



الجمهورية العربية السورية

جامعة البعث

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب

دراسة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في هندسة التحكم الآلي والحواسيب

بعنوان

دراسة ومعالجة آثار التأخير الزمني غير المحدد في نظم التحكم الشبكية

Study and Manipulate the Effects of Uncertain Time-Delay in Networked Control Systems

إعداد

م. محمد مرهف بشار النيفاوي

إشراف

المشرف المشارك

د.م. جمانا دياب

أستاذ مساعد في قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة البعث

المشرف العلمي

د.م. بسيم عمران

أستاذ مساعد في قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة البعث

1443هـ-2022م

تصريح

أصرح بأن هذا البحث:

"دراسة ومعالجة آثار التأخير الزمني غير المحدد في نظم التحكم الشبكية"
لم يسبق بأن قُبل بأي شهادة، ولا هو مقدم حالياً للحصول على شهادة أخرى.

المرشح

م.محمد مرهف النيفawi

Declaration

It is hereby declared that this work:

"Study and Manipulate the Effects of Uncertain Time-Delay in Networked Control Systems"

Has not already accepted for any other degree, nor submitted for any other degree.

Candidate

Mohammad Morhaf Alnifawi

شهادة

نشهد بأن العمل الموصوف في هذه الأطروحة هو نتيجة بحث قام به المرشح محمد مرهف النيفاوي تحت اشراف الدكتور بسيم عمران أستاذ مساعد في قسم هندسة التحكم الالي والحواسيب بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة البعث، وأي رجوع إلى بحث آخر في هذا الموضوع موثق في النص.

المشرف على الأطروحة

د.م. بسيم عمران

Certification

We hereby certified that the work described in this thesis is the result of the author's own investigation.

The candidate Mohammad Morhaf Alnifawi under the supervision of Dr. Eng. Bassem Omran Associate Professor in Automatic Control and Computers Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, AL Baath University, and any reference to other research works has been duly acknowledged in the text.

Supervisor of the dissertation
Dr.Eng. Bassem Omran

الفهرس

7	..... الفهرس
15	..... فهرس الأشكال
21	..... فهرس الجداول
25	..... ملخص البحث
29	..... مقدمة.
32	..... مشكلة البحث
33	..... أهمية البحث
34	..... هدف البحث
35	..... منهج البحث
36	..... تنظيم الأطروحة

الفصل الأول: الدراسات المرجعية

41	1.1 الدراسات المرجعية المتعلقة بتأثير التأخير الزمني على استقرار نظم التحكم الشبكية
41	1.1.1 الدراسة المرجعية الأولى
42	1.1.2 الدراسة المرجعية الثانية
43	1.1.3 الدراسة المرجعية الثالثة
44	1.1.4 الدراسة المرجعية الرابعة
45	1.1.5 الدراسة المرجعية الخامسة
46	1.1.6 الدراسة المرجعية السادسة
47	1.1.7 الدراسة المرجعية السابعة
48	1.1.8 الدراسة المرجعية الثامنة
50	1.2 الدراسات المرجعية المتعلقة بتأثير التأخير الزمني على استقرار نظم القدرة الكهربائية
50	1.2.1 الدراسة المرجعية الأولى
51	1.2.2 الدراسة المرجعية الثانية
53	1.2.3 الدراسة المرجعية الثالثة
54	1.3 الدراسات المرجعية المتعلقة بحساسية متنبئ سميث
56	1.4 الدراسات المرجعية المتعلقة بنظريات التحكم المصممة لمخمدات الاهتزاز

الفصل الثاني: تحليل استقرار نظم التحكم في فضاء الحالة

61	2.1 مقدمة:
----	------------------

2.2	مفهوم الاستقرار في فضاء الحالة	61
2.3	وضع التوازن لنظام	61
2.3.1	النظام الخطي المتجانس	62
2.3.2	النظام الخطي غير المتجانس	62
2.3.3	النظام غير الخطي	63
2.4	طريقة ليابونوف لدراسة الاستقرار	63
2.4.1	المفهوم العام للاستقرار حسب ليابونوف	63
2.4.2	الاستقرار حول وضع التوازن	64
2.5	مفاهيم رياضية متعلقة بدراسة الاستقرار	66
2.5.1	التابع وحيد القيمة موجب التحديد (Positive definition: Pd)	66
2.5.2	التابع وحيد القيمة شبه موجب التحديد (Positive Semi definition: Psd)	66
2.5.3	التابع وحيد القيمة سالب التحديد (Negative definition: Nd)	66
2.5.4	التابع وحيد القيمة شبه سالب التحديد (Negative Semi definition: Nsd)	66
2.5.5	التابع وحيد القيمة غير محدد	67
2.5.6	الصيغة التربيعية Quadratic Formula	67
2.5.7	الصيغة التربيعية العقدية Complex Quadratic Formula	67
2.6	طريقة ليابونوف الثانية - الطريقة المباشرة	68
2.6.1	نظرية ليابونوف في الاستقرار المتقارب	68
2.6.2	نظرية ليابونوف في الاستقرار المتقارب على نطاق واسع	69
2.6.3	نظرية ليابونوف في الاستقرار العام	69
2.6.4	نظرية ليابونوف في عدم الاستقرار	69
2.7	تحليل استقرار النظم الخطية الثابتة زمنياً حسب ليابونوف	70
2.7.1	تحليل استقرار النظم الخطية الثابتة زمنياً المتجانسة	70
2.7.2	تحليل استقرار النظم الخطية الثابتة زمنياً غير المتجانسة	72
2.8	تحليل استقرار النظم المتقطعة حسب ليابونوف	72
2.8.1	تحليل استقرار النظم المتقطعة الخطية الثابتة زمنياً	73
2.8.2	تحليل استقرار النظم المتقطعة الناتجة من تقطيع نظام مستمر	73
2.9	الاستقرار في الأنظمة ذات التأخيرات الزمنية	74

Time Delay Systems الفصل الثالث: أنظمة التأخير الزمني

3.1	مقدمة	79
-----	-------	----

79	3.2	نظم التأخير الزمنية
81	3.3	المعادلة المميزة للتأخير الزمني
83	3.4	خصائص أنظمة التأخير الزمني
83	3.5	نمذجة التأخير الزمني
83	3.5.1	الأنظمة المستمرة
85	3.5.2	الأنظمة المتقطعة
86	3.6	التحكم بأنظمة التأخير الزمني
87	3.6.1	المتحكمات ذات البارامترات المحسنة
88	3.6.2	المتحكمات ذات البنية المحسنة هيكلياً أو معوضات الزمن الميت
88	3.7	متنبئ سميت في أنظمة التحكم مع تأخير زمني
90	3.7.1	بنية متنبئ سميت مع اضطرابات خارجية
91	3.7.2	اقتراح طريقة جديدة من قبل الباحث لتحسين عملية الترشيح في متنبئ سميت لأنظمة التأخير الزمني
100	3.8	الاستنتاجات والمقترحات

الفصل الرابع: نظم التحكم الشبكية Networked Control Systems

103	4.1	مقدمة
105	4.2	تاريخ نظم التحكم الشبكية
106	4.3	بنية نظم التحكم الشبكية
106	4.3.1	البنية المركزية
108	4.3.2	البنية اللامركزية
108	4.3.3	البنية الموزعة
109	4.4	الهيكليّة العامة لنظم التحكم الشبكية
110	4.4.1	تكوين نظام التحكم الشبكي
110	4.4.2	هيكليّة نظم التحكم الشبكية
112	4.4.3	التطبيقات الحساسة وغير الحساسة للزمن (Time sensitive and time insensitive applications)
112	4.4.4	عناصر نظم التحكم الشبكية
114	4.5	اتجاهات البحث في نظم التحكم الشبكية
114	4.5.1	التحكم في الشبكة (Control of Network)
114	4.5.2	التحكم عبر الشبكة (Control over Network)
118	4.6	التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية
118	4.6.1	أسباب حدوث التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية

4.6.2	التأخير الزمني في المسار الامامي والعكسي لحلقة التحكم في NCS:	120
4.6.3	تأثير التأخير الزمني ضمن NCS	121

الفصل الخامس: نمذجة منظومة القدرة الكهربائية

5.1	أهمية دراسة الاستقرار في نظم الطاقة الكهربائية	125
5.2	أنواع الاهتزازات المؤثرة على استقرار نظام الطاقة الكهربائية	125
5.3	تعريف محمد الاهتزاز التقليدي	126
5.4	مبررات استخدام محمد الاهتزاز	126
5.5	النموذج الرياضي لألة متواقة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي عبر خط النقل	128
5.6	استنتاج تابع النقل لمحمد الاهتزاز PSS	130
5.7	تأثير التأخير الزمني على استقرار مجموعات التوليد	131
5.8	تأخيرات الاتصال في شبكات مجموعات التوليد	132
5.9	متطلبات الزمن الحرجة في شبكات مجموعات التوليد	133
5.10	عناصر التأخير الزمني في شبكات مجموعات التوليد	133
5.11	حسابات التأخير الزمني	134
5.12	مجال التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية	135
5.13	النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي	136
5.14	النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي تربط بين أنظمتها الفرعية علاقة خطية	137
5.15	دراسة تأثير التأخير الزمني على نظام قدرة مؤلف من ثلاث مجموعات توليد متزامنة	140
5.16	استنتاج معادلات الحالة لنظام الطاقة الكهربائية المؤلف من ثلاث مجموعات توليد	142
5.17	استنتاج معادلات الحالة لنظام الطاقة الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد	142

الفصل السادس: تصميم متحكم أمثل لمعالجة تأثير التأخير الزمني غير المحدد في نظم التحكم الشبكية المستمرة

6.1	مقدمة	149
6.2	طريقة ليبانوف لحل مسألة التحكم التريبيعي الأمثل	149
6.3	التحكم التريبيعي الأمثل في النظام الخطي المتجانس	150
6.4	التحكم التريبيعي الأمثل في النظام الخطي غير المتجانس	151
6.5	قابلية التحكم (Controllability) في النظم المستمرة	154
6.6	تصميم المتحكم التريبيعي الأمثل لنظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد	154
6.6.1	دراسة قابلية التحكم لنظام التحكم الشبكي المستمر	157
6.6.2	اختيار مصفوفات التوزين للمتحكم LQR	157
6.6.3	حساب قيمة المصفوفة P	163

163.....	6.6.4 حساب قيمة عناصر الربح الخلفي K
164.....	6.7 دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد
172.....	6.8 دراسة الاستجابة الزمنية لمتغير الحالة الأول
177.....	6.9 الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau Stability$ في نظم التحكم الشبكية المستمرة
187.....	6.10 تصميم المتحكم LQR لنظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من مجموعتي التوليد الأولى والثانية
192.....	6.11 دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر الجديد
196.....	6.12 حساب $\tau Stability$ غير المحدد لنظام التحكم الشبكي الجديد
202.....	6.13 استنتاجات

الفصل السابع: تصميم متحكم أمثل لمعالجة تأثير التأخير الزمني غير المحدد في نظم التحكم الشبكية المتقطعة

207.....	7.1 مقدمة
207.....	7.2 قابلية التحكم (Controllability) في النظم المتقطعة
208....	7.3 نمذجة نظام التحكم الشبكي المتقطع والمؤلف من n نظاماً فرعياً مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين انظمتيه الفرعية
210.....	7.4 تصميم المتحكم التريبيعي الأمثل لنظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد
214.....	7.5 دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد
214.....	7.6 الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau DStability$ في نظم التحكم الشبكية المتقطعة

الفصل الثامن: لنتائج والمقترحات

229.....	8.1 مقدمة
230.....	8.2 استنتاج مجموعة من الشروط والقواعد المعممة لضمان استقرار نظام التحكم الشبكي مع وجود التأخير الزمني بين أنظمتيه الفرعية
232.....	8.3 ملخص النتائج العامة للبحث
232.....	8.4 المقترحات والتوصيات
233.....	فهرس المصطلحات العلمية
239.....	المراجع العلمية

فهرس الأشكال

الصفحة	الشرح	الشكل
41	الاستجابة الزمنية للتحكم PID مع تأخير زمني ضمن الشبكة بمقدار 0.008 SEC	الشكل (1-1)
42	الاستجابة الزمنية لمحرك التيار المستمر في NCS مع تأخير زمني متغير	الشكل (2-1)
44	الاستجابة الزمنية لنظام التحكم المدروس مع تأخير زمني.	الشكل (3-1)
45	الاستجابة الزمنية لخرج النظام عند تأخير زمني متغير (0-10S)	الشكل (4-1)
50	استجابة النظام باستخدام المتحكم PAFZ-PI والمتحكم FZ-PI مع وجود التأخير الزمني	الشكل (5-1)
51	مقارنة الاستجابة الزمنية للتحكم LQR و UPFC	الشكل (6-1)
52	نظام الطاقة الكهربائية متعدد المناطق مؤلف من أربع أنظمة فرعية SISO	الشكل (7-1)
52	الاستجابة الزمنية للنظام المتحكم به مع متحكم LQR مطبق على كل نظام فرعي من أجل (a) 0.01 p.u. input and (b) 0.01 disturbance input	الشكل (8-1)
58	الاستجابات الديناميكية لسرعة دوران الآلة المتوافقة الموافقة لوحدات التحكم المختلفة الثلاث	الشكل (9-1)
65	تمثيل بياني لمفهوم الاستقرار حسب ليايونوف (a: الاستقرار بشكل عام، b: الاستقرار المتقارب، c: عدم الاستقرار)	الشكل (1-2)
81	مخطط التأخير الزمني	الشكل (1-3)
81	التأخير الزمني في الأنظمة ذات التغذية العكسية	الشكل (2-3)
82	التأخير الزمني في الدخل	الشكل (3-3)
82	التأخير الزمني في الحلقة المفتوحة	الشكل (4-3)
82	التأخير الزمني في الأنظمة ذات المراتب العليا	الشكل (5-3)
84	نظام تغذية خلفية مع تأخير في الحساس	الشكل (6-3)
84	نظام تغذية خلفية مع تأخير المشغل	الشكل (7-3)
85	نظام متقطع مع تأخير المشغل	الشكل (8-3)
86	نظام متقطع مع تأخير المشغل وتأخير الحساس	الشكل (9-3)
89	بنية متنبئ سميث	الشكل (10-3)
90	الشكل المكافئ للنظام والمتحكم بوجود حلقة المتنبئ سميث	الشكل (11-3)
90	بنية متنبئ سميث مع إشارة ضجيج خارجية	الشكل (12-3)
91	مخطط صندوقي للتحكم PI مع نموذج النظام	الشكل (13-3)
92	استجابة حلقة التحكم المغلقة عند عدم تطبيق تأخير زمني وإشارة ضجيج	الشكل (14-3-A)
92	استجابة حلقة التحكم المغلقة عند عدم تطبيق تأخير زمني وإضافة ضجيج	الشكل (14-3-B)
92	استجابة حلقة التحكم المغلقة عند تأخير زمني 93.3 Sec وعدم وجود ضجيج	الشكل (14-3-C)
92	استجابة حلقة التحكم المغلقة عند تأخير زمني 93.3 Sec وإضافة ضجيج	الشكل (14-3-D)
93	مخطط صندوقي للتحكم PI مع نموذج النظام بوجود متنبئ سميث	الشكل (15-3)
94	استجابة كل من المتحكم التناسبي التكاملي PI والمتنبئ سميث	الشكل (16-3)
95	استجابة الحلقة المفتوحة لكل من $P(s)$ و $P1(s)$ و $P2(s)$	الشكل (17-3)
95	استجابة كل من المتحكم PI والمتنبئ سميث مع النماذج المضطربة	الشكل (18-3)
96	مخطط بود للنظام مع النموذج المضطرب الأول $P1(s)$	الشكل (19-3)
97	مخطط بود للنظام مع النموذج $P1(s)$ و $F_{new}(s)$	الشكل (20-3)
98	استجابة كل من المتحكم PI والمتنبئ سميث وفق $P1(s)$ و $F_{new}(s)$	الشكل (21-3)

فهرس الأشكال

98	مخطط بود للنظام مع النموذج $F_{new}(s)$ و $P2(s)$	الشكل (22-3)
99	استجابة كل من المتحكم PI والمتنبئ $Smith$ وفق $P2(s)$ و $F_{new}(s)$	الشكل (23-3)
104	الشكل العام لمنظومة تحكم شبكية مؤلفة من n نظام و n متحكم	الشكل (1-4)
106	نسب مواضيع البحث في NCS وفقاً للأوراق المنشورة خلال ثلاث فترات زمنية	الشكل (2-4)
107	البنية المركزية	الشكل (3-4)
108	البنية اللامركزية	الشكل (4-4)
109	البنية الموزعة	الشكل (5-4)
109	نسب استخدام البنية المختلفة لنظم التحكم الشبكية	الشكل (6-4)
110	المخطط العام لنظام التحكم الشبكي	الشكل (7-4)
111	الهيكل المباشر لتصميم NCS	الشكل (8-4)
111	الهيكل الهرمي (غير المباشر) لتصميم NCS	الشكل (9-4)
114	الأبحاث المستخدمة في $NCSs$	الشكل (10-4)
116	وصف الهجمات على NCS	الشكل (11-4)
117	إحصائيات لحوادث الاختراق ضمن NCS	الشكل (12-4)
120	التأخير الزمني في حلقة التحكم المغلقة في NCS	الشكل (13-4)
120	انتشار التأخير الزمني ضمن NCS	الشكل (14-4)
121	نظام التحكم في الحلقة المغلقة مع وجود التأخيرات الزمنية	الشكل (15-4)
121	استجابة الخطوة الواحدة للنظام بسبب تأثير التأخيرات الزمنية	الشكل (16-4)
128	آلة متوافقة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي عبر خط النقل	الشكل (1-5)
128	المخطط الصندوقي للألة المتوافقة.	الشكل (2-5)
128	المخطط الصندوقي لنظام التهيج من النوع (IEEE TYPE-1)	الشكل (3-5)
130	نموذج محمد الاهتزاز (PSS)	الشكل (4-5)
133	خطوات معالجة الرسائل ضمن الجهاز الالكتروني الذكي IED	الشكل (5-5)
136	وحدة تحكم شبكية مستقلة مع أخذ التأخيرات الزمنية المتغيرة بالحسبان	الشكل (6-5)
139	البنية الموزعة ضمن نظم التحكم الشبكية المستمرة بشكلها العام	الشكل (7-5)
141	مجموعات التوليد الثلاث المتزامنة المشكلة لنظام الطاقة الكهربائية	الشكل (8-5)
142	ثلاث مجموعات توليد متزامنة يتم التحكم بها عن طريق شبكة تحكمية	الشكل (9-5)
156	نمذجة منظومة التحكم الشبكية المستمرة لمجموعات التوليد الثلاث	الشكل (1-6)
159	تأثير المصفوفة R على إشارة التحكم لتحديد قيمتها بدقة من خلال خمس حالات	الشكل (2-6)
165	الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة للنظام الشبكي في الحلقة المفتوحة ($\tau = 0s$)	الشكل (3-6)
169	الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة للنظام الشبكي في الحلقة المغلقة عند تأخيرات زمنية متغيرة	الشكل (4-6)
171	الاستجابة الزمنية لتغير إشارة التحكم لنظام التحكم الشبكي المستمر	الشكل (5-6)
173	علاقة $\tau_{Stability}$ مع عدد الحواف الصاعدة الموجبة	الشكل (6-6)
173	علاقة $\tau_{Stability}$ مع القيمة $Peak2Peak$	الشكل (7-6)
173	علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن الارتفاع الموجب	الشكل (8-6)
174	علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن الانحدار الموجب	الشكل (9-6)
174	علاقة $\tau_{Stability}$ مع عدد الحواف السالبة	الشكل (10-6)

174	علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن السقوط السالب	الشكل (11-6)
175	علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن الانحدار السالب	الشكل (12-6)
175	علاقة $\tau_{Stability}$ مع التجاوز الأعظمي الموجب	الشكل (13-6)
175	علاقة $\tau_{Stability}$ مع التجاوز الأعظمي السالب	الشكل (14-6)
176	علاقة $\tau_{Stability}$ مع الدور	الشكل (15-6)
176	علاقة $\tau_{Stability}$ مع التردد	الشكل (16-6)
181	الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau_{Stability}$	الشكل (17-6)
190	دارة MATLAB/SIMULINK لمجموعي التوليد الأولى والثانية	الشكل (18-6)
190	دارة MATLAB/SIMULINK لمجموعي التوليد الثانية والثالثة	الشكل (19-6)
193	الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند ($\tau = 0\ S$)	الشكل (20-6-a)
193	الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند ($\tau = 0.1\ S$)	الشكل (20-6-b)
194	الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند ($\tau = 0.2\ S$)	الشكل (20-6-c)
194	الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند ($\tau = 0.22\ S$)	الشكل (20-6-d)
203	علاقة $\tau_{Stability}$, $\tau_{Stability12}$, $\tau_{Stability23}$ مع تكرار الخوارزمية المقترحة	الشكل (21-6)
209	وحدة تحكم شبكية متقطعة مستقلة مع أخذ التأخيرات الزمنية بالحسبان	الشكل (1-7)
212	نمذجة منظومة التحكم الشبكية المتقطعة لمجموعات التوليد الثلاث	الشكل (2-7)
218	الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau_{DStability}$	الشكل (3-7)

فهرس الجداول

فهرس الجداول

الصفحة	الشرح	الجدول
94	القيم العملية لنظام كيميائي يعاني اضطرابات حدية حول نموذج	الجدول (1-3)
97	القيم المعبرة عن كيفية اختيار المرشح الجديد	الجدول (2-3)
99	النتائج التي تؤكد فعالية المرشح المقترح	الجدول (3-3)
158	قيم Peak2Peak لإشارات التحكم الثلاث عند قيم مختلفة للمصفوفة R	الجدول (1-6)
162	تأثير المصفوفة Q على أقطاب الحلقة المغلقة	الجدول (2-6)
163	قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P لثلاث مجموعات توليد شبكية	الجدول (3-6)
164	جذور المعادلة المميزة لنظام التحكم الشبكي المستمر باستخدام LQR	الجدول (4-6)
172	الاستجابة الزمنية لخرج مجموعة التوليد الأولى	الجدول (5-6)
184	نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث مجموعات توليد	الجدول (6-6)
185	$\tau_{Stability}$ مع الحدود المضافة من سلسلة تايلور لنظام التحكم الشبكي المستمر	الجدول (7-6)
186	قيم τ المفروضة على نظام التحكم مع توضع أقطاب الحلقة المغلقة في الفضاء S	الجدول (8-6)
191	قيم المحددات الخاصة بالمصفوفات موجبة التحديد P_{12}, P_{32}	الجدول (9-6)
192	جذور المعادلة المميزة لمجموعتي التوليد الأولى والثانية باستخدام LQR	الجدول (10-6)
195	مقارنة بارامترات الاستجابة الزمنية لكل من نظام التحكم الشبكي القديم والجديد	الجدول (11-6)
197	نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من مجموعتي التوليد الأولى والثانية	الجدول (12-6)
198	نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من مجموعتي التوليد الثانية والثالثة	الجدول (13-6)
199	قيمة $\tau_{Stability12}, \tau_{Stability23}$ مع الحدود المضافة من سلسلة تايلور لنظام التحكم الشبكي المستمر الجديد	الجدول (14-6)
200	توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المستمر الجديد لوحدي التوليد الأولى والثانية	الجدول (15-6)
201	توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المستمر الجديد لوحدي التوليد الثانية والثالثة.	الجدول (16-6)
213	قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P لثلاث مجموعات توليد شبكية متقطعة	الجدول (1-7)
214	جذور المعادلة المميزة لنظام التحكم الشبكي المتقطع	الجدول (2-7)
221	نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد	الجدول (3-7)
222	قيمة $\tau_{DStability}$ مع الحدود المضافة من سلسلة تايلور لنظام التحكم الشبكي المتقطع	الجدول (4-7)
223	توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المتقطع	الجدول (5-7)
224	القيمة المطلقة للقيم الذاتية لأقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المتقطع	الجدول (6-7)
229	قيمة $\tau_{Stability}$ وفق الخوارزمية المقترحة مقارنة بغيرها من الطرائق	الجدول (1-8)

الملخص

يؤثر التأخير الزمني سلباً على أداء أنظمة التحكم الشبكية ويؤدي إلى الاهتزاز وعدم الاستقرار في الاستجابة التحكمية، ويكون التأخير الزمني ثابتاً أو متغيراً أو غير محدد. تتعرض نظم القدرة الكهربائية الموزعة على مساحات جغرافية واسعة لمجموعة من العوامل تؤثر على استقرارها، ومن أهمها التأخيرات الزمنية بين أنظمتها الفرعية.

تعرض هذه الأطروحة طريقة جديدة تعتمد على مجموعة من الخطوات التحكمية للتقليل من الحساسية العالية التي يعاني منها متبني سميث في أنظمة التأخير الزمني، ناتجة عن عدم التطابق بين نموذج العملية ونموذج النظام، إذ يتم عادة تقليل الحساسية باستخدام مرشح ضمن بنية متبني سميث. كما تعتمد على نموذجين مضطربين للنظام يمثلان مجاًلاً من الانحراف عن نموذج العملية، وتصميم مرشح معدل وفق دراسة تحكمية متكاملة. بينت المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج MATLAB تحسن الحساسية بشكل ملحوظ، والتأكد من فعالية المرشح المقترح بمقارنة المتحكم التناسبي التكاملي PI مع متبني سميث مفلتر ومتحكم PI مع متبني سميث باستخدام المرشح المقترح.

بالإضافة إلى تطبيق أسلوب نمذجة مرن لنظام التحكم الشبكي المستمر والمتقطع المؤلف من n نظاماً فرعي في فضاء الحالة. إذ تربط بين أنظمتها الفرعية علاقة خطية مع وجود التأخيرات الزمنية غير المحددة بين عناصر الشبكة التحكمية، بالإضافة إلى تصميم متحكم تربيعي خطي يهدف إلى الحد من تأثير التأخير الزمني السليبي على استقرار نظام القدرة الكهربائية. وطبقت الدراسة على نظام شبكي للقدرة الكهربائية مؤلف من ثلاث مجموعات توليد موزعة على ثلاث مناطق جغرافية منفصلة. بينت المحاكاة الحاسوبية باستخدام MATLAB تحسناً ملحوظاً في استقرار النظام الشبكي المستمر والمتقطع من خلال سرعة إخماد الاهتزازات في النظام، وإمكانية استقرار النظام عند حدود معينة للتأخير الزمني.

كما تم التوصل لخوارزمية مقترحة لتخمين قيمة التأخير الزمني غير المحدد التي تبقى على النظام الشبكي المستمر أو المتقطع بحالة استقرار. والتأكد من فعالية ودقة الخوارزمية من خلال تطبيقها على نظام القدرة الكهربائية المستمر والمتقطع، بالإضافة لمقارنتها مع غيرها من الخوارزميات. إذ أنها تمثل القيمة الأكبر، وهو الهدف المطلوب من جعل مجال الاستقرار للنظام التحكمي الذي يعاني من تأخير زمني غير محدد أكبر ما يمكن. والتوصل لقيمة دقيقة (9 خانات بعد الفاصلة)، مقارنة بغيرها من الخوارزميات (3 أو 4 خانات كحد أقصى).

الكلمات المفتاحية: معوض سميث المفلتر، نظم التحكم الشبكية المستمرة، نظم التحكم الشبكية المنقطعة، التأخير الزمني غير المحدد، نظم القدرة الكهربائية، المتحكم التربيعي الخطي، فضاء الحالة، التحكم الاشرافي.

Abstract

Time delay negatively affects the performance of the Networked Control Systems and leads to vibration and instability in the control response, and time delay may be Constant, Variable, or even uncertain. Electrical power systems distributed over wide geographical areas are exposed to a set of factors that affect their stability. The most important factors are the time delays between their subsystems.

This thesis presents new method that relies on series of control steps to reduce high sensitivity of Smith Predictor in Time Delay Systems resulting from mismatches between process model and plant model. Usually the sensitivity is reduced using a filter built in the structure of Smith Predictor. The Paper based on two perturbed plant models representative of the range of uncertainty in the process model. A modified filter was designed based on an integrated control study. Computer simulation using MATLAB showed improvements in sensitivity significantly. The efficacy of the proposed filter was confirmed by comparing the integral proportional control with filtered Smith Predictor and PI controller with Smith Predictor using the proposed filter.

In this thesis, a discrete and Continuous networked control system consisting of n subsystems is modeled in state space. The subsystems of the model have a linear relationship with time delays between the control network elements. In addition, a linear quadratic regulator (LQR) controller was designed. The aim of the LQR controller is to reduce the negative impact of the time delay on the stability of the electrical power system. The study was applied to a networked electrical power system consisting of three-generation stations distributed in three separate geographical areas. Computer simulations using MATLAB showed a remarkable improvement in the stability of the discrete networked system through the speed of damping the vibrations in the system, and the system ability to be stable at certain limits of the time delay.

In addition, a proposed algorithm has been reached to estimate the uncertain time delay that keeps the Continuous or Discrete Networked Control Systems in a stable state. Moreover, to ensure the effectiveness and accuracy of the algorithm by applying it to the Continuous or Discrete Electrical Power System, in addition to compare it with other algorithms. It represents the largest value, which is the desired goal of making the stability range of the control system that suffers from an uncertain time delay as large as possible. In addition, reaching an accurate value (9 digits after the comma), compared to other algorithms (3 or 4 digits maximum).

Keywords: Filtered Smith Predictor (FSP), Continuous Networked Control Systems (CNCS), Discrete Networked Control Systems (DNCS), Uncertain Time Delay (UTDS), Electrical Power Systems (EPS), Linear Quadratic Regulator (LQR), State Space (SS), Supervisory Control (SC).

مقدمة

نظام التحكم الشبكي (Networked Control System: NCS) هو نظام تحكم ذكي يتكون من أجهزة ذكية موزعة فيزيائياً على مناطق جغرافية واسعة النطاق يمكنها التحسس بالبيئة التي تعمل بها، والتواصل مع بعضها البعض من خلال شبكة اتصال لتحقيق هدف مشترك [1]. أو يمكن تعريف NCS على أنه نوع خاص من أنظمة التحكم الموزعة، إذ تكون حلقة التحكم مغلقة بشكل من أشكال شبكة الاتصال [2].

في نظم التحكم التقليدية المتصلة نقطة بنقطة، يتم توصيل كل مكون من مكونات النظام (الحساس والمشغل والمتحكم) من خلال سلك مخصص [3]. ويعتبر الاتصال السلكي غير موثوق وغير اقتصادي في حالة النظام متعدد المداخل والمخارج (Multi Input Multi Output: MIMO) المؤلف من مجموعة من الحساسات والمشغلات نظراً للزيادة الملحوظة في تكلفة الكابلات والصيانة [4]. بالإضافة إلى أن هذا النوع من النظام ليس مرناً من وجهة نظر التوسع لأنه يتطلب إعادة توصيل جميع مكونات النظام [5]. كما أن هناك بعض الأنظمة مثل نظام تتبع الصواريخ أو منظومة المركبات الفضائية أو محطات الطاقة النووية الخطرة [6]، لا يمكن استخدامها استخدام بنية نقطة لنقطة. إذ في مثل هذه الحالات، تكون تقنية التحكم عن بعد هي الحل الوحيد.

نظام الأتمتة الصناعية هو نظام هرمي، إذ مستوى القاعدة هو المستوى الحقلي والمستوى الأعلى هو مستوى المعلومات. في المستوى الحقلي، توجد أنواع مختلفة من الحساسات والمشغلات. أما في مستوى المعلومات المعروف بمستوى الإدارة يتم اتخاذ جميع القرارات المناسبة لتشغيل النظام. بينما المستوى المتوسط هو مستوى التحكم. إذ يمكن تقسيمه إلى ثلاثة مستويات فرعية، وهي: المستوى الفرعي للعمليات والمستوى الفرعي للخلية والمستوى الفرعي للمنطقة. تتواصل جميع المستويات مع بعضها البعض باستخدام وسط ناقل [7].

يتم استخدام المتحكم الرقمي في الصناعة لأن تكلفة وحدة التحكم الرقمية أقل من نظيرتها التناظرية وأكثر مرونة. بالإضافة إلى أن الأجهزة الرقمية غير حساسة للخطأ الناتج عن التشويش من نظيرتها التناظرية، كما أنه يمكن للمتحكم الرقمي تنفيذ خوارزمية تحكم أكثر تعقيداً، ودقة النظام الرقمي أكثر من نظيره التناظري [8]. جميع تلك الظواهر تبرر الحاجة إلى استخدام وسيط الاتصال الرقمي لتبادل البيانات بين المكونات المختلفة لنظام التحكم لتقليل التكلفة وسهولة تنفيذ خوارزمية التحكم. وهذا من شأنه أن يطور نظام التحكم الشبكي (NCS) الذي أصبح شائع الاستخدام في نظم التحكم في العمليات الموزعة [9,10,11].

هناك العديد من التطبيقات لنظم التحكم الشبكية مثل أتمتة المصانع والطائرات والروبوتات والسيارات والتطبيقات العسكرية [12,13]. تختلف تقنية التحكم المستخدمة لهذا النوع من الأنظمة عن نظرية التحكم التقليدية. في التحكم التقليدية، يُفترض أن هناك تزامناً مناسباً بين المكونات المختلفة للنظام، ولا يوجد تأخير زمني في عمليات

التحسس والتشغيل [14]. بينما تعاني NCS من بعض الظواهر غير المرغوب فيها مثل التأخير الزمني ضياع الرزم أو وصولها وفق ترتيب خاطئ، jitter التي تؤدي بدورها إلى تدهور أداء النظام وأحياناً إلى عدم الاستقرار [15,16,17,18]. للحفاظ على الاستقرار، يجب تقليل ربح وحدة التحكم [15,16].

اعتماداً على بروتوكول الشبكة، قد يكون هذا التأخير حتمياً أو قد يكون عشوائياً في طبيعته. في حالة بروتوكولات الشبكة المحلية (Local Area Network: LAN) مثل SAE token bus، PROFIBUS، IEEE 802.5، SAE token Ring، MIL-STAD-1553B، فإن هذا التأخير هو طبيعة حتمية. بينما في الشبكة المحلية ذات الوصول العشوائي مثل CAN و Ethernet تؤدي إلى تأخير زمني عشوائي [19]. والسبب وراء ذلك هو أن الوسط الناقل في الزمن الحقيقي له نطاق ترددي محدود، بسبب البيانات المرسله عبر وسيط الاتصال الذي يعاني من تأخير زمني بالإضافة إلى إمكانية وجود تصادم للبيانات. وأحياناً يتم ضياع للبيانات بسبب هذا التصادم.

الأسباب الرئيسة للتأخيرات الزمنية هي: التأخير الحسابي الذي يتطلبه الجهاز الرقمي وزمن الوصول إلى الشبكة وزمن الإرسال. بينما الأسباب الرئيسة وراء ضياع الرزم هي: الازدحام الشبكي وفشل إرسال الرزم والتأخير الزمني الكبير [20].

على الرغم من أن NCS لها بعض العيوب، إلا أنها تتمتع بالعديد من المزايا التقنية والاقتصادية مثل التكلفة المنخفضة وسهولة الصيانة والموثوقية والتصميم المرن للنظام والتنفيذ البسيط والسريع وسهولة تشخيص النظام وصيانتها [5]. يقلل NCS من تعقيد النظام عندما يكون هناك عدد كبير من الحساسات والمشغلات من خلال التخلص من الأسلاك الإضافية. إذ أنه يمكن تركيبها بأقل تكلفة [21]. إذاً، فإن NCS لديها بعض المشكلات التقنية والكثير من المزايا التقنية والاقتصادية. لذلك، إذا تم تعويض المشكلات التي تسببها الشبكة، عندها فإن NCS ستخدم المجتمع بشكل كبير.

يمكن إزالة المشكلات الناجمة عن الشبكة بطريقتين: الأولى من خلال تطوير بروتوكول شبكة فعال أو طريقة جدولة يتم من خلالها استخدام النطاق الترددي للشبكة بطريقة تقلل من آثار المشكلات التي تحدثها الشبكة أو يتم إزالتها تماماً. وهذا ما يسمى بالتحكم في الشبكة (Control of Network). في هذه الطريقة، يتم التحكم في التوجيه (Routing Control) والتحكم في الازدحام (Congestion Control) واتصال البيانات الفعال (Efficient Data Communication) وبروتوكول الشبكات. أما الثانية من خلال تطوير خوارزميات تحكم تعوض المشكلة التي تسببها الشبكة. وهذا ما يسمى التحكم عبر الشبكة (Control over Network) [22,23].

من المعروف أن حالات عدم اليقين بما في ذلك تأرجح قيم البارامترات والتأخير الزمني والاضطرابات الخارجية عادة ما تكون حتمية في أنظمة التحكم العملية بسبب نقل البيانات وتحويل الإشارة وعدم دقة النمذجة والتقريب الخطي والمدخلات غير المعروفة وأخطاء القياس. ويمكن أن تكون في كثير من الأحيان مصدراً لعدم الاستقرار أو الاهتزازات حول نقطة الاستقرار وأداء التحكم الضعيف في أنظمة التحكم، لذلك يجب أن تؤخذ التأخيرات الزمنية والاضطرابات التي يعاني منها نظام التحكم بالحسبان عند تصميم أي مخطط تحكم للأنظمة الديناميكية لكونها تؤثر على أداء حلقة التحكم المغلقة [24,25,26].

يعتبر استقرار أنظمة التأخير الزمني (Time Delay Systems: TDS) قضية أساسية في نظرية التحكم، وكانت هناك جهوداً كبيرة مكرسة لمشكلة تحليل استقرار النظم التي تعاني من تأخير زمني [26,27]. في البداية، استخدمت طرائق مجال التردد (Frequency-Domain) القائمة على توزيع جذور معادلتها المميزة (Distribution of the Characteristic Equation Roots) أو حلول معادلة تابع مصفوفة ليانوف المعقدة (Solutions of a Complex Lyapunov matrix function)، لتحديد استقرار أنظمة التأخير الزمني [28,29]. ومع ذلك، فإن عيب هذه الطريقة هو أنها مناسبة فقط للأنظمة ذات التأخيرات الزمنية الثابتة، لأن حلول الأنظمة ذات التأخيرات الزمنية المتغيرة بمرور الوقت أكثر تعقيداً. لذلك، فإن تطبيق طرائق مجال التردد لتحليل استقرار (TDS) له قيود شديدة [30].

بعد ذلك، قُدمت طرائق المجال الزمني (Time-Domain)، إذ استُعرضت الطرائق الأكثر شيوعاً لتحليل استقرار (TDS) وهي (Lyapunov Krasovskii Function: LKF) و Razumikhin Function. أنشئت هذه الطرائق في الخمسينيات من القرن الماضي من قبل عالمي الرياضيات الروسيين Krasovskii و Razumikhin على التوالي. الفكرة الرئيسة لهذه الطرائق هي بناء مجموعة من توابع LKFs المناسبة أو تابع Lyapunov المناسب للحصول على معايير استقرار TDS. في ذلك الوقت، كانت هذه الفكرة مهمة جداً من الناحية النظرية، ومع ذلك، كان من المستحيل استنباط حل عام. ثم حُلّت هذه المشكلة عندما بدأ استخدام معادلات Riccati، ومراجحات المصفوفات الخطية (LMI: Linear Matrix Inequalities) [31]. وبالتالي، استخدمت طرائق المجال الزمني على نطاق واسع لمعالجة مشكلة تحليل استقرار TDS.

نظراً للأهمية الحاسمة في كل من المنظورين النظري والعملي خلال العقود الماضية، كان هناك جهد كبير مكرس لمشكلة استقرار TDS. لذلك، كان الشاغل الرئيس لتحليل الاستقرار في TDS، لاسيما بالنسبة لحالة التأخير المتغير بمرور الزمن، هو كيفية توسيع منطقة الاستقرار الممكنة، أو كيفية زيادة الحد الأقصى المسموح

به للتأخير الزمني لكي يبقى استقرار النظام مضموناً، أو كيفية تطوير ظروف الاستقرار باستخدام متغيرات قرار قليلة، مع الحفاظ على نفس التأخير الزمني الأعظمي المسموح به.

يمكن تقسيم نظم التحكم الشبكية التي تعاني من تأخير زمني إلى نوعين، أحدهما يعتمد على التأخير (Delay Dependent: DD) والآخر مستقل عن التأخير (Delay Independent: DI). في النظام المعتمد على التأخير الزمني يكون النظام مستقراً بشكل متقارب على نطاق واسع (Asymptotically Stable: AS) من أجل $\tau < \tau_{Stability}$ وعلى حافة الاستقرار أو مستقر استقراراً حرجياً (Marginally Stable: MS) من أجل $\tau = \tau_{Stability}$ وغير مستقر (unstable) من أجل $\tau > \tau_{Stability}$. بينما في نظام التأخير المستقل لا يؤثر التأخير الزمني على الاستقرار إذ يعتبر النظام مستقر بشكل متقارب على نطاق واسع من أجل أي قيمة موجبة للتأخير الزمني.

من بين الطرائق تحليل الاستقرار لـ TDS، اعتبر نهج (Lyapunov–Krasovskii) أحد أكثر الطرائق شيوعاً للحصول على معايير الاستقرار المعتمدة على التأخير لنظم التحكم التي تعاني من تأخير زمني. المنهج الرئيس لهذه الطريقة هو أولاً اختيار دالة موجبة التحديد، ثم حساب مشتقتها الزمنية بالنسبة لأنظمة التأخير الزمنية المستمرة أو الفرق بالنسبة للأنظمة المتقطعة على طول حلول النظام.

مشكلة البحث

يمكن تلخيص مشكلة البحث في النقاط الآتية:

1. من أهم مشكلات متنبئ سميث حساسيته العالية جداً لانحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية، إذ من الصعب جداً في الحياة العملية تطابق بارامترات النموذج للنظام بالضبط مع النموذج الأصغري. وبالتالي يصبح النظام التحكمي الذي يستخدم متنبئ سميث لحذف التأخير الزمني من المعادلة المميزة للحلقة المغلقة، معرض بشكل كبير للاضطرابات ويفقد متانته في ملاحقة الإشارة المرجعية. بالإضافة إلى مشكلة أخرى هي إمكانية وجود خطأ في نموذج النظام المراد دراسته، ما يعقد من عملية التصميم. لذلك لا يعتبر النموذج الأصغري إلا تقريباً لنموذج العملية التحكمية الحقيقية، وبالتالي فإن متنبئ سميث يتأثر بشكل كبير بدقة النموذج الرياضي.
2. يعاني العديد من الباحثين ضمن نظم التحكم وبالأخص الشبكية منها من دراسة تأثير بعض المشكلات التي تعاني منها نظم التحكم في الزمن الحقيقي ومن أهمها التأخير الزمني. وبالأخص إدخال تأثير التأخير الزمني على المعادلات التفاضلية التي تصف نظام التحكم الشبكي المستمر والمتقطع في فضاء الحالة، وعرضها بأسلوب مرن يمكن الباحث من تغير قيمة التأخير الزمني الثابت أو وضع مجال متغير للتأخير الزمني المتغير

- أو تطبيق توابع تعطي قيم عشوائية للتأخير الزمني العشوائي. بهدف دراسة تأثير التأخير الزمني على استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر أو المتقطع.
3. تعقيد أساليب النمذجة الرياضية لتوصيف نظام التحكم الشبكي المستمر أو المتقطع مع إدخال تأثير التأخير الزمني بين أنظمتها الفرعية، بحيث يصبح من الصعب تمثيله بأحد برامج المحاكاة الحاسوبية. وخاصة عندما يكون النظام الشبكي متعدد المداخل والمخارج وأبعاد مصفوفات الحالة الممثلة له ذات مراتب عالية.
4. صعوبة التحكم بنظم التحكم الشبكية التي تعاني من تأخير زمني وخاصة ذات التغذية العكسية، وذلك لصعوبة استنتاج تابع النقل لنظام التحكم الشبكي مع التأخير الزمني. إذ أن كل بحث معني بنوع المتحكم المستخدم للتخلص من تأثير التأخير الزمني.
5. عدم توفر القواعد والشروط التي من الممكن أن تعمم باستخدام أحد المتحكمات الحديثة تمكن الباحثين من دراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين الأنظمة الفرعية على استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر أو المتقطع.
6. يمكن للباحث من خلال التجريب باستخدام برامج المحاكاة الحاسوبية إيجاد مجال شبه تقريبي لقيمة التأخير الزمني $\tau_{Stability}$ التي تبقى على النظام الشبكي المستمر أو المتقطع بحالة استقرار. ولكن من الصعوبة إيجاد القيمة الدقيقة جداً، والتي من الممكن أن تختلف من نظام لآخر. لذلك، يركز الكثير من الباحثين على إيجاد طرائق حسابية لحساب $\tau_{Stability}$.
7. يركز الكثير من الباحثين على حساب $\tau_{Stability}$ بطرائق رياضية معقدة للغاية، تصلح للتطبيق على نظم تحكم بسيطة من مراتب قليلة. إذا أن عدداً كبيراً من الباحثين يختتم بحثه المقترح بمثال بسيط لنظام تحكم بمتغيري حالة غير شبكي مؤلف من دخل وحيد وخرج وحيد. وتحتاج هذه الطرائق إلى مختصين في البرمجة الحاسوبية ومعتنقين لعلوم الرياضيات لنقلها إلى برنامج محاكاة حاسوبي لاختبار كفاءتها.

أهمية البحث

ركز الباحثون في السنوات القليلة الماضية على دراسة العديد من القضايا ضمن نظم التحكم الشبكية ومن أهمها نمذجة استقرارها وتحليلها مع وجود التأخير الزمني وضياح الرزم أو وصولها وفق ترتيب خاطئ بين أنظمتها الفرعية. وبما أن التأخير الزمني يعتبر مسؤولاً بشكل رئيس عن زيادة اضطراب حلقة التحكم، ووفقاً لهذا التأخير فإن أنظمة التحكم تميل إلى الاهتزاز ويحدث تشوه وعدم استقرار في الاستجابة التحكمية. لذلك، تعتبر مشكلة التأخير الزمني من المشكلات الأكثر شيوعاً في نظم التحكم في الزمن الحقيقي، ومن أهمها نظم التحكم الشبكية، إذ تبدي هذه الأنظمة تأخيراً زمنياً في سلوكها الديناميكي، ما يجعل التحكم بالأنظمة التي تعاني من تأخير زمني وخاصة ذات التغذية العكسية أكثر صعوبة من غيرها. بالإضافة إلى أن التأخير الزمني الطويل جداً

يمكن أن يكون كارثياً لأنه قد يؤدي إلى الخلط بين النظام مع تأخير والنظام دون تأخير، وهذا يحدث عندما لا يمكن ملاحظة تأثير هذا التأخير في الوقت المناسب.

انطلاقاً مما سبق، تتجلى أهمية البحث من خلال دراسة آثار التأخير الزمني غير المحدد على استقرار نظم التحكم الشبكية بنوعيتها المستمرة والمنقطعة ومعالجته. ومن أهمها تأثير استقرار التأخير الزمني غير المحدد على نظم القدرة الكهربائية واسعة النطاق. إذ تتعرض هذه النظم لمجموعة من العوامل تساهم في تغير استقرار النظام ككل، ومن أهمها التأخير الزمني غير المحدد بين مجموعات التوليد. إذ أنه عندما يتغير الحمل في منطقة محددة، فإن المناطق المتصلة ضمن نظام التحكم الشبكي ستتأثر بتغير الحمل في إحداها، وبالتالي على المتحكمات المحلية المسؤولة عن كل منطقة أن تتبادل معلوماتها مع بعضها البعض ضمن الشبكة بهدف إعادة الاستقرار للمنظومة الشبكية بأكملها. إضافة إلى أن العديد من الأوراق المنشورة تبحث في تحديد قيمة التأخير الزمني التي تبقى على النظام الشبكي المستمر أو المتقطع بحالة استقرار، بهدف تحديد مجال الاستقرار للنظام باستخدام خوارزميات التحكم الحديث.

هدف البحث

يهدف البحث إلى دراسة آثار التأخير الزمني غير المحدد على استقرار نظم التحكم الشبكية المستمرة والمنقطعة ومعالجته. ويمكن تحديد أهداف البحث في النقاط الآتية:

1. اقتراح طريقة جديدة لتحسين عملية الترشيح في متنبئ سميث لأنظمة التأخير الزمني، وذلك بهدف التخلص من الحساسية العالية التي يعاني منها متنبئ سميث في عدم التطابق بين النموذج الأصغري للعملية (بارامترات العملية) ونموذج النظام، باستخدام مرشح معدل مبني على دراسة تحكمية متكاملة.
2. التأكد من فعالية المرشح المقترح بمقارنة المتحكم التناسبي التكاملي (Proportional Integral: PI) مع متنبئ سميث مفلتر ومتحكم PI مع متنبئ سميث باستخدام المرشح المقترح.
3. التوصل إلى معادلات تفاضلية عامة في فضاء الحالة تصف نظام التحكم الشبكي المستمر أو المتقطع والمؤلف من n نظاماً فرعياً، إذ تربط بين أنظمتها الفرعية علاقة خطية. يمكن تطبيق هذه المعادلات التفاضلية على أي نظام تحكم شبكي مستمر أو متقطع متعدد المداخل والمخارج بغض النظر عن أبعاد مصفوفات الحالة التي تصفه، مع إمكانية إضافة الضجيج الخارجي الذي يمكن أن يطبق عليه.
4. اجراء التغير في قيمة التأخير الزمني غير المحدد ضمن برامج المحاكاة الحاسوبية لأي نظام تحكم شبكي مستمر أو متقطع يعاني من تأخير زمني بين أنظمتها الفرعية من خلال أسلوب نمذجة مرن، وذلك بهدف دراسة تأثير التأخير الزمني على استقرار نظام التحكم الشبكي.

5. خوارزمية مقترحة لتخمين قيمة التأخير الزمني $\tau_{Stability}$ التي تبقى على النظام الشبكي المستمر أو المتقطع بحالة استقرار. وهو المجال الذي يسمح للنظام مع وجود المتحكم بأن يكون مستقراً وعند تجاوزه يخرج النظام بالكامل عن الاستقرار. بهدف ضمان استقرار النظام عند حدود معينة للتأخير الزمني.
6. التأكد من فعالية الخوارزمية المقترحة ودقتها من أجل أي نظام تحكم شبكي مستمر أو متقطع متعدد المداخل والمخارج وأبعاد مصفوفات الحالة الممثلة له ذات مراتب عالية. بالإضافة إلى تطبيق الخوارزمية المقترحة على نظام القدرة الكهربائية المؤلف من ثلاث مجموعات توليد.
7. التوصل إلى مجموعة من الشروط والقواعد المعممة يمكن أن تطبق على أي نظام تحكم شبكي مستمر أو متقطع متعدد المداخل والمخارج بغض النظر عن أبعاد مصفوفات الحالة التي تصفه، بالإضافة إلى الضجيج الذي يمكن أن يطبق عليه بهدف التقليل من تأثير التأخير الزمني وضمان استقرار نظام التحكم الشبكي باستخدام المتحكم التربيعي الخطي (Linear Quadratic Controller: LQR).
8. تطبيق القواعد والشروط المعممة على نظام التحكم الشبكي المستمر والمتقطع لثلاث مجموعات توليد متزامنة متواجدة في ثلاث مناطق جغرافية منفصلة مع أخذ التأخيرات الزمنية غير المحددة فيما بينها بالحسبان. بالإضافة إلى دراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرارها باستخدام متحكم LQR. إذ تتبادل مجموعات التوليد المعلومات فيما بينها (متغيرات الحالة لكل مجموعة توليد) عبر شبكة تحكمية.
9. تطبيق القواعد والشروط المعممة على نظام التحكم الشبكي المستمر والمتقطع لمجموعتي التوليد الأولى مع الثانية فقط، وكذلك الأمر بالنسبة لمجموعتي التوليد الثانية مع الثالثة فقط. ودراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار النظام الشبكي الجديد، بالإضافة إلى تخمين $\tau_{Stability}$ بغية ملاحظة تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين النظام الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد والنظام المؤلف من مجموعتين، والاختلاف في قيمة $\tau_{Stability}$ بين النظامين.
10. مقارنة الخوارزمية المقترحة لتخمين قيمة التأخير الزمني $\tau_{Stability}$ التي تبقى على النظام الشبكي المستمر أو المتقطع بحالة استقرار مع غيرها من الخوارزميات المقترحة في الأوراق البحثية، واستنتاج إيجابيات وسلبيات كل منها على مجموعة من الأنظمة التحكمية المختلفة.

منهج البحث

اعتمد منهج البحث على إجراء دراسة تحليلية لآثار التأخير الزمني غير المحدد على استقرار نظم التحكم الشبكية المستمرة والمتقطعة باستخدام MATLAB. إذ تم في البداية اقتراح طريقة جديدة لتحسين الحساسية العالية التي يعاني منها متبني سميث ضمن أنظمة التأخير الزمني في عدم التطابق بين النموذج الأصغري للعملية ونموذج النظام، باستخدام مرشح معدل مبني على دراسة تحكمية متكاملة. بعد ذلك، قُدم أسلوب نمذجة

مرن يمكن الباحث من نمذجة أي نظام تحكم شبكي مستمر أو متقطع مع وجود التأخير الزمني غير المحدد بين أنظمتها الفرعية، إضافة إلى إمكانية تطبيق ضجيج على إحداها. مهما كان نوع النظام المراد التحكم به ودرجته وعدد مداخله ومخارجه.

اعتمد أسلوب النمذجة المستنتج في دراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار منظومة قدرة كهربائية واسعة النطاق مؤلفة من ثلاث مجموعات توليد باستخدام المتحكم LQR. ومن ثم اقترح خوارزمية جديدة لتخمين قيمة التأخير الزمني غير المحدد $\tau_{Stability}$ التي تبقى على النظام الشبكي بنوعيه المستمر والمتقطع بحالة استقرار لضمان استقرار المنظومة ضمن مجال محدد للتأخير الزمني. حققت الخوارزمية قيمة التأخير الزمني غير المحدد لنظام القدرة الكهربائية بدقة مقدارها 9 خانوات بعد الفاصلة. ومن ثم قورنت $\tau_{Stability}$ مع نظام قدرة كهربائية مؤلف من مجموعتي توليد للتأكد من فعاليتها، ولوحظ بأن $\tau_{Stability}$ للنظام الجديد أكبر منها للنظام القديم، أي سيكون لدى النظام الجديد مجال أكبر من التأخير الزمني غير المحدد ليبقى مستقرًا على نطاق واسع.

تنظيم الأطروحة: نُظمت الأطروحة في ثمانية فصول وفق الآتي:

يناقش الفصل الأول أهم الدراسات والأوراق البحثية والطرائق السابقة التي أجريت لتحسين استقرار نظم التحكم الشبكية بوجود التأخير الزمني بأنواعه المختلفة بين أنظمتها الفرعية.

يقدم الفصل الثاني شرحاً موجزاً عن مفهوم الاستقرار في فضاء الحالة، وتحديد وضع التوازن للنظام الخطي المتجانس وغير المتجانس، ومن ثم شرح عام عن نظرية ليبانوف لدراسة الاستقرار بأنواعه (المتقارب، المتقارب على نطاق واسع والاستقرار العام). بعد ذلك يتم استعراض المفاهيم الرياضية الأساسية المتعلقة بدراسة الاستقرار في فضاء الحالة. وينتهي الفصل بشرح الاستقرار في الأنظمة ذات التأخيرات الزمنية.

يطرح الفصل الثالث مقدمة عامة عن أنظمة التأخير الزمني وخصائصها وتأثيرها على استقرار نظم التحكم بشكل عام. ومن ثم نمذجة التأخير الزمني في الأنظمة المستمرة والمتقطعة. بعد ذلك، ننقل لدراسة التحكم بأنظمة التأخير الزمني وتقديم شرح مفصل مع دراسة مرجعية عن متنبئ سميث في أنظمة التحكم مع تأخير زمني. وينتهي الفصل باقتراح طريقة جديدة لتحسين عملية الترشيح في متنبئ سميث لأنظمة التأخير الزمني.

يدرس الفصل الرابع مقدمة عامة عن نظم التحكم الشبكية مع المزايا التي تتمتع بها والقيود المفروضة عليها. ومن ثم سرد لتاريخ NCS والبنى الأساسية لها ومحاسن ومساوئ كل منها. بعد ذلك، يقدم الفصل شرحاً مفصلاً عن الهيكلية العامة لنظم التحكم الشبكية ومكوناتها. إضافة إلى عرض لاتجاهات البحث ضمن NCS. وينتهي الفصل بدراسة لأنواع التأخير الزمني في NCS وأسباب حدوثه وتأثيره على استقرارها.

يتضمن الفصل الخامس دراسة مفصلة عن أهمية الاستقرار في نظم الطاقة الكهربائية، ومن ثم استنتاج النموذج الرياضي لألة متواقة موصولة إلى قضيب تجميع لانهاى عبر خط النقل، مع تقديم دراسة مرجعية عن أنواع مختلفة من مخمدات الاهتزاز والمقارنة فيما بينها وبين مخمد الاهتزاز التقليدي. بعد ذلك، استعراض الفصل تأثير التأخير الزمني على استقرار مجموعات التوليد، وأنواع وأسباب وعناصر تأخيرات الاتصال في شبكات مجموعات التوليد. وينتهي الفصل بالتوصل إلى أسلوب نمذجة مرن مؤلف من مجموعة من المعادلات التفاضلية العامة في فضاء الحالة تمكن الباحث من دراسة استقرار أي نظام تحكم شبكي مستمر مؤلف من n نظاماً فرعياً. ومن ثم تطبيق أسلوب النمذجة المستنتج على نظام التحكم الشبكي المستمر لثلاث مجموعات توليد متواجدة في ثلاث مناطق جغرافية منفصلة مع وجود التأخيرات الزمنية غير المحددة فيما بينها.

يناقش الفصل السادس مقدمة عن التحكم الأمثل، وطريقة ليبانوف لحل مسألة التحكم التربيعي الأمثل. ومن ثم خطوات تصميم المتحكم التربيعي الأمثل لنظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد. بعد ذلك، يطرح البحث دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد. ومن ثم يعرض علاقة $\tau_{Stability}$ مع بارامترات الاستجابة الزمنية لخرج مجموعة التوليد الأولى. ثم يتم طرح خوارزمية تخمين $\tau_{Stability}$ في نظم التحكم الشبكية المستمرة وحساب قيمتها لنظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث مجموعات توليد. وينتهي الفصل بتطبيق أسلوب النمذجة على مجموعتي التوليد الأولى والثانية ومجموعتي التوليد الثانية والثالثة ومقارنتها مع النظام الشبكي القديم من ناحية استقرار متغيرات الحالة لكل نظام، وحساب قيمة $\tau_{Stability}$ للنظام الجديدة مع الاستنتاجات النهائية.

يقدم الفصل السابع نمذجة نظام التحكم الشبكي المتقطع والمؤلف من n نظاماً فرعياً مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين انظمته الفرعية. بعد ذلك يطرح البحث خطوات تصميم المتحكم التربيعي الأمثل لنظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد. ومن ثم يقترح خوارزمية تخمين $\tau_{DStability}$ في نظم التحكم الشبكية المتقطعة وحساب قيمتها لنظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد. وينتهي الفصل بتطبيق أسلوب النمذجة على مجموعتي التوليد الأولى والثانية ومجموعتي التوليد الثانية والثالثة ومقارنتها مع النظام الشبكي المتقطع القديم من ناحية استقرار متغيرات الحالة لكل نظام، وحساب قيمة $\tau_{DStability}$ للنظام المتقطع الجديد مع الاستنتاجات النهائية.

يقارن الفصل الثامن الخوارزمية المقترحة لحساب $\tau_{Stability}$ مع غيرها من الخوارزميات الأخرى بالإضافة إلى استعراض أهم النتائج التي تم التوصل إليها والأفاق المستقبلية لتطوير البحث.

الفصل الأول

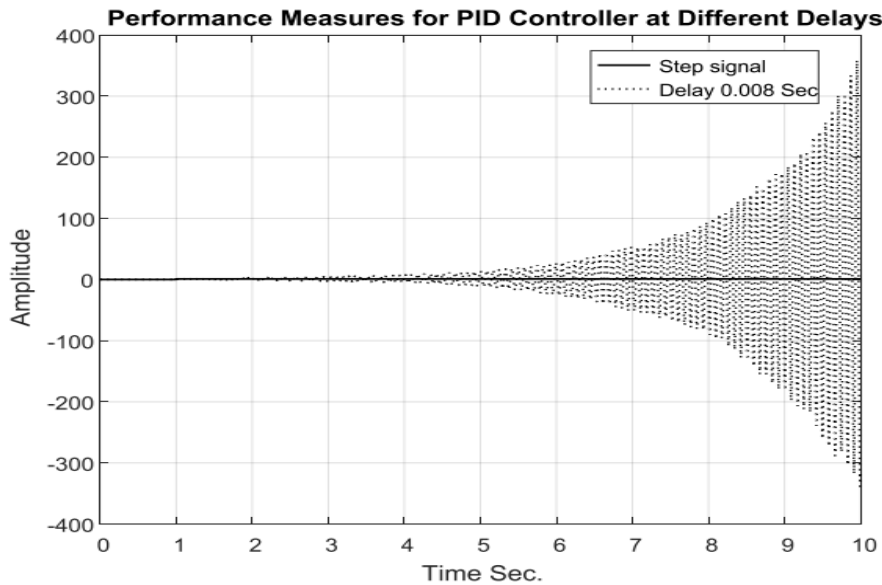
الدراسات المرجعية

1.1 الدراسات المرجعية المتعلقة بتأثير التأخير الزمني على استقرار نظم التحكم الشبكية:

1.1.1 الدراسة المرجعية الأولى [32]

Effects of the Feed Forward and Feedback Signals Time Delays on Speed Control of DC Motor

يعرض هذا البحث دراسة تأثير التأخير الزمني الثابت في المسار الأمامي (Feed Forward: FF) والعكسي (Feed Back: FB) لنظام تحكم شبكي (Fieldbus Network: FN) للتحكم بمحرك تيار مستمر ضمن حلقة التحكم المغلقة مع وجود التأخيرات الزمنية بين الحساس والمتحكم PID (TCA: Time Delay between Controller and Actuator) والتأخير الزمني بين المتحكم PID والمشغل (TSC: Time Delay between Sensor and Controller) في الزمن المستمر. تُدرس الاستقرار لنظام التحكم وفق حالتين، الأولى عند عدم وجود تأخير زمني والآخرى عند قيم مختلفة من التأخيرات الزمنية الثابتة ضمن الشبكة. ولوحظ بأن نظام التحكم يستقر عند عدم وجود تأخير زمني، بينما يفقد استقراره مع وجود المتحكم PID عندما يكون التأخير الزمني الثابت أكبر من 0.008Sec كما يوضح الشكل (1-1).



الشكل (1-1): الاستجابة الزمنية للتحكم PID مع تأخير زمني ضمن الشبكة (0.008Sec) [32].

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار:

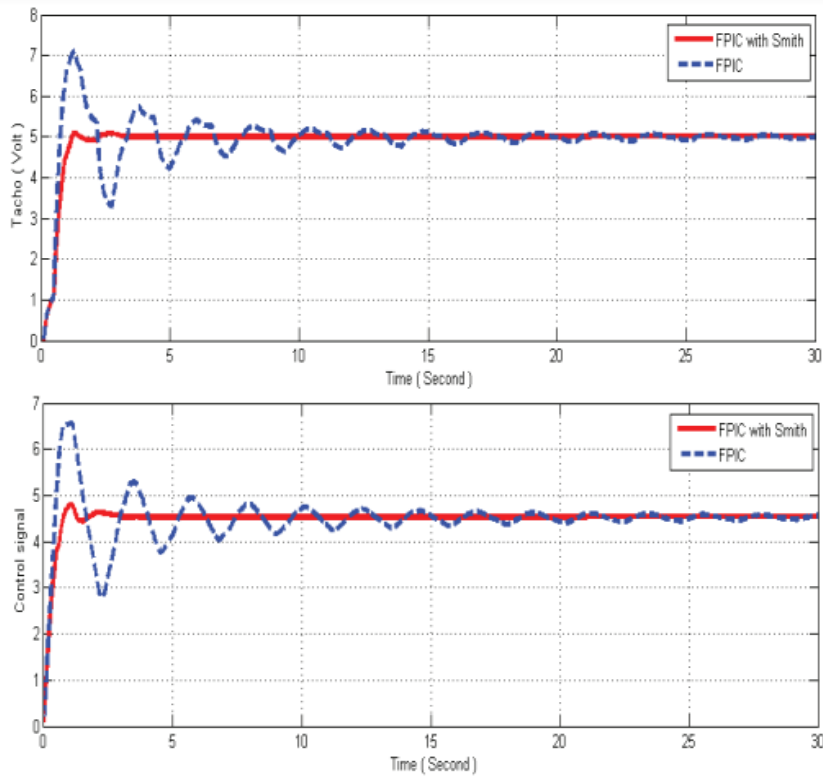
- لم يأخذ الباحث بالحسبان تأثير التأخير الزمني لعميات المعالجة المستغرقة ضمن المتحكم PID، وبيضيفها إلى التأخير الزمني الإجمالي.
- استنتجت القيمة التي يفقد عندها نظام التحكم استقراره (0.008SEC) بالتجريب ضمن برنامج MATLAB دون وجود خوارزمية واضحة تحدد القيمة التي يمكن للنظام أن يفقد استقراره عندها مع وجود التأخير الزمني.

- عدم تطبيق إشارة ضجيج (إشارات خارجية) على نظام التحكم لاختبار كفاءة المتحكم، وبالتالي لم يدرس الباحث تأثير الضجيج مع التأخير الزمني الثابت على استقرار نظام التحكم الشبكي.
- اكتفى الباحث بدراسة التأخير الزمني الثابت لعدة قيم فقط، دون دراسة التأخير الزمني غير المحدد التي يمكن أن يتعرض لها النظام التحكمي ضمن الشبكة.

1.1.2 الدراسة المرجعية الثانية [33]

FUZZY SMITH PREDICTOR FOR NETWORKED CONTROL SYSTEM

صمم مجموعة من الباحثين متحكم FPIC (Fuzzy Proportional Integral Controller: FPIC) متضمن (Smith Predictor: SP) للتحكم بسرعة محرك تيار مستمر من خلال شبكة اتصال تحكمية، والهدف من تصميم المتحكم المقترح هو التغلب على تأثير التأخير الزمني الثابت والمتغير في NCS بالإضافة إلى معالجة ضياع الرزم. فُرن المتحكم المقترح (FPIC With Smith) مع المتحكم PI الضبابي (Fuzzy PI Controller) والمتحكم PID التقليدي بوجود متنبئ سميث (PID With Smith). بالنتيجة أعطى المتحكم المقترح قدرة جيدة في التغلب على التغيرات المفاجئة في NCS، وأظهرت المحاكاة الحاسوبية وفق الشكل (1-2) أداء جيد للمتحكم المقترح على مجال واسع من التأخير الزمني المتغير في NCS أكثر من المتحكم Fuzzy PI Controller والمتحكم التقليدي PID With Smith.



الشكل (1-2): الاستجابة الزمنية لمحرك التيار المستمر في NCS مع تأخير زمني متغير [33].

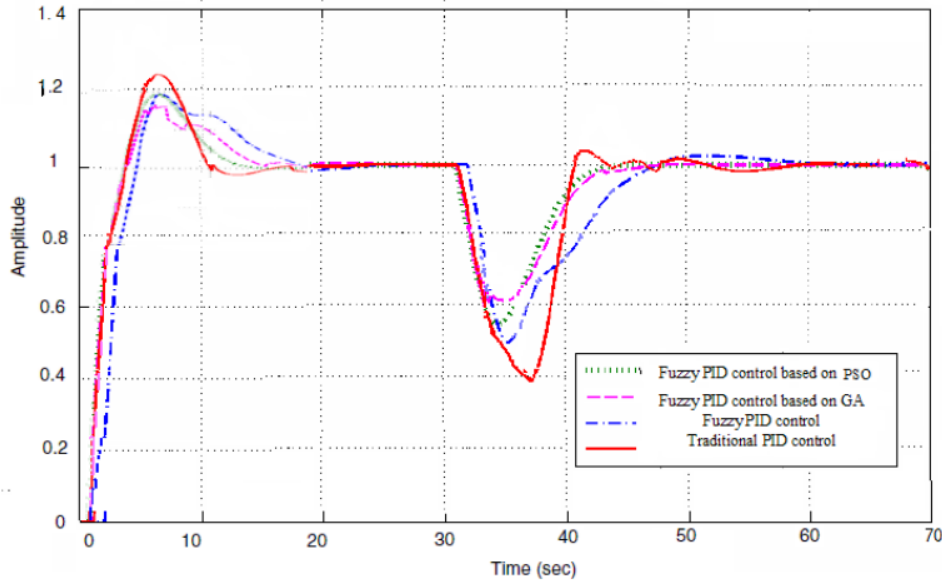
النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار:

- لم يأخذ الباحث بالحسبان تأثير التأخير الزمني لعمليات المعالجة المستغرقة ضمن المتحكم FPIC، وبضيفها إلى التأخير الزمني الإجمالي المتضمن $(\tau_{SC} + \tau_{Ca})$.
- درس الباحث تأثير التأخير الزمني الثابت عند القيمة $(\tau_{SC} = \tau_{Ca} = 0.25S)$ والمتغير ضمن المجال $(0.05 - 0.6S)$ ، ولم يطبق قيم أكبر للتأخير الزمني الثابت أو المتغير لتوضيح القيمة التي يفقد عندها نظام التحكم الاستقرار. إذ أن النظام يستقر مع المتحكم المقترح عند تأخير زمني متغير بقيم أكبر من التأخير الزمني الثابت.
- عدم تطبيق إشارة ضجيج (إشارات خارجية) على نظام التحكم لاختبار كفاءة المتحكم، وبالتالي لم يدرس الباحث تأثير الضجيج مع التأخير الزمني الثابت على استقرار نظام التحكم الشبكي.
- استخدم الباحث متنبئ سميث مع المتحكم المقترح FPIC للتخلص من آثار التأخير الزمني، ولكن لم يدرس حساسيته العالية جداً لانحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية، إذ من الصعب جداً في الحياة العملية تطابق بارامترات النموذج للنظام بالضبط مع النموذج الأصغري. إذ إن متنبئ سميث يتأثر بشكل كبير بدقة النموذج الرياضي، حيث اختار الباحث النموذج الداخلي لمتنبئ سميث مساوياً تماماً لنموذج محرك التيار المستمر.

1.1.3 الدراسة المرجعية الثالثة [34]

The Design of Fuzzy PID Controller for Networked Systems with Random Time Delay

عمل مجموعة باحثين على تحليل وتصميم وتوليف البارامترات الثلاث (k_p, k_i, k_d) للمتحكم Fuzzy PID باستخدام الخوارزميات الجينية، لتحسين استقرار نظام غير خطي يتضمن تأخير زمني (تأخير في النقل) وضياح للرزم في تطبيقات نظم التحكم الشبكية. وقارن البحث بين عدة طرائق (المتحكم PID الضبابي بالاعتماد على خوارزمية (Particle swarm optimization: PSO)، المتحكم PID الضبابي بالاعتماد على الخوارزمية الجينية (Genetic Algorithm: GA)، المتحكم PID الضبابي، المتحكم PID التقليدي). وأشارت المحاكاة الحاسوبية حسب الشكل (1-3) إلى أن فعالية المتحكمات PID الضبابية المعتمدة على خوارزمية PSO و GA أفضل من المتحكمات الأخرى، بالإضافة إلى استنتاج أن المتحكم PID الضبابي مع خوارزمية PSO أفضل منه مع خوارزمية GA.



الشكل (1-3): الاستجابة الزمنية لنظام التحكم المدروس مع تأخير زمني [34].

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار:

- درس الباحث التأخير الزمني كقيمة ثابتة (0.1Sec) دون دراسة التأخير الزمني بين الحساس والمتحكم والتأخير بين المتحكم والمشغل والتأخير ضمن المتحكم.
- درس الباحث تأثير التأخير الزمني، ولم يطبق قيم أكبر للتأخير الزمني لتوضيح القيمة التي يفقد عندها نظام التحكم الاستقرار.
- عدم تطبيق إشارة ضجيج (إشارات خارجية) على نظام التحكم لاختبار كفاءة المتحكم، وبالتالي لم يدرس الباحث تأثير الضجيج مع التأخير الزمني على استقرار نظام التحكم الشبكي.

1.1.4 الدراسة المرجعية الرابعة [35]

Adaptive Indirect Fuzzy Sliding Mode Controller for Networked Control Systems Subject to Time-Varying Network-Induced Time Delay

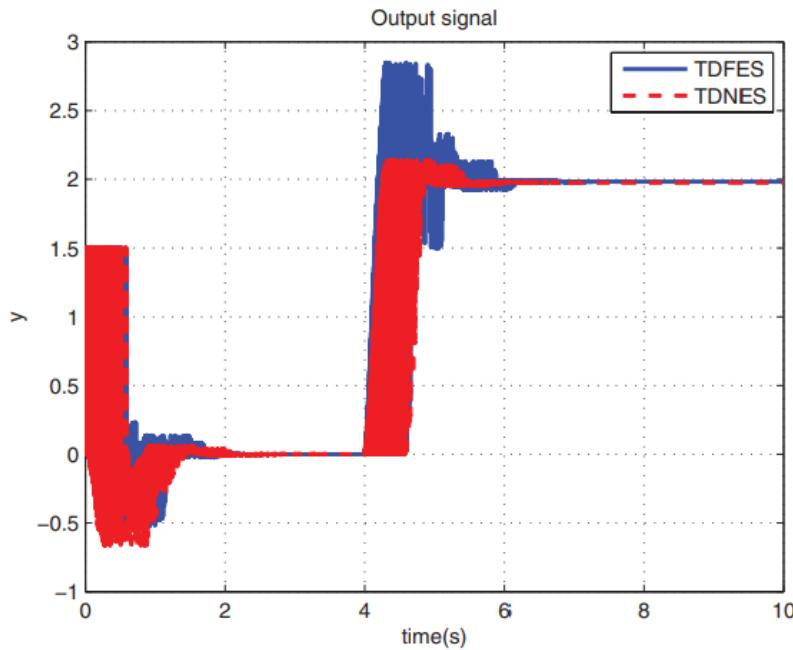
هناك تحديان رئيسيان في أنظمة التحكم الشبكية هما التأخيرات الزمنية المتغيرة بمرور الوقت التي تحدث ضمن الشبكة التحكمية بالإضافة إلى ضياع الرزم. تستخدم هذه الدراسة المتحكم الانزلاقي الضبابي (Fuzzy : FSMC Sliding Mode Controller) للتقليل من هذه المشكلات. إذ يتم استخدام المنطق الضبابي لتخمين النظام الديناميكي غير الخطي أنياً (Online)، ويتم التعامل مع التأخير الناجم عن الشبكة عن طريق تقريب (Pade approximation). يتم التعامل مع مشكلة ضياع الرزم من خلال عرضها على أنها تأخيرات زمنية كبيرة متغيرة بمرور الوقت في النظام. يضمن التصميم القائم على الوضع المنزلق المستخدم استقرار ومثانة وحدة التحكم المقترحة في ظل وجود اضطرابات وتأخيرات زمنية متغيرة ضمن الشبكة. باستخدام دالة Lyapunov المناسبة، ثبت أن

خطاً التتبع يستقر بجوار الصفر بشكل متقارب. تظهر نتائج المحاكاة الحاسوبية أن المتحكم الانزلاقي الضبابي قادر على التحكم في الأنظمة الديناميكية غير الخطية عبر الشبكة والتي تخضع لاضطرابات خارجية محدودة، وتأخيرات زمنية ناتجة عن الشبكة متغيرة بمرور الوقت، وضياح في الرزم بأداء مناسب.

1.1.5 الدراسة المرجعية الخامسة [36]

Joint Smith Predictor and Neural Network Estimation Scheme for Compensating Randomly Varying Time-delay in Networked Control System

أضاف Dang وزملاؤه متنبئ سميث إلى شبكة عصبونية لتحقيق استجابة قابلة للتكيف ومستقرة وسريعة بنفس الوقت. إذ إنه استخدم الشبكة العصبونية لتخمين التأخير الزمني المتغير ضمن الشبكة بطريقة تحديث الاوزان أنياً، بينما استخدم متنبئ سميث لإزالة حد التأخير الزمني من المعادلة المميزة لنظام الحلقة المغلقة. أجريت مقارنة بين وحدة التحكم العصبونية الشبكية ووحدة التحكم الضبابي. واستبدلت وحدة التحكم الضبابية (Time Delay Fuzzy Estimation Scheme: TDFES) بوحدة التحكم العصبونية الشبكية (Time Delay Neural network Estimation Scheme: TDNES)، والهدف من هذه الفكرة هو أن تكيف وحدة تحكم العصبونية الشبكية أفضل تماماً من وحدة التحكم الضبابي، خاصةً في ظل الخصائص غير الخطية والمتغيرة عشوائياً. بعد إجراء مقارنة في الاستجابة الزمنية للوحدتين تبين أن قيمة المطال الأعظمي لخرج النظام باستخدام وحدة التحكم الشبكية 2.138 مقارنة 2.849 للمطال الأعظمي لخرج النظام باستخدام وحدة التحكم الضبابية عند مجال متغير من التأخير الزمني (0-10S) حسب الشكل (4-1).



الشكل (4-1): الاستجابة الزمنية لخرج النظام عند تأخير زمني متغير (0-10S) [36].

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار:

- لم يأخذ الباحث بالحسبان تأثير التأخير الزمني لعمليات المعالجة المستغرقة ضمن المتحكم، ويضيفها إلى التأخير الزمني الإجمالي المتضمن $(\tau_{sc} + \tau_{ca})$.
- درس الباحث تأثير التأخير الزمني المتغير عند القيم (0-2,0-4,0-6,0-8,0-10S) بالنسبة لوحدة التحكم الشبكية العصبونية ووحدة التحكم الضبابية وتميزت العصبونية عن الضبابية بسرعة الاستجابة الزمنية لخرج النظام بالإضافة إلى تجاوز أعظمي أقل. ولكن لم يطبق الباحث قيماً أكبر للتأخير الزمني المتغير لتوضيح القيمة التي يفقد عندها نظام التحكم الاستقرار باستخدام وحدة التحكم الشبكية العصبونية.
- عدم تطبيق إشارة ضجيج (إشارات خارجية) على نظام التحكم لاختبار كفاءة وحدتي التحكم، وبالتالي لم يدرس الباحث تأثير الضجيج مع التأخير الزمني المتغير على استقرار نظام التحكم الشبكي.
- من أهم الاتجاهات المستقبلية التي نوه إليها الباحث بأنه يمكن توسيع الدراسة من خلال مراقبة أداء NCS مع نموذج نظام غير مؤكد تحت تأثير التشويش والاضطرابات الخارجية. حيث اختار الباحث النموذج الداخلي لمتنبئ سميث مساوياً تماماً لنموذج النظام. وبالتالي نوه إلى ضرورة دراسة الحساسية العالية جداً لانحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية في متنبئ سميث.

1.1.6 الدراسة المرجعية السادسة [37]

Time Delay Processing In Networked Control System Using Smith Predictor and ANN Based Error Predictor

يعرض هذا البحث نظام تحكم خطي لمحرك سيرفو مع تأخير زمني (يمكن ان يصل إلى 600ms) ناتج من الشبكة التحكمية بالإضافة إلى إجراء مقارنة بين ثلاثة نماذج مختلفة من المتحكمات للتخلص من تأثير التأخير الزمني الثابت. الأول هو المتحكم المنطقي الضبابي إذ يعتبر الخيار الأفضل بين المتحكمات التقليدية مثل PI و PID كونها أكثر مرونة وغير خطية. والثاني هو المتحكم الضبابي مع متنبئ سميث لإزالة حد التأخير الزمني من المعادلة المميزة لنظام الحلقة المغلقة. بينما النموذج الثالث هو الأكثر تقدماً والأفضل من بين النماذج الثلاثة. حيث يستخدم الشبكة العصبية الاصطناعية كنظام تكيفي لوحدة التحكم المنطقية الضبابية. إذ يعتبر التأخير الزمني هو البارامتر المتغير التي تحتاج وحدة التحكم إلى التكيف معه.

تم اختبار نظام التحكم باستخدام المتحكم الضبابي على تأخير زمني مقداره 100ms ولوحظ عدم وجود Overshoot مع زيادة كبيرة في زمن الاستقرار وزمن الارتفاع. ومن ثم اختبر نظام التحكم باستخدام النموذج الثاني والثالث على تأخير زمني مقداره 300ms ولوحظ بالنسبة للنموذج الثاني عدم وجود Overshoot مع زيادة

كبيرة في زمن الاستقرار وزمن الارتفاع بينما استنتج من النموذج الثالث عدم وجود تجاوز أعظمي مع تناقص كبير في زمن الاستقرار (5S) والارتفاع مقارنة بالنموذج الثاني (16S). وأخيراً طبق تأخير زمني (600ms) على النموذج الثالث فقط. ولوحظ ازدياد في زمن الاستقرار (18S).

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار:

- لم يأخذ الباحث بالحسبان تأثير التأخير الزمني لعمليات المعالجة المستغرقة ضمن المتحكم، ويضيفها إلى التأخير الزمني الإجمالي المتضمن $(\tau_{sc} + \tau_{ca})$.
- درس الباحث تأثير التأخير الزمني الثابت عند القيم (100,300,400,600ms) بالنسبة للنماذج التحكمية الثلاث، وتميز النموذج الثالث عن النموذجين الآخرين بعدم وجود Overshoot بالإضافة إلى تناقص ملحوظ في زمن الاستقرار والارتفاع. ولكن لم يطبق الباحث قيماً أكبر للتأخير الزمني الثابت (أكبر من 600ms) لتوضيح القيمة التي يفقد عندها نظام التحكم الاستقرار باستخدام النموذج الثالث حصراً كون النموذجين الأول والثاني يفقدان الاستقرار عند قيم أقل بكثير من الثالث.
- عدم تطبيق إشارة ضجيج (إشارات خارجية) على نظام التحكم لاختبار كفاءة النماذج التحكمية الثلاثة، وبالتالي لم يدرس الباحث تأثير الضجيج مع التأخير الزمني الثابت على استقرار نظام التحكم الشبكي.
- لم يدرس الباحث تأثير الحساسية العالية جداً لانحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية في متبئ سميث.

1.1.7 الدراسة المرجعية السابعة [38]

Design the Remote Control System with the Time-Delay Estimator and the Adaptive Smith Predictor

في تطبيقات الزمن الحقيقي، يكون نظام التحكم عن بعد عبارة عن تكامل لشبكات مختلفة إحداها شبكة تجارية لنقل الرسائل والأخرى صناعية للتحكم في الأجهزة البعيدة من خلال شبكة اتصال. نظراً لأن التأخير الزمني في NCS قد يتسبب في عدم استقرار النظام، تقترح هذه الورقة بنية NCS عن بعد من خلال تنفيذ متبئ سميث التكيفي (Adaptive Smith Predictor: ASP) باستخدام مخمن التأخير الزمني أنياً (Online Time-Delay Estimator: OTDE). نظراً لأن التأخير في شبكة Ethernet التجارية يتغير بشكل كبير اعتماداً على عدد المستخدمين النهائيين، يتم تخمين التأخير الزمني في هذا البحث من خلال معالجة القياس أنياً لوقت الذهاب والإياب (Round-Trip Time: RTT) بين طبقات التطبيق للخادم والعميل. تم تطوير متبئ سميث التكيفي من خلال التطبيق المباشر للتأخير الزمني المخمن. لإثبات كفاءة نظام التحكم المقترح عن بعد، تم تطبيق النموذج

المطور على محرك سيرفو AC 400 W تم اختباره من مسافة 15 كم. تشير النتائج التجريبية إلى أنه يمكن تحقيق تحسن في الاستقرار بشكل كبير ودقة في الحركة بشكل موثوق من خلال تطبيق النموذج المقترح.

تشير نتائج المحاكاة الحاسوبية إلى أن التحكم في متبئ سميث التكيفي المقترح يقدم أداءً أفضل بكثير مقارنةً بوحدة التحكم PI مع متبئ سميث الكلاسيكي عند تأخير زمني (200ms). كما تم إجراء تجارب من مواقع مختلفة لاختبار التصميم المقترح. إذ كان زمن التأخير الزمني داخل المختبر أصغر بكثير من زمن أخذ العينات، لذلك تم إهمال تأثير التأخير الزمني (5ms). كما تم اختبار التجارب بين مختبر NCTU ومختبر Hukou لمسافة 15 كم بالإضافة إلى تحميل بيانات ضخمة من عدة مستخدمين في 16 ثانية لمشاركة النطاق الترددي المحدود للشبكة. تشير النتائج إلى أن التأخير الزمني يزداد وفقاً لذلك إلى مستوى معين (46ms)، وتصبح وحدة تحكم PI مع متبئ سميث ذو التأخير الثابت غير مستقرة. ومع ذلك، لا يزال متبئ سميث التكيفي المقترح يقدم أداءً محسناً حتى مع التأخير الزمني المتنوع الناجم عن الشبكة بشكل كبير.

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار:

- لم يأخذ الباحث بالحسبان تأثير التأخير الزمني لعمليات المعالجة المستغرقة ضمن المتحكم المقترح، ويضيفها إلى التأخير الزمني الإجمالي المتضمن $(\tau_{sc} + \tau_{ca})$.
- درس الباحث تأثير التأخير الزمني الثابت والمتغير لثلاث نماذج تحكمية (متحكم PI، متبئ سميث التقليدي مع PI، متبئ سميث التكيفي مع PI)، وتميز النموذج الثالث عن النموذجين الآخرين باستجابة زمنية أفضل بكثير حتى مع وجود تأخير زمني بقيمة (200ms). ولكن لم يطبق الباحث قيم تجربته أكبر من 200ms لتوضيح القيمة التي يفقد عنها نظام التحكم الاستقرار باستخدام النموذج الثالث حصراً كون النموذجين الآخرين يفقدان الاستقرار عند قيم أقل بكثير من الثالث.
- لم يدرس الباحث تأثير الحساسية العالية جداً لانحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية في متبئ سميث.

1.1.8 الدراسة المرجعية الثامنة [39]

NEW TWO-TERM PARAMETER ADAPTIVE FUZZY CONTROL STRUCTURE FOR TIME-DELAY SYSTEMS

اقترح P.J Escamilla, N.Mort متحكم ضبابي يُبنى على نموذج ضبابي تكيفي للتنبؤ بالحالة المستقبلية للاستجابة واتخاذ قرار التحكم المناسب بهدف التخلص من تأثير التأخير الزمني الموجود في النظام وتأمين التحكم

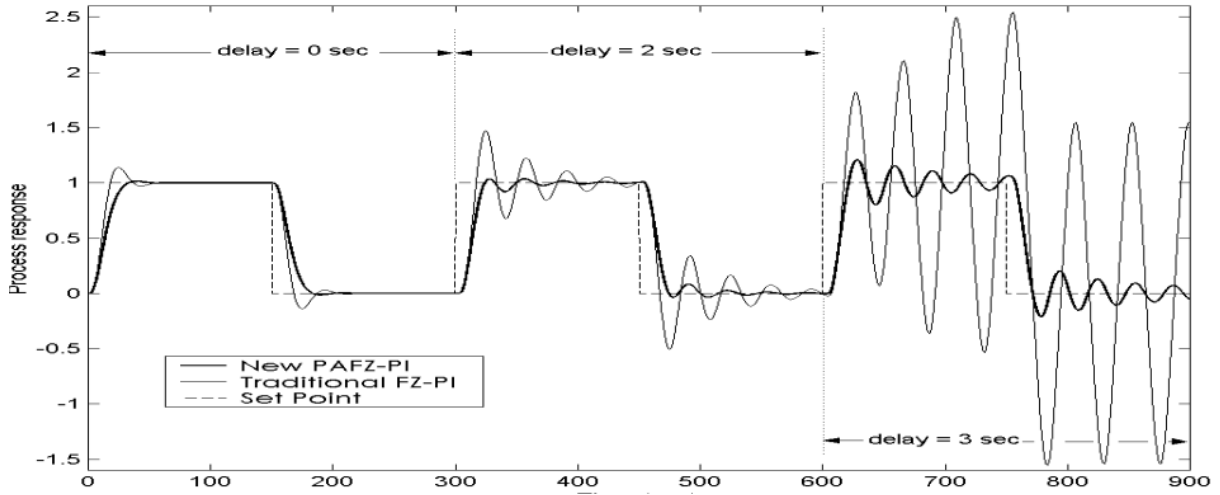
المناسب للجملة. تتعامل هذه البنية (Two-Term Fuzzy Control System) مع التأخير الزمني في الجملة وتأخذ بعين الاعتبار تغيرات الاستجابة ليس فقط من الخطأ وتغيراته ولكن أيضاً من تأثير فعل التحكم السابق.

للربح التكاملي في المتحكم Fuzzy PI تأثير مهم على أداء المتحكم الضبابي، فإذا كان صغيراً ستكون الاستجابة بطيئة وإذا كان كبيراً فسيُدفع بالجملة لعدم الاستقرار. إذا احتوت الجملة على تأخير زمني فإن المعلومات المأخوذة عن طريق المتحكم الضبابي تصل متأخرة وبالتالي يتولد فعل تحكم متأخر. بما أن التأخير الزمني من أحد الأسباب الرئيسية للاهتزازات في الجملة، ستزداد أهمية الربح التكاملي في هذه الحالة.

عند هذه اللحظة يوجد حقيقتين، الأولى أن التأخيرات تؤدي إلى عدم استقرار في شكل الاهتزازات والثانية أن زيادة الربح التكاملي سيقود إلى عدم استقرار. من هنا طُورت طريقة استخدام ربح تكاملي متغير مع الزمن لتعويض آثار التأخير الزمني وبالتالي زيادة استقرار الجملة.

تعتمد هذه الطريقة على تغيير الربح التكاملي مع الزمن، فإذا لم يوجد تأخير زمني في النظام لا يتغير الربح ويبقى ثابتاً ولكن إن وجد تأخير في الجملة فإنه سيتم تخفيض الربح التكاملي تدريجياً مع الزمن لكي يزيد تخامد الجملة ويزيد الاستقرار. إن تخفيض الربح التكاملي سوف يخفض بالمقابل الربح التناسبي أيضاً وبذلك سوف ينخفض رد فعل المتحكم أمام الخطأ لذا يجب زيادة الربح التناسبي بنفس نسبة تخفيض الربح التكاملي، وبهذه الطريقة فإن قوة التحكم التناسبي ستبقى ثابتة وتكون استجابة النظام سريعة أمام الخطأ.

يظهر الشكل (1-5) استجابة كل من المتحكم الضبابي التقليدي Fuzzy PI والمتحكم الضبابي التكيفي (Parameter Adaptive Fuzzy PI: PAFZ-PI) بعد محاكاة كل منهما باستخدام MATLAB. ويبدو جلياً أن البنية التكيفية أكثر متانة لتغيرات قيمة التأخير الزمني حيث نلاحظ أن وجود التأخير الزمني أثر سلباً على استجابة النظام من حيث ظهور الاهتزاز حول نقطة الاستقرار (التجاوز) وازدياد التجاوز مع زيادة التأخير. إن البنية التكيفية للمتحكم الضبابي حسنت الاستجابة بشكل واضح، فمن أجل تأخير زمني قدرة (1) ثانية نلاحظ سرعة في استجابة النظام من دون تجاوز كذلك الحال من أجل تأخير زمني قدره (2) ثانية ولكن مع زيادة التأخير ظهرت تجاوزات لكن أقل من تلك التي ظهرت من دون وجود هذه البنية التكيفية.



الشكل (1-5) استجابة النظام باستخدام المتحكم PAFZ-PI والمتحكم FZ-PI مع وجود التأخير الزمني

1.2 الدراسات المرجعية المتعلقة باستقرار نظم القدرة الكهربائية:

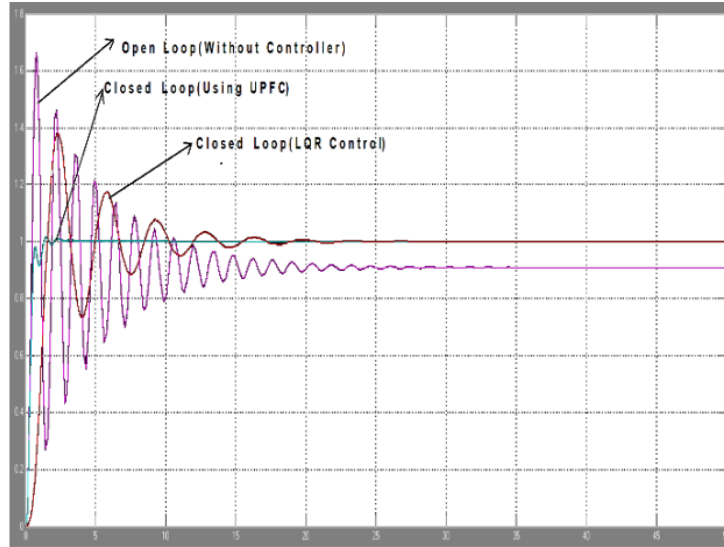
1.2.1 الدراسة المرجعية الأولى [40]

Modelling and Simulation: A Comparison of LQR Control and Unified Power Flow Controller for Dynamic Stability Improvement

يمكن تحسين الاستقرار الديناميكي لالة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي (Single Machine Infinite Bus: SMIB) باستخدام التحكم الأمثل (LQR) وأجهزة التحكم في تدفق الطاقة الموحدة (Unified Power Flow Controller: UPFC) لتحسين استقرار نظام SMIB. تتم المقارنة بين المتحكمين في حالة الحلقة المفتوحة والمغلقة (باستخدام المتحكم LQR و UPFC) عن طريق MATLAB/Simulink. يكتب نموذج SMIB على شكل متغيرات الحالة، ثم يطبق معادلة Riccati لتحديد الربح الأمثل في نظام التحكم (LQR). يتم الحصول على مدخلات الربح الأمثل من زاوية عزم القدرة ($\Delta\delta$) والسرعة الزاوية ($\Delta\omega$)، وكذلك الجهد الداخلي (V_t) وتغير الجهد عند anchor. يحقن خرج عنصر التحكم LQR في نظام التهيج الخاص بنموذج SMIB. يثبت جهاز UPFC على خط النقل. تم تشكيل UPFC في نموذج معادلة رياضية جديد للحقن. يتحكم نموذج حقن UPFC في بارامترات الطاقة P_i و P_j (الطاقة المحقونة في bus-i و bus-j). حيث يستخدم جهاز UPFC لإصلاح تذبذبات نظام الطاقة الكهربائية.

من النتائج التجريبية وحسب الشكل (1-6)، يمكن ملاحظة أن استخدام المتحكم LQR و UPFC يمكن أن يقلل من مطال الاهتزازات لنظام الطاقة الكهربائية. يتخامد الاهتزاز في نظام الحلقة المفتوحة عند 25 ثانية، وفي الحلقة

المغلقة باستخدام المتحكم LQR يصل النظام للحالة المستقرة عند 15 ثانية، بينما باستخدام المتحكم UPFC يصل النظام للحالة المستقرة عند 4 ثواني.



الشكل (1-6): مقارنة الاستجابة الزمنية للمتحكم LQR و UPFC [40].

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار:

- لم يدرس الباحث وصل عدة مجموعات توليد مع بعضها البعض ضمن شبكة تحكمية وإنما اكتفى بدراسة مجموعة توليد واحدة فقط.
- عدم تطبيق إشارة ضجيج (إشارات خارجية) على مجموعة التوليد لاختبار كفاءة المتحكمين، وبالتالي لم يدرس الباحث تأثير الضجيج مع التأخير الزمني على استقرار نظام القدرة الكهربائية.

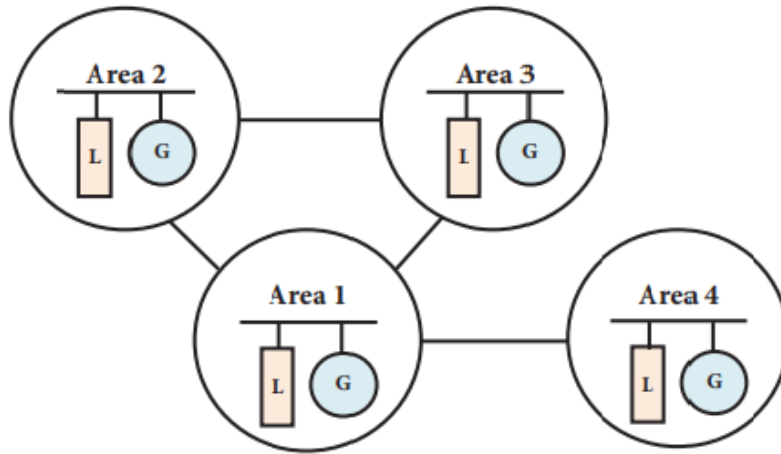
1.2.2 الدراسة المرجعية الثانية [41]

Optimal Decentralized LQR Control to Enhance Multi-Area LFC System Stability

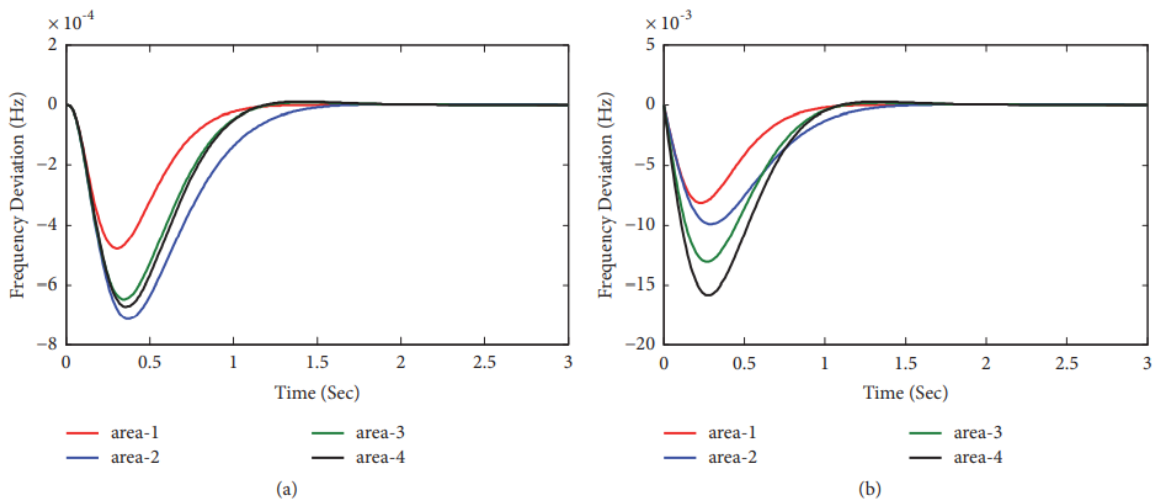
تم إجراء العديد من الدراسات ضمن مجال التحكم في تردد الحمل (LFC) خلال العقود القليلة الماضية نظراً لأهميتها لنظام الطاقة الصحي. إذ إنه من المهم الحفاظ على تغيرات التردد عند مستوى الصفر بسبب اضطرابات الحمل. في التحكم اللامركزي، تتألف منظومة القدرة الكهربائية متعددة المناطق من أربع أنظمة فرعية (Single Input Single Output: SISO) ويتم تصميم وحدة تحكم محلية لكل نظام فرعي كما في الشكل (1-7). قد يكون للنظم الفرعية المتحكم فيها أقطاب بطيئة، تدفع هذه الأقطاب غير المرغوب فيها النظام الكلي إلى منطقة عدم الاستقرار. وبالتالي لابد من إعادة تموضع هذه الأقطاب لتصبح أكثر استقراراً لتجنب تأثيرها على استقرار النظام الكلي.

تهدف الدراسة إلى تصميم متحكم جديد في تردد الحمل يعتمد على تقنية (LQR). يمكن تطبيق هذه التقنية على مستوى النظام الفرعي لإزاحة الأقطاب غير مرغوب فيها للنظام الفرعي واحداً تلو الآخر إلى موقع مُحدد مسبقاً وهذا من شأنه يؤدي إلى إزاحة كامل الأقطاب البطيئة للنظام الكلي ويقلل من تأثير التفاعل بين الأنظمة الفرعية المترابطة فيما بينها. يجب تطبيق هذا الإجراء عدة مرات بعدد الأقطاب غير المرغوب فيها (المطلوب إزاحتها) حتى يتم تحقيق جميع الأقطاب المطلوبة.

يعتبر الهدف الرئيس هو الحصول على تصميم قوي عندما يتأثر النظام باضطرابات فيزيائية و $\pm 40\%$ نسبة عدم اليقين. توضح نتائج المحاكاة حسب الشكل (8-1) فعالية الطريقة المقدمة لتوفير منظم تردد قوي عندما يتأثر النظام بنسبة 40% من عدم اليقين. يتم الحصول على خطأ الحالة الدائمة الصفري لتغيرات التردد لكل منطقة مع زمن استقرار وتجاوز أعظمي مقبول.



الشكل (7-1): نظام الطاقة الكهربائية متعدد المناطق مؤلف من أربع أنظمة فرعية SISO [41].



الشكل (8-1): الاستجابة الزمنية للنظام المتحكم به مع متحكم LQR مطبق على كل نظام فرعي من أجل

(a) 0.01 p.u. input and (b) 0.01 disturbance input

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار :

- اقترح الباحث التوصيل السلبي بين مجموعات التوليد ولم يدرس وجود شبكة تحكمية تربط بين الأنظمة الفرعية.
- لم يقدم الباحث أسلوب نمذجة يمكن الباحثين من نمذجة عدة مجموعات توليد لدراسة استقرارها، مع ادخال تأثير التأخير الزمني بأنواعه المختلفة.

1.2.3 الدراسة المرجعية الثالثة [42]

Load Frequency Control Using Hybrid Intelligent Optimization Technique for Multi-Source Power Systems

يهدف البحث إلى معالجة التحديات المتعلقة بنظم التحكم بالتردد في نظم القدرة واسعة النطاق مع مصادر تغذية متعدد. إذ يزداد تعقيد هذه المهمة مع دمج مصادر متعددة لتوليد الطاقة. استخدم الباحث منظومة قدرة كهربائية متواجدة في منطقتين منفصلتين جغرافياً تتكون من ثلاثة مصادر للطاقة الكهربائية (محطة الطاقة الحرارية، محطة الطاقة الكهرومائية ومحطة الطاقة الغازية). طورت تقنية نمذجة جديدة تجمع وتستخرج الميزات الرئيسة لتقنيات التحسين الثلاثة PSO و (Gravitational Search Algorithm: GSA) و (FA: Firefly Algorithm). استخدمت التقنية المقترحة لضبط بارامترات المتحكم PID لتحقيق التحكم التلقائي في تردد التحميل لنظام الطاقة متعدد المصادر. كما تم فحص أداء النظام مع الأخذ في الاعتبار تغيير الاضطراب في الحمل في كلا المنطقتين. اختبرت الفعالية الكلية للخوارزمية المقترحة في دراستي حالة مختلفتين. الأولى، خضعت كلتا المنطقتين إلى زيادة حمل قدره 0.01PU بينما في الثانية تعرضت المنطقتان لزيادات مختلفة في الحمل بمقدار 0.03PU للأولى و 0.02PU للثانية. أجريت محاكاة لنظام الاختبار الذي تعرض لتغير الاضطراب في الحمل لتقييم أداء ومثانة الخوارزمية الجديدة المقترحة فيما يتعلق بالتجاوز الاعظمي وزمن الاستقرار مقارنة بكل من المتحكمات PSO و GSA و FA. حيث بلغ زمن الاستقرار بالنسبة للحالة الأولى للخوارزمية المقترحة 8.5 S مقارنة بـ 8.7 S و PSO و 8.7 S و FA و 9.0 S للخوارزمية GSA. بينما بلغ زمن الاستقرار بالنسبة للحالة الثانية للخوارزمية المقترحة 5.5 S مقارنة بـ 6.2 S و PSO و 7.0 S و FA و 8.5 S و PSO و 8.5 S للخوارزمية المقترحة.

النقاط التي لم تؤخذ بعين الاعتبار :

- من أهم التوصيات التي اقترحها الباحث هي اختبار المتحكم المقترح لنظام القدرة واسع النطاق على ظروف عمل بيئية واقعية تؤثر من شأنها على استقرار نظام القدرة العام، ومقارنته مع غيره من المتحكمات الأخرى.

حيث تعتبر التأخيرات الزمنية غير المحددة من أهم الظروف البيئية التي تؤثر على استقرار منظومة القدرة الكهربائية.

- افترض الباحث أسلوب التوصيل السلبي بين منطقتي منظومة القدرة، إذ أنه من الأفضل والأكثر واقعية أن تكون هناك شبكة اتصال تحكمية تربط المنطقتين مع بعضهما البعض باستخدام البنية الموزعة التي تتضمن متحكم إشرافي ينسق ويراقب عمل المنطقتين.
- لم يقدم الباحث أسلوب نمذجة يمكن الباحثين من نمذجة عدة مجموعات توليد لدراسة استقرارها، مع ادخال تأثير التأخير الزمني بأنواعه المختلفة.

1.3 الدراسات المرجعية المتعلقة بحساسية متنبئ سميث:

إن عدم الخطية والتأخير الزمني في النظم الهوائية، تجعل من طريقة التحكم التقليدي PID لا تعطي الكفاءة المطلوبة لمثل هذا النوع من الأنظمة. لذلك، اقترح مجموعة من الباحثين في عام 2021 [43] طريقة تحكم محسنة تستخدم المتحكم التقليدي PID وتجمع بين شبكة عصبونية ذات انتشار عكسي ومتنبئ سميث، للتحكم بمشغل مستند على أسطوانة هوائية لتشغيل الروبوتات. أظهرت النتائج التجريبية من خلال المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج MATLAB أن الطريقة المقترحة يمكن أن تنقص من الحد الأعظمي للتجاوز (Maximum Overshoot) مقارنة مع طريقة التحكم التقليدي PID.

في عام 2019 [44] أجرى الباحثان Necdet و İlyas تحقيقاً تجريبياً لمخطط تحكم-fractional Fuzzy gain-scheduled مع متنبئ سميث معدّل للتحكم في عملية حرارية متأخرة زمنياً. تعمل استراتيجية التحكم على توظيف خوارزمية ضبابية لضبط بارامترات وحدة التحكم الملائمة بناءً على ظروف تشغيل النظام. يتيح تحسين أداء نظام الحلقة المغلقة سلوكاً أكثر قوة في حالة وجود اضطراب مع تقليل استهلاك الطاقة من خلال إنتاج إشارة تحكم سلسلة مقارنة بمخططات متنبئ سميث التقليدية. تشتمل وحدة التحكم المقترحة على إمكانية الضبط الذاتي في وقت التشغيل مما يجعلها قابلة للتكيف بطبيعتها. وكان الدافع وراء هذه الدراسة هو المساهمة النظرية والعملية. تتمثل المساهمة النظرية في اقتراح نظام new Smith Predictor based fractional order Fuzzy Dead-Time Compensation يمكن أن يتعامل مع حالات عدم اليقين وتغيرات البارامترات والاضطرابات الداخلية والخارجية. بينما تتمثل المساهمة العملية في تطبيق مخطط التحكم المقترح على عملية تسخين الهواء في الزمن الحقيقي. وتم تقييم أداء مخطط التحكم المقترح باستخدام المحاكاة الحاسوبية والتطبيق التجريبي في ظل ظروف تشغيل مختلفة. واستنتج الباحثان بأن مخطط التحكم المقترح تفوق على وحدات التحكم التقليدية PI-PD SP ووحدات التحكم الضبابية لمهام مراقبة درجة الحرارة لعملية مؤخرة زمنياً. بالإضافة إلى توضيح الإيجابيات والسلبيات المستنتجة لكل وحدة تحكم مستخدمة.

استخدم الباحثان Steinberger و Horn في عام 2020 [45] متنبئ سميث المفلتر (Filtered Smith Predictor: FSP) للتحكم في الانظمة الخطية مع تأخيرات زمنية ثابتة. بصرف النظر عن إمكانية التطبيق بالنسبة للتحكم الكلاسيكي، فإنه يمكن استخدامها أيضاً داخل حلقات التحكم المتصلة بالشبكة، حيث يتم إرسال القياسات في رزم منفصلة عبر قناة إرسال تخضع لتأخيرات متغيرة بمرور الوقت. ومع ذلك، لا يمكن إعطاء ضمانات الاستقرار في هذه الحالة. لذلك، درس الباحثان أن التأخيرات المتغيرة بمرور الوقت وكذلك packetized character لعمليات الإرسال يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار لتحليل الاستقرار. عمل الباحثان على ثلاثة بروتوكولات للشبكة، تستخدم آليات مختلفة لاختيار الرزم والاحتفاظ بها. ثم قدما معايير الاستقرار القوي لحلقة التغذية الخلفية المتصلة بالشبكة، وهي تستند إلى نظرية الكسب الصغير (small gain theorem) وتسمح بطريقة غير مكلفة من الناحية الحسابية للتحقق من الاستقرار مع تأخيرات الحزمة المحدودة. وتلقي أمثلة المحاكاة الحاسوبية الضوء على النهج المقدم وتوضح سبب أهمية إدراج packetized character المتغير زمنياً لعمليات إرسال الشبكة من أجل تحليل الاستقرار.

درس الباحثان Anand, Poorani [46] كيفية الحفاظ على المبادل الحراري عند درجة الحرارة المطلوبة، إذ فشل المتحكم PID في التحكم بالنظام بسبب التأخير الزمني. لذلك، استخدم متنبئ سميث، وأظهرت نتيجة المحاكاة أن المتنبئ لديه أداء أفضل من المتحكم PID، ولكن المشكلة التي يعاني منها هي الحساسية العالية. ودمج كل من Rao و Chidambaram [47] ثلاثة متحكمات ومرشح لتكوين متنبئ سميث محسن بهدف التحكم في العمليات التي تعاني من تأخيرات زمنية ثابتة. إذ استخدم المتحكم الأول للتحكم بمحرك Servo والثاني لضبط التنظيم بينما استخدم المتحكم الثالث للتعامل مع الاضطرابات الخارجية التي يعاني منها النظام، ولتحسين المتانة بشكل أفضل أضيف فلتر من الدرجة الأولى.

وصممت وطورت [48] وحدة تحكم شبكية تنبؤية مع حلقة تحكم تكيفية للتعامل مع التأخير الزمني العشوائي من قبل Velagic، استفيد منها في تقليل تأثير التأخير الزمني على نظام التحكم، إضافة إلى تضمين مرشح مع متنبئ سميث لتحسين متانة المتحكم اتجاه الاضطرابات الخارجية.

بالنظر إلى مشكلة الاضطرابات الدورية التي تعاني منها النظم التحكمية ذات التأخير الزمني، قدم كل من Kuzu و Songuler [49] مخطط هجين وجديد لمتنبئ سميث. كانت هذه البنية الجديدة مزيج من متحكم PI ضبابي ومنتنبئ سميث، من أهم المشكلات التي تعترض هذه البنية هي أخطاء النمذجة الرياضية والتي يمكن إزالتها من خلال استخدام متنبئ سميث مفلتر بهدف إزالة التذبذبات والحصول على متانة أفضل.

وبالتالي نجد أنه من أهم مشكلات متنبئ سميث حساسيته العالية جداً لانحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية، إذ من الصعب جداً في الحياة العملية تطابق بارامترات النموذج للنظام بالضبط مع النموذج الأصغر،

حيث وضع J.E.Normey-Rico في كتابه [50] مجموعة من المشكلات التي يعاني منها متبني سميت التي من أهمها حساسيته العالية، وبالتالي يصبح معرض بشكل كبير للاضطرابات ويفقد متانته في ملاحقة الإشارة المرجعية، بالإضافة إلى مشكلة أخرى هي إمكانية وجود خطأ في نموذج النظام المراد دراسته، مما يعقد من عملية التصميم. لذلك لا يعتبر النموذج الأصغر إلا تقريباً لنموذج العملية التحكيمية الحقيقية، وبالتالي فإن متبني سميت يتأثر بشكل كبير بدقة النموذج الرياضي، وهذا ما سيتم توضيحه من خلال اقتراح طريقة جديدة من قبل الباحث لتحسين عملية الترشيح في متبني سميت لأنظمة التأخير الزمني.

1.4 الدراسات المرجعية المتعلقة بنظريات التحكم المصممة لمخمدات الاهتزاز:

هناك العديد من الأبحاث التي تطرقت لدراسة أنواع مختلفة من مخمدات الاهتزاز وقارنت بينها وبين مخمد الاهتزاز التقليدي للتأكيد من فعالية المخمد المدروس، حيث تختلف فيما بينها من حيث نظرية التحكم المصممة عليها هذه المخمدات مثل الشبكات العصبونية (Artificial Neural Network: ANN) والمنطق الضبابي (Fuzzy Logic: FL)، وتقنيات الأمثلة (Optimization Techniques) [51,52]، والمتحكمات التكيفية (Adaptive Controllers) [53]، والمتحكمات المتينة (Robust Controllers) [54,55,56].

إذ تم التركيز ضمن هذه الأبحاث على توليف بارامترات مخمد الاهتزاز ضمن طيف واسع من حالات التشغيل، ودراسة أدائه عند حالات العطل. من أهم الميزات التي تقدمها تقنيات الذكاء الصناعي والتحكم الحديث في مجال استقرار نظم الطاقة الكهربائية أنها تزيد من الموثوقية، وسرعة المعالجة وتقلل من الأخطاء البشرية التي ممكن أن تحدث [57]. من جهة أخرى ينظر العديد من الباحثين بأن طرائق التحكم الحديثة المستخدمة لتطوير أنواع مختلفة من مخمدات الاهتزاز ليست أفضل بكثير من مخمد الاهتزاز التقليدي [58,59]، ويعود السبب في ذلك التفضيل إلى أن استخدام مخمد الاهتزاز التقليدي يعتبر تحكماً لا مركزياً، إضافة إلى سهولة توليف بارامتراته وتعديلها أثناء حالات العمل.

وبينت الدراسة [59] تحليلاً شاملاً ومفصلاً حول تأثير بارامترات مخمد الاهتزاز التقليدي على الأداء الديناميكي لنظام الطاقة. وقد أوضحت بأن الاختيار المناسب لبارامترات المخمد المدروس تعطي بالنتيجة أداء جيد للنظام خلال تعرضه لعدد كبير من الاضطرابات.

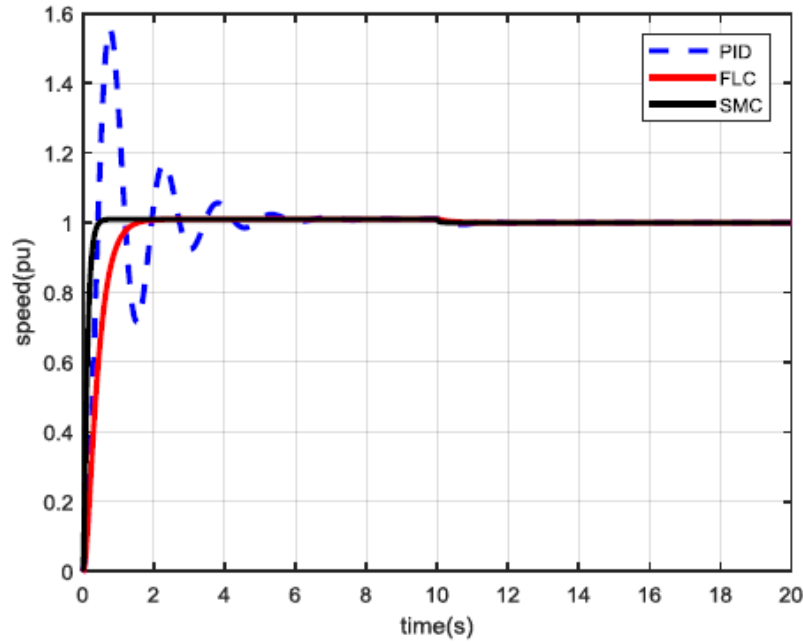
في حين وضع مجموعة من الباحثين [60] بأن عملية ضبط بارامترات مخمد الاهتزاز هي عملية دقيقة جداً تعتمد على عدة عوامل من أهمها نوع الآلة المتواقة والمهيج المستخدم ونوع إشارة دخل المخمد، حيث أن إشارة الخرج لأي مخمد اهتزاز تضاف كإشارة دخل إلى منظم الجهد الآلي لنظام التهبيج. ودُرس تأثير إشارات الدخل المختلفة لمخمد الاهتزاز على استقرار نظام القدرة الكهربائية. كما استُعرض تأثير تغير السرعة الزاوية (الفرق بين سرعة

الألة والسرعة المرجعية)، وتغير التردد وتغير الاستطاعة المسرعة (الفرق بين الاستطاعة الميكانيكية والكهربائية) بالإضافة إلى تطبيق اضطراب أدى إلى تغير في العزم الميكانيكي بمقدار 0.01 لمدة 1 ثانية. وأظهرت النتائج أن استخدام مخدم الاهتزاز بتغذية عكسية من إشارة تغير السرعة الزاوية يعطي أفضل تخامد للنظام مقارنة بالإشارات الأخرى وذلك لأن مخدم الاهتزاز يعطي تخامداً متوافقاً بالطور مع السرعة.

بينما درس الباحث [61] تحسين استقرار نظام القدرة الكهربائية من خلال مخدم الاهتزاز من نوع PID وبينت نتائج المحاكاة الحاسوبية تحسن ملحوظ في استقرار نظام القدرة باستخدام مخدم PID مقارنة مع المخدم التقليدي من خلال سرعة إخماد الاهتزازات الناشئة في النظام، وإمكانية ضمان الاستقرار عند حالات عمل مختلفة.

وعند تصميم مخدم اهتزاز يعتمد على المتحكمات الضبابية لابد أن يكون هناك معرفة عميقة جداً بسلوك بارامترات النظام لتطبيق التحكم الضبابي [62,63]. إذ صمم [64] Balsam وزملاؤه مخدم اهتزاز من النوع الضبابي بهدف تحسين الاستقرار الديناميكي لنظام الطاقة الكهربائية المؤلف من آلة متواقة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي، واستنتج أن التحكم الإضافي في نظام التهيج بواسطة المتحكمات الضبابية يقلل مطال الاهتزازات الناشئة عن الأعطال وينقص زمن التخماد ويعطي أداء أفضل بكثير مقارنة بمخدم الاهتزاز التقليدي من أجل حالات عمل مختلفة.

وفي عام 2019 درس Ngoc-Khoat Nguyen [65] تأثير مخدمات الاهتزاز المعتمدة على التحكم الحديث. إذ قارن الباحث بين ثلاث طرائق تحكم لتصميم مخدم فعال يهدف إلى تحسين استقرار نظام القدرة الكهربائية لألة متواقة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي. المخدم الأول من نوع PID (PID-based PSS) والثاني من النوع الضبابي (A Fuzzy logic-based PSS) FLC بينما الثالث مخدم معتمد على التحكم الانزلاقي SMC والتحكم الضبابي (A fuzzy logic-integrated sliding mode control-based PSS). طبقت الدراسة على حالي عمل الأولى دون تغير في الحمل والثاني مع إجراء تغيرات في الحمل للتأكد من فعالية المخدمات. وكشفت المحاكاة الحاسوبية وفق الشكل (1-9) باستخدام MATLAB تحسن كبير في استقرار نظام الطاقة الكهربائية باستخدام المخدم الثالث (FLC+SMC) من خلال مطال اهتزازات وزمن استجابة قليل مقارنة بالمخدم الأول (PID).



الشكل (1-9): الاستجابات الديناميكية لسرعة دوران الآلة المتوافقة الموافقة لوحدة التحكم المختلفة الثلاث [65]

وبما أن نظام الطاقة الكهربائية غير خطي لذلك فإن تصميم بارامترات PSS باستخدام ANN [66,67] يؤمن استقراراً ديناميكياً جيداً، إلا أنه يتطلب مجموعة بيانات تدريب جيدة تغطي جميع أنواع عدم اليقين في النظام، ولكن من الصعب تحقيق ذلك من الناحية العلمية. حيث صمم Tareek [68] وزملاؤه مخدم اهتزاز يعتمد في مبدأ عمله على الشبكات العصبونية وذلك للتحكم بتهييج آلة متوافقة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي. واستنتج تحسن ملحوظ في الاستقرار الديناميكي للنظام الكهربائي من خلال قدرة المخدم العصبوني على إنقاص الاهتزازات الناشئة عن التغيرات في حالات العمل وهذا بدوره يؤدي إلى إنقاص زمن التخميد، وبالتالي أظهر البحث فعالية المخدم العصبوني مقارنة بمخدم الاهتزاز التقليدي.

في [69] تم تطوير SVC المزود بوحدة تحكم التخميد التكميلية (Supplementary Damping Controller: SDC) للحد من الاهتزازات بين المناطق، وصمم متحكم PI باستخدام نظرية خاريتونوف (Kharitonov).

الفصل الثاني

تحليل استقرار نظم التحكم في

فضاء الحالة

2.1 مقدمة:

عند دراسة أي نظام تحكم فإن أول ما تتناوله الدراسة التصميمية للتحكم هو كيفية جعل النظام المتحكم به مستقرًا. حيث تعتبر صفة الاستقرار أهم ما يميز نظاماً فيزيائياً عن آخر. وتصف هذه الميزة تصرف النظام والمسار الذي سيسلكه في مستوي التردد أو المطال عند تطبيق دخل ما على النظام.

2.2 مفهوم الاستقرار في فضاء الحالة [70]:

يعتمد الاستقرار في فضاء الحالة على مفهوم وضع التوازن للنظام. نعلم أن النظام في فضاء الحالة هو مجموعة من الحالات المتغيرة زمنياً التي نطلق عليها متغيرات الحالة للنظام والتي تشكل شعاع الحالة للنظام. يمثل شعاع الحالة عند الزمن محدد نقطة في فضاء الحالة احداثياتها قيم مركبات شعاع الحالة عند هذا الزمن.

عندما يعمل النظام بتغيير متغيرات الحالة مع الزمن فينتقل النظام من نقطة إلى أخرى مشكلاً مساراً في فضاء الحالة. يبدأ المسار من نقطة يحددها شعاع الحالة الابتدائي (الوضع الابتدائي) ويسير بعدها على المسار مع تغيير الزمن.

يعتمد مفهوم الاستقرار في فضاء الحالة على المسار في الوضع الدائم، أي بعد تشغيل النظام بفترة من الزمن (لانهائية نظرياً). حتى يكون النظام مستقرًا بشكل عام في فضاء الحالة ينبغي أن يكون هذا المسار محدوداً ضمن منطقة من فضاء الحالة، أما إذا انتهى المسار إلى اللانهاية (قيم كبيرة نسبياً) مع الزمن فسيكون النظام غير مستقر.

يُطلب عادة في نظم التحكم أن يصل النظام إلى نقطة محددة في منطقة محدودة من فضاء الحالة ويبقى عندها أي يستقر فيها ولا يغادرها. إن بقاء النظام في نقطة من فضاء الحالة وعدم مغادرتها مع الزمن يعني أن النظام سيصل إلى شعاع حالة ثابت زمنياً، أي ستكون كل مركبات شعاع الحالة في هذه النقطة ثابتة. نسمي هذه النقطة وضع التوازن للنظام فيكون معدل تغيير (المشتق الزمني) شعاع الحالة صفراً.

نتوصل مما سبق إلى أن النظام يكون مستقرًا بشكل عام في فضاء الحالة عندما يسلك مساراً محدوداً بمنطقة محددة من فضاء الحالة ويكون غير مستقرًا إذا انتهى المسار إلى اللانهاية (نظرياً) مع الزمن. ويكون مستقرًا بشكل متقارب (الاستقرار المطلوب عملياً في نظم التحكم) إذا وصل النظام في نهاية المسار إلى نقطة محددة (وضع التوازن) وبقي واستقر فيها مع تغيير الزمن (الوضع الدائم).

2.3 وضع التوازن لنظام [71]:

إذا كان النظام موصوفاً في فضاء الحالة بالمعادلة (1-2):

$$\dot{x}^* = f(x, t) \quad (1 - 2)$$

حيث:

x : شعاع الحالة للنظام (طوله n).

x^* : مشتق شعاع الحالة للنظام (طوله n).

$f(x, t)$: شعاع عناصره توابع لعناصر شعاع الحالة، x_1, x_2, \dots, x_n وللزمن t (طوله n).

بفرض أن للنظام الموصوف بالمعادلة (1-2) حلاً يبدأ عند الوضع الابتدائي x_0 هذا الحل هو:

$$x(t) = \phi(t; x_0, t_0) \quad (2-2)$$

أي أن النظام ينطلق من نقطة x_0 عند الزمن t_0 ثم يسير على المسار $x(t)$ مع تغير الزمن t . إن وضع التوازن للنظام الموصوف بالمعادلة (1-2) ونسميه x_e هو شعاع الحالة (نقطة في فضاء الحالة) الذي يحقق المعادلة:

$$x^* = 0 \rightarrow f(x_e, t) = 0 \quad (3-2)$$

فوضع التوازن هو النقطة (أو مجموعة النقاط) من فضاء الحالة التي لا يتغير فيها شعاع الحالة أي يستقر أو يبقى فيها النظام ثابتاً مع تغير الزمن. إن إيجاد وضع التوازن للنظام (أوضاع التوازن) يتم بحل المعادلة (3-2) وهذا لا يتطلب حل معادلات الحالة التفاضلية للنظام أي لا يتطلب حل المعادلة (1-2). سندرس فيما يأتي وضع التوازن للأنظمة المختلفة:

2.3.1 النظام الخطي المتجانس:

يوصف النظام الخطي المتجانس في فضاء الحالة بالمعادلة:

$$x^* = Ax$$

لإيجاد وضع التوازن نحل المعادلة:

$$x^* = 0 \rightarrow Ax_e = \bar{0}$$

حيث $\bar{0}$ شعاع صفري طوله n أي طول شعاع الحالة للنظام. إذا كانت المصفوفة A نظامية (nonsingular) سيكون الحل وحيداً هو:

$$x_e = \bar{0}$$

فوضع التوازن وحيد وهو مبدأ فضاء الحالة أو نقول إن وضع التوازن صفري. عندما تكون المصفوفة A غير نظامية (singular) يكون هناك عدد لا نهائي من الحلول أي عدد لا نهائي من أوضاع التوازن.

2.3.2 النظام الخطي غير المتجانس:

يوصف النظام الخطي غير المتجانس في فضاء الحالة بالمعادلة:

$$x^* = Ax + Bu$$

لإيجاد وضع التوازن نحل المعادلة:

$$x^* = 0 \rightarrow Ax_e + Bu = \bar{0}$$

إذا كانت المصفوفة A نظامية فالحل وحيد ولكنه ليس صفرياً.

2.3.3 النظام غير الخطي:

يوصف النظام غير الخطي في فضاء الحالة بالمعادلة:

$$\dot{x}^* = f(x, t, u)$$

ولإيجاد وضع التوازن نحل المعادلة:

$$x^* = 0 \rightarrow f(x_e, t, u) = \bar{0}$$

يمكن أن نحصل بحل المعادلة السابقة على حل وحيد، أو على عدد من الحلول أي عدد من أوضاع التوازن التي يمكن أن تكون معزولة أي منفصلة بعضها عن البعض، أو لا تكون معزولة (مسار).

2.4 طريقة ليابونوف لدراسة الاستقرار:

أسس طريقة ليابونوف في الاستقرار المهندس وعالم الرياضيات الروسي ألكسندر ميخائيلوف ليابونوف، وقد نشرت نتائج هذه الطريقة عام 1892 في روسيا، ثم ترجمت إلى الفرنسية عام 1907، وفي عام 1960 تم الاهتمام بهذه الطريقة من قبل مجمع مهندسي التحكم الأمريكي. تدرس طريقة ليابونوف استقرار نظم التحكم في فضاء الحالة، وتطبق هذه الطريقة على كل أنواع النظم الخطية ولا خطية، ثابتة زمنياً أو متغيرة مستمرة أو رقمية. كذلك يمكن انطلاقاً من طريقة ليابونوف الحصول على التحكم الأمثل بمفهوم ليابونوف وذلك بالتحكم التربيعي الأمثل [70].

لقد وضع ليابونوف طريقتين لدراسة استقرار النظم في فضاء الحالة، الطريقة الأولى تسمى الطريقة الأولى لليابونوف، وتعتمد على إيجاد حل تقريبي للنظام أي إيجاد شعاع الحالة للنظام بشكل تقريبي ثم دراسة الاستقرار، وتسمى أيضاً الطريقة غير المباشرة. أما الطريقة الثانية وتسمى الطريقة الثانية لليابونوف، فلا تحتاج إلى حل النظام ومن ثم فهي أكثر تطبيقاً في الواقع العملي وتسمى الطريقة المباشرة. يدرس ليابونوف استقرار نظم التحكم حول وضع التوازن الصفري المعزول دوماً وعندما يراد دراسة استقرار النظام حول وضع توازن غير صفري ينبغي نقل النظام إلى فضاء الحالة الذي مبدؤه نقطة التوازن المطلوبة (سحب محاور) [70].

2.4.1 المفهوم العام للاستقرار حسب ليابونوف [72,73]:

لتحليل استقرار نظام في فضاء الحالة يفترض ليابونوف وجود منطقتين كرويتين في فضاء الحالة: المنطقة الأولى $S(\delta)$ والمنطقة الثانية $S(\varepsilon)$. لتكن لدينا المعادلة (4-2):

$$\|x - x_e\| \leq k \quad (4 - 2)$$

k : عدد موجب

$\|x - x_e\|$: هو البعد الاقليدي Euclidean norm الذي يعطى بالمعادلة:

$$\|x - x_e\| = [(x_1 - x_{1e})^2 + (x_2 - x_{2e})^2 + \dots + (x_n - x_{ne})^2]^{1/2}$$

تمثل المعادلة (4-2) منطقة كروية في فضاء الحالة مركزها x_e ونصف قطرها k ومن ثم كل نقطة من فضاء الحالة تحقق المعادلة (4-2) تقع داخل أو على محيط المنطقة التي تمثلها هذه المعادلة. لنتعرف على منطقتي ليابونوف في فضاء الحالة.

• المنطقة الأولى $S(\delta)$:

تحتوي المنطقة الأولى $S(\delta)$ كل النقاط التي تشكل المحل الهندسي للمعادلة:

$$\|x - x_e\| \leq \delta \quad (5-2)$$

تمثل المعادلة (5-2) منطقة كروية نصف قطرها δ ، حيث δ عدد موجب ومركزها وضع التوازن x_e ، وتضم كل الاوضاع الابتدائية x_0 الممكنة للنظام أي كل الاوضاع التي يمكن أن ينطلق منها النظام حول وضع توازن محدد وتبعد عن وضع التوازن بعداً محدداً δ .

• المنطقة الثانية $S(\varepsilon)$:

تحتوي المنطقة الثانية $S(\varepsilon)$ كل النقاط التي تشكل المحل الهندسي للمعادلة (6-2):

$$\|\phi(t; x_0, t_0) - x_e\| \leq \varepsilon \quad (6-2)$$

تمثل ϕ مسار النظام المتغير مع الزمن والذي يبدأ بالنقطة x_0 عند الزمن t_0 . إن المنطقة الموصوفة بالمعادلة (6-2) هي منطقة كروية نصف قطرها ε ، حيث ε عدد موجب ومركزها وضع التوازن x_e وتضم كل المسارات الممكنة للنظام ϕ حول وضع توازن محدد.

2.4.2 الاستقرار حول وضع التوازن:

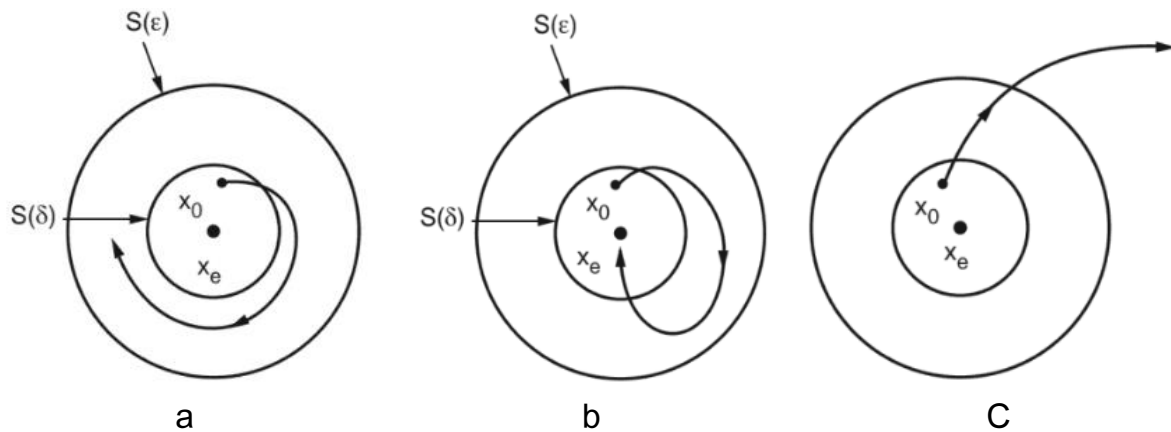
يعرف مفهوم الاستقرار حسب ليابونوف كما يأتي: "نقول عن وضع التوازن x_e لنظام أنه مستقر حسب ليابونوف إذا وجد منطقة $S(\delta)$ لكل منطقة $S(\varepsilon)$ بحيث أن المسارات التي تنطلق من $S(\delta)$ لا تغادر $S(\varepsilon)$ عندما تزداد t اللانهاية. ويكون النظام غير مستقر إذا وجد مساراً واحداً على الأقل ينطلق من $S(\delta)$ ويغادر $S(\varepsilon)$ ". يعرف ليابونوف عدداً من أنواع الاستقرار، سنوردها فيما يأتي.

• مفهوم الاستقرار المتقارب (Asymptotic Stability):

يعرف ليابونوف الاستقرار المقارب على النحو الآتي: "نقول عن نظام إنه مستقر بشكل متقارب بالنسبة لوضع توازن x_e ، إذا كان مستقراً بشكل عام وكان كل مسار يبدأ ضمن المنطقة $S(\delta)$ ينتهي إلى x_e دون أن يغادر المنطقة $S(\epsilon)$ عندما تزداد t إلى اللانهاية". أي أن جميع المسارات التي تنطلق من x_0 من تنتهي إلى x_e عندما تنتهي t إلى اللانهاية أي تستقر عند وضع محدد. إن الاستقرار المتقارب عملياً أكثر أهمية من الاستقرار بشكل عام وهو يحدد استقرار النظام في منطقة محددة من فضاء الحالة أي هو استقرار محلي.

• مفهوم الاستقرار المتقارب على نطاق واسع:

يعرف ليابونوف الاستقرار المقارب على نطاق واسع على النحو الآتي: "نقول عن نظام إنه مستقر بشكل متقارب على نطاق واسع لوضع التوازن محدد x_e إذا كان مستقراً في كامل فضاء الحالة". هذا يعني أن أي مسار ينطلق من أي مكان في فضاء الحالة ينتهي إلى x_e . أي تصبح δ لانهاية وتشمل $S(\delta)$ كامل فضاء الحالة. وبما أن كل المسارات تعود إلى x_e فإن وضع التوازن سكون وحيداً. يوضح الشكل (1-2) تمثيل بياني لمفهوم الاستقرار حسب ليابونوف.



الشكل (1-2) تمثيل بياني لمفهوم الاستقرار حسب ليابونوف

(a: الاستقرار بشكل عام، b: الاستقرار المتقارب. c: عدم الاستقرار) [72].

نستنتج مما سبق أنه لدراسة استقرار نظام حسب ليابونوف ينبغي القيام بالخطوات التالية [70]:

- 1- تحديد وضع (أو أوضاع) التوازن للنظام.
- 2- تحديد منطقة المسارات (تحديد ϵ).
- 3- تحديد المنطقة $S(\delta)$ لكل $S(\epsilon)$.
- 4- التأكد من أن كل المسارات التي تنطلق من $S(\delta)$ لا تغادر $S(\epsilon)$.

إن اختبار الاستقرار وفق هذه الخطوات طريقة غير عملية، لذلك لا بد من اللجوء إلى طريقة أو مفهوم رياضي أبسط لتحديد الاستقرار. من أجل ذلك لا بد من التعرف على بعض مفاهيم الرياضية الهامة التي نفيدينا في دراسة استقرار النظم في فضاء الحالة.

2.5 مفاهيم رياضية متعلقة بدراسة الاستقرار [72,73]:

2.5.1 التابع وحيد القيمة موجب التحديد (Positive definition: Pd):

يقال عن التابع وحيد القيمة $v(x)$ (وهو تابع معرف في فضاء الحالة وله قيمة واحدة عند كل نقطة من فضاء الحالة) إنه موجب التحديد Pd إذا كان أكبر تماماً من الصفر من أجل كل قيم x ويساوي الصفر في مبدأ فضاء الحالة وفق المعادلة (7-2):

$$\begin{aligned} v(x) &> 0 \text{ for all } t \geq t_0 \text{ for } x \neq \bar{0} \\ v(\bar{0}) &= \bar{0} \text{ for all } t \geq t_0 \end{aligned} \quad (7-2)$$

إذا كان التابع $v(x, t)$ تابعاً للزمن يكون موجب التحديد إذا كان محدوداً بتابع ثابت زمنياً $v(x)$ وفق المعادلة (8-2):

$$\begin{aligned} v(x, t) &> v(x) \text{ for all } t \geq t_0 \text{ for } x \neq \bar{0} \\ v(\bar{0}, t) &= \bar{0} \text{ for all } t \geq t_0 \end{aligned} \quad (8-2)$$

2.5.2 التابع وحيد القيمة شبه موجب التحديد (Positive Semi definition: Psd):

يقال عن التابع وحيد القيمة $v(x)$ إنه شبه موجب التحديد Psd إذا كان أكبر أو يساوي الصفر من أجل كل قيم x ويساوي الصفر في مبدأ فضاء الحالة وفق المعادلة (9-2):

$$\begin{aligned} v(x) &\geq 0 \text{ for all } t \geq 0 \text{ for } x \neq \bar{0} \\ v(\bar{0}) &= \bar{0} \end{aligned} \quad (9-2)$$

2.5.3 التابع وحيد القيمة سالب التحديد (Negative definition: Nd):

يقال عن التابع وحيد القيمة $v(x)$ إنه سالب التحديد Nd إذا كان $-v(x)$ موجب التحديد أو إذا كان أصغر تماماً من الصفر من أجل قيم x و يساوي الصفر في مبدأ فضاء الحالة وفق المعادلة (10-2):

$$\begin{aligned} v(x) &< 0 \text{ for all } t \geq 0 \text{ for } x \neq \bar{0} \\ v(\bar{0}) &= \bar{0} \end{aligned} \quad (10-2)$$

2.5.4 التابع وحيد القيمة شبه سالب التحديد (Negative Semi definition: Nsd):

يقال عن التابع وحيد القيمة $v(x)$ إنه شبه سالب التحديد Nsd إذا كان $v(x) -$ شبه موجب التحديد أو إذا كان أصغر أو يساوي الصفر من أجل كل قيم x ويساوي الصفر في مبدأ فضاء الحالة وفق المعادلة (11-2):

$$\begin{aligned} v(x) &\leq 0 \text{ for all } t \geq 0 \text{ for } x \neq \bar{0} \\ v(\bar{0}) &= \bar{0} \end{aligned} \quad (11 - 2)$$

2.5.5 التابع وحيد القيمة غير محدد:

يقال عن التابع وحيد القيمة $v(x)$ إنه غير محدد إذا كان موجباً (أو شبه موجب) التحديد في بعض نقاط فضاء الحالة، وسالباً (أو شبه سالب) التحديد في نقاط أخرى.

2.5.6 الصيغة التربيعية Quadratic Formula:

يقال عن التابع وحيد القيمة $v(x)$ إنه تابع تربيعي أو ذو صيغة تربيعية إذا أمكن كتابته بالصيغة المصفوفية الآتية (12-2):

$$v(x) = x^T P x = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{12} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1n} & P_{2n} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (12 - 2)$$

حيث إن المصفوفة P مصفوفة مربعة $n \times n$ ومتناظرة، و x^T منقول شعاع الحالة.

2.5.7 الصيغة التربيعية العقدية Complex Quadratic Formula:

يقال عن التابع وحيد القيمة $v(x)$ إنه تابع تربيعي عقدي أو ذو صيغة تربيعية عقدية: إذا أمكن كتابته بالصيغة المصفوفية الآتية (13-2):

$$v(x) = x^* P x = [\bar{x}_1 \quad \bar{x}_2 \quad \cdots \quad \bar{x}_n] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{12} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{1n} & P_{2n} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (13 - 2)$$

x^* : شعاع منقول مرافقات عناصر الشعاع Z .

P : مصفوفة مربعة $n \times n$ ومتناظرة عقدياً.

إذ تساعد الصيغة التربيعية والتربيعية العقدية في اختبار نوع التابع $v(x)$ كما يأتي:

1- يكون التابع موجب التحديد Pd عندما تكون جميع المعينات المتتابعة للمصفوفة P أكبر تماماً من الصفر.

2- يكون التابع شبه موجب التحديد Psd إذا كانت المعينات المتتابعة للمصفوفة P أكبر أو تساوي الصفر والمعين الأساسي مساوياً للصفر $|P|=0$.

3- يكون التابع $v(x)$ سالب التحديد Nd عندما يكون $-v(x)$ موجب التحديد، وكذلك يكون التابع $v(x)$ شبه سالب التحديد Nsd عندما يكون $-v(x)$ شبه موجب التحديد.

2.6 طريقة ليابونوف الثانية - الطريقة المباشرة [72]:

لقد انطلقت طريقة ليابونوف الثانية من نظرية تقليدية في الميكانيك تنص هذه النظرية على ما يأتي: "يكون النظام الميكانيكي المهتر مستقراً إذا كانت الطاقة الكلية للنظام متناقصة بشكل مستمر حتى الوصول إلى التوازن".

تعتمد طريقة ليابونوف المباشرة في دراسة الاستقرار على تعميم هذه النظرية وتنص على أنه "إذا كان للنظام وضع توازن مستقر بشكل متقارب فإن الطاقة المخزنة في النظام تتخامد مع الزمن حتى تصل إلى قيمتها الدنيا عند وضع التوازن".

لا يوجد طريقة بسيطة لتحديد الطاقة الكلية لنظام بصيغة رياضية محددة. لذلك اقترح ليابونوف تابعاً سُمي تابع ليابونوف وهو تابع افتراضي للطاقة. إذ يتصف تابع ليابونوف بما يأتي:

1- تابع وحيد القيمة في فضاء الحالة.

2- موجب التحديد Pd.

3- مستمر ومتناقص مع الزمن، أي أن مشتق هذا التابع بالنسبة للزمن سالب التحديد Nd أو Nsd.

نرمز لتابع ليابونوف $v(x, t)$ بالرمز $v(x)$ اختصاراً ومشتقه $v^*(x)$. كل تابع يحقق ما سبق هو تابع ليابونوف، ومن ثم فإن تابع ليابونوف لنظام ليس وحيداً.

2.6.1 نظرية ليابونوف في الاستقرار المتقارب:

إذا كان لدينا تابع وحيد القيمة موجب التحديد $v(x)$ ، فإن النقاط من فضاء الحالة التي تحقق $v(x) = C$ حيث C ثابت موجب، تقع على سطح كروي في فضاء الحالة ذي البعد n بجوار المركز.

إذا كان $v(x) \rightarrow \infty$ عندما $\|x\| \rightarrow \infty$ فإن هذا السطح سيشمل كامل فضاء الحالة. إن السطح الكروي $v(x) = C_1$ يقع بشكل كامل داخل $v(x) = C_2$ إذا كان $C_1 < C_2$.

إذا كان من الممكن وجود التابع وحيد القيمة موجب التحديد $v(x)$ لنظام ما، بحيث يكون المشتق الزمني لهذا التابع على طول مسار ما سالباً دوماً، عندها سيتناقص $v(x)$ مع تزايد الزمن حتى يصل للصفر وكذلك ستصل x إلى الصفر.

هذا يعني أن النظام مستقر بشكل متقارب بالنسبة لمبدأ فضاء الحالة. إن نظرية ليابونوف في الاستقرار التي هي تعميم لما سبق، تعطي الشرط الكافي للاستقرار المتقارب، يمكن صياغة هذه النظرية بالصيغة الآتية: يكون النظام الموصوف بالمعادلة (1-2) الذي له وضع توازن صفري (شعاع صفري) أي $f(\bar{0}, t) = \bar{0}$ لكل قيم t ، مستقرًا بشكل متقارب بالنسبة لمبدأ الاحداثيات، إذا وجد تابع وحيد القيمة $v(x, t)$ وكان مشتقه $v^*(x, t)$ مستمرًا وحقق ما يأتي:

$$v(x, t) \checkmark : \text{موجب التحديد Pd.}$$

$$v^*(x, t) \checkmark : \text{سالب التحديد Nd.}$$

2.6.2 نظرية ليابونوف في الاستقرار المتقارب على نطاق واسع:

تنص نظرية ليابونوف في الاستقرار المتقارب على نطاق واسع على ما يأتي: يكون النظام الموصوف بالمعادلة (1-1) والذي يملك وضع التوازن صفري أي $f(\bar{0}, t) = \bar{0}$ لكل قيم t ، مستقر بشكل متقارب على نطاق واسع بالنسبة لمبدأ الاحداثيات، إذا وجد تابع وحيد القيمة $v(x, t)$ وكان مشتقه الأول مستمرًا وحقق ما يأتي:

$$v(x, t) \checkmark : \text{موجب التحديد Pd.}$$

$$v^*(x, t) \checkmark : \text{سالب التحديد Nsd.}$$

$$V^*(\Phi(t; x_0, t_0), t) \checkmark : \text{لايساوي الصفر عندما } t \geq t_0 \text{ من أجل أي } t_0 \text{ أي } x_0 \neq 0 \text{ (أي لا يساوي الصفر على طول المسار الا في المبدأ).}$$

2.6.3 نظرية ليابونوف في الاستقرار العام:

تنص نظرية ليابونوف في الاستقرار العام على ما يأتي: يكون النظام الموصوف بالمعادلة (1-2) والذي له وضع توازن صفري أي $f(\bar{0}, t) = \bar{0}$ لكل قيم t ، مستقر بشكل عام بالنسبة لمبدأ الاحداثيات إذا وجد تابع وحيد القيمة $v(x, t)$ وكان مشتقه الأول مستمرًا وحقق ما يأتي:

$$v(x, t) \checkmark : \text{موجب التحديد Pd.}$$

$$v^*(x, t) \checkmark : \text{شبه سالب التحديد Nsd.}$$

2.6.4 نظرية ليابونوف في عدم الاستقرار:

تنص نظرية ليابونوف في عدم الاستقرار على ما يأتي: يكون النظام الموصوف بالمعادلة (1-2) والذي له وضع توازن صفري أي $f(\bar{0}, t) = \bar{0}$ لكل قيم t ، غير مستقر إذا وجد تابع وحيد القيمة $w(x, t)$ وكان مشتقه الأول مستمرًا وحقق ما يأتي:

$$w(x, t) \checkmark : \text{موجب التحديد Pd في منطقة ما حول المبدأ.}$$

✓ $w^*(x, t)$: موجب التحديد Pd في نفس المنطقة.

عند تطبيق طريقة ليابونوف لدراسة استقرار نظم التحكم غير الخطية يجب مراعاة الملاحظات الآتية:

- 1- تقدم طريقة الشروط الكافية للاستقرار وليس اللازمة للاستقرار.
- 2- تابع ليابونوف لنظام محدد غير وحيد. ومن ثم عندما لا نستطيع ايجاد تابع ليابونوف المناسب لدراسة الاستقرار أو الاستقرار المتقارب أو عدم الاستقرار فهذا لا يعطي نتيجة حول الاستقرار.
- 3- يمكن لتابع ليابونوف محدد أن يثبت أن نظاماً ما مستقراً أو مستقراً بشكل متقارب في منطقة Ω تضم وضع التوازن، وهذا لا يعني أن النظام غير مستقر خارج المنطقة Ω .
- 4- يوجد دوماً للنظم المستقرة أو المستقرة بشكل متقارب تابع ليابونوف يحقق المطلوب.

2.7 تحليل استقرار النظم الخطية الثابتة زمنياً حسب ليابونوف [70]:

يوجد عدة طرائق لاختبار الاستقرار المتقارب لنظم التحكم الخطية الثابتة زمنياً. إن الشرط اللازم والكافي للاستقرار المتقارب لنظام التحكم حول المبدأ، أن يكون لكل القيم الخاصة للمصفوفة A قسم حقيقي سالب، أو أن يكون لجذور المعادلة المميزة للنظام قسم حقيقي سالب، حيث أن المعادلة المميزة للنظام:

$$|SI - A| = S^n + a_1 S^{n-1} + \dots + a_{n-1} S + a_n$$

وبشكل مشابه فإن الشرط اللازم والكافي للاستقرار المتقارب للنظام المتقطع:

$$x(K + 1) = Gx(K)$$

أن تكون جميع القيم الخاصة للمصفوفة ذات جزء حقيقي أصغر من الواحد، أو أن تقع جذور المعادلة المميزة للنظام داخل الدائرة الواحدة، حيث إن المعادلة المميزة للنظام:

$$|ZI - G| = Z^n + a_1 Z^{n-1} + \dots + a_{n-1} Z + a_n$$

يعد إيجاد الجذور المعادلة المميزة للنظم ذات الدرجات الأعلى أو النظم ذات المعاملات اللارقمية أمراً صعباً. هنا يمكن دراسة استقرار النظم باستخدام طرائق بديلة. إن طريقة ليابونوف لدراسة الاستقرار تقدم حلاً تحليلياً بديلاً لدراسة استقرار نظم التحكم الخطية والثابتة زمنياً هذا الحل لا يتطلب إيجاد جذور المعادلة المميزة للنظام ولا يقدم فقط الشرط الكافي للاستقرار ولكن الشرط اللازم والكافي.

2.7.1 تحليل استقرار النظم الخطية الثابتة زمنياً المتجانسة [72]:

نعلم أن النظام الخطي الثابت زمنياً المتجانس يوصف في فضاء الحالة بالمعادلة الآتية:

$$\dot{x}^* = Ax$$

وضع التوازن لهذا النظام هو وضع التوازن الصفري $x_e = \bar{0}$ يمكن دراسة استقرار هذا النوع من الأنظمة حول وضع توازنه بسهولة باستخدام طريقة ليابونوف الثانية. يتم اختيار تابع ليابونوف لهذا النظام عادة وفق المعادلة (14-2):

$$v(x) = x^*Px \quad (14 - 2)$$

حيث P مصفوفة موجبة التحديد متناظرة عقدياً (عندما يكون x شعاعاً حقيقياً تكون P مصفوفة موجبة التحديد حقيقية متناظرة). لنحسب الآن المشتق الزمني $v(x)$ على طول أي مسار:

$$\begin{aligned} v^*(x) &= x^{**}Px + x^*Px^* \\ &= (Ax)^*Px + x^*PAx \\ &= x^*A^*Px + x^*PAx \\ &= x^*(A^*P + PA)x \end{aligned}$$

وبما أننا اخترنا $v(x)$ موجب التحديد، سيكون النظام مستقراً بشكل متقارب عندما $v^*(x)$ سالب التحديد، بفرض أن وفق العلاقة (15-2):

$$v^*(x) = -x^*Qx \quad (15 - 2)$$

عندها يجب أن يكون $Q = -(A^*P + PA)$ موجب التحديد Pd ، ومن ثم حتى يكون النظام $x^* = Ax$ مستقراً بشكل متقارب حول وضع توازنه يجب أن تكون Q موجبة التحديد.

بدلاً من أن نختار المصفوفة P موجبة التحديد، ونثبت من أن المصفوفة Q موجبة التحديد، فإنه من الأنسب أن نختار المصفوفة Q موجبة التحديد، ثم نثبت أن المصفوفة P موجبة التحديد. نحسب P من العلاقة (16-2):

$$-Q = A^*P + PA \quad (16 - 2)$$

بمساواة طرفي العلاقة السابقة نحصل على عدد من المعادلات يساوي $n(n+1)/2$ معادلة خطية نحدد منها عناصر المصفوفة P ، ثم نختبر كونها موجبة التحديد أم لا.

ملاحظات:

1- إذا كانت $v^*(x)$ في المعادلة (15-2) لا تساوي الصفر على طول أي مسار يمكن أن نختار Q شبه موجبة التحديد.

2- عندما نختار Q موجبة التحديد (أو شبه موجبة التحديد عندما $v^*(x)$ لا تساوي الصفر على طول المسار) ونحسب P بحل المعادلة (16-2) عندها يكون الشرط اللازم والكافي لاستقرار النظام بشكل متقارب حول وضع التوازن $x_e = \bar{0}$ أن تكون المصفوفة P موجبة التحديد.

3- غن استقرار النظام لا يتعلق باختيار محدد للمصفوفة Q المهم أن تكون موجبة التحديد.

4- نختار عادة المصفوفة Q الواحدية $Q = 1$.

خطوات دراسة استقرار نظام خطي ثابت زمنياً متجانس:

إن وضع التوازن لنظام خطي ثابت زمنياً متجانس هو مبدأ الاحداثيات في فضاء الحالة (بفرض أن A نظامية). ومن ثم يمكن تطبيق طريقة ليابونوف الثانية مباشرة لدراسة هذا النوع من النظم ونتبع الخطوات الآتية:

- 1- نفرض مصفوفة Q مربعة $n \times n$ بحيث تكون Pd وبشكل عام نفرضها الواحدية ما لم يطلب خلاف ذلك.
- 2- نحسب عناصر المصفوفة P من العلاقة (2-16).
- 3- نختبر نوع المصفوفة P ، إذا كانت موجبة التحديد كان النظام مستقراً بشكل متقارب والا فهو غير مستقر.
- 4- نحسب مشتق تابع ليابونوف (2-15) فإن كان لا يساوي الصفر إلا في المبدأ (هذا محقق من أجل Q الواحدية) كان النظام مستقراً بشكل متقارب على نطاق واسع.

2.7.2 تحليل استقرار النظم الخطية الثابتة زمنياً غير المتجانسة:

يوصف النظام الخطي الثابت زمنياً غير المتجانس في فضاء الحالة بالمعادلة الآتية:

$$\dot{x}^* = Ax + Bu$$

وضع التوازن لهذا النظام معزول ولكنه ليس وضع التوازن الصفري، لذلك لا بد من نقل النظام إلى فضاء الحالة الجديد الذي مركزه نقطة التوازن للنظام (سحب محاور). ثم دراسة استقرار النظام الناتج بطريقة ليابونوف الثانية تماماً كما تُدرس نظام التحكم المتجانس.

2.8 تحليل استقرار النظم المتقطعة حسب ليابونوف [70]:

نهتم في النظم المتقطعة بشكل مماثل للنظم المستمرة بالاستقرار المتقارب للنظام المتقطع حول وضع التوازن. نستخدم في نظم التحكم المتقطعة الفرق الأمامي المعطى بالعلاقة (2-17) بدلاً من $v^*(x)$.

$$\Delta v(x(KT)) = v(x(K+1)T) - v(x(KT)) \quad (17-2)$$

ليكن لدينا النظام المتقطع المعطى بالعلاقة (2-18):

$$x(K+1)T = f(x(KT)) \quad (18-2)$$

x : شعاع الحالة طوله n ، $f(x)$: شعاع يحقق $f(0) = 0$ ، T : زمن أخذ العينات.

يكون النظام المتقطع المعطى بالعلاقة (2-18) مستقراً بشكل متقارب على نطاق واسع حول وضع التوازن $x = 0$ عندما يكون لدينا تابع وحيد القيمة ومستمر يحقق المواصفات التالية:

$$v(x) > 0 \quad \checkmark \quad \text{من أجل } x \neq 0$$

$$\Delta v(x) < 0 \quad \checkmark \quad \text{من أجل } x \neq 0$$

$$v(0) = 0 \quad \checkmark$$

$$v(x) \rightarrow \infty \text{ عندما } \|x\| \rightarrow \infty \quad \checkmark$$

ويكون $v(x)$ تابع لياونوف.

2.8.1 تحليل استقرار النظم المتقطعة الخطية الثابتة زمنياً:

ليكن لدينا النظام المتقطع المعطى بالعلاقة (19-2):

$$x(K+1) = Gx(K) \quad (19-2)$$

حيث G مصفوفة مربعة $n \times n$ نظامية عناصرها ثابتة زمنياً. وضع التوازن للنظام هو وضع التوازن الصفري $x = 0$. سندرس استقرار هذا النظام حسب طريقة لياونوف الثانية.

نختار تابع لياونوف للنظام كما في العلاقة (20-2):

$$v(x(K)) = x^*(K)Px(K) \quad (20-2)$$

حيث P مصفوفة موجبة التحديد، ومن ثم:

$$\begin{aligned} \Delta V(x(K)) &= v(x(K+1)) - v(x(K)) \\ &= x^*(K+1)Px(K+1) - x^*(K)Px(K) \\ &= [Gx(K)]^* P[Gx(K)] - x^*(K)Px(K) \\ &= x^*(K)G^*PGx(K) - x^*(K)Px(K) \\ &= x^*(K)(G^*PG - P)x(K) \end{aligned}$$

بما أننا اخترنا $v(x(K))$ موجبة التحديد فإن الاستقرار التقاربي للنظام يتطلب أن تكون $\Delta v(x(K))$ سالبة التحديد وفق العلاقة (21-2)، إذاً تعطى قيمة Q بالعلاقة (22-1):

$$\Delta V(x(K)) = x^*(K)Qx(K) \quad (21-2)$$

$$Q = -(G^*PG - P) \quad (22-2)$$

وبالتالي لتحقيق الاستقرار التقاربي للنظام الموصوف بالمعادلة (19-2) يكفي أن تكون Q في المعادلة (22-2) موجبة التحديد.

2.8.2 تحليل استقرار النظم المتقطعة الناتجة من تقطيع نظام مستمر:

إذا كان النظام موصوفاً في فضاء الحالة، فإن الاستقرار المتقارب حول وضع التوازن لنظام متقطع ناتج من تقطيع نظام مستمر مكافئ لاستقرار النظام المستمر الذي نتج عن النظام المتقطع.

ليكن النظام المستمر $\dot{x} = Ax$ والنظام المتقطع الموافق $x(K+1) = Gx(K)$ حيث تكون قيمة G وفق العلاقة (23-2):

$$G = e^{AT} \quad (23 - 2)$$

إذا كان النظام المستمر مستقراً بشكل متقارب، أي كل القيم الخاصة للمصفوفة A ذات جزء حقيقي سالب، فإن:

$$\|G^n\| \rightarrow 0 \text{ as } n \rightarrow \infty$$

ومن ثم فإن النظام المتقطع مستقر بشكل متقارب أيضاً. وذلك لأنه إذا كانت λ_1 قيمة خاصة للمصفوفة A فإن القيمة الخاصة للمصفوفة G هي $e^{\lambda_1 T}$ ، حيث إن $abs(e^{\lambda_1 T}) < 1$ ، إذا كانت $\lambda_1 T$ سالبة.

2.9 الاستقرار في الأنظمة ذات التأخيرات الزمنية:

حسب ليابونوف، وبالنسبة للنظام المعطى بالمعادلة (24-2) والممثل في فضاء الحالة، فإنه إذا وجدت الدالة الممثلة بالمعادلة (18-2).

$$\dot{x}^* = Ax(t) + \sum_{i=1}^L A_i x(t - \tau_i) \quad (24 - 2)$$

حيث $\tau_i > 0$ التأخيرات الزمنية.

$$v(x, t) = A^T P A + \sum_{i=1}^L \int_0^{\tau_i} x(t - \tau_i)^T P_i x(t - \tau_i) dt \quad (25 - 2)$$

حيث: $P > 0; P_1 > 0; \dots \dots \dots; P_L > 0$

$$\frac{dv(x, t)}{dt} < 0; \text{ for every state } x$$

فإن النظام يحقق الاستقرار التقاربي، أي أن:

$$x \rightarrow 0 \text{ AS } t \rightarrow \infty$$

وبالتالي يمكن التوصل إلى العلاقة (26-2):

$$\frac{dv(x, t)}{dt} = y(t)^T \quad (26 - 2)$$

حيث:

$$W = \begin{bmatrix} A^T P + P A + \sum_{i=1}^L P_i & P_1 & \dots & P_L \\ A_1^T & -P_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_L^T & 0 & \dots & -P_L \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x(t - \tau_1) \\ \vdots \\ x(t - \tau_L) \end{bmatrix}$$

عندها يمكن التحقق من استقرار النظام إذا أوجدنا الثوابت $P; P_1; \dots; P_L$ التي تحقق المتراجحات الخطية المصفوفية (LMI) الموضحة بالعلاقة (27-2):

$$W < 0; P > 0; P_1 > 0; \dots; P_L > 0 \quad (27 - 2)$$

بإضافة الدخل $u(t)$ إلى النظام نحصل على العلاقة (28-2):

$$\dot{X}^* = Ax(t) + Bu(t) + \sum_{i=1}^L A_i x(t - \tau_i) \quad (28 - 2)$$

وبما أن $u(t) = kx(t)$ فإنه يمكن تمثيل النظام السابق ليصبح وفق العلاقة (29-2):

$$\dot{x}^* = (A + Bk)x(t) + \sum_{i=1}^L A_i x(t - \tau_i) \quad (29 - 2)$$

ومن أجل جعل النظام مستقرًا يجب تحقيق شروط دالة ليايرونوف السابقة من أجل النظام الجديد، وتصبح الشروط الجديدة للاستقرار موضحة بالعلاقة (30-2):

$$W = \begin{bmatrix} (A + Bk)^T P + P(A + Bk) + \sum_{i=1}^L P_i & P_1 & \dots & P_L \\ A_1^T & -P_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_L^T & 0 & \dots & -P_L \end{bmatrix} < 0$$

$P > 0; P_1 > 0; \dots; P_L > 0 \quad (30 - 2)$

بضرب كل كتلة في المصفوفة W من اليمين واليسار بالقيمة P^{-1} وجعل:

$$Q = P^{-1}, Q_i = P^{-1} P_i P^{-1}, Y = KP^{-1}$$

يصبح الشرط السابق للاستقرار موضحاً بالعلاقة (31-2):

$$x = \begin{bmatrix} AQ + QA^T + BY + \sum_{i=1}^L Q_i & A_1 Q & \dots & A_L Q \\ QA_1^T & -Q_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ QA_L^T & 0 & \dots & -Q_L \end{bmatrix} < 0 \quad (31 - 2)$$

وتصبح مسألة الاستقرار هي إيجاد الحل لمجموعة متراجحات خطية مصفوفية LMI من أجل المتحولات:

$$Q, Y, Q_1, \dots, Q_L$$

• تطبيق عملي 1: لبرهان استقرار النظام المتغير مع الزمن:

$$x_i^* = A_i x, i = 1, 2, 3$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -0.8 & 1.5 \\ 1.3 & -2.7 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} -1.4 & 0.9 \\ 0.7 & -2.0 \end{bmatrix}$$

يكفي إيجاد مصفوفة ليابونوف P ، حيث تؤول المسألة إلى إيجاد P المحققة للمتراجحات التالية:

$$A_1^T P + P A_1 < 0$$

$$A_2^T P + P A_2 < 0$$

$$A_3^T P + P A_3 < 0$$

$$P > I$$

بعد تطبيق مسألة LMI وفق البرنامج التالي بلغة MATLAB نحصل على المصفوفة $Psolution$:

Setlmiis();

P=lmivar(1,[2 1])

lmiterm([1 1 1 p],a1,'s')

lmiterm([2 1 1 p],a2,'s')

lmiterm([3 1 1 p],a3,'s')

lmiterm([-4 1 1 p],1,1)

lmiterm([4 1 1 0],1)

lmiis=getlmiis

[tmin,xfeas]=feasp(lmiis)

Psolution=dec2mat(lmiis,xfeas,P)

$$Psolution = \begin{bmatrix} 5.58 & -8.35 \\ -8.35 & 18.65 \end{bmatrix}$$

• تطبيق عملي 2: يمكن إيجاد حل مقبول للمعادلة التالية:

$$A^T x + xA + xBR^{-1}B^T x + Q < 0, x > 0, R > 0$$

$$A = \begin{bmatrix} -2 & -2 & -1 \\ -3 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} -2 & 1 & -2 \\ 1 & -2 & -4 \\ -2 & -4 & -2 \end{bmatrix}, R = I_2$$

بالاعتماد على متمم شور، حيث يمكن تمثيل المسألة السابقة بالشكل التالي:

$$x > 0, Q > 0, R > 0$$

$$\begin{bmatrix} A^T x + xA + Q & xB \\ B^T x & -R \end{bmatrix} < 0$$

الفصل الثالث

أنظمة التأخير الزمني

Time Delay Systems

3.1 مقدمة:

يُعرّف التأخير الزمني أنه الزمن الفاصل بين بداية الحدث في نقطة ما من النظام واستجابة النظام لذلك الحدث في نقطة أخرى منه، ويعرفه الباحثون بمصطلحات متعددة منها الزمن الميت [74,75] (Dead time) أو تباطؤ النقل (Transport Lag). وتعتبر مشكلة التأخير الزمني في أنظمة التحكم من المشكلات الأكثر شيوعاً، إذ تبدي هذه الأنظمة تأخيراً زمنياً في سلوكها الديناميكي. وتعاني الأنظمة الصناعية [76] بالإضافة إلى أنظمة أخرى مثل الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية والاقتصادية ونظم التحكم الشبكية [77,78] بأنواعها المختلفة السلوكية واللاسلكية [79] وغيرها من النظم التحكمية من تأخير زمني في سلوكها الديناميكي وقد يتواجد هذا التأخير الزمني في الجملة نفسها أو ينشأ من المتحكم [74].

يعتبر التأخير الزمني مسؤولاً بشكل رئيس عن زيادة اضطراب حلقة التحكم في نظم التحكم، ووفقاً لهذا التأخير فإن أنظمة التحكم تميل إلى الاهتزاز، ويحدث تشوه وعدم استقرار في الاستجابة التحكمية.

هناك العديد من الأسباب المؤدية إلى حدوث التأخير الزمني ضمن نظم التحكم منها التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية بين العنصر المتحكم به (مشغل) والحساس [77,78]، والتأخير الزمني الذي يظهر عند تقريب النماذج الرياضية ذات المرتبة الأعلى إلى نماذج رياضية ذات مرتبة أقل، والتأخير الزمني الناتج عن الحسابات الرياضية أو أزمنة المعالجة ضمن المتحكمات، والتأخير الزمني ضمن عمليات نقل المعلومات والطاقة والسوائل وغيرها.

3.2 نظم التأخير الزمنية:

إن ظاهرة التأخير الزمني منتشرة في الواقع المعاصر بشكل كبير، فهي موجودة في أي نظام يعمل على نقل المعلومات أو المواد. إذ إن التأخير الزمني في تسليم المعطيات يؤكد الحدوث، وإن وجود هكذا تأخير يزيد من تعقيد النظام وتحليله وتصميم وحدة التحكم الخاصة به [79].

ويعرف التأخير الزمني بأنه الفاصل الزمني بين تطبيق تغيير ما على دخل النظام وبين ملاحظة تأثير هذا التغيير على خرجه. إذ إن زمن التأخير يتغير تبعاً لدرجة تعقيد النظام وكلما ازداد التأخير كلما ازدادت عملية تحليل النظام والتصميم تعقيداً.

إن التأخير الزمني الطويل جداً يمكن أن يكون كارثياً لأنه قد يؤدي إلى الخلط بين النظام مع تأخير والنظام دون تأخير. وهذا يحدث عندما لا يمكن ملاحظة تأثير هذا التأخير في الوقت المناسب. في الأنظمة التي لا تحتوي على تأخير زمني، يمكن مواجهة أي خطأ في الخرج بشكل مباشر عن طريق تطبيق التغيير في الدخل، وإذا لم يتم تحسس الخطأ والتخلص منه مباشرة، سيتوجب على ذلك اتخاذ المزيد من الإجراءات. بالمقابل فإنه في أي نظام تأخير زمني، يجب عدم توقع تأثير مباشر للخطأ على الخرج. حيث إن أثر تطبيق أي تغيير على الدخل سيتم

ملاحظته على الخرج بعد تأخير زمني [80]. لذلك من المهم دراسة هذا التأخير جيداً حتى لا يبالغ بالخطأ وتتفاقم الأخطاء بدلاً من تحسينها.

إن تصميم نظام تغذية خلفية مع وجود تأخير زمني يشكل تحدياً مع مرور الوقت. ففي حالة وجود تأخير في قناة القياس Measurement channel، فإن وحدة التحكم ستتلقى المعلومات في الوقت الخطأ. كما يمكن أن تحدث حالة أخرى عند وجود تأخير في قناة العمل Actuation channel في هذه الحالة تتخفض كفاءة النظام بشكل كبير بسبب تطبيق إشارة التحكم في الوقت الخطأ (أي بعد التأخير الزمني) [81].

يُعبّر عن التأخير الزمني في أنظمة الزمن المستمر (Continuous Time System: CTS) بالشكل $e^{-s\tau}$ وهذا يؤدي إلى زيادة أبعاد مصفوفة النظام إلى اللانهاية. ونتيجة لذلك، فإن العديد من طرائق التصميم التقليدية لا يمكن تطبيقها مع وجود تأخير زمني. بينما في أنظمة الزمن المتقطعة (Discrete Time System: DTS) يعتبر التأخير من رتبة $z^{-\tau}$ ويؤدي إلى زيادة أبعاد النظام الرقمي، وبالتالي يمكن اعتباره جزءاً من النظام. في كلتا الحالتين، نلاحظ بأن التأخير الزمني يزيد من تعقيد النظم المستمرة والمتقطعة بشكل كبير.

بالإضافة إلى ذلك فإن التأخير الزمني يزيد من تأخر الصفحة Phase Lag مسبباً عدم الاستقرار في النظام وينقص نسبياً من ربح المتحكم. ونتيجة لذلك لا بد من وضع القيود على أداء عملية التحكم.

عند وجود تأخير في الحالة الداخلية للنظام، بالإضافة إلى المشاكل السابقة المرتبطة بالتأخير، سيؤدي أيضاً إلى تغيير في السلوك الديناميكي للنظام بشكل كبير مقارنة بسلوك الأنظمة الخالية من التأخير.

في حالة وجود تأخير زمني في حلقة التغذية العكسية فإنه يمكن اعتباره نوع من أنواع الاضطرابات التي قد تؤدي إلى تغيير كبير وفوري في استجابة النظام وبالتالي، فإن استجابة النظام لتغيرات التغذية الخلفية ستكون غير متجانسة [82].

أنظمة التأخير الزمني والتي تدعى أيضاً بالأنظمة ذات التأخر اللاحق أو الزمن الميت أو معادلات بمعاملات إزاحة، أو معادلات فروق تفاضلية. وتعتبر العلاقة (1-3) هي أبسط مثال على هذه الأنظمة.

$$\dot{x}(t) = -x(t - \tau), \quad x(t) \in \mathbb{R}, \quad (1 - 3)$$

حيث $\tau > 0$ هو التأخير الزمني. يظهر التأخير الزمني غالباً في العديد من أنظمة التحكم مثل أنظمة التحكم بالطائرات أو أنظمة التحكم الكيمائية أو شبكات الاتصالات إما في متحولات الحالة أو في دخل التحكم أو في قياسات الحساسات والمشغلات. إذ يمكن أن يوجد تأخير في النقل أو الاتصالات أو القياسات.

غالباً ما تعمل نظم التحكم بوجود تأخير زمني، إذ يعود ذلك بشكل أساسي للزمن الذي تأخذه لتحصيل المعلومات اللازمة لصنع القرار وأخذ قرار التحكم وتنفيذ قرار (فعل) التحكم.

تسبب عادة المشغلات والحساسات والشبكات التي تدخل في حلقة التحكم تأخيراً زمنياً. وهكذا فإن التأخير الزمني يدخل بشكل أساسي في مجال الاتصالات وتقنيات المعلومات ويشكل تحدياً من حيث استقرار نظم التحكم الشبكية أو السرعة العالية في شبكات الاتصال.

3.3 المعادلة المميزة للتأخير الزمني:

من أجل تأخير زمني معطى $\tau \geq 0$ ، تأخذ معادلة النظام الشكل التالي:

$$y(t) = u(t - \tau) \quad (2 - 3)$$

وعندها يأخذ تابع النقل لعنصر التأخير الزمني الشكل $e^{-\tau s}$ ويوضح الشكل (1-3) التأخير الزمني الموضح بالعلاقة (2-3).

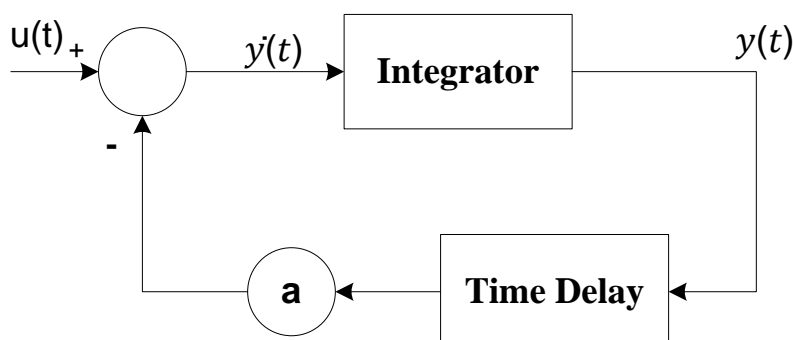


الشكل (1-3): مخطط التأخير الزمني.

أما في الأنظمة الديناميكية التي يتواجد التأخير الزمني فيها ضمن التغذية العكسية فيمكن التعبير عن معادلة النظام بالعلاقة (3-3).

$$\dot{y}(t) + ay(t - \tau) = u(t) \quad (3 - 3)$$

ويعبر عنها بالمخطط الصندوقي المبين بالشكل (2-3)

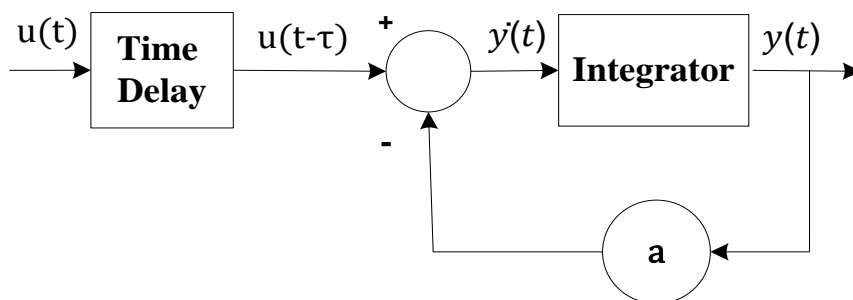


الشكل (2-3): التأخير الزمني في الانظمة ذات التغذية العكسية

وإذا تواجد التأخير الزمني في الدخل فإن معادلة النظام تكون وفق العلاقة (4-3).

$$\dot{y}(t) + ay(t) = u(t - \tau) \quad (4 - 3)$$

ويعبر عن ذلك بالمخطط الصندوقي المبين بالشكل (3-3).

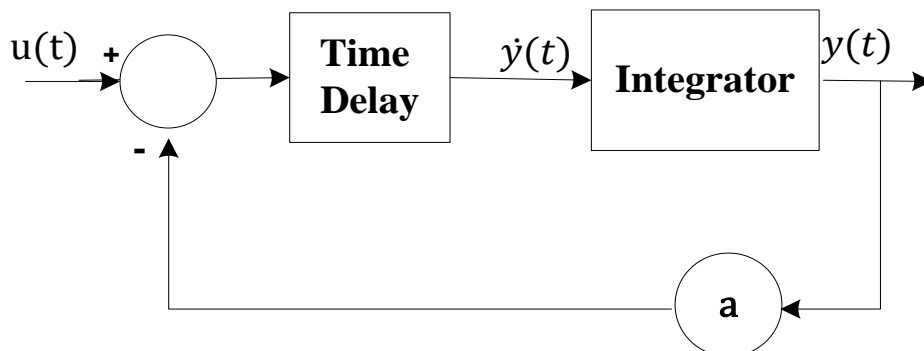


الشكل (3-3): التأخير الزمني في الدخل.

وفي حال تواجد التأخير الزمني في الحلقة المفتوحة تصبح معادلة النظام وفق العلاقة (5-3).

$$\dot{y}(t) = -ay(t - \tau) + u(t - \tau) \quad (5 - 3)$$

ويمكن تمثيل هذه الحالة بالمخطط الصندوقي المبين بالشكل (4-3).

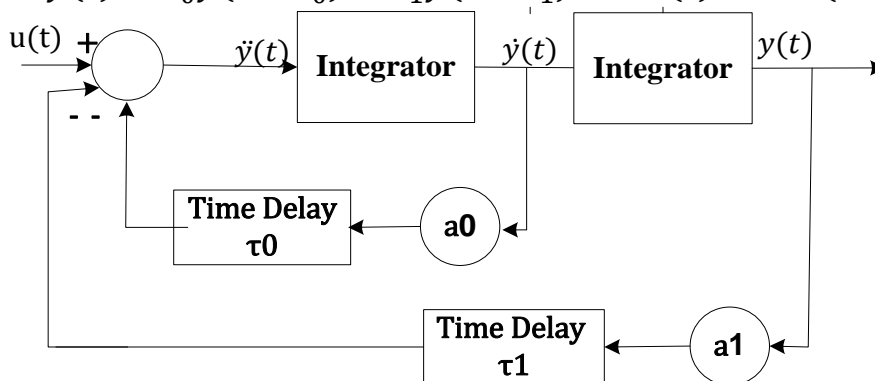


الشكل (4-3): التأخير الزمني في الحلقة المفتوحة.

وفي الأنظمة ذات المراتب العليا Higher Order Systems مع وجود التأخيرات الزمنية المتعددة، يمكن التعبير

عنها بالعلاقة (6-3). ويوضح المخطط الصندوقي المبين بالشكل (5-2) هذه الحالة.

$$\ddot{y}(t) + a_0\dot{y}(t - \tau_0) + a_1y(t - \tau_1) = u(t) \quad (6 - 3)$$



الشكل (5-3): التأخير الزمني في الأنظمة ذات المراتب العليا [83].

إن النظام الموضح بالعلاقة (3-6) يمكن أن يمثل بمتغيرات الحالة وفق الشكل المصفوفي (3-7):

$$\begin{aligned} y(t) &= x_1(t), \quad \dot{y}(t) = x_2(t) \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -a_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t - \tau_0) \\ x_2(t - \tau_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t - \tau_1) \\ x_2(t - \tau_1) \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (7-3) \end{aligned}$$

3.4 خصائص أنظمة التأخير الزمني:

نستعرض الآن مجموعة من خصائص أنظمة التأخير الزمني الخطية، ونأخذ كمثال نظاماً مستمراً معرّفاً بالعلاقة (3-8)، ونظاماً متقطعاً معرّفاً بالعلاقة (3-9):

$$G(s) = G_0(s)e^{-s\tau} \quad (8-3)$$

$$G(z) = G_0(z)z^{-\tau} \quad (9-3)$$

حيث إن كل من $G_0(s)$ و $G_0(z)$ توابع النقل لكل نظام بدون التأخير.

وفيما يلي مواصفات هذه الأنظمة:

- نظام يحوي فقط تأخيراً زمنياً هو نظام خطي.
- نظام التأخير الزمني المستمر هو من رتبة غير منتهية أو عدد أبعاد غير منته بسبب الحاجة إلى عدد لانهائي من القيم لوصف حالة النظام في كل لحظة من الزمن.
- يمكن توصيف نظام التأخير الزمني المستمر من خلال نظام المعادلات التفاضلية.
- يمكن وصف أنظمة التأخير الزمني المتقطعة عن طريق معادلات الفروق Difference Equations عندما يكون زمن أخذ العينات ثابتاً والتأخير الزمني عدد صحيح من زمن أخذ العينات.
- وبالمقابل إذا كان زمن أخذ العينات غير ثابت، فلا يمكن وصف أنظمة التأخير الزمني المتقطعة عن طريق معادلات الفروق ولكن بمعادلات مختلطة من معادلات الفروق والمعادلات التفاضلية.

3.5 نمذجة التأخير الزمني:

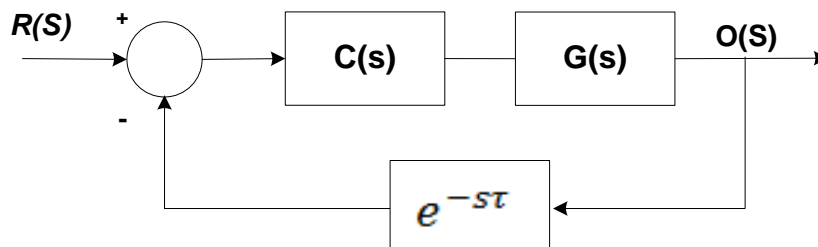
تختلف نمذجة التأخير الزمني في الأنظمة تبعاً لنوع الأنظمة (مستمرة أو متقطعة) وتبعاً لمكان تواجد التأخير (تأخير في الخرج أو تأخير في النقل).

3.5.1 الأنظمة المستمرة:

إن تحويل لابلاس للتأخير الزمني الصافي يعطى بالعلاقة (3-10):

$$f(t - \tau) \Leftrightarrow e^{-s\tau} F(s) \quad (10-3)$$

حيث يمثل τ التأخير الزمني مقدراً بالثواني، وبالتالي فإنه من السهل اشتقاق تابع النقل للأنظمة التي تحتوي على تأخير زمني. على سبيل المثال، إن نظام $G(s)$ مع وحدة تحكم $C(s)$ على التسلسل ووحدة تغذية عكسية واحدة، وجهاز يتحسس التأخير الزمني في الخرج (a sensor delay)، يملك تابع النقل الذي يمكن حسابه من الشكل (6-3).

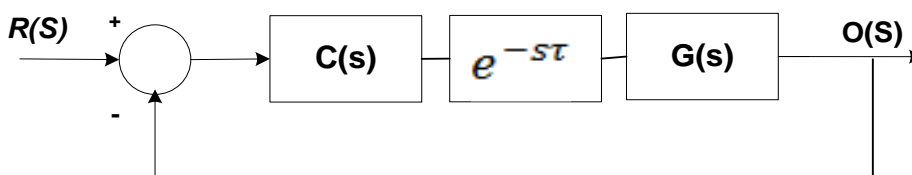


الشكل (6-3): نظام تغذية خلفية مع تأخير في الحساس.

حيث يعطى تابع النقل للنظام السابق بالعلاقة (3-11):

$$H(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)e^{-s\tau}} \quad (11-3)$$

إذا حدث تأخير في نقل الخرج من وحدة تحكم $C(s)$ إلى النظام $G(s)$ ، فإن مخطط النظام سيصبح على النحو الموضح في الشكل (7-3).



الشكل (7-3): نظام تغذية خلفية مع تأخير المشغل.

ويعبر عندها عن تابع النقل بالعلاقة (3-12):

$$H(s) = e^{-s\tau} \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)e^{-s\tau}} \quad (12-3)$$

نلاحظ أن تابع النقل في المعادلة (3-12) هو عبارة عن نسخة مؤخرة عن تابع النقل الموضح بالمعادلة (3-11).

هناك بعض التقريبات التي يمكن استخدامها في التأخير الزمني والتي لها شكل كثير الحدود كون المشكلة تكمن في حقيقة أن التأخير لا يمكن تمثيله بكثير حدود، وهي [84]:

$$e^{-s\tau} \cong 1 - s\tau + \frac{(s\tau)^2}{2} - \frac{(s\tau)^3}{3} \dots \quad (13 - 3)$$

$$e^{-s\tau} \cong \frac{1}{1 + s\tau + \frac{(s\tau)^2}{2} + \frac{(s\tau)^3}{6} \dots} \quad (14 - 3)$$

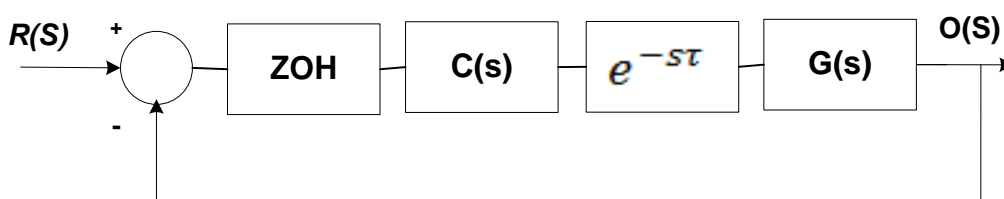
$$e^{-s\tau} \cong \frac{1 - \frac{s\tau}{2}}{1 + \frac{s\tau}{2}} \quad (15 - 3)$$

$$e^{-s\tau} \cong \frac{1}{\left[1 + \frac{s\tau}{n}\right]^n} \quad (16 - 3)$$

يمكن زيادة دقة الحساب من خلال التقريب الموضح في المعادلة (16 - 3) وذلك كلما كانت قيمة n كبيرة، وبالقيام بمجموعة من التجارب باستخدام برامج التصميم يمكن توضيح نقاط القوة والضعف في عملية استخدام كل من العلاقات التقريبية السابقة.

3.5.2 الأنظمة المتقطعة:

لنفترض أن لدينا نظاماً متقطعاً بتأخير زمني (تأخير المشغل) كما هو موضح في الشكل (8-3).



الشكل (8-3): نظام متقطع مع تأخير المشغل.

ويملك تابع النقل في المجال النبضي للنظام السابق العلاقة (17 - 3):

$$H(z) = \frac{Q(z)}{1+Q(z)} \quad (17 - 3)$$

حيث أن $Q(z)$ معطى بالعلاقة (18 - 3):

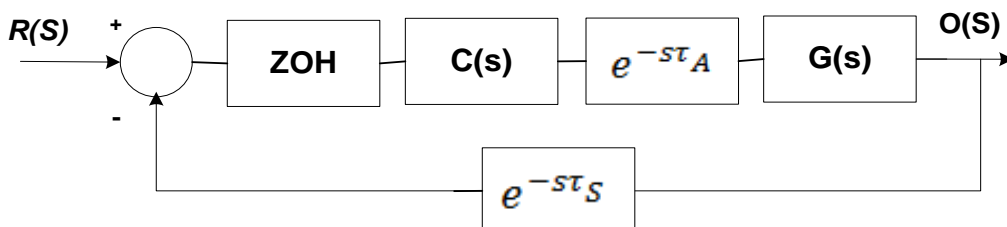
$$Q(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{C(s)G(s)e^{-s\tau}}{s} \right\} \approx z^{-N} \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{C(s)G(s)}{s} \right\} \quad (18 - 3)$$

وذلك من أجل $N = f_s \tau$.

حيث N : عدد العينات المؤخرة، f_s تردد أخذ العينات، τ التأخير الزمني في النظام.

أهمية النتيجة أعلاه هي أنه حتى مع التأخير، فإنه تم المحافظة على طبيعة كثير الحدود ضمن المجال Z . هذا يعني أننا يمكن استخدام تقنيات تصميم الأنظمة المتقطعة على أنظمة مستمرة مع تأخير زمني، شريطة أن يتم تعيين تردد أخذ العينات f_s بقيمة كبيرة بما يكفي لإجبار الأنظمة المتقطعة من الاقتراب من الأنظمة المستمرة.

يوضح الشكل (9-3) نظام متقطع عام يحتوي على كل من تأخير الحساس وتأخير المشغل.



الشكل (9-3): نظام متقطع مع تأخير المشغل وتأخير الحساس.

في هذا النظام فإن المتحكم $C(s)$ ومكافئه الرقمي هو $D(z)$ هما العنصران الوحيدان في النظام القابلان للتبديل والتعديل من قبل المصمم. عند العمل في المجال Z يمكن التعبير عن التأخيرات ضمن هذا النظام باستخدام أزمنة أخذ العينات كما يلي:

$$N_A = f_s \tau_A$$

$$N_S = f_s \tau_S$$

حيث: N_S, N_A عدد العينات المؤخرة من أجل التأخير الزمني للمشغل وتأخير الحساس τ_S, τ_A على الترتيب و f_s تردد أخذ العينات.

عندها يعطى تابع النقل لنظم الحلقة المغلقة في المجال z بالعلاقة (3 - 19):

$$H(z) = \frac{O(z)}{R(z)} = \frac{z^{-N_A} \left(\frac{z-1}{z} \right) Z \left\{ \frac{C(s)G(s)}{s} \right\}}{1 + z^{-(N_A+N_S)} Z \left\{ \frac{C(s)G(s)}{s} \right\}} \quad (19 - 3)$$

3.6 التحكم بأنظمة التأخير الزمني:

لاقت مشكلة التأخير الزمني في الأنظمة اهتماماً ملحوظاً في الأبحاث المختلفة خلال العقود الأخيرة الماضية، حيث قُدمت أبحاث موسعة في طرائق التحكم التقليدية لإيجاد حلول فعالة لهذه المشكلة والتخلص من الآثار السلبية للتأخير الزمني.

وبشكل عام يمكن تقسيم الطرائق المتبعة لتعويض التأخير الزمني في التحكم التقليدي إلى طريقتين أساسيتين هما:

1. المتحكمات ذات البارامترات المحسنة أو متحكمات PI, PID.

2. المتحكمات ذات البنية المحسنة هيكلياً أو معوضات الزمن الميت: Dead Time Compensators (DTC).

3.6.1 المتحكمات ذات البارامترات المحسنة:

يقصد بالمتحكمات ذات البارامترات المحسنة المتحكمات ذات البنية الثابتة مع معاملات قابلة للتعديل، ويعد متحكم PID من أشهر هذه المتحكمات.

يعتبر متحكم PID من المتحكمات الأكثر شهرة واستخداماً في تطبيقات التحكم. إذ يمكن استخدامه في كل من النظم ذات التأخير الزمني والنظم الخالية من التأخير الزمني، ويمكن تطبيقه في الزمن المستمر أو المتقطع، ويتسم بالبساطة. يمتلك المتحكم PID ثلاث بارامترات وهي عامل التناسب والتكامل والتفاضل، كما يمكن الحصول على متحكمات مختلفة من هذا المتحكم نتيجة التركيبات المختلفة لبارامتراته مثل متحكم PI ومتحكم PD، ويعطى الشكل القياسي لمتحكم PID بالعلاقة (20 - 3) :

$$C(s) = P + I + D = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (20 - 3)$$

k_p الربح التناسبي، k_i الربح التكاملي و k_d الربح التفاضلي.

كما يمكن التعبير عنه بالشكل القياسي (21 - 3):

$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (21 - 3)$$

T_i الزمن التكاملي، T_d الزمن التفاضلي.

نتيجة لبساطة متحكم PID فإنه يمكن استخدامه بسهولة في مجالات مختلفة ميكانيكية وكهربائية وصناعية، فهو يأخذ بعين الاعتبار بارامتراته الثلاثة P,I,D التي تعبر بالترتيب عن معلومات خطأ التحكم control error في الماضي والحاضر والمستقبل، لذلك فهي قادرة على تزويد أداء تحكمي مقبول.

تستخدم متحكمات PID بشكل واسع في أنظمة التأخير الزمني. وفي معظم الحالات فإن تصميم المتحكم من أجل الأنظمة ذات التأخير الزمني يعتمد على الطرائق المستخدمة غالباً في تصميم المتحكمات من أجل النظم التي لا تعاني من تأخير زمني. وعملياً يُبدي متحكم PID أداءً جيداً إذا كانت متطلبات الأداء للنظام المطلوب متواضعة. وبشكل عام وباستخدام قواعد ضبط البارامترات tuning rules سيكون صالحاً في مجالات عملية واسعة، إلا أن متحكم PID ليس مناسباً للتحكم بالأنظمة المسيطر عليها من قبل التأخير الزمني بشكل كبير، وينصح بتطبيق هذا المتحكم من أجل الأنظمة المنخفضة أو متوسطة الدرجة مع تأخير زمني صغير حيث يتم ضبط (توليف) المتحكم باستخدام قواعد ضبط البارامترات.

تعرف عملية ضبط (توليف) المتحكم بأنها العملية التي يتم فيها اختيار بارامترات المتحكم لتقابل الأداء المطلوب للجملة (للنظام)، اقترح العالمان Ziegler and Nichols طريقتان لضبط بارامترات المتحكم PID أي قواعد لتحديد قيم الربح التناسبي k_p وزمن التكامل T_i وزمن التفاضل T_d .

3.6.2 المتحكمات ذات البنية المحسنة هيكلياً أو معوضات الزمن الميت:

عندما تعاني الأنظمة من تأخير زمني واضح في استجابتها، فإنه يمكن تحسين أداء النظم ذات التغذية الخلفية باستخدام المتحكمات ذات البنية المحسنة هيكلياً أو معوضات الزمن الميت وهي المتحكمات التي يتم فيها تعديل بنية ومعاملات المتحكم تبعاً لبنية ومعاملات النظام، وتسمى المتحكمات المعتمدة في هيكليتها على بنية متنبئة باسم معوضات الزمن الميت DTC وقد تم تطبيقها في العديد من الحقول الهندسية وخاصة في النظم الصناعية ونظم الروبوت. ومعظم هذه المعوضات مبنية على معرفة النموذج الرياضي، ويمكن دور هذا النموذج في تعويض الزمن الميت عبر التنبؤ بتأثير إشارة التحكم في الخرج، والقسم الأكبر من هذه المعوضات يكون على شكل نماذج رياضية خواصها الديناميكية من رتبة محددة وشكل محدد.

3.7 متنبئ سميث في أنظمة التحكم مع تأخير زمني:

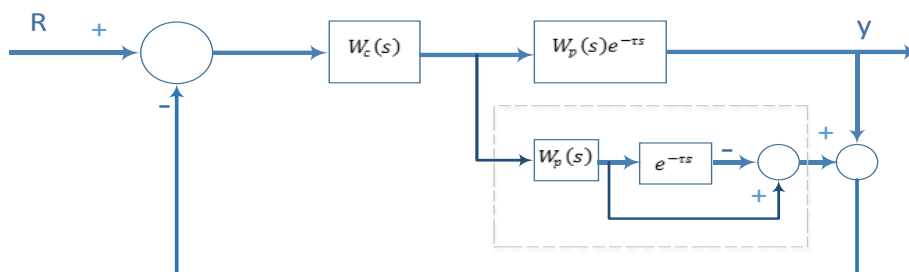
يعتبر متنبئ سميث [85,86,87] من أقدم معوضات الزمن الميت وأشهرها وأكثرها استخداماً حتى الآن، إذ ظهر متنبئ سميث في أواخر الخمسينات لتحسين أداء المتحكمات التقليدية PI, PID في النظم التي تعاني تأخيراً زمنياً واضحاً في استجابتها، ويهدف إلى حذف التأخير الزمني من المعادلة المميزة للحلقة المغلقة بشكل كامل وهذا بدوره يؤدي إلى تحسين أداء حلقة التحكم بشكل واضح مقارنة مع عدم استخدامه، إذ الهدف منه هو الحد من تأثير التأخير الزمني على نظام الحلقة المغلقة، ولكن من أهم نقاط ضعف هذه الطريقة أنها حساسة جداً اتجاه دقة النموذج الرياضي. بعد ذلك تم تطوير متنبئ سميث من أجل حذف الخطأ الساكن في الأنظمة الخطية ذات التأخير الزمني، لكن بالمقابل كان هناك بطء في استجابة النظام بالإضافة إلى أنه لم يتم حذف الخطأ الساكن ما لم يتوفر تقدير دقيق لقيمة التأخير الزمني ضمن النظام.

يقدم متنبئ سميث حلاً لمشكلة التأخير الزمني وتحسين أداء حلقة التحكم عن طريق إضافة بنية خاصة تدخل في حلقة التحكم بهدف حذف حد التأخير الزمني من المعادلة المميزة للنظام. ويعتبر متنبئ سميث من أقدم المعوضات وأكثرها انتشاراً واستخداماً والتي درست وعالجت مشكلة التأخير الزمني في نظم التحكم المغلقة. وتناولت العديد من المقالات والأبحاث العلمية [96-88] دراسة متنبئ سميث وتأثيره على النظم التحكمية التي تعاني من تأخير زمني. لكن من أهم سلبياته الحساسية العالية جداً لانحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية (النموذج الأصغري)،

وتشكل هذه السيئة نواة بحثنا لمحاولة تقليل الحساسية قدر الإمكان وفق طريقة تحكمية مقترحة تعتمد على التعديل في قيمة المرشح المستخدم.

تقسم بنية المتنبئ في الشكل (10-3) إلى قسمين أساسيين هما المتحكم $W_c(s)$ وبنية المتنبئ. يتألف المتنبئ من نموذج الجملة بدون تأخير زمني $W_p(s)$ وحد التأخير الزمني $e^{-\tau s}$ ، وتظهر بنية المتنبئ ضمن المربع المنقط حيث أن:

$W_p(s)e^{-\tau s}$: تابع النقل للنظام مع تأخير زمني. $W_p(s)$: تابع النقل للنظام بدون تأخير زمني.
 $W_c(s)$: تابع النقل للمتحكم. τ : التأخير الزمني للجملة.
 R : دخل الجملة. y : خرج الجملة.



الشكل (10-3): بنية متنبئ سميث.

يأخذ تابع نقل الحلقة المغلقة دون وجود متنبئ سميث العلاقة (22-3):

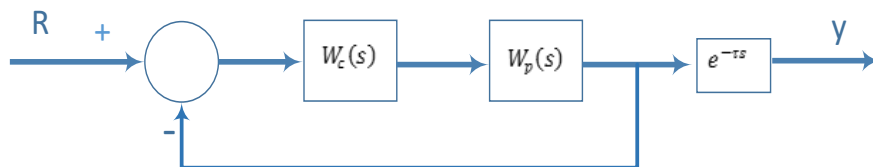
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_c(s)W_p(s)e^{-\tau s}}{1 + W_c(s)W_p(s)e^{-\tau s}} \quad (22 - 3)$$

وبذلك تكون المعادلة المميزة للحلقة المغلقة هي $1 + W_c(s)W_p(s)e^{-\tau s} = 0$ ، حيث يظهر حد التأخير الزمني $e^{-\tau s}$ الذي يسبب التأخير في الطور والاهتزاز حول الدخل المرجعي، ويؤدي إلى عدم استقرار في الجملة رغم وجود المتحكم.

بينما يأخذ تابع النقل مع حلقة المتنبئ العلاقة (23-3):

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_c(s)W_p(s)e^{-\tau s}}{1 + W_c(s)W_p(s)} \quad (23 - 3)$$

وتكون المعادلة المميزة الموافقة للحلقة المغلقة $1 + W_c(s)W_p(s) = 0$ ، وكما هو ملاحظ فقد تمت إزالة حد التأخير الزمني، مما يحسن أداء حلقة التحكم بشكل واضح، ويمكن تعديل شكل حلقة التحكم مع حلقة سميث لتأخذ الشكل (11-3) المكافئ:



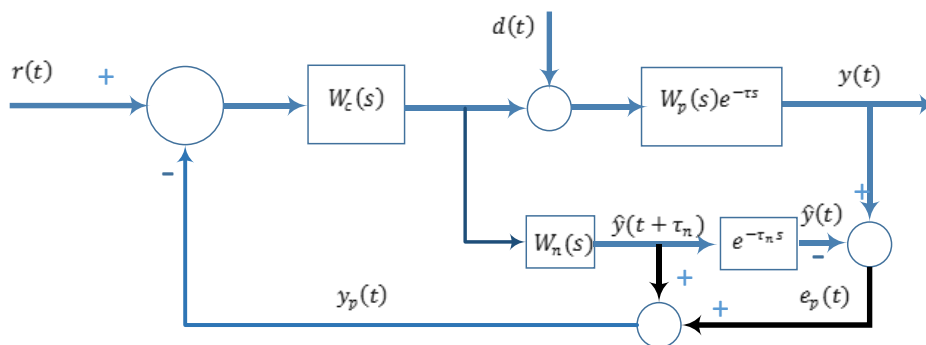
الشكل (3-11): الشكل المكافئ للنظام والمتحكم بوجود حلقة المتنبئ سميث.

يمكن ملاحظة أن بنية سميث تضع حد التأخير الزمني خارج حلقة التحكم وبالتالي لا تؤثر على ديناميكية الجملة ويمكن التعامل مع النظام عند تصميم المتحكم وكأنه دون تأخير زمني.

3.7.1 بنية متنبئ سميث مع ضجيج خارجي:

يبين الشكل (3-12) بنية متحكم سميث في الحالة العامة وهي تشبه البنية المقدمة في الشكل (3-10) وتختلف عنها ببعض التعاريف وهي النموذج الأصغري $W_n(s)$ والتأخير الأصغري τ_n وبذلك يكون خطأ النموذج $e_p(t)$ هو الفرق بين خرج الجملة وخرج النموذج الأصغري مع التأخير الزمني $\hat{y}(t)$ ، يضاف هذا الخطأ إلى الحلقة المفتوحة للمتنبئ كما يظهر في الشكل (3-12). في حال لم يوجد خطأ في النموذج ولم يوجد ضجيج خارجي على الجملة يكون الفرق معدوماً ونعود إلى الحالة النموذجية السابقة ويكون خرج المتنبئ $y_p(t)$ هو خرج الجملة الخالي من التأخير، في هذه الحالة يمكن توليف المتحكم $W_c(s)$.

ليكن $P(s) = W_p(s)e^{-\tau s}$ و $P_n(s) = W_n(s)e^{-\tau_n s}$



الشكل (3-12): بنية متنبئ سميث مع إشارة ضجيج خارجية.

سوف نفترض بداية أنه لا يوجد خطأ في النموذج أي أن $W_p(s) = W_n(s)$ و $\tau = \tau_n$ في حال لا يوجد إشارة ضجيج خارجية $d(t) = 0$ يكون الخطأ $e_p(t) = 0$ معدوماً. مع هذه الفرضيات سيكون $y_p(t) = \hat{y}(t + \tau_n)$ والمعادلة المميزة للنظام $1 + W_c(s)W_n(s) = 0$ تنتبئ إشارة التغذية الخلفية $y_p(t)$ الناتجة عن المتنبئ بخرج الجملة الموافق لتغيرات الدخل ولكن مع وجود إشارة ضجيج خارجية نحصل على العلاقة الرياضية (3-24) لهذه الإشارة.

$$y_p(t) = \hat{y}(t + \tau_n) + W_n(s)[d(t) - d(t + \tau_n)] \quad (24 - 3)$$

يمكن الملاحظة بأنه من أجل التغيرات البطيئة للضجيج بالنسبة لزمن التأخير يمكن أن نكتب $d(t) \approx d(t + \tau_n)$ عندها تكون الإشارة $y_p(t)$ توقع لأبأس به $\hat{y}(t + \tau_n)$ ولكن في حال كان تغير إشارة الضجيج الخارجية $d(t)$ سريعاً لا يمكن التخلص منه في إشارة التغذية الخلفية $y_p(t)$.

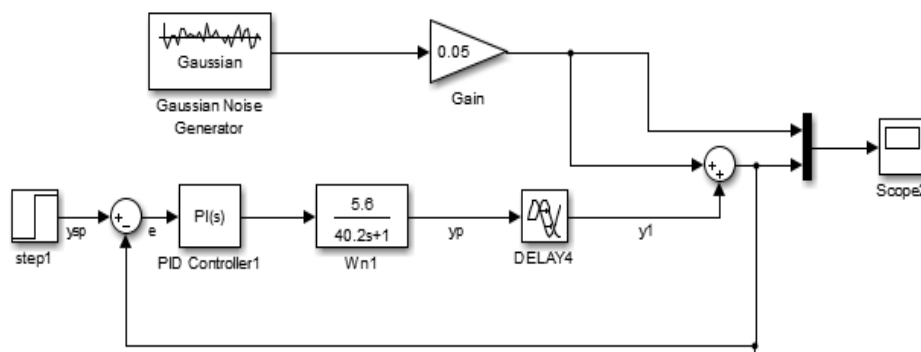
3.7.2 اقتراح طريقة جديدة من قبل الباحث لتحسين عملية الترشيح في متنبئ سميث لأنظمة التأخير الزمني:

يوجد العديد من الأبحاث التي تناولت وجود متنبئ سميث مع المتحكمات التقليدية PI, PID وأخرى منها لوجود متنبئ سميث بشكل مدمج مع المتحكمات الحديثة مثل المتحكم الضبابي والتكيفي والشبكات العصبونية والخوارزميات الجينية بهدف التخلص من تأثير التأخير الزمني على حلقة التحكم المغلقة لذلك، تطرقنا إلى طريقة تقلل من حساسية متنبئ سميث وتعتبر جديدة كونها تركز على التعديل في نموذج المرشح ضمن بنية متنبئ سميث المرشح دون الدخول في بنية المتحكم المدمج ونوعه مع متنبئ سميث، حيث استخدمنا المتحكم التقليدي PID وأجرينا أفضل توليف لبارامتراته باستخدام طريقة Ziger-Nicholas، وبينت المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB فعالية الطريقة المقترحة.

إن الهدف الرئيس هو تقليل الحساسية العالية لمتنبئ سميث الناتجة عن انحراف بارامترات النموذج عن بارامترات العملية (النموذج الأصغري)، باستخدام مرشح معدل مبني على دراسة تحكمية متكاملة.

3.7.2.1 نظم التحكم المغلقة التي تعاني من تأخير زمني (تصميم متحكم PI لنموذج النظام الكيميائي):

يوضح الشكل (3-13) تابع النقل لنظام يستخدم في العمليات الكيميائية مضافاً إليه تأخيراً زمنياً بقيمة 93.9 ثانية، وتم التحكم في هذا النظام من خلال متحكم تناسبي تكاملي PI ضُبَّت بارامتراته ليعطي أفضل استجابة في الحلقة المغلقة وفق طريقة Ziger-Nicholas فبلغت قيمة ربح المتحكم التناسبي $K_p=0.5742$ وزمن المتحكم التكاملي $T_i=0.01429$ Sec.

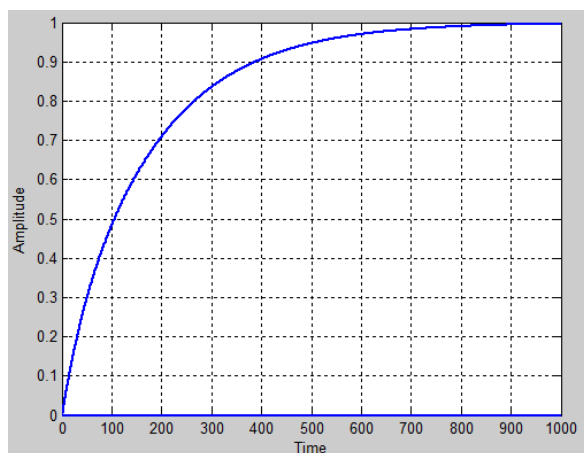


الشكل (3-13): مخطط صندوقي للمتحكم PI مع نموذج النظام.

يوضح الشكل (14-3-A) استجابة حلقة التحكم المغلقة عند عدم تطبيق تأخير زمني وإشارة ضجيج، بينما يبين الشكل (14-3-B) الاستجابة ذاتها مع الأخذ بالحسبان إشارة الضجيج الخارجية التي من الممكن أن يتعرض لها النظام (Gaussian Noise Generator)، كما يعبر الشكل (14-3-C) عن استجابة حلقة التحكم المغلقة عند

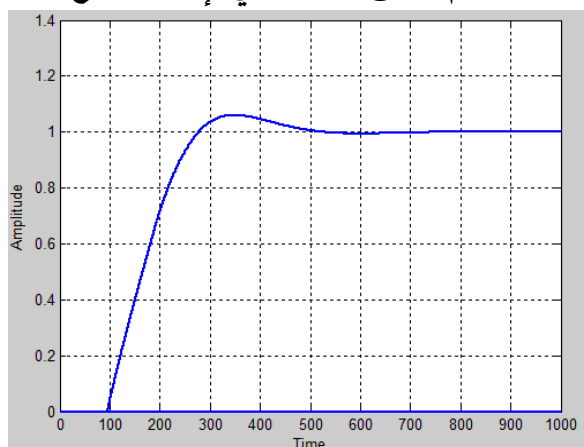
تأخير زمني 93.9 Sec وعدم وجود ضجيج، بينما الشكل (14-3-D) يأخذ الضجيج بالحسبان. إذ يعبر المدخل ysp عن الدخل المرجعي بينما y يمثل خرج النظام.

نستنتج من الشكل (14-3) أن استجابة الحلقة المغلقة لها تجاوزات مقبولة ولكنها بطيئة إلى حد ما (تستقر تقريباً عند 600 ثانية)، كما هو ملاحظ فإن أداء وحدة التحكم التناسبي التكاملي PI محدود للغاية بسبب التأخير الزمني الطويل (93.9 Sec)، وذلك لأن وحدة تحكم PI ليس لديها أية معرفة مسبقة بهذا التأخير الزمني. كما هو واضح فإن التأخير الزمني لمنظومة التحكم بالعمليات أدى إلى زيادة اضطراب حلقة التحكم وحدوث اهتزازات حول نقطة الدخل المرجعي على الرغم من اختيار أفضل بارامترات للتحكم التناسبي التكاملي، ومن هنا نستنتج أنه عندما يكون هناك تأخير زمني كبير في العملية، فإن التحكم بواسطة المتحكمات التقليدية PID, PI يكون محدوداً، لذلك كان لا بد من استخدام معوضات الزمن الميت التي من شأنها أن تحسن أداء حلقة التحكم وأكثرها استخداماً هو متنبئ سميث.



الشكل (14-3-A): استجابة حلقة التحكم المغلقة

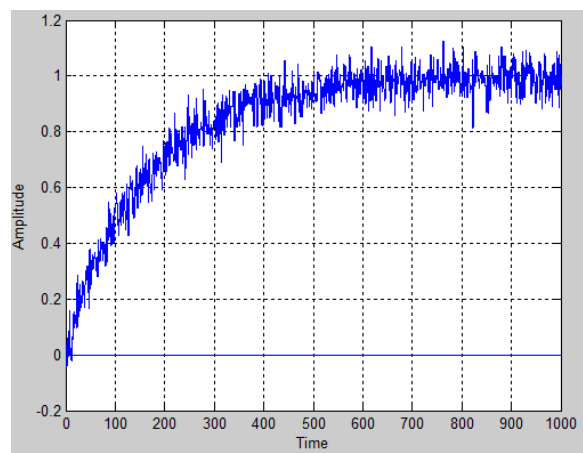
عند عدم تطبيق تأخير زمني وإشارة ضجيج



الشكل (14-3-B): استجابة حلقة التحكم المغلقة

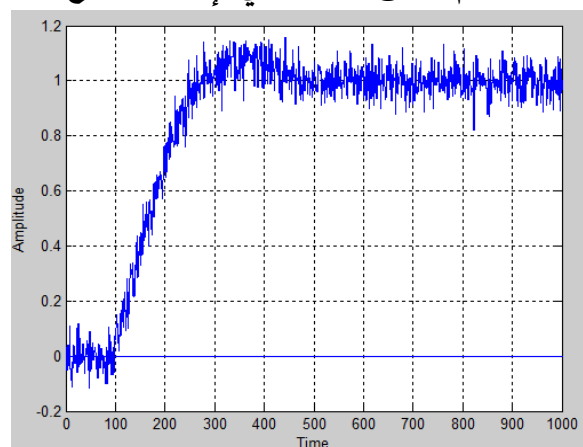
عند تأخير زمني 93.9 Sec وعدم وجود ضجيج

الشكل (14-3): استجابة حلقة التحكم المغلقة عند تأخير (93.9 Sec) باستخدام متحكم PI.



الشكل (14-3-C): استجابة حلقة التحكم المغلقة

عند عدم تطبيق تأخير زمني وإضافة ضجيج

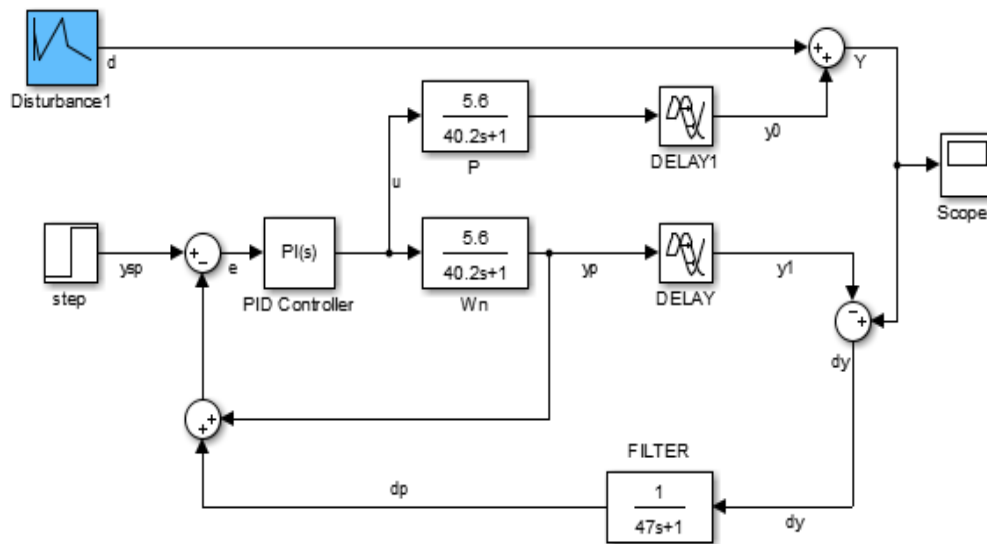


الشكل (14-3-D): استجابة حلقة التحكم المغلقة

عند تأخير زمني 93.9 Sec وإضافة ضجيج

3.7.2.2 دراسة تأثير متنبئ سميث ومقارنته مع المتحكم PI لنظام فيه تأخير زمني:

لدراسة تأثير متنبئ سميث على حلقة التحكم التي تعاني من تأخير زمني نعيد تصميم الشكل (3-13) بعد إضافة متنبئ سميث اعتماداً على الشكل (3-10) مع إضافة دخل d كإشارة ضجيج خارجية (Gaussian Noise) فيصبح لدينا الشكل (3-15) المعبر عن المخطط الصندوقي للمتحكم PI مع نموذج النظام بوجود متنبئ سميث. يستخدم متنبئ سميث النموذج الأصغري $W_n(s)$ للتنبؤ بالاستجابة الخالية من التأخير، ثم يقارن خرج هذا التنبؤ y_p مع القيمة المرجعية y_{sp} لتحديد ما هي التعديلات المطلوبة التي لا بد للمتحكم من القيام بها. لمنع تأثير إشارة الضجيج الخارجية d ، يقارن متنبئ سميث أيضاً خرج النظام (مع التأخير الزمني) y مع خرج المتنبئ y_1 (الذي يأخذ التأخير الزمني بالحسبان)، وبالتالي تكون $dy = y - y_1$ هي dy وتمر عبر مرشح (فلتر) F وخرج المرشح dp تساهم في إشارة الخطأ الإجمالية e .



الشكل (3-15): مخطط صندوقي للمتحكم PI مع نموذج النظام بوجود متنبئ سميث.

أختير النموذج الأصغري $W_n(s)$ بشكل مطابق تماماً للنظام المراد التحكم به وفق العلاقة (3-25):

$$W_n(s) = \frac{K_f e^{-\tau s}}{1 + T_f s} = \frac{5.6 e^{-93.3s}}{1 + 40.2s} \quad (25 - 3)$$

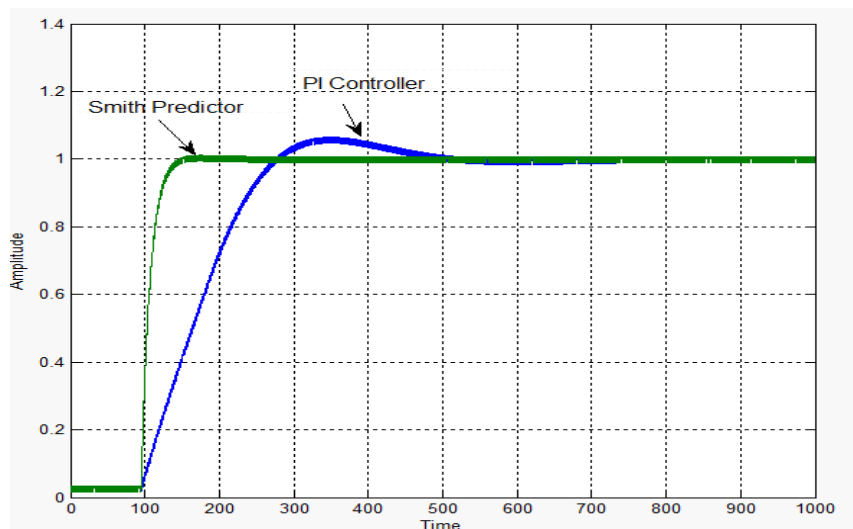
بالنسبة إلى المرشح F ، استخدام مرشح من الدرجة الأولى لانتقاط اضطرابات منخفضة التردد وفق العلاقة (3-26):

$$F(s) = \frac{1}{1 + T_f s}, T_f = \tau/2, F(s) = \frac{1}{1 + 47s} \quad (26 - 3)$$

وَصُمم المتحكم PI وفق البارامترات التالية:

TI	Kp	Bandwidth	Phase margin
40.2	0.574	0.08 rad/s	90 degrees

كما هو ملاحظ في الشكل (3-16) الذي يوضح استجابة كل من المتحكم PI والمتنبئ سميث أن متنبئ سميث يؤمن استجابة أسرع بكثير دون أي تجاوز أو اهتزاز مقارنة بالمتحكم PI.



الشكل (3-16): استجابة كل من المتحكم التناسبي التكاملي PI والمتنبئ سميث.

3.7.2.3 دراسة تأثير عدم تطابق النموذج الأصغري $W_n(s)$ مع نموذج النظام $P(s)$:

من الصعب جداً في التطبيقات العلمية تطابق نموذج النظام $P(s)$ بالضبط مع النموذج الأصغري $W_n(s)$ ، لذلك لا يعتبر النموذج الأصغري إلا تقريباً لنموذج العملية التحكمية الحقيقية، لذا من المهم فهم مدى قوة متنبئ سميث (حساسية متنبئ سميث) في عدم التطابق بشكل تام بين هذين النموذجين، ودراسة الخطوات المطلوبة لجعل هذا المتنبئ أكثر حساسية لهذا الانحراف بين النموذجين.

- بداية نأخذ بالحسبان نموذجين مضطربين للنظام $(P1(s), P2(s))$ يمثلان مجالاً من الانحراف عن نموذج النظام (النموذج الأصغري).

النموذج الأصغري	نموذج النظام المضطرب الثاني	نموذج النظام المضطرب الأول
$W_n(s) = \frac{k_f e^{-\tau s}}{T_f s + 1}$	$P2(s) = \frac{(k_f + \Delta k_f) e^{-(\tau + \Delta \tau)s}}{(T_f + \Delta T_f)s + 1}$	$P1(s) = \frac{(k_f - \Delta k_f) e^{-(\tau - \Delta \tau)s}}{(T_f - \Delta T_f)s + 1}$
$W_n(s) = \frac{5.6 e^{-93.3s}}{40.2s + 1}$	$P2(s) = \frac{6 e^{-100s}}{42s + 1}$	$P1(s) = \frac{5 e^{-90s}}{38s + 1}$

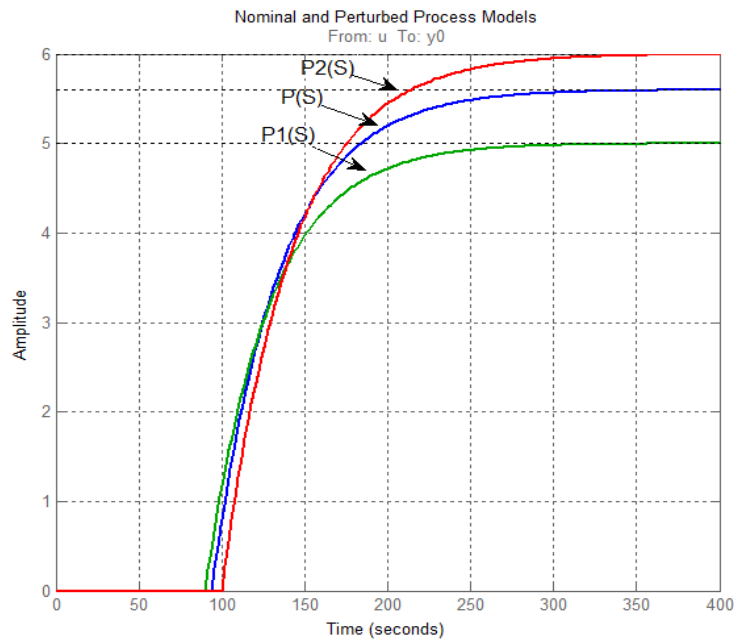
الجدول (3-1): القيم العملية لنظام كيميائي يعاني اضطرابات حدية حول نموذج [96].

حيث أن:

$$k_f = k_f \pm \Delta k_f, \quad T_f = T_f \pm \Delta T_f, \quad \tau = \tau \pm \Delta \tau$$

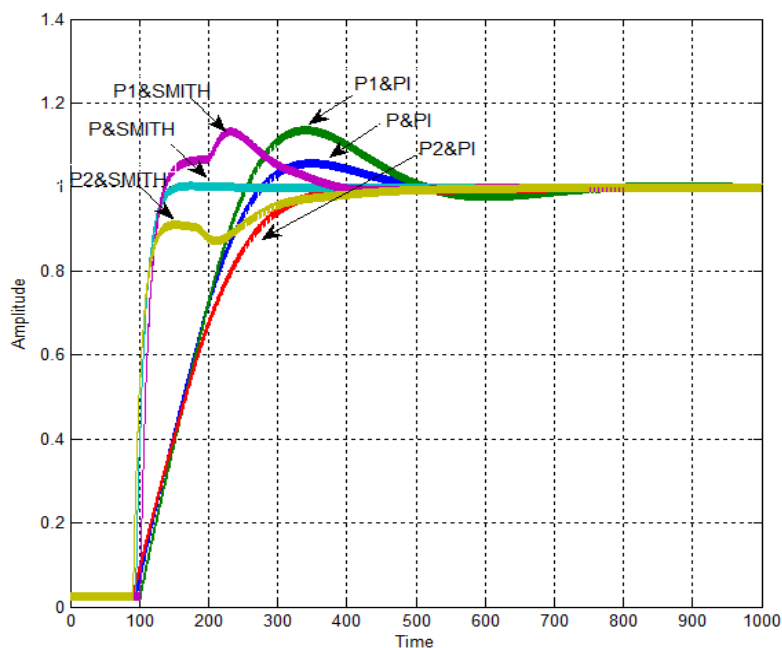
حيث استقدنا من القيم التي عرضها الباحث [96] كونها تتضمن قيماً عملية تطبيقية لنظام كيميائي يعاني من اضطرابات حدية بزيادة أو نقصان حول النموذج الأصغري الذي يمثله موضحة ضمن الجدول (3-1)، حيث أن T_f, k_f, τ تعبر عن القيم الاسمية لبارامتراته، بينما $\Delta T_f, \Delta k_f, \Delta \tau$ هي الحد الأقصى للانحرافات عن القيم الاسمية لبارامترات النظام.

- نرسم استجابة الحلقة المفتوحة step كما في الشكل (17-3) لكلا النموذجين المضطربين للنظام $P(s)$ و $P_1(s), P_2(s)$ والنموذج الأساسي للنظام $P(s)$.



الشكل (17-3): استجابة الحلقة المفتوحة لكل من $P(s)$ و $P_1(s), P_2(s)$.

- لتحليل ودراسة متانة متبئ سميث للانحراف بين النموذج الأصغري والنموذجين المضطربين، نجمع النموذج الأصغري $P(s)$ والنماذج المضطربة $P_1(s), P_2(s)$ في مصفوفة واحدة، ونعيد بناء تابع النقل للحلقة المغلقة لتصاميم كل من المتحكم التناسبي التكاملي PI ومتبئ سميث، ونحاكي استجابات الحلقة. ونلاحظ من الشكل (18-3) المعبر عن استجابة حلقة التحكم المغلقة لكل من المتحكم PI والمتبئ سميث بأن حساسية متبئ سميث عالية جداً للانحراف بين النموذجين المضطربين والنموذج الأصغري للنظام.

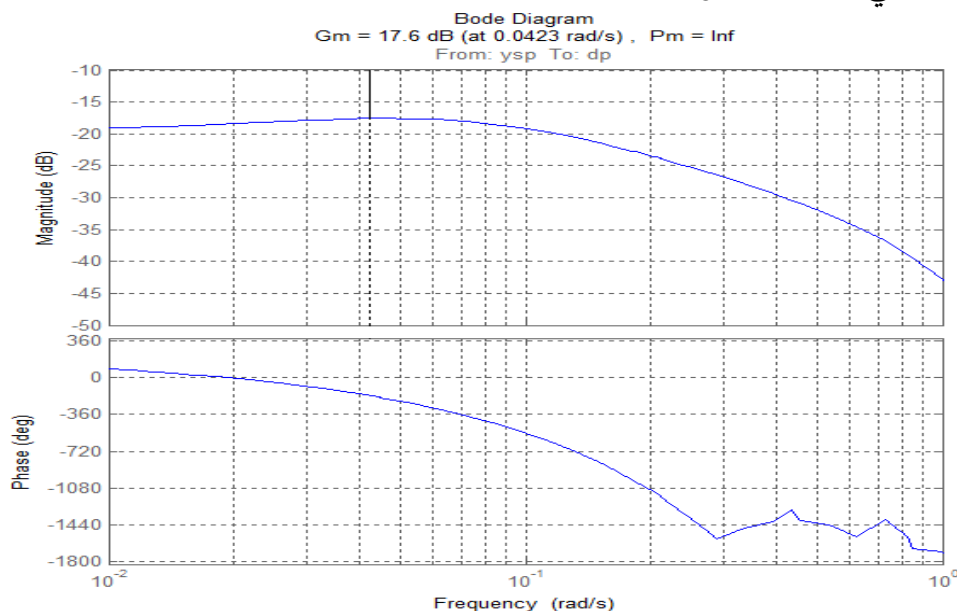


الشكل (18-3): استجابة كل من المتحكم PI والمتبئ سميث مع النماذج المضطربة.

3.7.2.4 تحسين متانة عدم تطابق النموذج الأصغري $W_n(s)$ مع نموذج النظام $P(s)$:

• دراسة النموذج المضطرب الأول للنظام $P1(s)$:

يحتوي مخطط بود في الشكل (19-3) على ارتفاع (حدبة) بالقرب من القيمة 0.04 rad/sec ، يخفض هامش الربح ويزيد من الحدبة في استجابة خطوة الحلقة المغلقة.



الشكل (19-3): مخطط بود للنظام مع النموذج المضطرب الأول $P1(s)$.

لإصلاح هذه المشكلة، نعدل من قيمة المرشح القديم وفق العلاقة (26-3) لنحصل على سرعة أكبر

$$F_{old}(s) = \frac{1}{47s + 1}$$

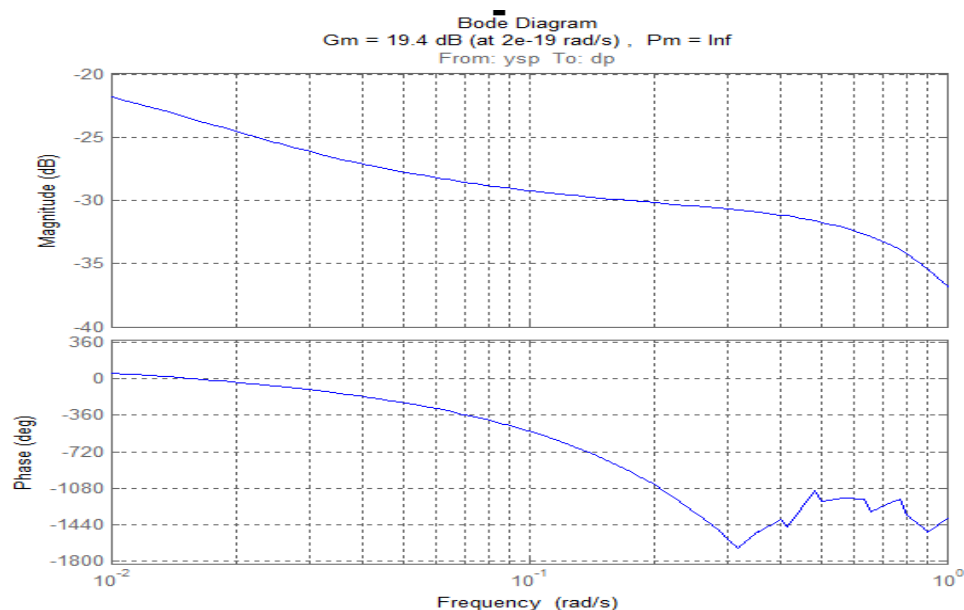
نبدأ بالتغير في المرشح القديم وفق الجدول (2-3) حتى نتأكد من أن هامش الربح قد تحسن بالقرب من القيمة التي كانت تعاني من ارتفاع (حدبة)، وهي 0.04 rad/sec ، كما يوضح الشكل (20-3).

NEW FILTER	Bode response	P1(S)=5E-90/(1+38*s)			
	Gain Margin (rad/sec)	Peak Amplitude	Overshoot (%) AT Time (SEC)	Setting Time (SEC)	Rise Time (SEC)
(1+10*s)/(1+20*s)	GM= 16.2 at 0.108	1.19	19.3% , 212	317	23.8
(1+10*s)/(1+30*s)	GM= 18.7 at 0.0441	1.17	16.6% , 217	323	23.7
(1+10*s)/(1+40*s)	GM= 19.4 at 4.98e-19	1.15	14.9% , 218	332	23.7
(1+10*s)/(1+47*s)	GM= 19.4 at 4.26e-19	1.14	14.1% , 221	339	23.8
(1+10*s)/(1+50*s)	GM= 19.4 at 4e-19	1.14	13.8% , 222	343	23.8

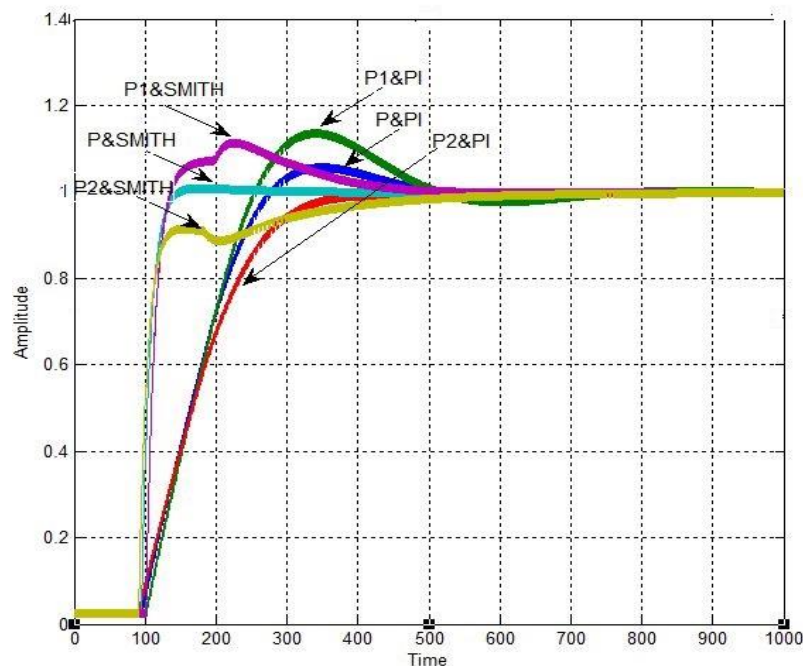
$(1+10*s)/(1+60*s)$	GM= 19.4 at $3.33e-19$	1.13	12.9% , 223	354	23.8
$(1+10*s)/(1+70*s)$	GM= 19.4 at $2.86e-19$	1.12	12.2% , 223	366	23.7
$(1+10*s)/(1+90*s)$	GM= 19.4 at $2.22e-19$	1.11	11.3% , 226	391	–
$(1+10*s)/(1+100*s)$	GM= 19.4 at $2e-19$	1.11	10.9% , 227	404	23.7
$(1+10*s)/(1+110*s)$	GM= 19.4 at $1.82e-19$	1.11	10.6% , 226	416	–
$(1+10*s)/(1+150*s)$	GM= 19.4 at $1.33e-19$	1.1	9.73% , 230	466	23.7
$(1+10*s)/(1+200*s)$	GM= 19.4 at $1e-19$	1.09	9.09% , 230	528	23.9
$(1+10*s)/(1+300*s)$	GM= 19.4 at $1e-19$	1.08	8.41% , 232	652	23.9
$(1+10*s)/(1+1000*s)$	GM= 19.4 at $1e-19$	1.07	7.41% , 254	1490	30.2

الجدول (2-3): القيم المعبرة عن كيفية اختيار المرشح الجديد

بعد التأكد من أن هامش الربح قد تحسن بالقرب من القيمة المذكورة، أجريت محاكاة لنظام الحلقة المغلقة وفق المرشح المعدل لملاحظة التحسن في الاستجابة وفق الشكل (3-21)، وعند مقارنته مع الشكل (3-18) نستنتج أن استجابة المتحكم مع المتنبئ سميث باستخدام المرشح المعدل يوفر أداءً أكثر انسياباً وأقل اهتزازاً وتجاوزاً على حساب استجابة اسمية أبطأ قليلاً.



الشكل (3-20): مخطط بود للنظام مع النموذج $P1(s)$ و $F_new(s)$.

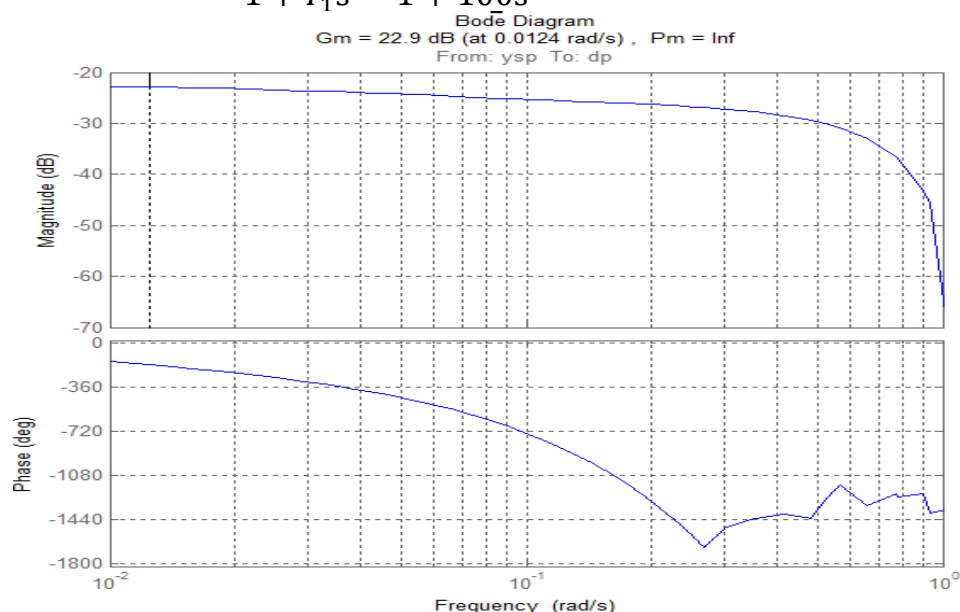


الشكل (21-3): استجابة كل من المتحكم PI والمتنبئ سميث وفق $P1(s)$ و $F_{new}(s)$.

• دراسة النموذج المضطرب الثاني للنظام $P2(s)$

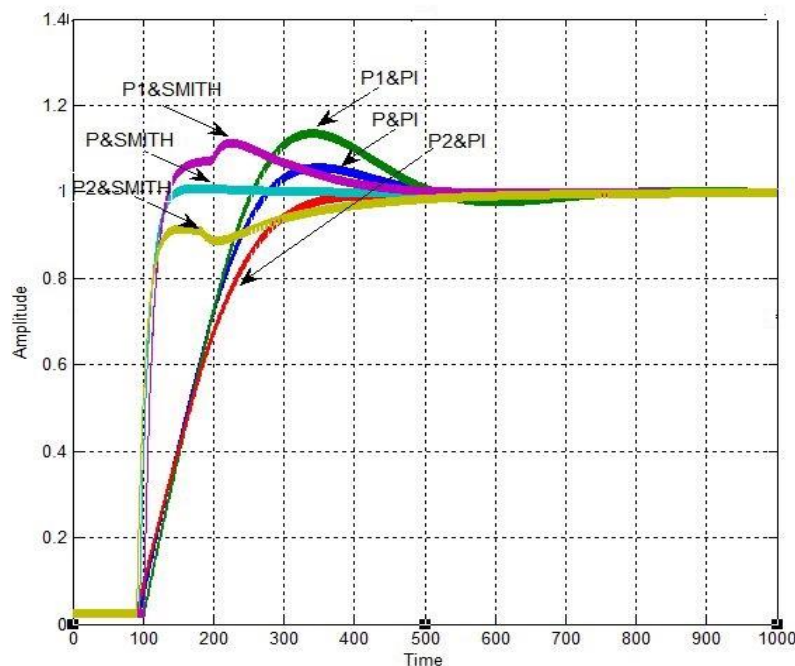
نبدأ بالتغير في المرشح القديم كما فعلنا في النموذج المضطرب الأول حتى نلاحظ تحسناً في الاستجابة كما يوضح الشكل (22-3)، فيكون تابع النقل للمرشح الجديد وفق العلاقة (27-3):

$$F_{new}(s) = \frac{1 + T_0 s}{1 + T_1 s} = \frac{1 + 10s}{1 + 100s} \quad (27 - 3)$$



الشكل (22-3): مخطط بود للنظام مع النموذج $P2(s)$ و $F_{new}(s)$.

بعد التأكد من أن هامش الربح قد تحسن أجرينا محاكاة لنظام الحلقة المغلقة وفق المرشح المعدل لملاحظة التحسن في الاستجابة وفق الشكل (23-3).



الشكل (3-23): استجابة كل من المتحكم PI والمتنبئ سميث وفق $P2(s)$ و $F_{new}(s)$.

بعد دراسة استجابة الحلقة المغلقة لكل من النموذج المضطرب الأول الشكل (3-21) والنموذج المضطرب الثاني الشكل (3-23)، نستنتج أن الاستجابة من الدخل المرجعي y_{sp} إلى الخرج الأساسي y متشابهة تماماً ولا يوجد أي اختلاف يذكر.

يوضح الجدول (3-3) النتائج التي حصلنا عليها والتي تؤكد فعالية المرشح المقترح، حيث إنه باستخدام المرشح الجديد تم إنقاص كل من Peak Amplitude و Overshoot بمقدار 0.6 و 6.5، والحفاظ على قيمة Rise Time عند القيمة 23.8 Sec و 55.3 Sec عند استخدام كل من P1&Smith و P2&Smith على التوالي مقارنة بالمرشح القديم.

Parameters of Response Time	المتحكم PI والمتنبئ سميث باستخدام المرشح القديم		المتحكم PI والمتنبئ سميث باستخدام المرشح المقترح	
	P1&Smith	P2&Smith	P1&Smith	P2&Smith
Peak Amplitude	1.17	–	1.11	–
Overshoot (%) at Time (Sec)	17.4 at 224	–	10.9 at 227	–
Settling Time (Sec)	327	344	404	466
Rise Time (Sec)	23.8	55.3	23.8	55.4

الجدول (3-3): النتائج التي تؤكد فعالية المرشح المقترح.

3.8 الاستنتاجات والمقترحات:

- يعتبر التأخير الزمني مسؤولاً بشكل رئيس عن زيادة اضطراب حلقة التحكم في نظم التحكم. وفقاً لهذا التأخير فإن أنظمة التحكم تميل إلى الاهتزاز، ويحدث تشوه وعدم استقرار في الاستجابة التحكمية.
- عندما يكون هناك تأخير زمني كبير في العملية، فإن التحكم بواسطة المتحكمات التقليدية PI, PID يكون محدوداً، لذلك كان لابد من استخدام معوضات الزمن الميت التي من شأنها أن تحسن أداء حلقة التحكم وأكثرها استخداماً هو متبئ سميث.
- تم اقتراح مجموعة من الخطوات ضمن البحث للتخلص من الحساسية العالية التي يعاني منها متبئ سميث في عدم التطابق بين النموذج الأصغري للعملية ونموذج النظام، بالإضافة إلى دراسة نموذجين مضطربين للنظام $P1(s), P2(s)$ يمثلان مجاًلاً من الانحراف عن نموذج العملية (النموذج الأصغري)، وبينت المحاكاة الحاسوبية باستخدام برنامج MATLAB تحسن الحساسية بشكل ملحوظ.
- عند دراسة استجابة الحلقة المغلقة لكل من النموذج المضطرب الأول والثاني استنتج أن الاستجابة من الدخل المرجعي ysp إلى الخرج الأساسي y متشابهة تماماً ولا يوجد أي اختلاف.

الفصل الرابع

نظم التحكم الشبكية

Networked Control Systems

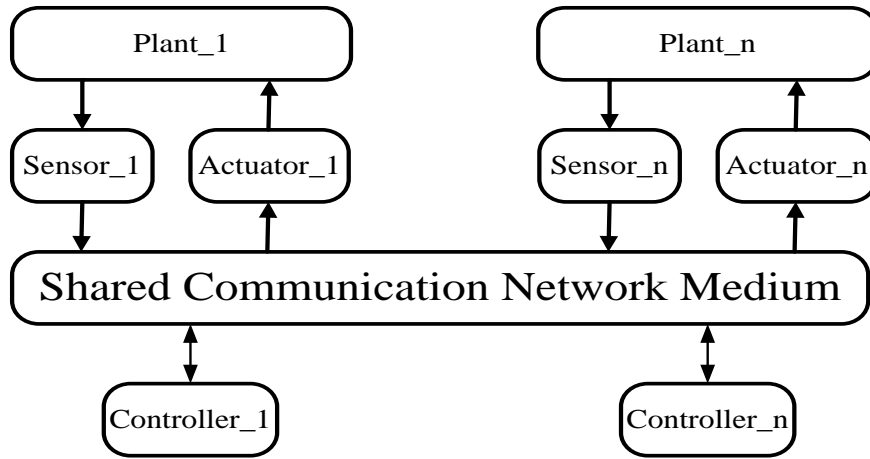
4.1 مقدمة:

إن نظم التحكم الشبكية ليست فقط المكون الأساسي لشتى مجالات العلوم من شبكات الكمبيوتر وأنظمة الاتصالات ونظم معالجة الإشارة والروبوتات بأنواعها المختلفة ونظم تكنولوجيا المعلومات ونظرية التحكم الحديثة وإنما أيضاً من الممكن أن تجمع كل هذه العلوم أو بعضها معاً بشكل منسق لتحقيق نظام شبكي متكامل موحد يمكنه العمل بكفاءة عالية عبر الشبكة ويستفيد من كامل خصائصها وميزاتها [97]. وانطلاقاً من هذا الارتباط مع العلوم الأخرى فإن نظم التحكم الشبكية يمكن اعتبارها نظم تحكم موزعة في الزمن الحقيقي [98] (Distributed Real Time Control Systems: DRTCS)، بالإضافة إلى كونها منظومة تحكم واتصالات متكاملة [99] (Integrated Communication and Control Systems: ICCSs) حيث يتم التحكم بالجملة بواسطة شبكة اتصالات.

استخدمت شبكات الاتصالات في تطبيقات الزمن الحقيقي، والفرق الرئيس بينها وبين أنظمة التحكم الشبكية هو أن شبكات الاتصالات مكرسة لهدف محدد، في حين أن نظم التحكم الشبكية مخصصة للأغراض العامة، وكامل المفاهيم الجديدة في الاتصالات والشبكات تم دمجها مع مفاهيم التحكم، وأصبحت نظاماً متكاملًا.

يوضح الشكل (4-1) الشكل العام لنظام التحكم الشبكي. إذ إن إشارات التحكم في نظم التحكم الكلاسيكية تكون متصلة نقطة إلى نقطة، بينما يختلف الوضع اختلافاً كبيراً في نظم التحكم الشبكية لأن الإشارات الناتجة عن عناصر التحكم مثل المشغل (Actuator) أو الحساس (Sensor) تنتقل عن طريق شبكة اتصالات تحكمية، وبالتالي فإن أداء نظام التحكم يعتمد على خصائص الشبكة. وهكذا تلقت NCSs اهتماماً متزايداً وأصبحت متداولة في العديد من التطبيقات العملية في الآونة الأخيرة. إذ تتمتع نظم التحكم الشبكية بالمقارنة مع نظم التحكم التقليدية بالعديد من المزايا [100] وهي:

1. الجزئية (Modularity).
2. انخفاض التكاليف (Low Costs).
3. انخفاض الوزن (Reduced Weight).
4. اللامركزية في التحكم (Decentralization of Control).
5. التحليل والتشخيص المتكامل (Integrated Diagnosis).
6. تركيب بسيط وسريعة وسهلة الصيانة (quick and easy maintenance, simple installation).
7. التوسع (فمن السهل إضافة / إزالة حساس، محرك أو وحدة تحكم مع انخفاض التكلفة).
8. يمكن تعديلها بسهولة أو تحديثها (Easily Modified or Upgraded).
9. قدرة على دمج المعلومات العامة لاتخاذ قرارات ذكية على مساحات فيزيائية كبيرة.



الشكل (4-1): الشكل العام لمنظومة تحكم شبكية مؤلفة من n نظام و n متحكم.

نتيجة لتلك الميزات فقد استخدمت نظم التحكم الشبكية على نطاق واسع في العقود الماضية في العديد من المجالات مثل التحكم في العمليات، الأنظمة الهندسية، أنظمة الطاقة الذكية، استكشاف الفضاء، النظم البيئية، الأتمتة الصناعية، الروبوتات باختلاف أنواعها، أنظمة الطيران، السيارات، مراقبة المصانع، التشخيص عن بعد، استكشاف الأخطاء وإصلاحها، التشغيل عن بعد [106-101]. فقد تبين أن إدراج نظم التحكم الشبكية في الأنظمة الديناميكية يقدم تحديات جديدة للنظام ككل بسبب ظهور بعض العيوب وهي:

1. قيود الاتصالات (Communication Constraints).
2. التحكم من مسافات بعيدة لكن مقابل تأخيرات زمنية قد تكون ثابتة، متغيرة أو حتى عشوائية.
3. فقدان بعض البيانات والتأخير في الوصول إلى بعضها الآخر بسبب طبيعة الشبكة يجعل النظام عشوائياً.
4. فترة تقطيع متغيرة مع الزمن.
5. حزم ترانسل خاطئة بسبب عدم كفاءة الشبكة.
6. زيادة تحميل على الشبكة.

إن وجود هذه الظواهر في الشبكة يمكن أن يخفض من أداء حلقة التحكم بشكل فعال كما يؤدي إلى عدم استقرار المنظومة التحكمية بالكامل. لذلك من الضروري بناء تمثيل ديناميكي مناسب لمنظومة التحكم الشبكية وتصميم متحكمات فعالة تحقق الاستقرار في ظل هذه الظروف.

وركز الباحثون في السنوات القليلة الماضية على دراسة العديد من القضايا ضمن هذا المحور وهي [109-107]:

1. تحليل وتصميم نظم التحكم الشبكية.
2. بنية الشبكة وأنواع البروتوكولات وطرق الجدولة المستخدمة فيها.
3. الدراسات التجريبية والمحاكاة.

4. نمذجة نظم التحكم الشبكية.

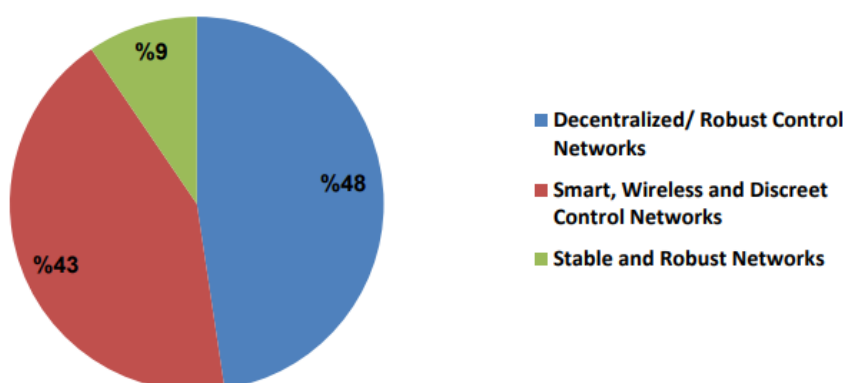
5. تحليل استقرار نظم التحكم الشبكية مع الأخذ بالحسبان التأخير الزمني وضياح الرزم (Packet Dropouts) أو وصولها وفق ترتيب خاطئ (Packets out-of-order).

4.2 تاريخ نظم التحكم الشبكية:

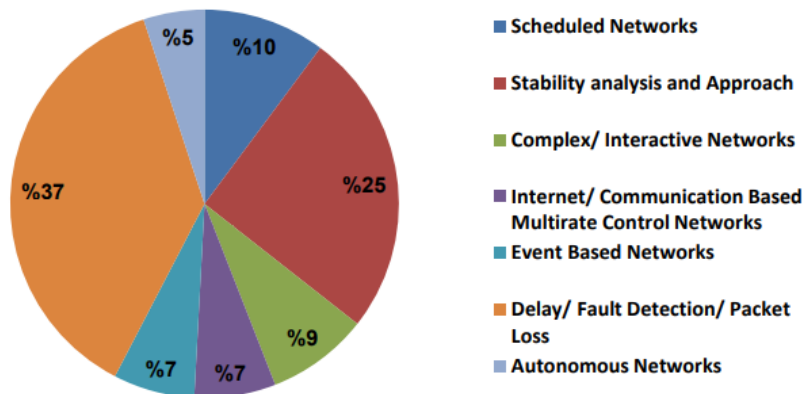
برز البحث في التشغيل عن بعد مع توسع احتياجات التحكم الصناعي وتلبية لمتطلبات التحكم في البيئات الخطرة، على سبيل المثال محطات المفاعلات النووية، والمشاريع الفضائية [110]. كما كان هناك تحسن هائل في مجال NCS خاصة مع ظهور تقنيات الشبكات، نتيجة لانخفاض التكلفة وسهولة الوصول إلى الإنترنت [110]. تتجه NCS الآن نحو NCS الموزعة وهي عبارة عن شبكة تدمج الحساسات الموزعة والمشغلات الموزعة وخوارزميات التحكم الموزعة عبر شبكة اتصال في الزمن الحقيقي [111,112].

يوضح الشكل (4-2) نسب مواضيع البحث في نظم التحكم الشبكية وفقاً للأوراق البحثية المنشورة خلال ثلاث فترات زمنية، الأولى منها ابتداء من الأعوام السابقة حتى 2000 والثانية من 2000-2011 وبينما الفترة الثالثة من 2011 وحتى الآن. فقد لوحظ خلال الفترة الزمنية الأولى بأن مواضيع البحث ضمن نظم التحكم الشبكية اقتصرت على ثلاثة مواضيع فقط، وكانت النسبة الأكبر (48%) لموضوع البحث Decentralized/Robust Control Network. أما خلال الفترة الزمنية الثانية فقد توسعت محاور البحث ضمن نظم التحكم الشبكية لتشمل سبعة مواضيع بحثية، حيث كانت الحصة الأكبر لموضوع البحث Delay/ Fault Detection/ Packet loss بنسبة مقدارها (37%)، كما حصل موضوع البحث Stability analysis and Approach على نسبة مقدارها (25%). بينما حافظ موضوع البحث Delay/ Fault Detection/ Packet loss على أعلى نسبة (37%) خلال الفترة الزمنية الثالثة مع ظهور المحور Model/ Sampling Based Networks بنسبة مقدارها (16%) [113].

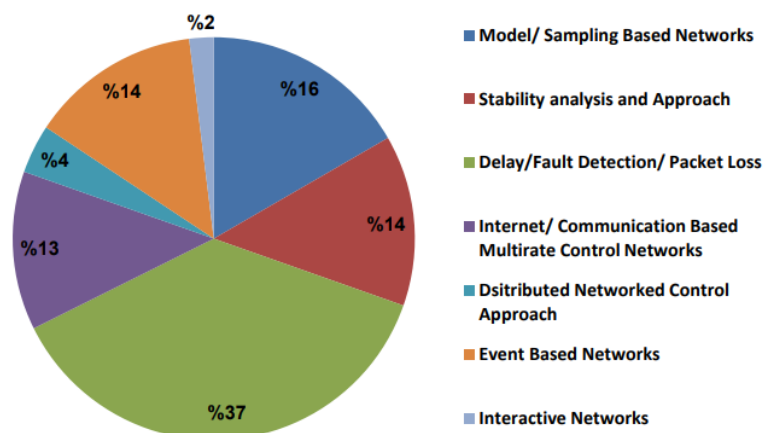
Distribution of Focus Areas of NCS Research prior to 2000



Distribution of Focus Areas of NCS Research from 2001 to 2010



Distribution of Focus Areas of NCS Research from 2011 Onwards



الشكل (4-2): نسب مواضيع البحث في NCS وفقاً للأوراق المنشورة خلال ثلاث فترات زمنية [113]

وهذا يؤكد بأن معالجة التأخيرات الزمنية وضياع الرزم ضمن نظم التحكم الشبكية كانت ومازالت من المحاور الرئيسية، ويتعين على الباحثين إيجاد الحلول الأفضل لمعالجة آثار التأخير الزمني على استقرار نظم التحكم الشبكية. بالإضافة إلى إيجاد طرائق بسيطة لنمذجة نظم التحكم الشبكية وإدخال تأثير التأخير الزمني/ ضياع الرزم ضمن النموذج لتسهيل دراسة تأثيرها على الاستقرار.

4.3 بنية نظم التحكم الشبكية:

هناك ثلاثة أنواع من بنى نظم التحكم الشبكية وهي البنية المركزية واللامركزية والبنية الموزعة [113].

4.3.1 البنية المركزية:

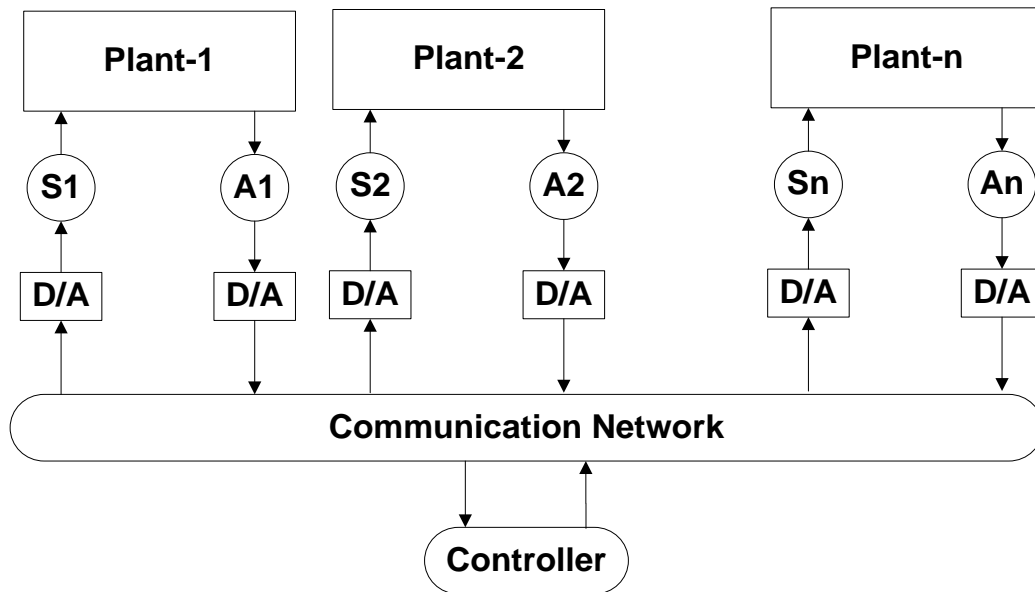
يوضح الشكل (4-3) البنية المركزية لنظم التحكم الشبكية. إذ يتم تركيب متحكم مركزي واحد في غرفة التحكم يؤدي كافة عمليات المراقبة والتحكم ويقوم بإرسال واستقبال البيانات من وإلى النظام من خلال الحساسات والمشغلات وهذا ما يعرف بالتحكم المركزي [114,115].

من مزايا هذه البنية:

1. سهولة النفاذ إلى مجمل معطيات النظام.
2. إمكانية الأمثلة لكامل النظام.
3. تؤمن مصدراً وحيداً للمعلومات عن حالة النظام.

من مساوئ هذه البنية:

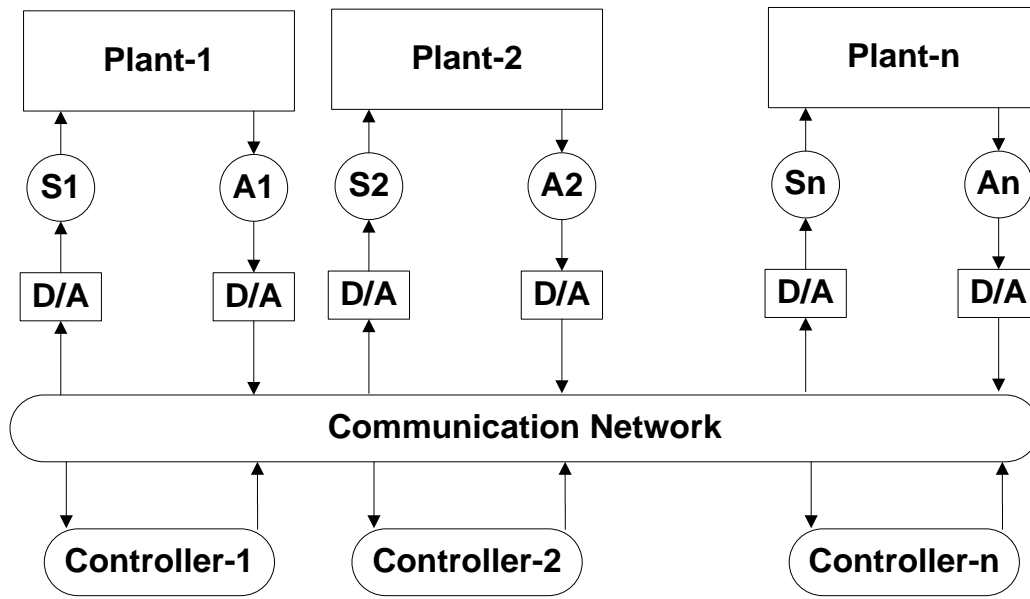
- 1- تتطلب هذه البنية نظام توزيع أسلاك معقداً لربط العناصر إلى حاسوب مركزي أو محطة عمل Workstations وهذا يؤدي إلى صعوبات في التركيب وإعادة التشكيل.
- 2- كلفة التوصيلات عالية، كما تتطلب هذه البنية حاسوباً مركزياً أو محطات عمل فرعية ذات كلفة عالية أيضاً لأداء وظائف التحكم المتقدمة.
- 3- استجابة زمنية بطيئة.
- 4- شكّل الحاسوب المركزي أو محطات العمل الفرعية نقاط عيب حرجية، إذ إن حدوث خطأ ما قد يسبب في انشغال نظام التحكم بالكامل أو حتى انهيار النظام.
- 5- الطبيعة المغلقة للنظام وغير المعتمدة على التراكيب القياسية جعلت قابلية التبادل بين العناصر المختلفة لنظام التحكم أمراً مستحيلاً.
- 6- صعوبة تعديل برمجيات التحكم.



الشكل (4-3): البنية المركزية.

4.3.2 البنية اللامركزية:

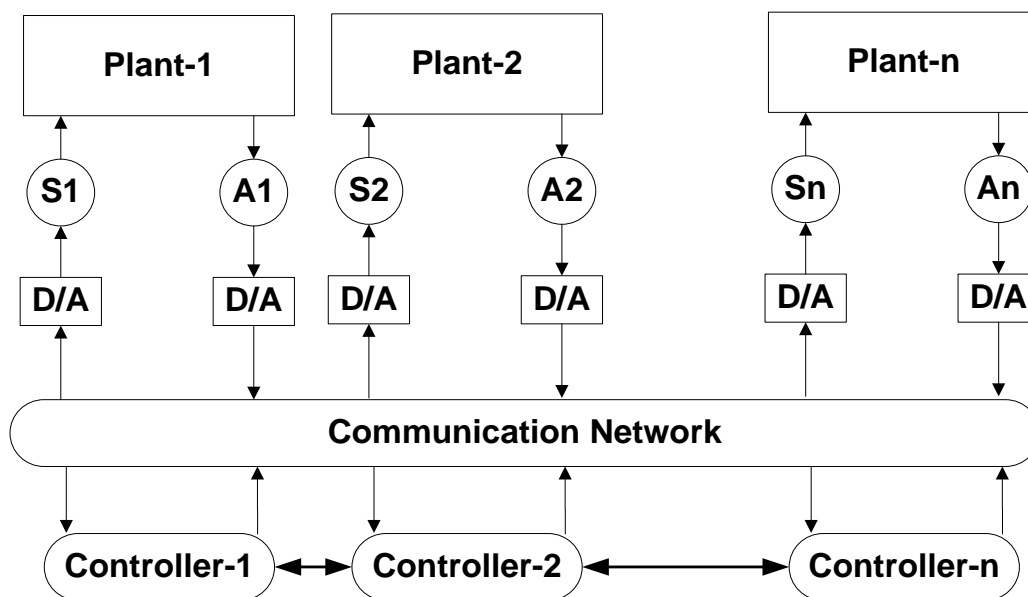
يوضح الشكل (4-4) البنية اللامركزية لنظم التحكم الشبكية. تعتمد كل عقدة تحكم فقط على المعلومات المحلية التي تمتلكها وحدة التحكم لاتخاذ قرارها المحلي. في هذه الهيكلية، لا تشارك عُقد التحكم معلوماتها مع العقد المجاورة المقابلة. إن هذه الأنواع من البنية مفيدة في تقليل الزمن المستغرق لتحليل وتركيب نظم التحكم بالشبكة. وبالتالي فإن وحدات التحكم ضمن هذه الهيكلية هي وحدات تحكم لا مركزية. واستخدمت البنية اللامركزية في العديد من الأبحاث في وقتنا الراهن [116-119].



الشكل (4-4): البنية اللامركزية

4.3.3 البنية الموزعة:

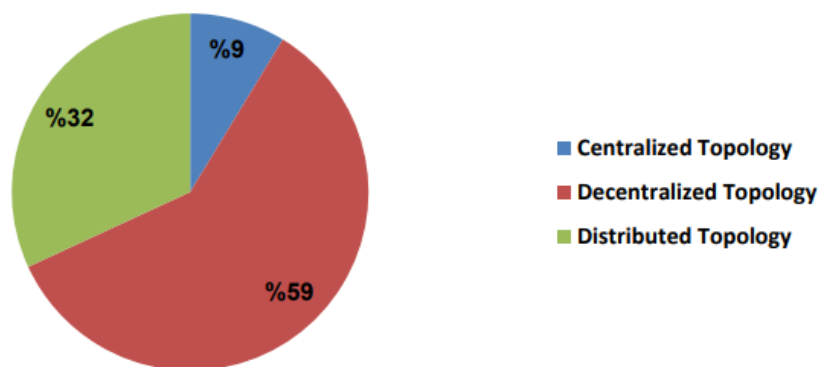
استخدمت البنية الموزعة الموضحة في الشكل (4-5) في [120] بحيث تمت مناقشة التحكم في تردد التحميل لنظام طاقة متعدد المناطق متصل بالشبكة. هناك نوعان من الخصائص الهامة لهذه الهيكلية: يتم تبادل معلومات النظام الفرعي بمساعدة شبكة الاتصالات المشتركة، ويتكون النظام من عدد كبير من الحساسات والمشغلات المترابطة لتحقيق الهدف المطلوب. يُسمح أيضاً لكل وحدة تحكم بمشاركة معلوماتها المحلية مع وحدات التحكم المجاورة المقابلة. وبالتالي، فإن وحدات التحكم الموزعة قادرة على تنسيق سلوكها عن طريق إرسال واستقبال المعلومات من وإلى وحدات التحكم الأخرى. إذاً فإن وحدات التحكم هنا هي وحدات تحكم موزعة. ومن أهم مزايا هذا النوع من البنية هي: الجزئية، وقابلية التوسع، والمثانة. واستخدمت في عدد من الأوراق البحثية الحديثة [120,121,122].



الشكل (4-5): البنية الموزعة.

إن غالبية الأعمال البحثية تستخدم البنية اللامركزية حيث تعمل وحدة التحكم بشكل مستقل لعدد محدد من الأنظمة التحكمية، ولها العديد من المزايا مقارنة بالبنية المركزية مثل تقليل زمن الشبكة في إرسال البيانات، وتقليل ازدحام الشبكة، وما إلى ذلك. كما تعتبر الهيكلية الموزعة في مرحلة التطوير وله تطبيقات عديدة في NCS. إن التركيز الآن يتحول نحو الهيكلية الموزعة لنظم التحكم بالشبكة. ويوضح الشكل (4-6) أن التركيز الرئيس [113] على البنية اللامركزية (59%)، تليها البنية الموزعة (32%) بينما البنية المركزية هي البنية الأقل تفضيلاً (9%).

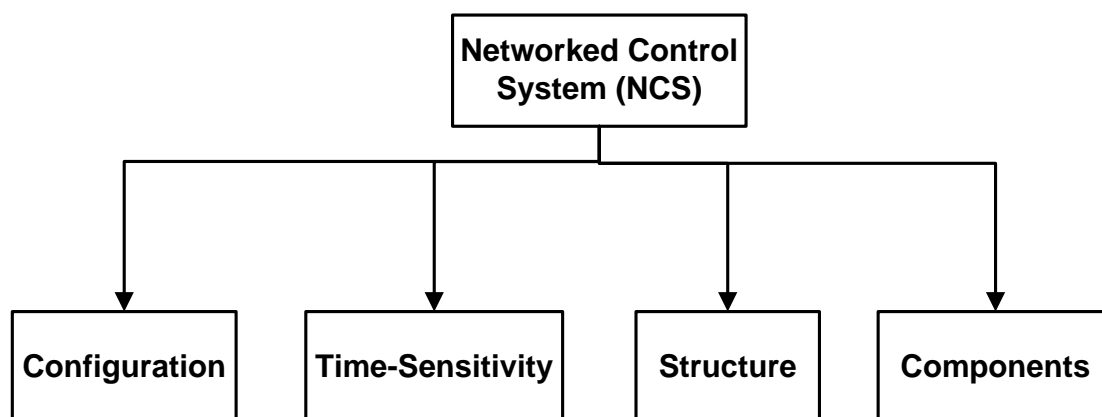
Utilization of different topologies in NCSs



الشكل (4-6): نسب استخدام البنية المختلفة لنظم التحكم الشبكية [113]

4.4 الهيكلية العامة لنظم التحكم الشبكية:

يوضح الشكل (4-7) المخطط العام لنظام التحكم الشبكي وفقاً لخصائصه مثل المكونات (Configuration) وحساسية الزمن (Time Sensitivity) والبنية (Structure) والعناصر (Components).



الشكل (4-7): المخطط العام لنظام التحكم الشبكي.

4.4.1 مكونات نظام التحكم الشبكي:

تعتمد مكونات NCS على مجالات التطبيق الخاصة به [123]:

4.4.1.1 التحكم في الأنظمة المعقدة (Control of Complex Systems) [124,125]

أنظمة التحكم المعقدة هي أنظمة واسعة النطاق تحتوي على عدد من الأنظمة الفرعية. تتكون هذه الأنظمة الفرعية من الحساسات والمشغلات والمتحكمات. وتسمى هذه الأنظمة بالمعقدة نظراً لتعقيد الدارات المراد وصلها من الحساسات والمشغلات. نتيجة لذلك، يتم تطبيق NCS لتقليل تعقيد مكونات الأسلاك ولتحقيق المرونة في التركيب والصيانة واستكشاف الأخطاء وإصلاحها [126,127].

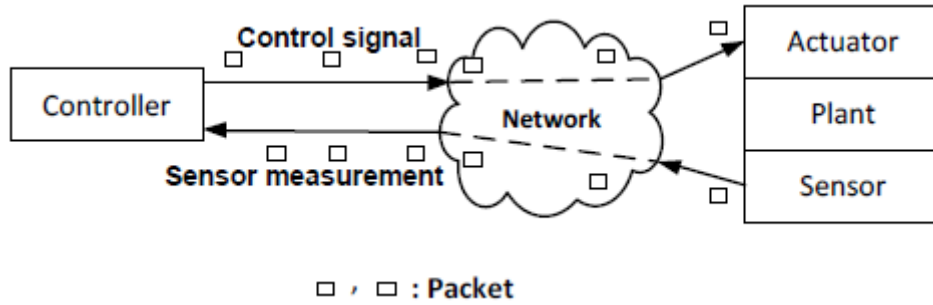
4.4.1.2 التحكم في الأنظمة عن بعد (Control of Remote Systems) [128,129]

في هذه الحالة يتم تثبيت وحدة التحكم المركزية في الموقع المحلي بينما يقع المصنع في موقع بعيد عنه. أي يمكن أن يكون الموقع المحلي على بعد عدة كيلومترات من الموقع البعيد. وتعتبر هذه الأنظمة من فئات أنظمة المراقبة وتحصيل البيانات [130]. يكون هناك رابط اتصال مخصص بين المتحكم والكائن الذي يتم التحكم فيه في نظام التحكم عن بعد. مثال على ذلك الطائرة التي يتم التحكم فيها عن طريق الراديو. في هذه الحالة، لا تستطيع الطائرات الأخرى مشاركة ذات تردد الاتصال. عادة ما يكون هذا النوع من الأنظمة مكلفاً للغاية من حيث الصيانة والتركيب والتحديث. هناك طريقة أكثر فعالية من حيث التكلفة لتحقيق التحكم عن بعد وهي الاستفادة من الشبكة المشتركة. ومن الأمثلة على ذلك الإنترنت المتاح بسهولة بالإضافة إلى التكلفة المنخفضة.

4.4.2 هيكلية نظم التحكم الشبكية:

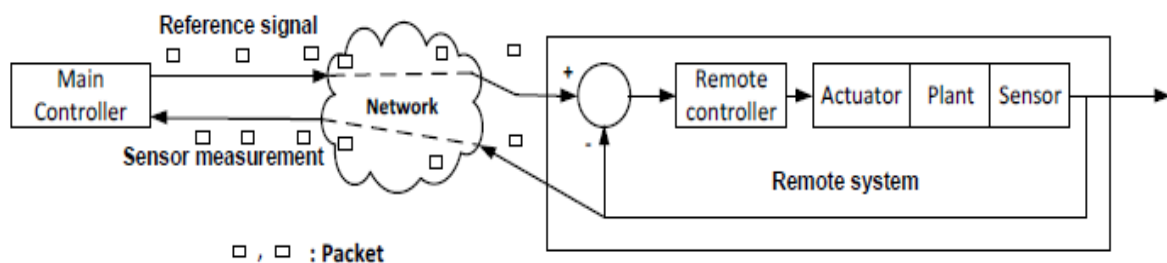
هناك طريقتان عامتان للتصميم في أنظمة التحكم الشبكية وهما: الهيكل المباشر والهيكل الهرمي (غير المباشر) [131]. يتكون NCS في الهيكل المباشر من متحكم ونظام بعيد يحتوي على نظام فيزيائي وحساسات ومشغلات

كما هو موضح في الشكل (4-8) [131]. يتوضع المتحكم والنظام فعلياً في أماكن مختلفة وترتبط مباشرة بشبكة بيانات لتحقيق التحكم في الحلقة المغلقة عن بُعد. يحسب المتحكم إشارة التحكم ويرسلها كحزمة عبر الشبكة إلى النظام. بعد ذلك يتم إرجاع خرج النظام إلى المتحكم عن طريق وضع قياسات الحساس في حزمة أيضاً. من الأمثلة NCS التي تستخدم الهيكل المباشر مخبر التعلم عن بعد [132]، ونظام التحكم في سرعة المحرك [133].



الشكل (4-8): الهيكل المباشر لتصميم NCS [131].

من ناحية أخرى، يتكون الهيكل الهرمي من متحكمين هما المتحكم الرئيس (Main Controller) ونظام الحلقة المغلقة البعيدة مع المتحكم الخاصة به (Remote Controller) كما هو موضح في الشكل (4-9) [131]. يقوم المتحكم الرئيس بحساب وإرسال الإشارة المرجعية في حزمة عبر الشبكة إلى النظام البعيد. بعد ذلك يقوم النظام البعيد بمعالجة الإشارة المرجعية لإجراء التحكم المحلي في الحلقة المغلقة وإرجاع قياسات الحساس إلى المتحكم الرئيس للتحكم في الحلقة المغلقة المتصلة بالشبكة. عادةً ما تحتوي حلقة التحكم المتصلة بالشبكة على زمن أخذ عينات أطول من حلقة التحكم المحلية نظراً لأنه من المفترض أن يأخذ المتحكم عن بُعد الإشارة المرجعية قبل معالجة الإشارة المرجعية التي وصلت حديثاً [131]. بمعنى آخر، يتم تبادل البيانات بين المكونات مباشرة في حالة الهيكل المباشر مقارنة بالهيكل الهرمي حيث يتعين على المتحكم المركزي انتظار الموافقة عن القيمة المرجعية قبل اكتمال القياسات وكذلك إشارات الإنذارات وإشارات الحالة [111]. تشمل التطبيقات التي تستخدم نوع الهيكل الهرمي (غير المباشر) الروبوتات المتنقلة [134].



الشكل (4-9): الهيكل الهرمي (غير المباشر) لتصميم NCS [131].

تجمع بعض نظم التحكم الشبكية بين هذين الهيكلين وبالتالي تشكل بنية هجينة. ومن الأمثلة على ذلك مخبر التدريس عن بُعد [135]. تعتبر متطلبات التطبيق المراد دراسته واختيار المصمم من العوامل الرئيسية في التحديد بين الهيكل المباشر أو الهرمي. فمثلاً، قد يُفضل الهيكل المباشر في حالة أن الهدف هو تحقيق استجابة تحكم أسرع لسرعة محرك DC عبر الشبكة [133]. بينما، قد تتطلب روبوتات المناورة عادة عدة محركات في مفاصل الروبوت لتدور معاً بشكل متزامن وسلس وهذا يحتاج إلى بنية هرمية لتطوير نظام تحكم أكثر قوة [136].

4.4.3 التطبيقات الحساسة وغير الحساسة للزمن (Time sensitive and time insensitive applications)

باعتبار الزمن عامل مهم جداً في نظم التحكم الشبكية، يمكن تصنيف NCS إلى صنفين هما:

4.4.3.1 التطبيقات الحساسة للزمن (Time-critical/time-sensitive applications)

تعرف التطبيقات الحساسة للزمن (الدرجة) بأنه إذا لم تكتمل العملية في وقت محدد، فإن فشلها يعتبر أمراً حتمياً. يمكن أن يكون هذا الفشل عبارة عن خرج غير مرغوب به أو رديء إلى حد ما ويمكن أن يؤدي إلى تلف النظام. ومن الأمثلة على هذه الأنظمة ذات الأهمية الزمنية، التشغيل عن بعد عبر الشبكة، والقيادة الآلية على الطرق السريعة، والعمليات تحت سطح البحر، وعمليات مكافحة الحرائق أو حتى العمليات العسكرية.

4.4.3.2 التطبيقات غير الحساسة للتأخير الزمني (Time-delay-insensitive applications)

تعرف التطبيقات غير الحساسة للتأخير الزمني بأنه على الرغم من أنها تعمل في الزمن الحقيقي، إلا أنه لا يزال بالإمكان إكمالها بعد الزمن المحدد دون عواقب كبيرة، أي أنها ليست حرجية للزمن. ومن الأمثلة عليها البريد الإلكتروني، وبروتوكول نقل الملفات (FTP)، وخادم شبكة (DNS)، وبروتوكول نقل النص التشعبي (HTTP).

في الأنظمة التي يتم تشغيلها عن بعد، يختلف مستوى التدخل البشري أيضاً من تطبيق إلى آخر [130] بالنظر إلى التدخل البشري، يمكن تصنيف ثلاث مجموعات وهي:

- التشغيل عن بعد مع تدخل بشري.
- التشغيل عن بعد دون تدخل بشري.
- الأنظمة الهجينة التي تعمل عن بعد.

4.4.4 عناصر نظم التحكم الشبكية:

تتألف نظم التحكم الشبكية من أربعة مكونات رئيسية وهي:

4.4.4.1 الحساسات المسؤولة عن تحصيل المعلومات:

تتطلب NCS جمع البيانات باستخدام الحساسات الموزعة في الشبكة لدراسة النظام المراد التحكم به. كما يمكن أن تأخذ بيانات الحساس أي شكل مثل درجة الحرارة والضغط والوزن والصور والمصفوفات ومقاطع الفيديو وغيرها الكثير. يحتل الحساس مكاناً مهماً جداً في NCS لأنه لا يمكن أن يكون هناك تحكم فعال إذا لم يكن الحساس على درجة كافية من الحساسية لتقديم الحالة الفعلية للنظام المطروح للدراسة. نتيجة لذلك، هناك الكثير من الأبحاث حول الحساسات تتضمن شبكات الحساسات [137]، وتطوير البرمجيات الوسيطة (Middleware) وأنظمة التشغيل لعقد الحساسات [138]، وضمان المعلومات [139]، وعقد الحساسات الموفرة للطاقة [140] وحساسية البيانات. بالإضافة إلى استخدام بيانات الصور لتطبيقات المراقبة [141]، وروبوتات الملاحة، وتتبع الهدف والتشغيل عن بُعد. كما يتم التحكم في المركبات الأرضية والجوية [142] من خلال خوارزميات أنظمة الاستشعار المرئية وغيرها من أنظمة الاستشعار المحلية.

4.4.4.2 التعليمات والأوامر الصادرة من المتحكم:

إن قانون التحكم يضمن بأن تتبع المنظومة التحكمية مساراً مرغوباً معيناً. حيث طبق الباحثون استراتيجيات مختلفة للتحكم في NCS، بدءاً من المتحكم PID والتحكم الأمثل (Optimal Control) والتحكم التكيفي (Adaptive Control) والتحكم الممتين (Robust Control) والتحكم الذكي (Intelligent Control) والعديد من الأشكال الحديثة الأخرى لخوارزميات التحكم. إذ إنه نظراً للتأخير الزمني الناجم عن الشبكة وضياع البيانات، فإن تطبيق كل استراتيجيات التحكم هذه عبر الشبكة يعد مهمة صعبة للغاية.

4.4.4.3 المشغلات التي تعمل على تنفيذ الاتصالات والتحكم:

كما هو الحال لوجود حساسات موزعة في نظم التحكم الشبكية في مواقع مختلفة، فمن الضروري أيضاً أن يكون هناك مشغلات متصلة بواحد أو أكثر من المتحكمات عبر الشبكة. هذا يساعد على تحقيق قابلية التوسع في NCS.

4.4.4.4 الاتصالات:

هناك العديد من وسائل الاتصال التي يمكن استخدامها في نظم التحكم الشبكية بما في ذلك خطوط الهاتف وشبكات الهواتف المحمولة وشبكات الأقمار الصناعية و CAN و INTERNET و LAN و WLAN و GPS. الإنترنت هو الأكثر استخداماً نظراً لحقيقة أنه غير مكلف وقادر على تغطية مواقع جغرافية واسعة النطاق. كما يمكن استخدام أنظمة GPS لتحديد مواقع المركبات في جميع أنحاء العالم. ومع ذلك، يمكن للتطبيقات العسكرية والجراحية والتطبيقات الطبية الطارئة الأخرى استخدام شبكات الألياف الضوئية المخصصة لضمان سرعة عالية واتصالات موثوقة للبيانات [130]. في كل هذه الأمور، يعتمد اختيار الشبكة في الغالب على متطلبات التطبيق ولكن من الجيد مراعاة سهولة الاستخدام والموثوقية والتوافر والأمان [110].

أول شبكة تبديل للحزم في العالم (Advanced Research Projects Agency Networks: ARPANET) طُورت من قبل وزارة الدفاع الأمريكية في عام 1969 [110]. بعد ذلك جاء الناقل الحقلي (Field Bus) مع أشكاله المختلفة مثل (Process Field Bus: Profibus) في عام 1989 والذي يستخدم لتكنولوجيا الأتمتة الصناعية وشبكة (Controller Area Network: CAN). على الرغم من أن هذه الشبكات المبكرة مثل Profibus و CAN توفر اتصالاً موثوقاً في الزمن الحقيقي للأنظمة الموزعة الصناعية، إلا أنها مملوكة وغير متوفرة تجارياً كما أن صيانتها باهظة الثمن. وفي الوقت الحالي أصبح بروتوكول Ethernet من أكثر البروتوكولات تطبيقاً على نطاق واسع، نتيجة لكلفته المنخفضة ولتوافقه مع الإصدارات السابقة.

4.5 اتجاهات البحث في نظم التحكم الشبكية:

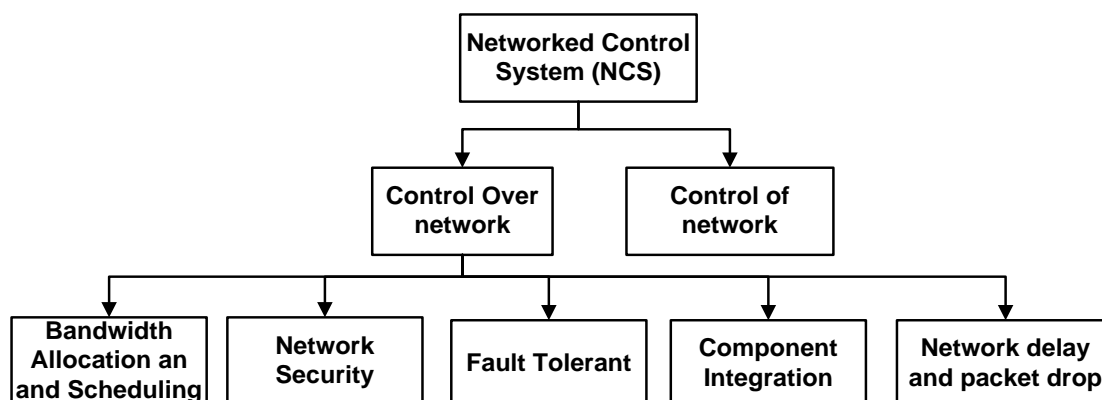
يتم دراسة نظم التحكم الشبكية عادة من منظورين مختلفين كما يوضح الشكل (4-10) وهما:

4.5.1 التحكم في الشبكة (Control of Network).

يتضمن التحكم في الشبكة (Control of Network) تحسين شبكة الاتصال من خلال تقليل الازدحام عبر الشبكة، والتحكم في التوجيه، وبروتوكول الشبكات، واتصال البيانات الفعال، وما شابه لتحسين جودة الشبكة وجودة الخدمة. على سبيل المثال، تم اقتراح خوارزميات مختلفة للتحكم في الازدحام وتجنب حدوثه [143-145]. للحصول على أداء أفضل عندما تكون حركة مرور الرزم عبر الشبكة أعلى من الحد الذي يمكن للشبكة التعامل معه.

4.5.2 التحكم عبر الشبكة (Control over Network).

يركز التحكم عبر الشبكة (Control over Network) [146,147] على تصميم أنظمة التحكم واستراتيجيات التحكم لتحسين أداء نظم التحكم الشبكية. يعتبر التحكم عبر الشبكة هو النهج المستخدم في هذه الأطروحة. يوضح الشكل (4-10) الأبحاث المستخدمة في NCSs وتنفيذها [110].



الشكل (4-10): الأبحاث المستخدمة في NCSs [110].

4.5.2.1 تخصيص وجدولة عرض النطاق (Bandwidth Allocation and Scheduling):

بما أن نظم التحكم الشبكية تتم باستخدام قنوات الاتصال مثل Ethernet و DeviceNet و CAN على سبيل المثال، فقد تكون هناك حالة منافسة بين العقد المتعددة التي تصل إلى الشبكة. إذ تحدث هذه الظاهرة عندما تحاول عقد متعددة الوصول إلى الشبكة في نفس الوقت مما يؤدي إلى ازدحام في الشبكة [148]. لذلك هناك حاجة إلى الاستخدام الأمثل لعرض النطاق المتاح لضمان تقديم خدمة فعالة في مواجهة الطلبات المتنافسة من العقد. لتحقيق ذلك، يتم استخدام العديد من الأساليب بما في ذلك مبدأ (Maximum-Minimum Fair: MMF) الذي يساعد على إيجاد مخطط توزيع نطاق معقول للطلبات المتنافسة [110]، والحد الأقصى للفاصل الزمني المسموح به (Maximum Allowable Time Interval: MATI). حيث هناك العديد من الدراسات في هذا المجال لجدولة MATI [149-153]. كما أنه من أجل ضمان استقرار نظم التحكم الشبكية، لابد من حساب الحد الأعظمي المسموح به للتأخير الزمني (Maximum Allowable Delay Bound: MADB)، بالإضافة إلى أنه يجب أن تكون لطريقة جدولة الشبكة المراد استخدامها زمن أخذ عينات ضمن MADB. إذ يتم ذلك عن طريق استخدام طرائق جدولة NCS واستراتيجية تخصيص النطاق الديناميكي. تشمل الدراسات التي تعتمد طرائق جدولة NCS، (Rate Monotonic Scheduling: RMS) وخوارزمية (Deadline Monotonic Scheduling: DMS) التي يستخدمها باحثو الأنظمة المضمنة للمعالجة المتوازية والتعدد في العمليات.

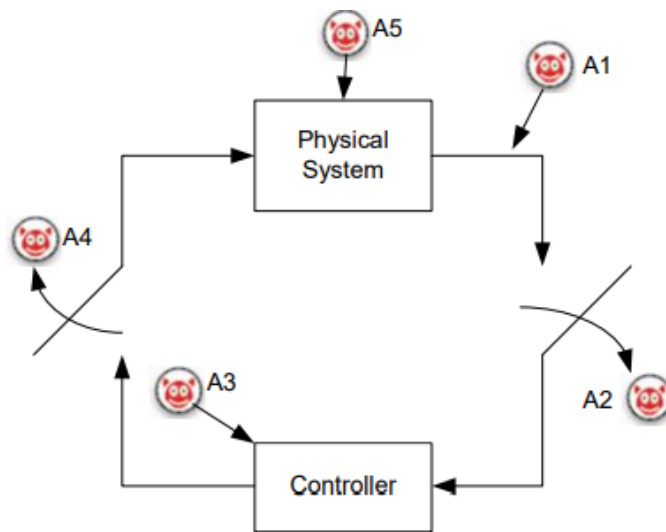
في حالة تخصيص النطاق الديناميكي (Dynamic Bandwidth Allocation: DBA)، يتم استخدام هذا الأسلوب للشبكات التي تدعم تطبيقات الوسائط المتعددة. تشمل الأمثلة VoIP و Video traffic وشبكات ATM. كما يمكن تحسين أداء IP عبر الشبكة الضوئية باستخدام DBA اعتماداً على نموذج إعادة التخصيص وطوبولوجيا الشبكة. كما أجريت دراسة أخرى ضمن هذا المجال وهي تخمين البارامترات الموزعة في شبكات الحساسات اللاسلكية [154]. في 2013 أجرى Zhang [148] وآخرون دراسة على NCS كشفت بأنه وفقاً لجدولة إرسال الرزم الناتجة من عقد الحساسات المتعددة، من الصعب ضمان أخذ العينات الثابت في نظم التحكم الشبكية. نتيجة لذلك، يمكن القول إن الفاصل الزمني بين إرسال واستقبال عينتين متتاليتين غير مؤكد وكبير بشكل ملحوظ. وبالتالي فإن هذا الوضع يؤثر بشكل واضح على استقرار النظام [155,156]. بشكل عام، يمكن أن تكون أزمدة أخذ العينات المتغيرة بمرور الزمن إما ثابتة أو غير ثابتة [136]. بالنسبة للحالات غير الثابتة، قد تختلف فيما يتعلق بالزمن أو حالة النظام أو يتم التحكم بها من قبل مشرف خارجي.

4.5.2.2 أمن الشبكة:

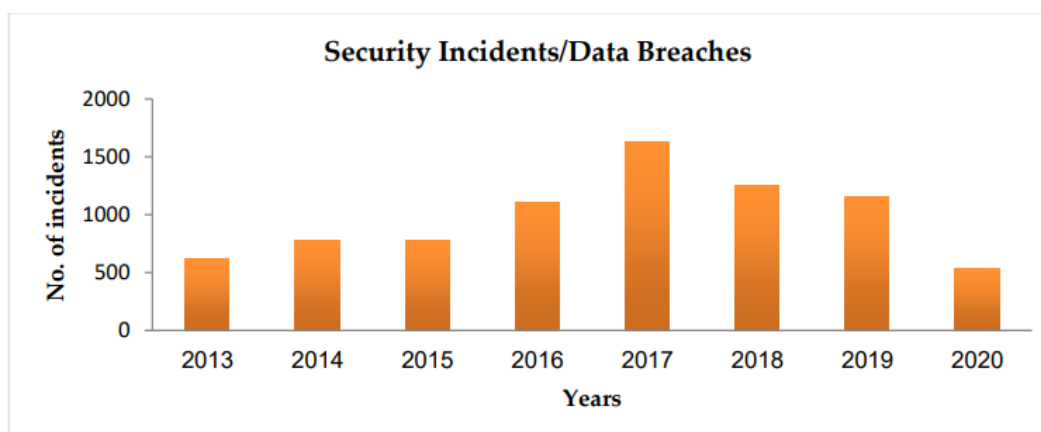
يعد أمن نظم التحكم الشبكية أحد التحديات الرئيسية المختلفة التي تحظى باهتمام كبير هذه الأيام [157-159]. إذ تعتبر أي شبكة عرضة للاختراق وخاصة الشبكات اللاسلكية. وبالتالي فإنه لابد من تضمين وتطوير الأمن

الشبكي المتقدم ضمن NCS. وبما أن نظم التحكم الشبكية تستخدم في البيئات الخطرة مثل محطات المفاعلات النووية، والمشاريع الفضائية، والتطبيقات العسكرية، فلا بد من توفير الأمن الكافي لهذا النوع من الشبكات. أجرى Dzong وآخرون [160] دراسة تستند إلى نظام اتصال مفتوح، وقدم المؤلفون أيضاً لمحة عامة عن أمن تكنولوجيا المعلومات في الأتمتة الصناعية بالإضافة إلى عدد من التدابير الوقائية. تستخدم اليوم أنظمة كشف التسلل (Intrusion Detection Systems: IDS) للمساعدة في أمن الشبكات [161]. كما طور المؤلفون [162] بنية أساسية لمعالجة قضايا التحكم في شبكات الأجهزة الموزعة ضمن بيئات مفتوحة وديناميكية. في بعض الحالات، يمكن التعامل مع مشكلة NCS من منظور تكنولوجيا المعلومات حيث يتم التعامل مع مسألة الأمن من وجهة نظر (IT). يمكن وصف الهجمات على NCS كما في الشكل (4-11) [113] باختصار على النحو التالي:

يرمز A1 و A3 إلى هجمات الخداع، حيث يرسل الشخص بيانات مزورة إما من الحساسات أو من المتحكمات. حيث تتكون البيانات المزورة إما من تنفيذ خاطئ مثل وقت التنفيذ غير الصحيح أو معرف (ID) المرسل غير الصحيح. عندها سيحصل الشخص من خلال هذه الأنواع من الهجمات على المفتاح أو من خلال التعاون مع بعض الهجمات على الحساسات (A1) أو المتحكمات (A3). تشير الهجمات A2 و A4 إلى هجمات رفض الخدمة (Denial of Service: DoS)، حيث يمنع الشخص من قبل المتحكم من الحصول على قياسات الجهاز. لإطلاق هجمات DoS يقوم الشخص بتشويش قنوات الاتصال المرتبطة، والتفاوض على الأجهزة لإيقافها، ومهاجمة بروتوكولات التوجيه. يرمز الهجوم A5 إلى هجوم على الفور ضد المشغلات. لذلك، يجب بذل محاولات لمنع تفاوض المشغلات والهجمات المباشرة الأخرى ضد النظام المادي. من خلال تأمين النظام المادي المهاجم، وكاميرات المراقبة، وما إلى ذلك. يوضح الشكل (4-12) [113] أن عدد الأحداث الأمنية قد ازداد، وهو ما أبلغ عنه فريق الاستجابة للطوارئ السيبرانية لأنظمة التحكم الصناعية (ICS) [115].



الشكل (4-11): وصف الهجمات على NCS [113].



الشكل (4-12): إحصائيات لحوادث الاختراق ضمن NCS [113].

يوضح الشكل (4-12) بأن حوادث الاختراق ضمن NCS بدأت في الازدياد منذ عام 2013 وبلغت ذروتها عند عام 2017، ومن ثم بدأت بالتناقص منذ عام 2017 وحتى 2020 وذلك نظراً لتطبيق الاستراتيجيات الوقائية المتخذة وتطوير الأمن الشبكي المتقدم ضمن NCS [163].

4.5.2.3 التحكم في التسامح مع الخطأ:

يعتبر تطبيق التحكم في التسامح مع الخطأ (Fault Tolerant Control: FTC) ضرورياً جداً من أجل منع فشل النظام. إذ أجريت العديد من الدراسات لتحقيق FTC، في عام 2004 قدم Patankar [164] نموذجاً للتسامح مع الخطأ في نظم التحكم الشبكية باستخدام (Time-Triggered Protocol Communication). بينما درس Huo الجدولة والتحكم لتصميم نظام تحكم متين للتسامح مع الخطأ في نظم التحكم الشبكية [112].

4.5.2.4 تكامل المكونات:

بما أن NCS يشتمل على وحدات مستقلة مختلفة، لذلك لابد من إيجاد طريقة لدمج وتنسيق كل هذه الوحدات المستقلة لتشكيل نظام واحد موزع. هذا يعني أنه بصرف النظر عن تحسين كل وحدة مستقلة، يجب أن يكون النظام الرئيس الموزع فعال بما يكفي لتحقيق هدف NCS. إذ طور مجموعة من الباحثين نظام تحكم وبرمجة متكامل يستخدم التحكم المتكامل في مصنع إنتاج كبير لصناعات مختصة بإدارة الطاقة. كما عمل Gupta [110] وآخرون على دراسة نظام ملاحية متكامل متعدد الحساسات ومتصل بشبكة تحكمية للروبوتات المتعددة من خلال دراسة الجوانب العملية لتصميم وبناء نظام تحكم شبكي باستخدام الإنترنت كوسيلة اتصال.

4.5.2.5 تكيم البيانات Data quantization:

نظراً لأن وسيط الشبكة رقمي بطبيعته، يتم استخدام وحدة التحكم الرقمية في نظام التحكم الشبكي. لذلك يجب تكيم خرج النظام قبل الإرسال إلى وحدة التحكم من خلال وسيط الشبكة. ونظراً لأن البيانات يجب أن تكتم، لابد أن يكون هناك خطأ في التكيم من الممكن تقليله عن طريق زيادة عدد البتات المستخدمة في التكيم.

نظراً لأن التحكم الرقمي في NCS أمر لا مفر منه، فإن وجود التكميم يؤثر على استقرار NCS. إذ تعتقد بعض الدراسات أن التكميم أمر حتمي ولكن يمكن تجاهله، كما يؤكد البعض الآخر آثاره السلبية في NCS [136]. تشمل الدراسات التي تم إجراؤها بشأن التكميم: التكميم مع تأخير الشبكة [166]، والتكميم مع ضياع الرزم [167]، بالإضافة إلى التكميم مع ضياع الرزم والتأخير [168].

4.5.2.6 تأخير الشبكة وضياع الرزم

هناك عيبان رئيسيان في أنظمة التحكم المتصلة بالشبكة، وهما تأخيرات الشبكة وضياع الرزم. يؤدي ضياع الرزم في نظام التحكم المتصل بالشبكة أيضاً إلى تدهور أداء النظام. كما يمكن أن يكون ضياع الرزم ثابتاً أو متغيراً بمرور الوقت أو حتى عشوائياً ويحدث بسبب عدم موثوقية الشبكة.

تحدث حالات ضياع الرزم الناتجة عن الشبكة بسبب أخطاء أو خسائر لا يمكن تجنبها في إرسال الرزمة بسبب مشاركة الشبكة ووجود حالات عدم اليقين والتشويش في قناة الاتصال [154]. ينشأ انخفاض الرزمة النشط عندما تكون مجموعة NCS غير قابلة للجدولة، إذ يتم إسقاط الحزم عن قصد من أجل المحافظة على معدل الإرسال المخصص، وذلك لغرض التحكم في الازدحام وللتأكد بأن مجموعة NCS يمكن جدولتها، وبالتالي ضمان استقرار NCS الإجمالي [169].

4.6 التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية:

تعرف الأنظمة ذات التأخير الزمني بأنها الأنظمة ذات الزمن الميت (Dead Time) أو الأنظمة ذات التأثير اللاحق (Systems with after-effect). تحدث هذه الظاهرة عندما يتم توصيل النظام والمتحكم والحساسات من خلال شبكة مشتركة. ويعرف الزمن الميت في أنظمة التحكم بأنه الفاصل الزمني بين اللحظة التي ترسل فيها وحدة التحكم إشارة تحكم واللحظة التي يبدأ فيها متغير العملية المقاسة في الاستجابة لأول مرة. يمكن أن يكون أيضاً الفاصل الزمني بين لحظة إرسال الحساس قيمته المقاسة إلى المتحكم للحساب واللحظة التي يتم فيها استخدام تلك القيمة من خلال المتحكم للحساب. يمكن أن يكون الزمن الميت في أنظمة التحكم أكبر أو أصغر من وقت أخذ العينات. وبالنتيجة فإن التأخير الزمني يشكل تحدياً كبيراً على أداء أنظمة التحكم خاصة عندما تكون أكبر من وقت أخذ العينات [110].

4.6.1 أسباب حدوث التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية:

تظهر التأخيرات الزمنية في نظم التحكم بسبب أخذ العينات (تأخر القياس Measurement Lag)، وعدم ترابط الحساس أو المشغل (تأخر الاتصال Communication Lag)، وتأخر النقل (Transportation Lag) [170,171]. من هذه الأسباب:

• مسك وأخذ العينات (Sample and hold): يؤدي وجود حلقة مسك وأخذ العينات في العديد من أنظمة التحكم إلى عامل تأخير إضافي لزمن أخذ عينات واحد في كل حلقة. وبالتالي يتم زيادة الزمن الميت الاجمالي الذي يمر به النظام [171].

• في بعض الاحيان توجد أنظمة تحكم يتم فيها فصل النظام عن وحدة التحكم بمسافة جغرافية واسعة، وفي هذه الحالة يجب إجراء التحكم عن بُعد. قد يمثل الزمن الذي يستغرقه المتحكم لإرسال إشارات التحكم إلى النظام الواقع على بعد عدة كيلومترات زمناً ميثاً في نظام التحكم. في بعض الحالات، سيكون التبديل إلى جهاز قياس أسرع أو حتى تحديد موقع الحساس والتحكم بالقرب من بعضهما البعض كافياً للتخلص من الزمن الميت. بينما في حالات أخرى، يلاحظ بأن الزمن الميت متأصل في نظام التحكم والطريقة الوحيدة للتخلص منه هي تصميم استراتيجيات التحكم في شكل معوض للزمن الميت مثل متنبئ سميث لنظام التحكم.

• في بعض مخططات التحكم في العمليات، يمكن أن يؤدي الزمن اللازم للقياس من الحساس إلى تأخير زمني يؤثر على أداء النظام. على سبيل المثال، عند التعامل مع ظروف الطقس القاسية ضمن بيئة قاسية، من الممكن أن تكون المزدوجة الحرارية محمية. فإذا لم يتم توخي الحذر، يمكن للغطاء المحيط بالمزدوجة الحرارية أن يجعلها أقل حساسية لدرجة الحرارة البيئية مما يؤدي إلى تأخير في اكتشاف التغيرات في درجة الحرارة في السائل الذي يتم قياسه. كما أن الزمن الذي تستغرقه المواد للانتقال من نقطة إلى أخرى في نظام التحكم يمكن أن يشكل تأخيراً زمنياً. على سبيل المثال، إذا تغيرت درجة حرارة السائل المتدفق في الأنابيب وكان الحساس موجوداً على مسافة، فلن يتم اكتشاف درجة الحرارة الجديدة حتى يصل السائل إلى موقع الحساس. عندها فإن الزمن المستغرق لاستشعار درجة الحرارة الجديدة هو شكل من أشكال الزمن الميت.

اعتماداً على نوع الشبكة المستخدمة بالنسبة لأنظمة التحكم الشبكية، يمكن للشبكة إحداث بعض التأخيرات التي قد تكون ثابتة أو متغيرة بمرور الوقت أو عشوائية حسب بروتوكولات الشبكة المستخدمة. يوجد في NCS ثلاثة أنواع تأخير رئيسة تساهم في إجمالي التأخيرات الزمنية في نظام الحلقة المغلقة وهي [172]:

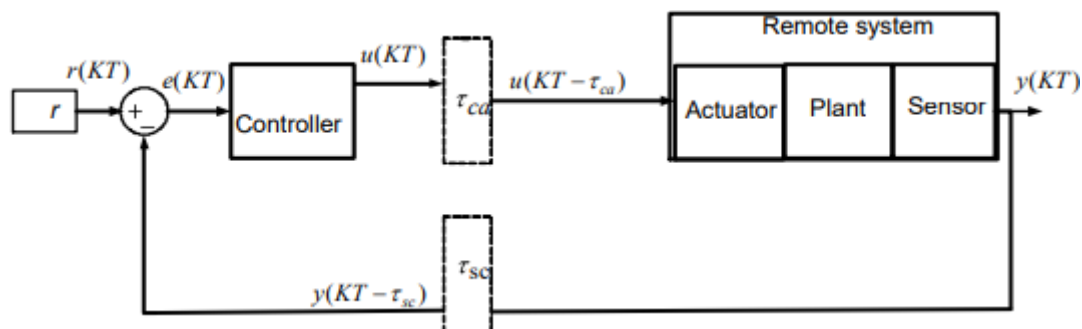
✓ τ_{SC} التأخير الزمني بين الحساس والمتحكم.

✓ τ_C التأخير الزمني في المتحكم.

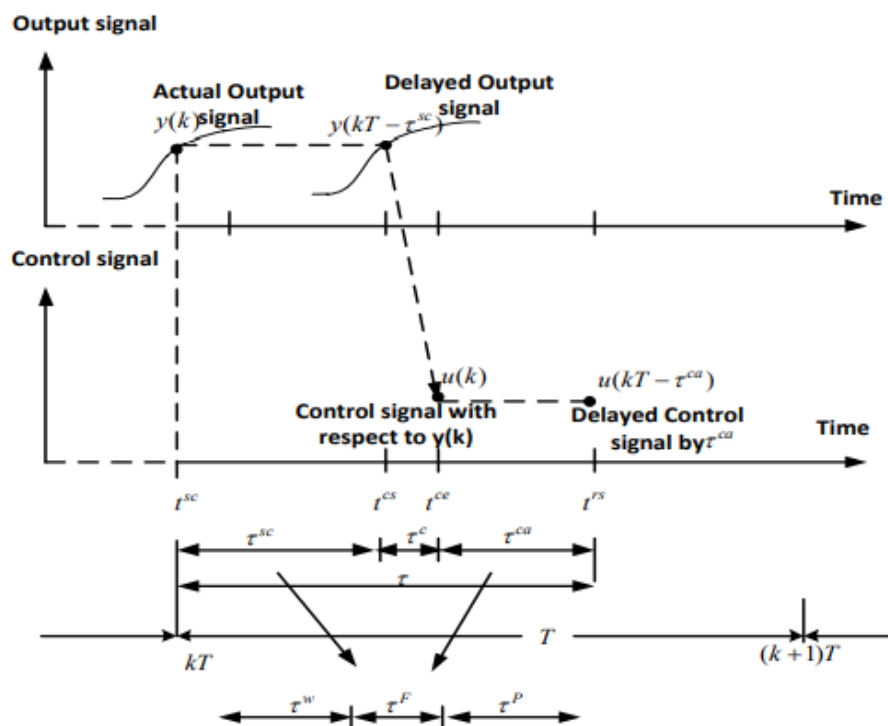
✓ τ_{Ca} التأخير الزمني بين المتحكم والمشغل.

4.6.2 التأخير الزمني في المسار الامامي والعكسي لحلقة التحكم في NCS:

يوضح الشكل (4-13) [138] التأخير الزمني في حلقة التحكم المغلقة في NCS، حيث $r(KT)$ تعبر عن الإشارة المرجعية، $u(KT)$ إشارة الدخل، $u(KT - \tau_{ca})$ هي الإشارة المتأخرة زمنياً بسبب التأخير الزمني الناجم عن الشبكة والمعروف بالتأخير الزمني بين المتحكم والمشغل (τ_{ca}) ، $y(KT)$ هي إشارة الخرج، $y(KT - \tau_{sc})$ إشارة الخرج المتأخرة زمنياً بسبب التأخير الزمني الناجم عن الشبكة والمعروف بالتأخير الزمني بين الحساس والمتحكم (τ_{sc}) ، K العينة الحالية، T زمن أخذ العينات. ويوضح الشكل (4-14) [136] المخطط الزمني الذي يصف انتشار التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية.



الشكل (4-13): التأخير الزمني في حلقة التحكم المغلقة في NCS [136]



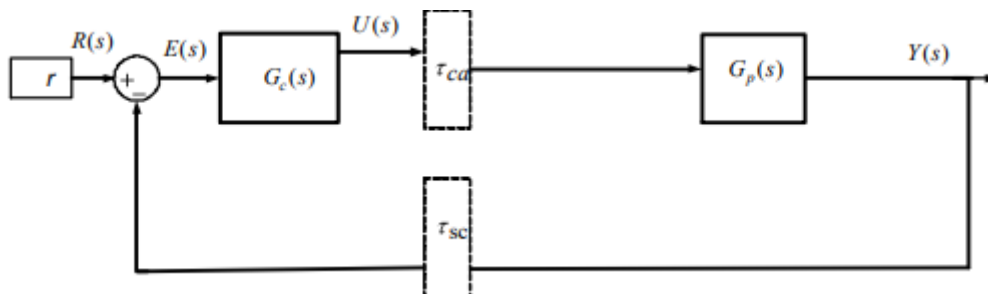
الشكل (4-14): انتشار التأخير الزمني ضمن NCS [136].

4.6.3 تأثير التأخير الزمني ضمن NCS

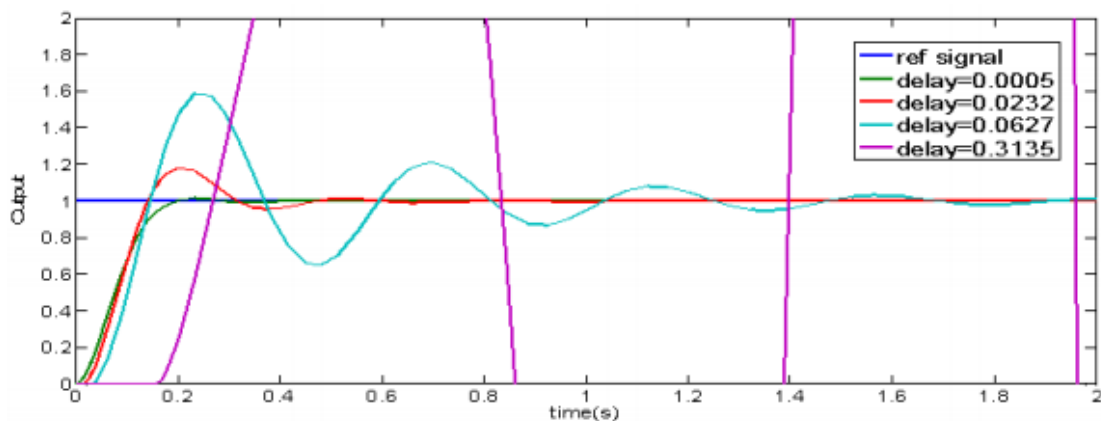
يمكن تصنيف تأثيرات التأخير الزمني الناجم عن الشبكة في NCS لقسمين:

4.6.3.1 تدهور استجابة النظام (Poor System response)

يتجلى تدهور استجابة النظام من خلال زمن الاستقرار (settling time) الأطول والتجاوز الأعلى (higher overshoot) الذي تواجهه أنظمة التحكم بسبب التأخيرات الزمنية الناتجة عن الشبكة. ويظهر ذلك جلياً في الشكل (4-15) حيث إن $G_P(s)$ تابع النقل للنظام المراد التحكم به، $G_C(s)$ تابع النقل للمتحكم. مع زيادة تأخيرات الزمنية للشبكة من 0.0005 إلى 0.3135 ثانية، يزداد تجاوز النظام ويواجه نظام التحكم زمناً أطول للاستقرار كما هو موضح في الشكل (4-16) [173].



الشكل (4-15): نظام التحكم في الحلقة المغلقة مع وجود التأخيرات الزمنية [173].



الشكل (4-16): استجابة الخطوة الواحدة للنظام بسبب تأثير التأخيرات الزمنية [173].

4.6.3.2 انخفاض هامش الاستقرار (Reduction in stability region)

انخفاض هامش استقرار النظام هو تأثير آخر للتأخير الزمني الناجم عن الشبكة. وهذا من شأنه أن يجعل النظام غير مستقر. قد لا يتم تحديد منطقة الاستقرار أو هامش الاستقرار للنظام عن طريق الطريقة التحليلية. في مثل هذه الحالات، يتم استخدام المحاكاة عن طريق زيادة التأخير واختبار مصفوفة نظام الحلقة المغلقة [171].

الفصل الخامس

نمذجة منظومة القدرة

الكهربائية

5.1 أهمية دراسة الاستقرار في نظم الطاقة الكهربائية:

توسعت في السنوات الأخيرة أنظمة الطاقة الكهربائية وتعاضمت أهمية التزويد المستمر للطاقة والتشغيل السلس للنظام مع المحافظة على موثوقية الخدمة الكهربائية، ومن هنا ظهرت أهمية دراسة استقرار نظم الطاقة الكهربائية والمؤلفة من مجموعة من الآلات المتواقة التي تعمل مع بعضها البعض على التوازي وتطور بسرعة متواقة. إذ إنه عند حدوث أي خلل في النظام سيتولد اضطراب يسري عبر خطوط النقل إلى الآلات المتواقة، باعتبار أن كل آلة تتحسس أو تتأثر بالعطل حسب حجمه وحسب موقعه، أي حسب بعده وقربه عن كل آلة [174,175].

ونتيجة لزيادة حجم وحدات التوليد واتجاه العالم نحو ربط أنظمة الطاقة الكهربائية ببعضها البعض لإنشاء نظام طاقة كهربائية يمتد على مساحة جغرافية واسعة مترابط ومؤلف من عدد كبير من محطات التوليد والتحويل بأنواعها المختلفة وأماكن وجودها المتباعدة التي قد تصل إلى آلاف الكيلو مترات من خطوط النقل، شهدت العقود الماضية اهتماماً كبيراً في مسألة الاستقرار الديناميكي لأنظمة الطاقة [176].

يمكن أن نعرف نوعين من الاستقرار حسب الحالة الأساسية للنظام قبل الاضطراب وذلك تبعاً لحجم الاضطراب أو لمطال الاضطراب وهما الاستقرار العابر والديناميكي [174,175]. إذ يكون النظام الكهربائي في حالة الاستقرار العابر إذا كان النظام قادراً على الوصول إلى الحالة الساكنة أو إلى حالة قريبة منها عندما يتعرض إلى اضطراب كبير، أما الاستقرار الديناميكي فيقصد به مقدرة النظام على الوصول إلى الحالة الساكنة عند تعرضه إلى تغيرات طفيفة في الحمولة.

5.2 أنواع الاهتزازات المؤثرة على استقرار نظام الطاقة الكهربائية:

نتيجة لزيادة حجم وتعقيد أنظمة الطاقة الكهربائية، غالباً ما تعمل تلك الأنظمة عند حدود استقرار منخفضة. لذلك، يعد تحسين استقرار نظام الطاقة الكهربائي أحد أهم المواضيع التي تضمن التشغيل الموثوق لأنظمة الطاقة الكهربائية. إن الاهتزازات منخفضة التردد والتي لوحظ أنها تسبب عدم الاستقرار الديناميكي للنظام يمكن تصنيفها كما يلي [177,178]:

- النمط المحلي من الاهتزازات (Local Mode of Oscillation) ويتراوح مجال تردد هذا النمط 0.8-1.8 [Hz] ويحدث عندما يهتز مولد أو مجموعة مولدات في محطة توليد محددة مؤثراً على استقرار النظام الكهربائي.
- النمط المتداخل بين المناطق (Inter Area Mode) يحدث هذا النوع من الاهتزازات المرافقة لعدة مولدات في جزء من النظام. إذ تهتز بالنسبة إلى بقية أجزاء النظام ويتراوح التردد الطبيعي لهذا النوع من الاهتزازات 0.2-

[0.5 Hz]. لقد تم ملاحظة هذه الاهتزازات في الخطوط الواصلة بين الجنوب الغربي من المحيط الهادي والشمال الغربي من المحيط الهادي في الولايات المتحدة الأمريكية. كما تم ملاحظتها في خطوط الربط بين القسم الشمالي والوسط الغربي في كندا. بالإضافة إلى ملاحظة الاهتزازات ذات الترددات المنخفضة على نظام الطاقة في اليابان الشرقية عند 0.4Hz. كما تم ملاحظة الاهتزازات المتداخلة نتيجة خروج 1400MW في شبكة فرنسا في 4 نيسان 2001 [179].

- Intra-System Mode: ينشأ بين الوحدات المنفردة ضمن النظام وتميل لتكون مشابهة للنوع الثاني.
- وهناك أنواع أخرى مرافقة لجهد الحقل يتراوح ترددها بين 3-6 Hz ويشار إليها بالنوع Exciter Mode [180].

5.3 تعريف مخمد الاهتزاز التقليدي:

تصمم مخمدات الاهتزاز التقليدية اعتماداً على نظرية التحكم الخطية بحيث يتم تحويل نظام الطاقة إلى نظام خطي حول نقطة العمل الاسمية، ويتم ضبط بنية وبارامترات PSS من أجل نقطة عمل محددة بحيث يكون قادراً على تقديم أداء أمثل للنظام من أجل هذه الحالة. كما هو معلوم فإن أنظمة الطاقة هي أنظمة غير خطية يمكن أن تتغير حالات عملها ضمن مجال واسع لذلك فإن مخمد الاهتزاز التقليدي (ذو البارامترات الثابتة) غير قادر على تقديم أداء أمثل للنظام على كامل مجال العمل [181].

إن التهيج المقدم من نظام التهيج لا يعطي التخامد الكافي لإخماد الاهتزازات الناشئة في النظام، لذلك نقوم بتأمين التخامد الإضافي اللازم من خلال التحكم الإضافي بالتهيج والذي يعرف بمخمد الاهتزاز (Power System Stabilizer: PSS). إن الهدف من مخمد الاهتزاز الذي يستخدم التحكم الإضافي بالتهيج هو إضافة تخامد بحيث ينتج مركبة من العزم الكهربائي على الدوار والتي يجب أن تكون متوافقة بالطور مع تغيرات السرعة.

هناك أنواع مختلفة من مخمدات الاستقرار تختلف فيما بينها من حيث نظرية التحكم المصممة عليها هذه المخمدات. وتبقى المسألة المرافقة لكل نوع من مخمد الاهتزازات هي: توليف مخمد الاهتزاز ضمن مجال واسع من حالات التشغيل، وأداء مخمد الاهتزاز عند حالات العطل.

5.4 مبررات استخدام مخمد الاهتزاز:

1. يحدث في الأنظمة الحديثة العديد من الاهتزازات الناشئة عن الأنواع المختلفة للاضطرابات مثل تغير حالات التحميل والدارات القصيرة في الأنظمة المترابطة والتي سوف تنعكس نتيجة الاستطاعة المتدفقة في خطوط الربط مسببة اهتزاز الآلات الموصولة إلى النظام.

2. معظم أنظمة الطاقة الحديثة تحتوي على أنظمة مؤلفة من خطوط نقل طويلة ومنابع تحكم بالتوليد. مثل هذه الأنظمة تمتلك ممانعات تسلسلية كبيرة تسهم في إمكانية عدم الاستقرار.
3. تعتبر مسألة تحسين استقرار نظم الطاقة الكهربائية منذ أكثر من ثلاثة عقود إحدى تحديات مهندسي نظم الطاقة. إذ أن الارتباط الكهروميكانيكي بين الدوار وبقية أجزاء النظام يتصرف بشكل مشابه لنظام تخامد كتلة نابض يتعرض لسلوك متأرجح حول حالة توازن تتبع أي اضطراب، مثل تغير مفاجئ في الحمولة، تغير في ثوابت خط النقل، التآرجحات في خرج العنف وغيرها من الأعطال. إن استخدام أنظمة التهيج ذات الربح العالي والتأثير السريع إضافة إلى التطور الكبير لأنظمة الطاقة المترابطة، مع نقل طاقة كبيرة عبر خطوط نقل ضعيفة زادت من خطورة المسألة، وأدت إلى نشوء اهتزازات في نظام الطاقة الكهربائي. هذه الاهتزازات تحد من مقدرة الشبكة الكهربائية على نقل الطاقة الكهربائية ويمكن أن تؤدي إلى فقدان التوافق وتعطل النظام بشكل كامل. إن استخدام مخدم الاهتزاز (PSS) يمكن أن يساعد في اخماد هذه الاهتزازات وتحسين استقرار النظام. الحل التقليدي والأكثر شيوعاً هو استخدام مخدم الاهتزاز التقليدي ولكن تبقى المسألة الأكثر أهمية هي توليف ثوابت مخدم الاهتزاز.
4. يعد الحفاظ على قيم اسمية ثابتة للتردد والجهد من أهم مقومات الأداء الجيد لنظم الطاقة الكهربائية، وهذا يأتي من الحفاظ الدقيق على توازن الاستطاعة الفعلية والردية بين التوليد والاستهلاك. ولكن نتيجة لتغيرات الحمولة والاعطال الكبيرة التي يمكن أن تصيب النظام، يحدث اختلاف بين الاستطاعة المولدة والمستهلكة مما قد يسبب تسارعاً أو تباطؤاً لدوار الآلة المتوافقة مؤدياً إلى تأرجح متحولات النظام مثل زاوية دوار المولد والسرعة والجهد على أطراف المولد والاستطاعة الكهربائية. هذه التآرجحات تزداد مع الزمن إذا لم يتوفر الاخمد الكافي لها مسببة عدم استقرار النظام وخروج المولدات عن التوافق.
5. تعد تغذية المستهلكين بالطاقة الكهربائية على نحو موثوق وجيد من أهم المواضيع التي تعني المصممين والقائمين على تشغيل نظام الطاقة الكهربائية. ويعد استقرار نظام الطاقة من أهم العوامل التي تحافظ على التغذية الموثوقة، نظراً لأن تغيرات حمولة المستهلكين عشوائية، وهذا يشكل اضطرابات في النظام تؤدي إلى نشوء اهتزازات فيه تنتقل عبر الاستطاعة المنقولة إلى دوار الآلات المتوافقة مؤدية إلى تأرجح متحولات الآلة ومسببة خروج الآلات عن التوافق، وانقطاع التغذية الكهربائية عن المستهلكين.

✓ معادلات الحالة للآلة المتوافقة:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\delta(t)}{\Delta\omega(t)} &= \frac{\omega}{S} = \frac{2\pi f}{S} ; \omega = 2\pi f \\ S \cdot \Delta\delta(t) &= 2\pi f \cdot \Delta\omega(t) , \Delta\delta'(t) = 2\pi f \cdot \Delta\omega(t) \\ \Delta\delta'(t) &= \omega_0 \cdot \Delta\omega(t)\end{aligned}\quad (1-5)$$

$$\begin{aligned}\Delta T_e(t) &= K_2 \cdot \Delta E'_q(t) + K_1 \cdot \Delta\delta(t) \\ \frac{\Delta\omega(t)}{-D \cdot \Delta\omega(t) + \Delta T_m(t) - \Delta T_e(t)} &= \frac{1}{2H \cdot S} ; M = 2H \\ 2H \cdot S \cdot \Delta\omega(t) &= -D \cdot \Delta\omega(t) + \Delta T_m(t) - \Delta T_e(t) \\ 2H \cdot S \cdot \Delta\omega(t) &= -D \cdot \Delta\omega(t) + \Delta T_m(t) - K_2 \cdot \Delta E'_q(t) - K_1 \cdot \Delta\delta(t) \\ 2H \cdot \Delta\omega'(t) &= -D \cdot \Delta\omega(t) + \Delta T_m(t) - K_2 \cdot \Delta E'_q(t) - K_1 \cdot \Delta\delta(t) \\ \Delta\omega'(t) &= \frac{-K_1}{2H} \cdot \Delta\delta(t) - \frac{D}{2H} \Delta\omega(t) - \frac{K_2}{2H} \cdot \Delta E'_q(t) + \frac{1}{2H} \Delta T_m(t) \\ \Delta\omega'(t) &= \frac{-K_1}{M} \cdot \Delta\delta(t) - \frac{D}{M} \Delta\omega(t) - \frac{K_2}{M} \cdot \Delta E'_q(t) + \frac{1}{M} \Delta T_m(t)\end{aligned}\quad (2-5)$$

✓ معادلات الحالة لنظام التهيج EXCITER من النوع (IEEE TYPE-1) ومنظم الجهد:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta E'_q(t)}{-K_4 \cdot \Delta\delta(t) + \Delta E_{fd}(t)} &= \frac{K_3}{1 + S \cdot K_3 \cdot T'_{d0}} \\ \Delta E'_q(t) + \Delta E'_q(t) \cdot S \cdot K_3 \cdot T'_{d0} &= -K_4 \cdot K_3 \cdot \Delta\delta(t) + K_3 \cdot \Delta E_{fd}(t) \\ \Delta E'_q(t) \cdot K_3 \cdot T'_{d0} &= -K_4 \cdot K_3 \cdot \Delta\delta(t) + K_3 \cdot \Delta E_{fd}(t) - \Delta E'_q(t) \\ \Delta E'_q(t) &= \frac{-K_4}{T'_{d0}} \cdot \Delta\delta(t) - \frac{1}{K_3 \cdot T'_{d0}} \cdot \Delta E'_q(t) + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta E_{fd}(t)\end{aligned}\quad (3-5)$$

$$\begin{aligned}\frac{\Delta E_{fd}(t)}{-\Delta V_t(t) + \Delta V_{ref}(t) + u(t)} &= \frac{K_A}{1 + S \cdot T_A} ; \Delta V_t(t) = K_5 \cdot \Delta\delta(t) + K_6 \cdot \Delta E'_q(t) \\ \Delta E_{fd}(t) + S \cdot T_A \cdot \Delta E_{fd}(t) &= -K_A \cdot K_5 \cdot \Delta\delta(t) - K_A \cdot K_6 \cdot \Delta E'_q(t) + K_A \cdot \Delta V_{ref}(t) + K_A \cdot u(t) \\ T_A \cdot \Delta E_{fd}(t) &= -\Delta E_{fd}(t) - K_A \cdot K_5 \cdot \Delta\delta(t) - K_A \cdot K_6 \cdot \Delta E'_q(t) + K_A \cdot \Delta V_{ref}(t) + K_A \cdot u(t) \\ \Delta E_{fd}(t) &= \frac{-K_A \cdot K_5}{T_A} \cdot \Delta\delta(t) - \frac{K_A \cdot K_6}{T_A} \Delta E'_q(t) - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd}(t) + \frac{K_A}{T_A} \Delta V_{ref}(t) + \frac{K_A}{T_A} u(t)\end{aligned}$$

عند عدم استخدام أي نوع من التحكم الإضافي يعتبر الحد $U = 0$ ، وبما أن الدخل المرجعي معدوم $\Delta V_{ref} = 0$ تصبح العلاقة وفق الآتي:

$$\Delta E_{fd}(t) = \frac{-K_A \cdot K_5}{T_A} \cdot \Delta\delta(t) - \frac{K_A \cdot K_6}{T_A} \Delta E'_q(t) - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd}(t) + \frac{K_A}{T_A} u(t) \quad (4-5)$$

حيث إن $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ هي ثوابت نظام القدرة الكهربائي المؤلف من آلة متوافقة موصولة إلى قضيب التجميع عبر خط النقل والتي يتم حسابها انطلاقاً من بارامترات النظام [176,182].

عندها يمكن كتابة معادلات الحالة (1-5,2-5,3-5,4-5) بالشكل المصفوفي (5-5) للحصول على مصفوفات الحالة التي تمثل النموذج الرياضي للمولد:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta(t) \\ \Delta\omega(t) \\ \Delta E'_q(t) \\ \Delta E_{fd}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T'_{d0}} & -\frac{1}{T'_{d0} \cdot K_3} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ 0 & -\frac{K_A \cdot K_5}{T_A} & -\frac{K_A \cdot K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta(t) \\ \Delta\omega(t) \\ \Delta E'_q(t) \\ \Delta E_{fd}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} u_E(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta(t) \\ \Delta\omega(t) \\ \Delta E'_q(t) \\ \Delta E_{fd}(t) \end{bmatrix} \quad (5-5)$$

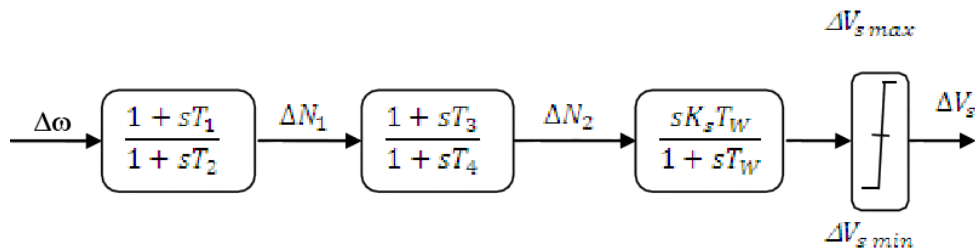
وبالتالي فإن متغيرات الحالة الأربع التي تصف النموذج الرياضي للمولد هي:

1. $\Delta\delta$ تغير زاوية عزم مجموعة التوليد (torque angle)
2. $\Delta\omega$ تغير السرعة الزاوية لدوار المولد (angular velocity)
3. $\Delta E'_q$ تغير القوة المحركة الكهربائية العابرة (quadratic-axis transient voltage)
4. ΔE_{fd} تغير جهد خرج التهييج (exciter output voltage)

حيث K_1, K_2 ثوابت ناتجة من العزم الكهربائي، و K_3, K_4 ثوابت ناتجة من جهد الحقل، و K_5, K_6 ثوابت ناتجة من الجهد الطرفي، و T_A الثابت الزمني لمنظم الجهد، و K_A ربح منظم الجهد، و T'_{d0} الثابت الزمني العابر للدائرة المفتوحة على المحور المباشر، و M معامل القصور الذاتي، و U_E دخل إشارة تحكم التهييج.

5.6 استنتاج تابع النقل لمخمد الاهتزاز PSS:

يبين الشكل (4-5) المخطط الصندوقي لنموذج مخمد الاهتزاز (PSS).



الشكل (4-5): نموذج مخمد الاهتزاز (PSS) [176,182].

واستنتجت معادلات مخمد الاهتزاز (5-6,7-5,8-5) انطلاقاً من المخطط الصندوقي للشكل (4-5):

$$\begin{aligned}\frac{\Delta N_1(t)}{\Delta \omega(t)} &= \frac{1 + S.T_1}{1 + S.T_2} \\ \Delta N_1(t)(1 + S.T_2) &= \Delta \omega(t)(1 + S.T_1) \\ \Delta N_1(t) + \Delta^* N_1(t).T_2 &= \Delta \omega(t) + \Delta \omega^*(t).T_1 \\ \Delta N_1(t) &= \frac{1}{T_2} \cdot \Delta \omega(t) + \frac{T_1}{T_2} \Delta \omega^*(t) - \frac{1}{T_2} \Delta N_1(t) \quad (6-5)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\Delta N_2(t)}{\Delta N_1(t)} &= \frac{1 + S.T_3}{1 + S.T_4} \\ \Delta N_2(t)(1 + S.T_4) &= \Delta N_1(t)(1 + S.T_3) \\ \Delta N_2(t) + \Delta^* N_2(t).T_4 &= \Delta N_1(t) + \Delta^* N_1(t).T_3 \\ \Delta N_2(t) &= \frac{1}{T_4} \cdot \Delta N_1(t) + \frac{T_3}{T_4} \Delta^* N_1(t) - \frac{1}{T_4} \Delta N_2(t) \quad (7-5)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{u(t)}{\Delta N_2(t)} &= \frac{S.K_S.T_W}{1 + S.T_W} \\ \Delta N_2(t)(S.K_S.T_W) &= u(t)(1 + S.T_W) \\ u(t) + T_W.u^*(t) &= \Delta^* N_2(t).K_S.T_W \\ u(t) &= K_S.\Delta^* N_2(t) - \frac{1}{T_W} u(t) \quad (8-5)\end{aligned}$$

وبالتالي فإن تابع النقل لمحمد الاهتزاز [176,182] يعطى بالعلاقة (9-5):

$$\frac{u(t)}{\Delta \omega(t)} = \left(\frac{S.K_S.T_W}{1 + S.T_W} \right) \left(\frac{1 + S.T_1}{1 + S.T_2} \right) \left(\frac{1 + S.T_3}{1 + S.T_4} \right) \quad (9-5)$$

يتألف المخدم من صندوق التصريف $\frac{S.K_S.T_W}{1+S.T_W}$ الذي يعمل على التقليل من الاستجابة الاعظمية للإخماد عند حدوث أعطال قاسية، وبما أن المخدم يقدم عزمًا كهربائيًا متوافقًا بالطور مع تغييرات السرعة، فإن دائرة تقديم الطور تستخدم لتعويض التأخير الحاصل بين خرج المخدم وتطبيق العزم الكهربائي الذي هو الغاية من المخدم والذي يعبر عنهم بالصندوقين $\left(\frac{1+S.T_1}{1+S.T_2} \right) \left(\frac{1+S.T_3}{1+S.T_4} \right)$. إن العدد اللازم من صناديق (تقديم - تأخير) يعتمد بشكل أساسي على النظام وعلى ضبط مخدم الاهتزاز، حيث T_W الثابت الزمني للتصريف، ورجح المخدم K_S هو عامل مهم جداً لزيادة الإخماد المقدم حتى يصل إلى قيمة محددة حرجة يبدأ بعدها الإخماد بالنقصان.

5.7 تأثير التأخير الزمني على استقرار مجموعات التوليد:

في شبكات الطاقة الكهربائية الحديثة والممتدة على مناطق جغرافية واسعة النطاق، يتم قياس قيم عدد كبير من التجهيزات المشكلة لنظام التحكم الشبكي وتوصيلها لأغراض تحكمية بهدف تحسين استقرار منظومة مجموعات التوليد. إذ يمكن أن يشار إلى شبكات القياسات والاتصالات لنظم الطاقة بأنها "نظام القياس واسع النطاق" (Wide-) Area Measurement System: WAMS [183]. ونظراً للسرعة المتزايدة لتجهيزات منظومة الاتصالات

وإدخال أجهزة جديدة ضمن نظام الطاقة الشبكي مثل وحدات قياس الأطوار (Phasor Measurement Units)، اقترح بعض مهندسي الطاقة استخدام نظام التحكم واسع النطاق (Wide-Area Control System: WACA) ضمن (WAMS) للتحكم في مجموعة متنوعة من التجهيزات، بما في ذلك مخمدات الاهتزاز (PSS) وأنظمة (High Voltage Direct Current: HVDC) ووحدات التحكم التكميلية لأجهزة نظام نقل التيار المتناوب المرنة (Flexible AC Transmission System: FACTS).

في نظام التحكم واسع النطاق، يُشار إلى الزمن المطلوب لنقل البيانات من موقع القياس إلى مركز التحكم والوقت المطلوب لتوصيل هذه البيانات في النهاية إلى أجهزة التحكم بشكل إجمالي باسم تأخير الاتصال أو زمن الوصول (latency) [183]، ويمكن أن تحدث تأخيرات زمنية في الاتصال عند نقاط مختلفة من نظام التحكم. إذ إن إدخال التأخير الزمني في حلقة التغذية العكسية له تأثير كبير في عدم استقرار نظام التحكم ويقلل من فعالية التخميد لنظام التحكم، حتى أنه في بعض الحالات قد تُفقد مزامنة النظام [184].

من أجل تلبية مواصفات الأداء لأنظمة التحكم واسعة النطاق، من المهم أن تؤخذ التأخيرات الزمنية بأنواعها المختلفة بعين الاعتبار أثناء تصميم المتحكم، ويجب أن يكون المتحكم المصمم قادراً على التعامل مع مجال محدد من ظروف التشغيل والتأخيرات الزمنية غير المحددة [184]. إذ إنه تم تجاهل تأثير التأخيرات الزمنية على فعالية وحدة التحكم إلى حد كبير في مجال أنظمة الطاقة الكهربائية، لكن الموضوع أصبح مهماً في السنوات الأخيرة بسبب المقترحات التي تدعو إلى التحكم في نظام الطاقة على نطاق واسع.

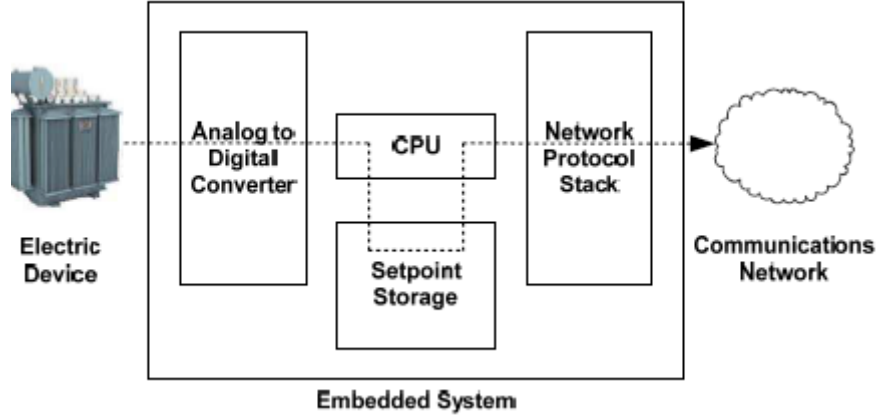
5.8 تأخيرات الاتصال في شبكات مجموعات التوليد:

يتم تعريف تأخير الاتصال بين مجموعات التوليد بأنه الزمن الفاصل بين إرسال الرسالة من الجهاز المصدر إلى حين استلامها عند الجهاز الهدف [185]، حيث يتم قياس التأخير الزمني من طرف إلى طرف بين تطبيقين يعملان في أنظمة المصدر والهدف، ونظراً لأن مجموعات التوليد لا تمتلك إمكانيات الاتصال، يتم عادةً توصيل كل جهاز بنظام حاسوبي مضمن يعمل كواجهة اتصال للنظام الشبكي.

يشكل جهاز الطاقة الكهربائي والنظام الحاسوبي المضمن معاً جهازاً إلكترونياً ذكياً (Intelligence Electronic Device: IED). ويوضح الشكل (5-5) خطوات معالجة الرسائل التي تحدث داخل IED، إذ يتم إنشاء رسالة تحتوي على بيانات حالة الجهاز وإرسالها من خلال أربع وحدات في IED وهي:

1. المبدل التشابهي الرقمي (Analog Digital Converter: ADC) الذي يبذل البيانات المقاسة من القيم التشابهية إلى الرقمية.

2. تعالج وحدة المعالجة المركزية (Central Processing Unit: CPU) البيانات المقاسة.
3. تخزين القيمة المرجعية (Setpoint Storage).
4. يقوم مكدس بروتوكول الشبكة (Network Protocol Stack) بتنسيق الرسالة وإرسالها عبر الشبكة.



الشكل (5-5): خطوات معالجة الرسائل ضمن الجهاز الالكتروني الذكي IED.

5.9 متطلبات الزمن الحرجة في شبكات مجموعات التوليد:

في الواقع يعد التوقيت أمراً بالغ الأهمية في اتصالات شبكة الطاقة الكهربائية وخاصة في شبكة الطاقة الذكية وهذا هو الاختلاف الأساسي بين الاتصالات في شبكة الطاقة والاتصالات في معظم الشبكات الأخرى. إن بعض أنواع تبادل المعلومات بين الأجهزة الكهربائية مفيدة فقط ضمن إطار زمني محدد مسبقاً يعرف بالنافذة الزمنية (Time Window)، حيث أنه إذا تجاوز تأخير الاتصال النافذة الزمنية، فإن هذه المعلومات لا تخدم الغرض المطلوب منها وفي أسوأ الحالات قد يؤدي هذا التأخير إلى إتلاف المعدات ضمن الشبكة. مثال على ذلك هو أجهزة حماية الطاقة الكهربائية مثل القواطع، حيث يجب فتح قاطع الدائرة على الفور إذا تجاوز الجهد أو التيار في الجهاز العتبة الحدية. وبالتالي يجب أن تحدد متطلبات تأخير الاتصال الصارمة لأنواع مختلفة من تبادل المعلومات في شبكات الطاقة (بما في ذلك الشبكات الذكية).

5.10 عناصر التأخير الزمني في شبكات مجموعات التوليد:

تتضمن البنية الشبكية لنظام الطاقة الكهربائية العديد من تقنيات الشبكات ولها تكوين هرمي ومختلط، وتستخدم أنواع مختلفة من الشبكات المترابطة (Interconnected Networks: INs) لتوفير الاتصالات في مناطق مختلفة من الشبكة الكهربائية. إذ يتضمن التأخير الزمني الذي تواجهه الرسالة العديد من المكونات، حيث تنتقل الرسالة داخل كل شبكة وعبر الواجهات بين الشبكات. وبشكل عام يمكن تصنيف التأخير الزمني ضمن البنية الشبكية لمجموعات التوليد إلى خمسة أصناف [185]:

1. تأخير تحصيل البيانات (Data Acquisition Delay): يتم الحصول على البيانات المقاسة مثل الجهد والتيار ودرجة الحرارة بشكل دوري من الأجهزة الكهربائية وتحويلها من القيم التشابهية إلى التمثيل الرقمي. حيث تتم معالجة المعلومات الرقمية بواسطة النظام المضمن المرفق بالجهاز الكهربائي والذي يعمل كجهاز حاسوبي منخفض المستوى لنقلها عبر شبكات الاتصالات. وبالتالي يعرف تأخير تحصيل البيانات بأنه الزمن بين وقوع الحدث (على سبيل المثال تغيير الجهد) والنقاط المعلومات الرقمية الفعلية.
2. تأخير معالجة الحزمة (Packet Processing Delay): يتم نقل البيانات عبر شبكة الاتصالات وفقاً لبروتوكولات الشبكة المحددة. حيث تتم إضافة العديد من ترويسات وتذييلات الرزم وفحصها وتعديلها وإزالتها على طول مسار إرسال الرزمة. كما تضيف كل خطوة في معالجة الرزم تأخيراً إلى إجمالي الزمن الذي تقضيه الحزمة في الشبكة.
3. تأخير إرسال الحزمة (Packet Transmission Delay): تُلحق آليات طبقة الربط الحالية حقل فحص سلامة البيانات بكل إطار بيانات لاكتشاف أخطاء البيانات المحتملة. ومن ثم تتحقق كل عقدة وسيطة على مسار إرسال الرزمة من صحة البيانات بعد تلقي إطار البيانات الكامل وقبل إعادة توجيه الرزمة إلى العقدة التالية. كما أنه يتعرض كل خط نقل لتأخير إرسال بسبب إرسال واستقبال إطار البيانات.
4. تأخير وسط الاتصال (Medium Access Delay): تتنافس العقد المتعددة التي تشترك في نفس وسط الإرسال (على سبيل المثال الطيف اللاسلكي وكابل سلكي) على وسط الاتصال من أجل نقل بياناتها، إذ يجب أن تنتظر العقدة دورها في نقل البيانات. وبالمثل، يجب على الرزمة الموجودة في العقدة الانتظار حتى يتم مسح جميع الرزم الأخرى المجدولة قبلها من المخزن المؤقت.
5. تأخير استجابة الحدث (Event Response Delay): تتطلب بعض أنواع بيانات القياس ضمن IED إجراءات يتم تنفيذها. على سبيل المثال، يجب أن يؤدي الجهد المقاس الذي يتجاوز القيمة العادية إلى تشغيل أمر قاطع الدارة من محطة التحكم، وبالتالي يعرف زمن تأخير الاستجابة للحدث بأنه الزمن الذي يستغرقه نظام الطاقة الذكي وإدارة الأعطال الموجود في العقدة المسؤولة لتنفيذ ذلك الحدث فعلياً.

5.11 حسابات التأخير الزمني:

في نظام التحكم واسع النطاق، يُفترض أن البيانات تُرسل على شكل رزم [183]. الرزم عبارة عن مقاطع منسقة من المعلومات يتم ترتيبها عادةً في ثلاثة أقسام: الترويسة وحمولة الشبكة والتذييل. تتضمن المعلومات الموجودة في الترويسة طول الرزمة وعنوان المصدر والوجهة ونوع الرزمة ورقم الرزمة (إذا تم إرسال سلسلة من الرزم). تحمل

الحمولة بيانات القياس أو التحكم، بينما يحمل التذيل الموجود في نهاية الحزمة معلومات تمكن جهاز الاستقبال من تحديد نهاية الرزمة.

يشمل التأخير الزمني الإجمالي عدة تأخيرات تحدث في أنظمة الاتصالات [183]. وتشمل هذه التأخيرات:

1. التأخير التسلسلي بين البتات المتتالية.
2. التأخير التسلسلي بين الرزم المتتالية.
3. تأخير التوجيه الذي يعرف بأنه الزمن المطلوب لإرسال البيانات عبر جهاز توجيه ثم إعادة إرسالها إلى موقع آخر.
4. تأخير الانتشار وهو الزمن المطلوب لإرسال البيانات عبر وسيط اتصالات محدد.

يتم إعطاء تأخير وقت الإشارة الإجمالي T من خلال العلاقة (5-10):

$$T = T_s + T_b + T_p + T_r \quad (10 - 5)$$

$$T_s = \frac{P_s}{D_r} \quad (11 - 5)$$

$$T_p = \frac{l}{v} \quad (12 - 5)$$

حيث T_s هو التأخير التسلسلي، T_b هو الفترة الفاصلة بين تأخير الرزمة، T_p هو تأخير الانتشار، T_r هو تأخير التوجيه، P_s هو حجم الرزمة، D_r هو معدل بيانات الشبكة، l طول وسيط الاتصال، و v هي السرعة التي يتم بها إرسال البيانات عبر وسيط الاتصالات المحدد.

5.12 مجال التأخير الزمني في نظم التحكم الشبكية:

تتراوح تأخيرات الاتصال عادةً من عدة ميكرو ثانية إلى بضع مئات من الملي ثانية [186-189]، ويكون عادةً التأخير الزمني في نظام موزع مثل نظام ريليهات الحماية الكهربائية أقل من 10 ميلي ثانية [184]. على عكس التأخيرات الزمنية الصغيرة التي تتم مواجهتها في التحكم المحلي، إذ يمكن أن تتراوح التأخيرات في أنظمة الطاقة واسعة النطاق من عشرات إلى عدة مئات من الملي الثانية أو أكثر، مثلاً في نظام Bonneville Power Administration يبلغ التأخير الزمني في الاتصالات الرقمية عبر الألياف الضوئية حوالي 38 ميلي ثانية، بينما يكون التأخير الزمني عند استخدام أجهزة المودم عبر الأمواج الميكروية أكثر من 80 ميلي ثانية [184]. بالإضافة إلى أن أنظمة الاتصالات التي تستخدم الأقمار الصناعية قد تعاني من فترات تأخير زمنية أطول.

عادة ما يكون تأخير إشارة التغذية العكسية في نظام قدرة واسع النطاق في حدود 100 ميلي ثانية [184]. إذا تم تضمين تأخيرات التوجيه وإذا كان سيتم توجيه عدد كبير من الإشارات، فهناك احتمال حدوث تأخيرات زمنية طويلة

وتغير كبير (أو غير محدد) في هذه التأخيرات. وفقاً لبعض التقارير [190,191]، يجب مراعاة تأخيرات الاتصال من 150 إلى 200 ميلي ثانية عند تصميم بعض أنظمة التحكم بهدف تحسين الاستقرار.

5.13 النمذجة الرياضي لنظام التحكم الشبكي:

يوصف النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي المستمر المستقل باستخدام فضاء الحالة وفق العلاقة (5-13):

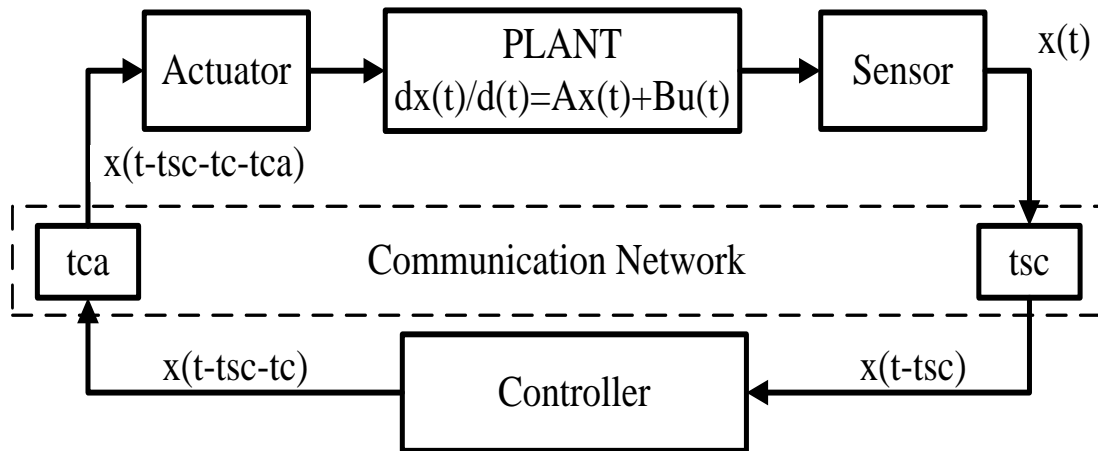
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Fw(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (13 - 5)$$

يعبر $x(t) \in R^n$ عن شعاع متغيرات الحالة للنظام، و $\dot{x}(t) \in R^n$ عن مشتق شعاع الحالة و $u(t) \in R^m$ عن دخل النظام، $w(t) \in R^l$ إشارة الضجيج الخارجية التي يمكن أن يتعرض لها النظام، $y(t) \in R^p$ خرج النظام. بينما تكون مصفوفات الحالة التي تصف نظام التحكم الشبكي الموضح في العلاقة (5-13) وفق الأبعاد التالية:

المصفوفة A مربعة أبعادها $[n \times n]$ ، المصفوفة B أبعادها $[n \times m]$ ، المصفوفة F أبعادها $[n \times l]$ ، المصفوفة C أبعادها $[p \times n]$ ، المصفوفة D أبعادها $[p \times m]$. حيث n درجة نظام التحكم الشبكي، m عدد مداخل النظام، l الضجيج المطبق على النظام، p عدد مخارج النظام.

وفي نظم التحكم الشبكية يتصل المتحكم مع النظام الشبكي المراد التحكم به عبر شبكة تحكمية، وفي هذه الحالة يكون التأخير الزمني بأنواعه المختلفة الناتج عن الشبكة كما هو مبين في الشكل (5-6). تعطى إشارة التحكم بالعلاقة (5-14):

$$u(t) = -Kx(t - \tau) \quad (14 - 5)$$



الشكل (5-6): وحدة تحكم شبكية مستقلة مع أخذ التأخيرات الزمنية المتغيرة بالحسبان [58].

يوضح الشكل (5-6) عناصر نظام التحكم الشبكي المستقل وهو عبارة عن نظام تحكم واحد وبالتالي لا يوجد أي تبادل للمعلومات مع الأنظمة الفرعية الأخرى، وإنما يرسل بياناته من النظام (Plant) إلى المتحكم (Controller) مروراً بالحساس ومن المتحكم إلى النظام مروراً بالمشغل عبر الشبكة مع وجود التأخير الزمني الناتج عن الشبكة. حيث تعبر K عن مصفوفة الربح الخلفي لمتحكم LQR و τ هي التأخير الزمني الإجمالي والمعطى في العلاقة (5-15). إذ أن τ_{SC} التأخير الزمني بين الحساس والمتحكم، و τ_C التأخير الزمني في المتحكم، بينما τ_{Ca} التأخير الزمني بين المتحكم والمشغل، ويعبر dT عن ضياع الرزم وبالتالي فإن d هي عدد الرزم الضائعة ضمن الشبكة و T زمن أخذ العينات:

$$\tau = \tau_{SC} + \tau_C + \tau_{Ca} + dT \quad (15 - 5)$$

5.14 النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي تربط بين أنظمتها الفرعية علاقة خطية:

تتوزع نظم القدرة الكهربائية بأنواعها المختلفة الحرارية والمائية [192] والريحية والنووية ونظم الطاقة المتجددة على مساحات جغرافية واسعة، ومن الممكن للمنطقة الواحدة أن تتألف من نوع أو أكثر من المولدات لتغذية الحمل المطلوب. لذلك تعتبر دراسة نظام التحكم الشبكي القادر على توصيل عدة مناطق جغرافية مسألة بحثية صعبة للغاية وتتعرض لمجموعة من العوامل التي تساهم في تغير الاستقرار للنظام ككل ومن أهمها التأخير الزمني بين النظم الفرعية وضياع الرزم ضمن الشبكة، حيث أنه عندما يتغير الحمل في منطقة محددة عندها فإن كل المناطق المتصلة ضمن نظام التحكم الشبكي ستتأثر بتغير الحمل في تلك المنطقة وبالتالي على المتحكمات المحلية المسؤولة عن كل منطقة أن تتبادل معلوماتها مع بعضها البعض ضمن الشبكة بهدف إعادة الاستقرار للمنظومة الشبكية بأكملها [193]. تتألف نظم التحكم الموزعة مثل نظم القدرة الكهربائية من مجموعة من النظم الفرعية المتصلة مع بعضها حيث لدينا n نظاماً فرعياً لكل منه متحكم خاص به تتصل هذه النظم مع بعضها وتتبادل المعلومات فيما بينها عبر شبكة اتصال وفق بروتوكول محدد. عندها يمكن استنتاج النموذج الرياضي لـ n نظام تحكم فرعي مستمر متصل مع بعضه وفق علاقة خطية عبر شبكة اتصالات تحكمية وفق العلاقة (5-16):

$$\begin{aligned} x_1(t) &= A_{11}x_1(t) + B_1u_1(t) + \sum_{j=2}^n A_{1j}x_j(t) + F_1w_1(t) \\ x_2(t) &= A_{22}x_2(t) + B_2u_2(t) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n A_{2j}x_j(t) + F_2w_2(t) \\ x_n(t) &= A_{nn}x_n(t) + B_nu_n(t) + \sum_{j=1, j \neq n}^{n-1} A_{nj}x_j(t) + F_nw_n(t) \\ y_n(t) &= C_{nn}x_n(t) + D_nu_n(t) \end{aligned} \quad (16 - 5)$$

$x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ تعبر عن مشتق أشعة متغيرات الحالة.

$u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)$ تعبر عن أشعة الدخل.

$w_1(t), w_2(t), \dots, w_n(t)$ تعبر عن أشعة الضجيج.

و n هي عدد الأنظمة الفرعية (مجموعات التوليد) المتصلة ضمن نظام التحكم الشبكي، و A_{ij} مصفوفة تعبر عن تأثير مجموعة التوليد i بمجموعة التوليد j ، و $y(t)$ تعبر عن خرج النظام.

يمكن إعادة كتابة العلاقة (5-16) بشكل عام وفق العلاقة (5-17):

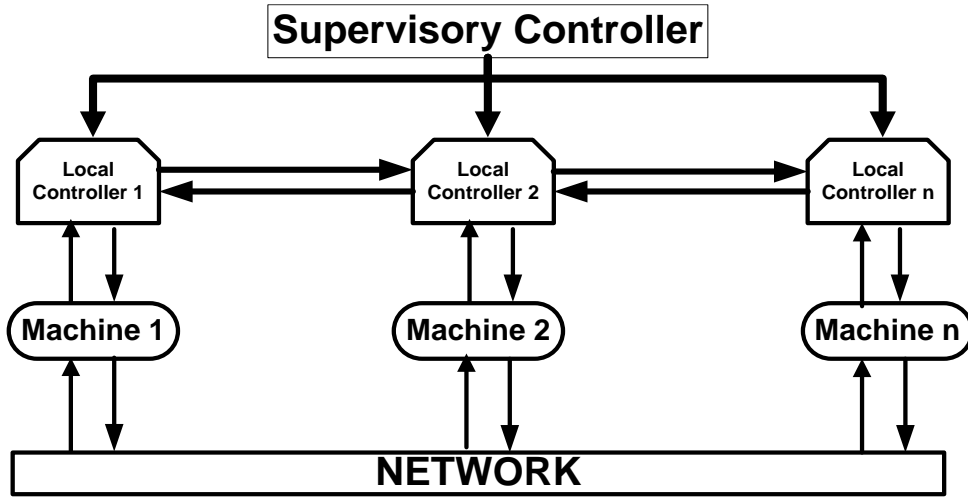
$$x_i(t) = A_{ii}x(t) + B_i u_i(t) + F_i w_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n A_{ij} x_j(t), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$y_i(t) = C_{ii}x(t) + D_i u_i(t) \quad (17 - 5)$$

تعتمد كل عقدة تحكم ضمن البنية اللامركزية لنظم التحكم الشبكية فقط على المعلومات المحلية التي تمتلكها وحدة التحكم لاتخاذ قرارها المحلي، ولا تشارك عُقد التحكم معلوماتها مع العقد المجاورة المقابلة. من جهة أخرى تسمح البنية الموزعة لنظم التحكم الشبكية لكل وحدة تحكم بمشاركة معلوماتها المحلية مع وحدات التحكم المجاورة المقابلة كما يوضح الشكل (5-7). وبالتالي، فإن وحدات التحكم الموزعة قادرة على تنسيق سلوكها عن طريق إرسال واستقبال المعلومات من وإلى وحدات التحكم الأخرى. إذاً فإن وحدات التحكم هنا هي وحدات تحكم موزعة. ومن أهم مزايا هذا النوع من الطوبولوجيا هي النمطية (Modularity)، وقابلية التوسع، والمتانة.

ونظراً لأهمية المعلومات المتبادلة بين المتحكمات الفرعية (Local Controllers) في نمذجة نظام التحكم الشبكي العام والمزايا التي تمتلكها البنية الموزعة وشموليتها عن البنية اللامركزية، وترابط الأنظمة الفرعية (Machines) ومتحكماتها الممثلة لنظام التحكم الشبكي مع المتحكم الإشرافي (Supervisory Controller: SP). عندها يصبح قانون التحكم مؤلف من المتحكم المحلي Local والإشرافي Supervisor وفق العلاقة (5-18):

$$u_i = u_i^{local} + u_i^{Supervisor} = -(K_{ii}x_i(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{ij} x_j(t - \tau_{ji})) \quad (18 - 5)$$



الشكل (5-7): البنية الموزعة ضمن نظم التحكم الشبكية المستمرة بشكلها العام.

بتعويض العلاقة (5-18) في العلاقة (5-16) نحصل على العلاقة (5-19)

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &= A_{11}x_1(t) - B_1(K_{11}x_1(t) + \sum_{j=2}^n K_{1j}x_j(t - \tau_{j1})) + \sum_{j=2}^n A_{1j}x_j(t) + F_1w_1(t) \\
 x_2(t) &= A_{22}x_2(t) - B_2(K_{22}x_2(t) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n K_{2j}x_j(t - \tau_{j2})) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n A_{2j}x_j(t) + F_2w_2(t) \\
 x_3(t) &= A_{33}x_3(t) - B_3(K_{33}x_3(t) + \sum_{j=1, j \neq 3}^n K_{3j}x_j(t - \tau_{j3})) + \sum_{j=1, j \neq 3}^n A_{3j}x_j(t) + F_3w_3(t) \quad (19-5)
 \end{aligned}$$

وفي حال لدينا n نظاماً فرعياً ضمن نظام التحكم الشبكي يمكن كتابة العلاقة (5-19) بشكلها العام:

$$\begin{aligned}
 x_n(t) &= A_{nn}x_n(t) - B_n(K_{nn}x_n(t) + \sum_{j=1, j \neq n}^n K_{nj}x_j(t - \tau_{jn})) + \sum_{j=1, j \neq n}^n A_{nj}x_j(t) + F_nw_n(t) \\
 y_n(t) &= C_{nn}x_n(t) + D_{nn}u_n(t)
 \end{aligned}$$

بالنظر إلى العلاقة (5-19) نلاحظ وجود التأخير الزمني ضمن التركيب الرياضي $x_j(t - \tau_{ji})$ وبالتالي لا يمكن تضمينه ضمن العلاقات الرياضية أو تعويض قيمته سواء كان ثابتاً أو متغيراً. وبالنتيجة لا يمكن تمثيله ضمن المحاكاة الحاسوبية لدراسة تأثير ذلك التأخير الزمني على استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر حتى يتم عزله من التركيب الرياضي والذي يمكن برهانه كالاتي:

من أجل تابع $f(x)$ يكون الشكل العام لسلسلة تايلور وفق العلاقة (5-20):

$$R_n(f(x), \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(x)}{n!} \tau^n \quad (20-5)$$

عندها فإن التركيب الرياضي $x(t - \tau)$ يمكن الحصول عليه بعد تطبيق سلسلة تايلور وفق العلاقة (5-21):

$$x(t - \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^n(t)}{n!} \tau^n$$

$$\begin{aligned} x(t - \tau) &= x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) \\ &\quad + \left(-\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) + \left(-\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t) + \left(\frac{\tau^6}{720}\right) x^{(6)}(t) + R_7(x, \tau) \\ x(t - \tau) &= x(t) - \tau x'(t) + R_2(x, \tau) \end{aligned} \quad (21 - 5)$$

من العلاقة (21-5) نجد أن التركيب الرياضي $R_2(x, \tau)$ يعتمد على التأخير الزمني ومشتقات المراتب العليا للتابع $x(t)$. إذا كان التأخير الزمني صغيراً بما فيه الكفاية فإن البارامترات المكونة للتابع الرياضي $R_2(x, \tau)$ يمكن تجاهلها لتصبح العلاقة (21-5) بشكلها العام وفق العلاقة (22-5):

$$x(t - \tau) = x(t) - \tau x'(t) \quad (22 - 5)$$

نلاحظ من العلاقة (22-5) بأنه تم عزل التأخير الزمني τ عن التركيب الرياضي $x(t - \tau)$ وعند تعويض العلاقة (22-5) في (19-5) نحصل على العلاقة النهائية (23-5) وهي العلاقة المعبرة عن نمذجة أي نظام تحكم شبكي مؤلف من عدد من الأنظمة الفرعية تربط فيما بينها علاقة خطية مع أخذ الضجيج الذي يمكن أن يتعرض له النظام الشبكي بعين الاعتبار والتأخيرات الزمنية بين عناصر الشبكة التحكمية.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (A_{11} - B_1 K_{11}) x_1(t) + \sum_{j=2, j \neq 1}^n (A_{1j} - B_1 K_{1j}) x_j(t) + \sum_{j=2, j \neq 1}^n \tau_{j1} B_1 K_{1j} x_j(t) + F_1 w_1(t) \\ x_2(t) &= (A_{22} - B_2 K_{22}) x_2(t) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n (A_{2j} - B_2 K_{2j}) x_j(t) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n \tau_{j2} B_2 K_{2j} x_j(t) + F_2 w_2(t) \\ x_3(t) &= (A_{33} - B_3 K_{33}) x_3(t) + \sum_{j=1, j \neq 3}^n (A_{3j} - B_3 K_{3j}) x_j(t) + \sum_{j=1, j \neq 3}^n \tau_{j3} B_3 K_{3j} x_j(t) + F_3 w_3(t) \\ x_n(t) &= (A_{nn} - B_n K_{nn}) x_n(t) + \sum_{j=1, j \neq n}^n (A_{nj} - B_n K_{nj}) x_j(t) + \sum_{j=1, j \neq n}^n \tau_{jn} B_n K_{nj} x_j(t) + F_n w_n(t) \\ y_n(t) &= C_{nn} x_n(t) + D_n u_n(t) \end{aligned} \quad (23 - 5)$$

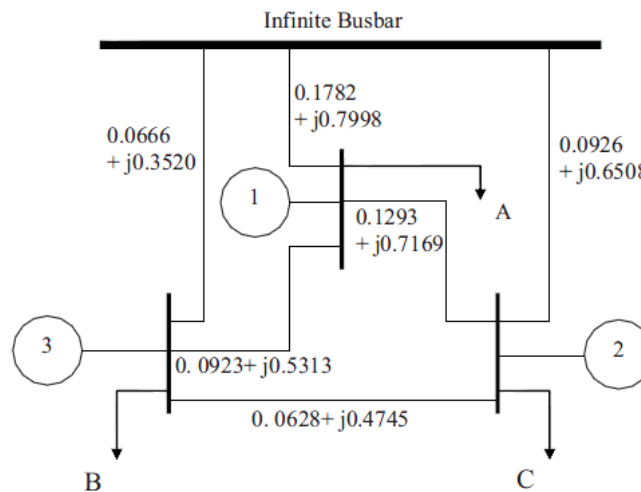
5.15 دراسة تأثير التأخير الزمني على نظام قدرة مؤلف من ثلاث مجموعات توليد متزامنة:

يوجد نوعان من المتحكمات في نظم القدرة الكهربائية، النوع الأول هو المتحكم المحلي المسؤول عن أمثلة أداء النظام الفرعي المراد التحكم به دون الأخذ بالحسبان المعلومات المرسلة عبر الشبكة، بينما النوع الآخر هو المتحكم العام الذي يستخدم لتنسيق المعلومات بين النظم الفرعية المتصلة فيما بينها عبر شبكة اتصال تحكمية وبالتالي

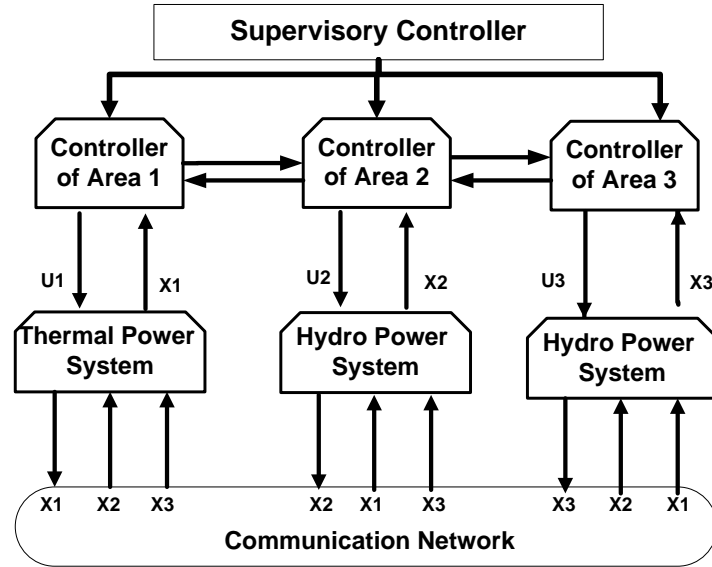
تحسين أداء النظام التحكمي الكلي. وبما أن نظام القدرة الكهربائية هو عبارة عن نظام ضخم وموزع على مساحة جغرافية واسعة ويعتمد على الاتصال الشبكي للتحكم فيه فيمكن اعتباره نظام تحكم شبكي NCS واسع النطاق.

تعتبر المولدات الحرارية والمائية من أكثر المولدات انتشاراً حول العالم، لذلك دُرِس [194-197] نظام القدرة الكهربائي الموضح في الشكل (5-8) وهو عبارة عن ثلاث مناطق جغرافية تتألف كل منطقة من مجموعة توليد. إذ تتكون المنطقة الأولى من مجموعة توليد للطاقة الحرارية باستطاعة كهربائية 360MVA، وكل من المنطقة الثانية والثالثة من مجموعة توليد للطاقة الكهرومائية باستطاعة كهربائية مقدارها 503MVA وللثانية و1673MVA. حيث تتصل مجموعات التوليد مع بعضها البعض عبر شبكة تحكمية كما هو موضح في الشكل (5-9)، تساهم في تبادل المعلومات (متغيرات الحالة لكل نظام فرعي) بين الأنظمة الفرعية.

ويبين الشكل (5-9) بأن متحكم المنطقة الأولى (Controller of Area1) وبناء على التوجيهات والأوامر الواردة من المتحكم الاشرافي يعطي إشارة التحكم u_1 إلى نظام الطاقة الكهربائي الفرعي الأول (Thermal Power System)، وبدوره يرسل متغير الحالة x_1 المعبر عن حالته عبر شبكة الاتصال (Power System Network) التي من الممكن أن تعاني من تأخيرات زمنية ثابتة أو متغيرة بالإضافة إلى ضياع في الرزم إلى مجموعات التوليد الفرعية الأخرى (مجموعات التوليد الكهرومائية في المنطقة الثانية والثالثة)، وبنفس الوقت يستقبل النظام الأول قيم متغيرات الحالة x_2 و x_3 من الأنظمة الفرعية الأخرى أيضاً عبر شبكة الاتصال، وتحدث ذات العملية عند مجموعة التوليد الكهرومائية في المنطقة الثانية والثالثة. وتهدف الدراسة إلى تطبيق أسلوب النمذجة المستنتج وفق العلاقة (5-23) على نظام التحكم الشبكي المدروس وتطبيق تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين مجموعات التوليد الثلاث وكيفية الحد من تأثيره باستخدام المتحكم (LQR) (كما سيعرض في الفصل السادس).



الشكل (5-8): مجموعات التوليد الثلاث المتزامنة المشكلة لنظام الطاقة الكهربائية [60].



الشكل (5-9): ثلاث مجموعات توليد متزامنة يتم التحكم بها عن طريق شبكة تحكمية.

5.16 استنتاج معادلات الحالة لنظام الطاقة الكهربائية المؤلف من ثلاث مجموعات توليد:

يتألف النموذج الرياضي لمجموعة التوليد من أربع متغيرات حالة [61] وهي:

$$x^T = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd}]$$

تم تصميم مجموعات التوليد المتزامنة كثلاثة أنظمة فرعية فيها وحدات تحكم محلية تتبادل المعلومات المعبرة عن حالاتها عبر الشبكة، ويتم اختيار متغيرات الحالة لنظام التحكم الشبكي الإجمالي (12 متغير حالة، إذ أن لكل مجموعة توليد متزامنة أربعة متغيرات حالة) وفق الآتي:

$$\begin{aligned} \text{SUBSYSTEM1,} \quad x_1^T &= [\Delta\delta_1 \quad \Delta\omega_1 \quad \Delta E'_{q1} \quad \Delta E_{fd1}] \\ \text{SUBSYSTEM2,} \quad x_2^T &= [\Delta\delta_2 \quad \Delta\omega_2 \quad \Delta E'_{q2} \quad \Delta E_{fd2}] \\ \text{SUBSYSTEM3,} \quad x_3^T &= [\Delta\delta_3 \quad \Delta\omega_3 \quad \Delta E'_{q3} \quad \Delta E_{fd3}] \end{aligned}$$

لدراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد على نظام الطاقة الكهربائية المدروس، وبتطبيق الثوابت والقيم الابتدائية له [43]. عندها لابد من استنتاج معادلات الحالة التي تصف النظام الفرعي بشكله المستقل (System_{ij})، والمعادلات التي تصف تأثير مجموعة التوليد i بمجموعة التوليد j (System_{ij}).

5.17 استنتاج معادلات الحالة لنظام الطاقة الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد:

بتعويض الثوابت والقيم الابتدائية لنظام الطاقة الشبكي بالعلاقات (1-5, 2-5, 3-5, 4-5) نحصل على معادلات الحالة التي تصفه وفق العلاقات (24-5, 25-5, 26-5, 27-5) لمجموعة التوليد الأولى و(28-5, 29-5, 30-5) للمجموعة الثانية و(31-5, 32-5, 33-5, 34-5, 35-5) للثالثة، مع إضافة ضجيج 5% للمجموعة الأولى فقط.

$$\begin{aligned}\Delta\delta_1(t) = & 0 \Delta\delta_1(t) + 377 \Delta\omega_1(t) + 0 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0 \Delta\delta_2(t) + 0 \Delta\omega_2(t) \\ & + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 0 \Delta\delta_3(t) + 0 \Delta\omega_3(t) + 0 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) \\ & + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0.05 w_1(t) + 0 w_2(t) \\ & + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (24 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta\omega_1(t) = & -0.147 \Delta\delta_1(t) - 0.039 \Delta\omega_1(t) - 0.013 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0.022 \Delta\delta_2(t) \\ & + 0.004 \Delta\omega_2(t) + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 0.046 \Delta\delta_3(t) + 0.02 \Delta\omega_3(t) \\ & + 0.003 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) \\ & + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (25 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta E'_{q1} = & -0.266 \Delta\delta_1(t) - 0.393 \Delta\omega_1(t) - 0.922 \Delta E'_{q1}(t) + 1 \Delta E_{fd1}(t) - 0.087 \Delta\delta_2(t) \\ & + 0.754 \Delta\omega_2(t) + 0.024 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) - 0.0250 \Delta\delta_3(t) \\ & + 1.131 \Delta\omega_3(t) + 0.072 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) \\ & + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (26 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta E_{fd1}(t) = & -30.100 \Delta\delta_1(t) - 309.14 \Delta\omega_1(t) - 60.943 \Delta E'_{q1}(t) - 20 \Delta E_{fd1}(t) \\ & + 24.599 \Delta\delta_2(t) - 91.990 \Delta\omega_2(t) - 3.501 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) \\ & + 62.051 \Delta\delta_3(t) - 1675 \Delta\omega_3(t) - 10.194 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) \\ & + 800 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (27 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta\delta_2(t) = & 0 \Delta\delta_1(t) + 0 \Delta\omega_1(t) + 0 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0 \Delta\delta_2(t) + 377 \Delta\omega_2(t) \\ & + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 0 \Delta\delta_3(t) + 0 \Delta\omega_3(t) + 0 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) \\ & + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (28 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta\omega_2(t) = & 0.004 \Delta\delta_1(t) - 0.034 \Delta\omega_1(t) - 0.087 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) - 0.149 \Delta\delta_2(t) \\ & + 0.032 \Delta\omega_2(t) - 0.008 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 0.079 \Delta\delta_3(t) \\ & - 0.028 \Delta\omega_3(t) + 0 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) \\ & + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (29 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta E'_{q2} = & 0.121 \Delta\delta_1(t) + 1.131 \Delta\omega_1(t) + 0.021 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) - 1.600 \Delta\delta_2(t) \\ & - 1.885 \Delta\omega_2(t) - 0.210 \Delta E'_{q2}(t) + 1 \Delta E_{fd2}(t) + 0.460 \Delta\delta_3(t) \\ & + 0.754 \Delta\omega_3(t) + 0.060 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) \\ & + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (30 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta E_{fd2}(t) = & -18.480 \Delta\delta_1(t) - 64.470 \Delta\omega_1(t) - 12.550 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) \\ & + 106.090 \Delta\delta_2(t) - 516.11 \Delta\omega_2(t) - 21.67 \Delta E'_{q2}(t) - 20 \Delta E_{fd2}(t) \\ & + 16.990 \Delta\delta_3(t) - 171.91 \Delta\omega_3(t) - 11.41 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) \\ & + 900 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (31 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta\delta_3(t) = & 0 \Delta\delta_1(t) + 0 \Delta\omega_1(t) + 0 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0 \Delta\delta_2(t) + 0 \Delta\omega_2(t) \\ & + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 0 \Delta\delta_3(t) + 377 \Delta\omega_3(t) + 0 \Delta E'_{q3}(t) \\ & + 0 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) \\ & + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (32 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta\omega_3(t) = & 0.001 \Delta\delta_1(t) - 0.017 \Delta\omega_1(t) - 0.003 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0.017 \Delta\delta_2(t) \\ & - 0.010 \Delta\omega_2(t) + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) - 0.056 \Delta\delta_3(t) - 0.017 \Delta\omega_3(t) \\ & - 0.009 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) \\ & + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (33 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta E'_{q3} = & 0.083 \Delta\delta_1(t) + 0 \Delta\omega_1(t) - 0.002 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0.220 \Delta\delta_2(t) \\ & + 0 \Delta\omega_2(t) + 0.011 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) - 1.200 \Delta\delta_3(t) - 1.131 \Delta\omega_3(t) \\ & - 0.190 \Delta E'_{q3}(t) + 1 \Delta E_{fd3}(t) + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) \\ & + 0 w_2(t) + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (34 - 5)$$

$$\begin{aligned}\Delta E_{fd3} = & -10.100 \Delta\delta_1(t) - 33.390 \Delta\omega_1(t) - 6.780 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) \\ & + 1.700 \Delta\delta_2(t) - 46.37 \Delta\omega_2(t) - 2.100 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) \\ & + 70.100 \Delta\delta_3(t) - 893.49 \Delta\omega_3(t) - 54.40 \Delta E'_{q3}(t) - 20 \Delta E_{fd3}(t) \\ & + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 1000 u_{E3}(t) + 0 w_1(t) + 0 w_2(t) \\ & + 0 w_3(t)\end{aligned}\quad (35 - 5)$$

وبما أن خرج النظام الشبكي هو عبارة عن زاوية دوار المولد $\Delta\delta(t)$ لكل مجموعة توليد، عندها يمكن كتابة معادلات الخرج وفق العلاقات (36-5, 37-5, 38-5) لكل من مجموعة التوليد الأولى والثانية والثالثة على التوالي:

$$\begin{aligned}y_1(t) = & 1 \Delta\delta_1(t) + 0 \Delta\omega_1(t) + 0 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0 \Delta\delta_2(t) + 0 \Delta\omega_2(t) \\ & + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 0 \Delta\delta_3(t) + 0 \Delta\omega_3(t) + 0 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) \\ & + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t)\end{aligned}\quad (36 - 5)$$

$$\begin{aligned}y_2(t) = & 0 \Delta\delta_1(t) + 0 \Delta\omega_1(t) + 0 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 1 \Delta\delta_2(t) + 0 \Delta\omega_2(t) \\ & + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 0 \Delta\delta_3(t) + 0 \Delta\omega_3(t) + 0 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) \\ & + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t)\end{aligned}\quad (37 - 5)$$

$$\begin{aligned}y_3(t) = & 0 \Delta\delta_1(t) + 0 \Delta\omega_1(t) + 0 \Delta E'_{q1}(t) + 0 \Delta E_{fd1}(t) + 0 \Delta\delta_2(t) + 0 \Delta\omega_2(t) \\ & + 0 \Delta E'_{q2}(t) + 0 \Delta E_{fd2}(t) + 1 \Delta\delta_3(t) + 0 \Delta\omega_3(t) + 0 \Delta E'_{q3}(t) + 0 \Delta E_{fd3}(t) \\ & + 0 u_{E1}(t) + 0 u_{E2}(t) + 0 u_{E3}(t)\end{aligned}\quad (38 - 5)$$

وبعد كتابة معادلات الحالة للنظام الشبكي يمكن عندها كتابتها بالشكل المصفوفي وفق العلاقة (39-5):

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.124 & -0.039 & -0.013 & 0 & 0.022 & 0.004 & 0 & 0 & 0.046 & 0.02 & 0.003 & 0 \\ -0.266 & -0.393 & -0.922 & 1 & -0.087 & 0.754 & 0.024 & 0 & -0.025 & 1.131 & 0.072 & 0 \\ -30.1 & -309.14 & -60.943 & -20 & 24.599 & -91.99 & -3.501 & 0 & 62.051 & -1675 & -10.194 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.004 & -0.034 & -0.087 & 0 & -0.149 & 0.032 & -0.008 & 0 & 0.079 & -0.028 & 0 & 0 \\ 0.121 & 1.131 & 0.021 & 0 & -1.6 & -1.8854 & -0.21 & 1 & 0.467 & 0.754 & 0.06 & 0 \\ -18.48 & -64.47 & -12.55 & 0 & 106.09 & -516.11 & -21.67 & -20 & 16.99 & -171.91 & -11.41 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ 0.001 & -0.017 & -0.003 & 0 & 0.017 & -0.01 & 0 & 0 & -0.056 & -0.017 & -0.009 & 0 \\ 0.083 & 0 & -0.002 & 0 & 0.22 & 0 & 0.011 & 0 & -1.2 & -1.131 & -0.197 & 1 \\ -10.1 & -33.93 & -6.78 & 0 & 1.7 & -46.37 & -2.1 & 0 & 70.1 & -893.49 & -54.4 & -20 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 800 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 900 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ w_3(t) \end{bmatrix} \\
 & y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \\ \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} \quad (39-5)
 \end{aligned}$$

بملاحظة العلاقة (39-5) ولإدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين مجموعات التوليد المشكلة NCS، لابد من كتابة المعادلات الخاصة بكل مجموعة توليد وفق الشكل المصفوفي حتى نتمكن من نمذجة كل مجموعة على حدى ونحسب قيمة مصفوفة الربح الخلفي K لكل مولد (كما في الفصل السادس)، وفق العلاقة (40-5) للمجموعة الأولى و(41-5) لمجموعة التوليد الثانية و(42-5) لمجموعة التوليد الثالثة، حيث إن أبعاد المصفوفات وفق الاتي:

$$A_{ij} \in R^{4 \times 4}, B_i \in R^{4 \times 1}, F_i \in R^{4 \times 1}, C_i \in R^{1 \times 4}, A \in R^{12 \times 12}, B \in R^{12 \times 3}, F \in R^{12 \times 3}, C \in R^{3 \times 12}, D \in R^{3 \times 3}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.147 & -0.039 & -0.013 & 0 \\ -0.266 & -0.393 & -0.922 & 1 \\ -30.1 & -309.14 & -60.943 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.022 & 0.004 & 0 & 0 \\ -0.087 & 0.754 & 0.024 & 0 \\ 24.599 & -91.99 & -3.501 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.046 & 0.02 & 0.003 & 0 \\ -0.025 & 1.131 & 0.072 & 0 \\ 62.051 & -1675 & -10.194 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_{E1}(t) + \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w_1(t) \\ y_1(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \end{bmatrix} \quad (40 - 5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.004 & -0.034 & -0.087 & 0 \\ 0.121 & 1.131 & 0.021 & 0 \\ -18.48 & -64.47 & -12.55 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.149 & -0.032 & -0.008 & 0 \\ -1.6 & -1.885 & -0.21 & 1 \\ 106.09 & -516.11 & -21.67 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.079 & -0.028 & 0 & 0 \\ 0.467 & 0.754 & 0.06 & 0 \\ 16.99 & -171.91 & -11.41 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_{E2}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w_2(t) \\ y_2(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \end{bmatrix} \quad (41 - 5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.001 & -0.017 & -0.003 & 0 \\ 0.083 & 0 & -0.002 & 0 \\ -10.1 & -33.93 & -6.78 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1(t) \\ \Delta\omega_1(t) \\ \Delta E'_{q1}(t) \\ \Delta E_{fd1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.017 & -0.01 & 0 & 0 \\ 0.22 & 0 & 0.011 & 0 \\ 1.7 & -46.37 & -2.1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta E'_{q2}(t) \\ \Delta E_{fd2}(t) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.056 & -0.017 & -0.009 & 0 \\ -1.2 & -1.131 & 0.197 & 1 \\ 70.1 & -893.49 & -54.4 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_{E3}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w_3(t) \\ y_3(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta E'_{q3}(t) \\ \Delta E_{fd3}(t) \end{bmatrix} \quad (42 - 5)$$

ويمكن كتابة نظام NCS المستمر لثلاث مجموعات توليد والموضح بالعلاقة (5-39) بشكله العام وفق (5-43):

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 & 0 & 0 \\ 0 & F_2 & 0 \\ 0 & 0 & F_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \\ w_3(t) \end{bmatrix} \\ y(t) = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} \quad (43 - 5)$$

الفصل السادس

**تصميم وتحكم أمثل لمعالجة
تأثير التأخير الزمني غير المحدد في
نظم التحكم الشبكية المستترة**

6.1 مقدمة:

إن الغرض من التحكم بالنظم بشكله العام هو جعل النظام يعمل بمواصفات محددة، ويحقق إنجازاً بمعايير محددة، ويتم ذلك عادة بتصميم متحكم يؤمن إشارات العمل اللازمة لقيادة النظام، ويجبره على تحقيق المواصفات المطلوبة سواء كانت مواصفات استجابة محددة مثل زمن الوصول إلى وضع الاستقرار أو خطأ الحالة الدائمة أو متطلبات استقرار محددة، أو متطلبات اقتصادية أو دقة ووثوقيه.

وبالتالي فإن التحكم الأمثل هو تصميم المتحكم الذي يحقق مواصفة محددة للنظام كأفضل ما يمكن وفق معيار محدد. مثل تصميم المتحكم الذي يحقق أقل خطأ استقرار، أو الذي يجعل استجابة النظام أسرع ما يمكن. ويمكن أن يكون الهدف من التحكم الحصول على بارامتر ما في النظام في الحلقة المغلقة يحقق مواصفة محددة للنظام كأفضل ما يمكن، مثل الحصول على قيمة تردد الاهتزاز الطبيعي غير المتخامد الذي يحقق أقل خطأ استقرار أو الحصول على قيمة معدل التخامد الذي يجعل استجابة النظام أسرع ما يمكن.

التحكم الأمثل بمفهوم ليبانوف هو تصميم المتحكم في فضاء الحالة (أو الحصول على بارامتر ما) يحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم ليبانوف.

ويعتبر مفهوم الأمثلة هو مفهوم عام، يرد في الكثير من المواضيع العلمية ويعني الحصول على الأفضل والأمثل وفق معيار محدد، أو الحصول على البارامترات التي تحقق الحالة الأفضل وفق معيار محدد. مثل الحصول على أعلى طاقة من مولد، أو أقل استهلاك للطاقة لألة ما، أو الحصول على أعلى إنتاجية زراعية أو صناعية، أو توزيع المهام على عدد محدد من المعالجات للحصول على أقل زمن تنفيذ.

تتم عمليات الأمثلة رياضياً بالحصول على القيمة العظمى Maximization، أو الصغرى Minimization، لتابع يسمى تابع الكلفة أو دالة الإنجاز Performance index، التي تمثل المواصفة التي نريدها كأفضل ما يمكن. مثلاً قد تكون دالة الإنجاز مردود الإنتاج لالة محددة، عملية الأمثلة في هذه الحالة هي الحصول على القيمة العظمى لدالة الإنجاز. وقد تكون دالة الإنتاج مقدار الخطأ المرتكب في إنجاز عمل ما هنا نريد الحصول على القيمة الصغرى لدالة الإنجاز.

6.2 طريقة ليبانوف لحل مسألة التحكم التربيعي الأمثل:

إن التحكم التربيعي الأمثل يعني تصميم المتحكم في فضاء الحالة الذي يحقق أفضل إنجاز للنظام التحكمي، ويسمى بالتحكم التربيعي لأن دالة الإنجاز هي عبارة عن تابع تربيعي.

تقتضي طريقة استبدال الجذور استبدال أقطاب النظام في الحلقة المفتوحة بأقطاب الحلقة المغلقة والتي تحقق مواصفات محددة للنظام سواء كانت مواصفات الاستجابة الانتقالية أو الدائمة أو متطلبات الاستقرار. ووفقاً لطريقة استبدال الجذور فإن تصميم المتحكم يقتضي حساب مصفوفة الربح الخلفي K التي يتم عن طريقها إعادة شعاع الحالة من خرج النظام إلى دخله بتغذية خلفية سالبة تحققها المصفوفة K (المتحكم). وتصبح إشارة الدخل للنظام u خطية وتعطى بالعلاقة (1-6) والتي تسمى بقانون التحكم الخطي.

$$u = -Kx(t) \quad (1 - 6)$$

وتعطى دالة الإنجاز J في التحكم التربيعي الأمثل كتابع لشعاع الحالة x ولإشارة دخل النظام u وتعطى بالعلاقة (2-6)

$$J = \int_0^{\infty} L(x, u) dt \quad (2 - 6)$$

حيث أن L هو تابع تربيعي في شعاع الحالة x ، و u دخل النظام وهو بشكل عام شعاع طوله r . يُطلب من خلال مسألة الأمثلة ايجاد إشارة التحكم التي تجعل النظام يعمل بالشكل الأمثل.

6.3 التحكم التربيعي الأمثل في النظام الخطي المتجانس:

ليكن لدينا النظام الخطي المتجانس الموصوف بالعادلة (3 - 6):

$$\dot{x}^*(t) = Ax(t) \quad (3 - 6)$$

حيث إن القيم الخاصة بالمصفوفة A ذات جزء حقيقي سالب، وضع التوازن للنظام هو وضع التوازن الصفري $x_e = \bar{0}$ والنظام مستقر بشكل متقارب حول وضع توازنه الصفري. تحوي المصفوفة A البارامتر أو البارامترات التي يُطلب أمثلة استقرار النظام بالنسبة لها. إن دالة الإنجاز التربيعية لهذا النظام تعطى بالعلاقة (4-6)

$$J = \int_0^{\infty} (x^* Q x) dt \quad (4 - 6)$$

Q هي مصفوفة مربعة متناظرة عقدية أو حقيقية موجبة التحديد Pd أو Ps_d و x^* منقول مرافقات شعاع الحالة.

وقد وُضح في الفصل الثاني بأن تابع ليبانوف ومشتقه على التوالي لهذا النوع من الأنظمة معطى بالعلاقة (5 - 6) و(6 - 6):

$$v(x) = x^* P x \quad (5 - 6)$$

$$v^*(x) = -x^* Q x \quad (6 - 6)$$

حيث إن P مصفوفة مربعة متناظرة عقدية أو حقيقية موجبة التحديد Pd ، ونحصل عليها من العلاقة (7-6):

$$-Q = A^*P + PA \quad (7 - 6)$$

عند تطبيق دالة الإنجاز بمفهوم ليبانوف للنظام الخطي المتجانس يكون لدينا:

$$v^*(x) = -x^*Qx = \frac{d}{dt}v(x) = \frac{d}{dt}(x^*Px)$$

$$J = \int_0^\infty \left(-\frac{d}{dt}(x^*Px)\right)dt = -[x^*Px]_0^\infty = -x^*(\infty)Px(\infty) + x^*(0)Px(0)$$

إن وضع التوازن للنظام المتجانس الخطي الموصوف بالمعادلة (6 - 3) هو الشعاع الصفري $x_e = \bar{0}$ ، ولكي يكون النظام مستقرًا بشكل متقارب حسب ليبانوف فإن:

$$x(\infty) = x_e$$

أي ينتهي شعاع الحالة إلى وضع التوازن وهنا هو وضع التوازن الصفري، وبالتالي تصبح دالة الإنجاز للنظام الخطي المتجانس وفق العلاقة (6 - 8):

$$J = x^*(0)Px(0) \quad (8 - 6)$$

حصلنا من خلال العلاقة على دالة الإنجاز بدلالة الوضع الابتدائي للنظام $x(0)$ والمصفوفة P التي ترتبط بالمصفوفة A و Q وفق العلاقة (6 - 7). وبالتالي للحصول على أفضل استقرار للنظام بمفهوم ليبانوف لابد من إنقاص دالة الإنجاز أي الحصول على النهاية الصغرى لها.

إن المصفوفة P التي تحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم ليبانوف هي المصفوفة التي عناصرها تجعل دالة الإنجاز تبلغ نهايتها الصغرى.

ونتمكن في هذا النوع من النظم من حساب قيمة بارامتر محدد للنظام والذي يحقق أفضل استقرار. عندها يجب إظهار هذا البارامتر في علاقة J ثم اشتقاق J بالنسبة له ومساواة المشتق بالصفر.

6.4 التحكم التربيعي الأمثل في النظام الخطي غير المتجانس:

ليكن لدينا النظام الخطي غير المتجانس الموصوف بالمعادلة (6 - 9):

$$x^*(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9 - 6)$$

حيث إن u هي إشارة الدخل للنظام أو إشارة التحكم وهي شعاع بطول r . وتعطى دالة الإنجاز التربيعية العقدية لهذا النوع من النظم وفق العلاقة (6 - 10):

$$J = \int_0^\infty (x^*Qx + u^*Ru)dt \quad (10 - 6)$$

Q, R مصفوفات مربعة متناظرة Pd أو Ps_d ، المصفوفة R أبعادها $r \times r$ حيث r طول شعاع الدخل.

عندما تكون قيم شعاع الحالة حقيقية نستخدم دالة الإنجاز الحقيقية المعطاة بالمعادلة (6 - 11):

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (11 - 6)$$

نوجد إشارة التحكم التي تجعل النظام مستقرًا بالشكل الأمثل أو عناصر مصفوفة الربح الخلفي K (المتحكم المصمم) التي تحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم ليبانوف.

إذا كان الدخل وحيد u عندها تكون مصفوفة الربح الخلفي K شعاعاً بطول $1 \times n$ ، بتعويض إشارة الدخل من العلاقة (6 - 1) بالعلاقة (6 - 9) نحصل على العلاقة (6 - 12):

$$\begin{aligned} x^*(t) &= Ax(t) - BKx(t) \\ x^*(t) &= (A - BK)x(t) \\ x^*(t) &= \hat{A}x(t) \end{aligned} \quad (12 - 6)$$

نلاحظ من العلاقة (6 - 12) بأن النظام غير المتجانس عاد متجانساً ولكن المصفوفة \hat{A} أصبحت وفق العلاقة (6 - 13):

$$\hat{A} = A - BK \quad (13 - 6)$$

سنفترض أن المصفوفة \hat{A} لها قيم خاصة ذات جزء حقيقي سالب فيكون وضع التوازن هو وضع التوازن الصفري.

عند تعويض الدخل u في العلاقة (6 - 1) بالعلاقة (6 - 10) تصبح دالة الإنجاز J :

$$J = \int_0^{\infty} (x^* Q x + x^* K^* R K x) dt = \int_0^{\infty} x^* (Q + K^* R K) x dt = \int_0^{\infty} (x^* \hat{Q} x) dt$$

نلاحظ أننا حصلنا على دالة الإنجاز مشابهة لتلك في النظام المتجانس ولكن أصبحت المصفوفة \hat{Q} معطى بالعلاقة (6 - 14):

$$\hat{Q} = Q + K^* R K \quad (14 - 6)$$

عند تطبيق دالة الإنجاز بمفهوم ليبانوف للنظام الخطي غير المتجانس يكون لدينا:

$$\begin{aligned} v^*(x) &= -x^* (Q + K^* R K) x = \frac{d}{dt} (x^* P x) \\ J &= \int_0^{\infty} \left(-\frac{d}{dt} (x^* P x) \right) dt = -[x^* P x]_0^{\infty} = -x^*(\infty) P x(\infty) + x^*(0) P x(0) \end{aligned}$$

إن وضع التوازن للنظام المتجانس الجديد الموصوف بالمعادلة (6 - 12) هو الشعاع الصفري $\bar{x}_e = 0$ ، ولكي يكون النظام مستقرًا بشكل متقارب حسب ليبانوف فإن:

$$x(\infty) = x_e$$

أي ينتهي شعاع الحالة إلى وضع التوازن وهنا هو وضع التوازن الصفري، وبالتالي تصبح دالة الإنجاز للنظام الخطي غير المتجانس:

$$J = x^*(0)Px(0)$$

وهي مشابهة تماماً للعلاقة (6 - 8) للنظام المتجانس، إن المصفوفة P مصفوفة متناظرة ويجب أن تكون موجبة التحديد وتحقق الاستقرار للنظام، أي أنها تحقق العلاقة (6 - 15):

$$-\hat{Q} = \hat{A}^*P + P\hat{A} \quad (15 - 6)$$

باستبدال المصفوفات \hat{A} و \hat{Q} بما يساويها في العلاقات (6 - 13) و (6 - 14) نحصل على العلاقة (6 - 16):

$$-(Q + K^*RK) = (A^* - K^*B^*)P + P(A - BK) \quad (16 - 6)$$

إذا أردنا حساب أفضل متحكم للنظام بمفهوم ليبانوف أي إيجاد عناصر ربح المصفوفة الخلفية K ، عندها لابد من استخدام العلاقة (6 - 16) لحساب المصفوفة P التي ستكون عناصرها تابعة لعناصر K ونتابع التعويض في علاقة دالة الإنجاز J واشتقاقها بالنسبة لعناصر K ومساواة المشتقات بالصفر كما في العلاقة (6 - 17):

$$\frac{dJ}{dK} = 0 \rightarrow \frac{dJ}{dK_1} = 0, i = 1 \dots n \quad (17 - 6)$$

لإيجاد حل لمسألة التحكم الأمثل لابد من إيجاد قيمة K التي تحقق الاستقرار الأمثل. بما أن المصفوفة R هي عبارة عن مصفوفة متناظرة Pd حقيقة أو عقدية يمكننا أن نكتب:

$$R = T^*T$$

حيث أن T مصفوفة نظامية. عندها يمكن كتابة العلاقة (6 - 16) بالشكل الآتي:

$$(A^* - K^*B^*)P + P(A - BK) + Q + K^*T^*TK = 0$$

$$A^*P + PA + [TK - (T^*)^{-1}B^*P]^*[TK - (T^*)^{-1}B^*P] - PBR^{-1}B^*P = 0$$

إن إنقاص J بالنسبة إلى K يتطلب إنقاص المقدار:

$$x^*[TK - (T^*)^{-1}B^*P]^*[TK - (T^*)^{-1}B^*P]x$$

بالنسبة إلى K بما أن المقدار السابق ليس سالباً، تكون نهايته الصغرى عندما يساوي الصفر أو:

$$TK = (T^*)^{-1}B^*P$$

$$K = T^{-1}(T^*)^{-1}B^*P = R^{-1}B^*P$$

نلاحظ من العلاقة الأخيرة بأنها تعطي قيمة K المثلى، ويمكن كتابتها وفق العلاقة (6 - 18):

$$K = R^{-1}B^*P \quad (18 - 6)$$

بتعويض العلاقة (6 - 18) في العلاقة (6 - 16) نحصل على العلاقة (6 - 19):

$$A^*P + PA + Q - PBR^{-1}B^*P = 0 \quad (19 - 6)$$

6.5 قابلية التحكم (Controllability) في النظم المستمرة:

قدم Kalman مفهومي قابلية التحكم والرصد. وهما من المفاهيم المهمة في تصميم نظم التحكم في فضاء الحالة، إذ يشكلان الشروط الأساسية لتصميم الراصد والمتحكم ولهما دور مهم جداً في التحكم الأمثل. نقول عن نظام إنه تحكيمي أو قابل للتحكم عند الزمن t_0 إذا وجدت إشارة تحكم u (أو شعاع تحكم) تستطيع نقل النظام من أي حالة ابتدائية $x(t_0)$ إلى أي حالة نهائية $x(t)$ خلال زمن محدد. بمعنى آخر فإن الدخل u يجب أن يؤثر على كل متغير حالة في النظام. وإذا وجد متغير حالة لا يؤثر عليه u فإن النظام غير قابل للتحكم بشكل كامل.

لمعرفة ان كان النظام الخطي المستمر الموصوف بالمعادلة:

$$\dot{x}^* = Ax + Bu$$

تحكيمياً كاملاً في فضاء الحالة أم لا نحسب المصفوفة M وفق المعادلة (6-20):

$$M = [B: AB: A^2B: \dots \dots A^{n-1}B] \quad (20 - 6)$$

يجب أن تكون المصفوفة M نظامية non-singular ولاختيار ذلك هناك حالتين:

- إذا كانت المصفوفة M مربعة نحسب محدد المصفوفة M ، إذا كان محدد المصفوفة M غير مساوٍ للصفر $\det(M) \neq 0$ يكون النظام تحكيمياً كاملاً بالحالة.
- إذا كانت المصفوفة M غير مربعة وهذا يحدث إذا كان للمصفوفة B أكثر من عمود أي للنظام أكثر من دخل واحد، في هذه الحالة يكون النظام تحكيمياً كاملاً اذا كان $\text{rank}(M) = n$ حيث n عدد متغيرات الحالة.

6.6 تصميم المتحكم التربيعي الأمثل لنظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد:

دُرس ضمن الفصل الخامس نمذجة منظومة التحكم الشبكية لنظام القدرة الكهربائية المؤلف من ثلاث مجموعات توليد موزعة على ثلاث مناطق جغرافية منفصلة. إذ تتكون المنطقة الأولى من مجموعة توليد واحدة للطاقة الحرارية وبإستطاعة كهربائية مقدارها 360MVA، بينما تتألف المنطقة الثانية والثالثة من مجموعة توليد كهرومائية واحدة وبإستطاعة كهربائية مقدارها 503MVA وللثانية و1673MVA للثالثة.

وتم التوصل بعد استنتاج معادلات الحالة لنظام الطاقة الكهربائية الشبكي إلى المعادلات الرياضية التي تصف أي نظام تحكم شبكي مؤلف من n نظاماً فرعياً، تربط بين أنظمتها الفرعية علاقة خطية. بالإضافة إلى دراسة تأثير

التأخير الزمني غير المحدد على استقرار نظام القدرة الكهربائية الممتد على مناطق جغرافية واسعة النطاق، والذي يعتبر مسؤولاً عن زيادة اضطراب حلقة التحكم المغلقة في نظم التحكم الشبكية، ووفقاً لهذا التأخير فإن هذه الأنظمة تميل إلى الاهتزاز وعدم الاستقرار في الاستجابة التحكمية.

في هذه الفصل سندرس تصميم متحكم تربيعي أمثل لمعالجة تأثير التأخير الزمني غير المحدد في نظم التحكم الشبكية المستمرة، ومن ثم تخمين قيمة التأخير الزمني التي تبقى على النظام الشبكي المستمر بحالة استقرار $\tau_{Stability}$.

سيتم تصميم المتحكم التربيعي الأمثل لمنظومة القدرة الكهربائية المؤلفة من ثلاث مجموعات توليد والتي درست ضمن الفصل الخامس مع توضيح تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين مجموعات التوليد الثلاث. بعد ذلك سنصمم المتحكم التربيعي الأمثل لمجموعتي التوليد الأولى (مجموعة التوليد الحرارية) مع الثانية (مجموعة التوليد الكهرومائية) وكذلك الأمر بالنسبة لمجموعتي التوليد الثانية مع الثالثة (مجموعات التوليد الكهرومائية)، وندرس تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار النظام الشبكي الجديد وتخمين $\tau_{Stability}$ بغية ملاحظة تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين النظام الشبكي المؤلف من ثلاث مولدات والنظام المؤلف من مولدين، والاختلاف في قيمة $\tau_{Stability}$ بين النظامين.

بالعودة إلى العلاقة (5-23) التي استنتجت من خلالها معادلات الحالة التي تصف نظام التحكم الشبكي لمنظومة الطاقة الكهربائية المؤلف من n نظاماً فرعياً، وبتعويض مجموعات التوليد الثلاث نصل إلى العلاقة (6-21) التي تصف نظام التحكم الشبكي لمجموعات التوليد الثلاث مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد، مع إضافة ضجيج بقيمة 5% لمجموعة التوليد الأولى فقط.

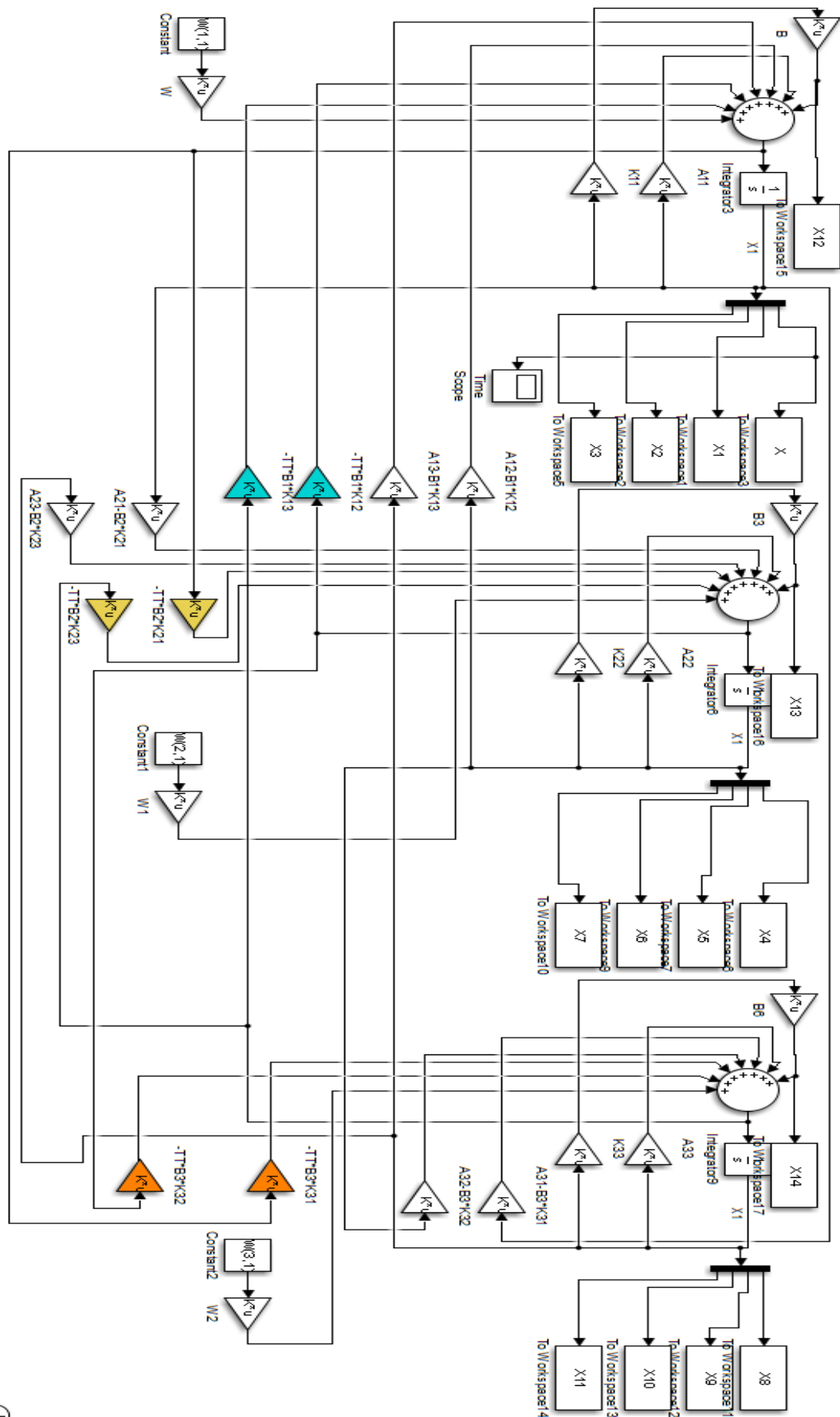
$$\begin{aligned} x_1(t) &= (A_{11} - B_1 K_{11})x_1(t) + (A_{12} - B_1 K_{12})x_2(t) + (A_{13} - B_1 K_{13})x_3(t) \\ &\quad + \tau_{21} B_1 K_{12} x_2(t) + \tau_{31} B_1 K_{13} x_3(t) + F_1 w_1(t) \\ x_2(t) &= (A_{21} - B_2 K_{21})x_1(t) + (A_{22} - B_2 K_{22})x_2(t) + (A_{23} - B_2 K_{23})x_3(t) \\ &\quad + \tau_{12} B_2 K_{21} x_1(t) + \tau_{13} B_2 K_{23} x_3(t) + F_2 w_2(t) \\ x_3(t) &= (A_{31} - B_3 K_{31})x_1(t) + (A_{32} - B_3 K_{32})x_2(t) + (A_{33} - B_3 K_{33})x_3(t) \\ &\quad + \tau_{13} B_3 K_{31} x_1(t) + \tau_{23} B_3 K_{32} x_2(t) + F_3 w_3(t) \end{aligned} \quad (21-6)$$

τ_{12} : التأخير الزمني بين مجموعة التوليد الأولى والثانية.

τ_{23} : التأخير الزمني بين مجموعة التوليد الثانية والثالثة.

τ_{13} : التأخير الزمني بين مجموعة التوليد الأولى والثالثة.

يوضح الشكل (6-1) دارة MATLAB/SIMULINK لمجموعات التوليد الثلاث متضمنة إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين أنظمتها الفرعية الثلاث كما تم وصفها وفق العلاقة (6-21)



الشكل (6-1): نمذجة منظومة التحكم الشبكية المستمرة لمجموعات التوليد الثلاث.

يتم تصميم المتحكم التربيعي الأمثل لنظام التحكم الشبكي المؤلف من مجموعات التوليد الثلاث وفق العلاقة (6-21) من خلال خطوات التصميم التالية:

- ✓ التأكد من أن نظام التحكم الشبكي هو نظام قابل للتحكم الكامل في فضاء الحالة وفق العلاقة (6-20).
- ✓ اختيار مصفوفات التوزين للمتحكم LQR.
- ✓ حساب قيمة المصفوفة P وفق العلاقة (6-19) والتأكد من أنها موجبة التحديد.
- ✓ حساب قيمة عناصر مصفوفة الربح الخلفي K وفق العلاقة (6-18).

6.6.1 دراسة قابلية التحكم لنظام التحكم الشبكي المستمر:

نحسب قيمة المصفوفة M من العلاقة (6-20). وبما أن نظام التحكم الشبكي المدروس هو عبارة عن نظام شبكي مؤلف من ثلاث مجموعات توليد، إذاً فهو يتألف من ثلاثة مداخل وعندها فإن أبعاد المصفوفة B هي 12×3 . بما أن للنظام أكثر من مدخل فإن المصفوفة M هي مصفوفة غير مربعة. بالنتيجة $\text{rank}(M) = n = 12$ إذاً نظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد تحكيمي كامل في فضاء الحالة ويمكن تصميم متحكم LQR له.

6.6.2 اختيار مصفوفات التوزين للمتحكم LQR:

يتم توليف المتحكم التربيعي الخطي من خلال اختيار أوزانه التي تتمثل بعناصر المصفوفات المربعة موجبة التحديد R، Q حيث قيم عناصر المصفوفة Q تعبر عن أهمية العناصر التي ستضرب بها وهي هنا شعاع الحالة الممثل لنظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث مجموعات توليد. أما قيم المصفوفة R تعبر عن أهمية ووزن إشارات التحكم المطبقة والتي بدورها تعبر عن الطاقة المستهلكة لتحقيق عملية التحكم.

بالنسبة لاختيار المصفوفات R، Q فإن الاختيار الأبسط $R = \rho I$ ، حيث I مصفوفة قطرية واحدية $n \times n$ والمعامل ρ تعبر عن المقايضة Tradeoff بين استجابة خرج النظام وطاقة دخل المتحكم من خلال تابع الكلفة.

وتأخذ الأوزان القطرية الشكل التالي:

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & q_n \end{bmatrix}, R = \rho \begin{bmatrix} R_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & R_m \end{bmatrix}$$

حيث Q هي مصفوفة مربعة موجبة التحديد وتسمى بمصفوفة أوزان الحالة Weighting Matrix و R هي أيضاً مصفوفة مربعة موجبة التحديد تسمى بمصفوفة معامل الوزن Weighting Factor، حيث n هي درجة النظام، m طول شعاع الدخل.

عادة يتم في التحكم الأمثل تصميم المتحكم LQR بتعديل المصفوفة Q بشكل مستمر وجعل R ثابتة، وهي تعبر عن أداء النظام بالحلقة المغلقة. كما هو ملاحظ فإن ρ لها دلالة مهمة بجعل استجابة النظام أبطأ أو أسرع على حساب إشارة تحكم أصغر أو أكبر.

يجب أن يتم اختيار المصفوفة Q بأن تكون مصفوفة مربعة متناظرة ($n \times n$) موجبة التحديد (جميع المعينات المتتابة أكبر تماماً من الصفر) أو شبه موجبة التحديد (المعينات المتتابة أكبر أو تساوي الصفر)، وكذلك الأمر بأن تكون المصفوفة R (أبعادها $m \times m$) موجبة التحديد. وذلك لأن مسألة التحكم الأمثل تهدف إلى إيجاد شعاع التحكم $U(t)$ الذي ينقل حالة النظام من أي حالة ابتدائية معطاة $x(t_0)$ إلى المنطقة المطلوبة من فضاء الحالة التي تكون من أجلها دالة الإنجاز الموصوفة بالعلاقة (6-10) أصغرية J_{\min} .

أولاً: دراسة تأثير المصفوفة R على إشارة التحكم لتحديد قيمتها بدقة.

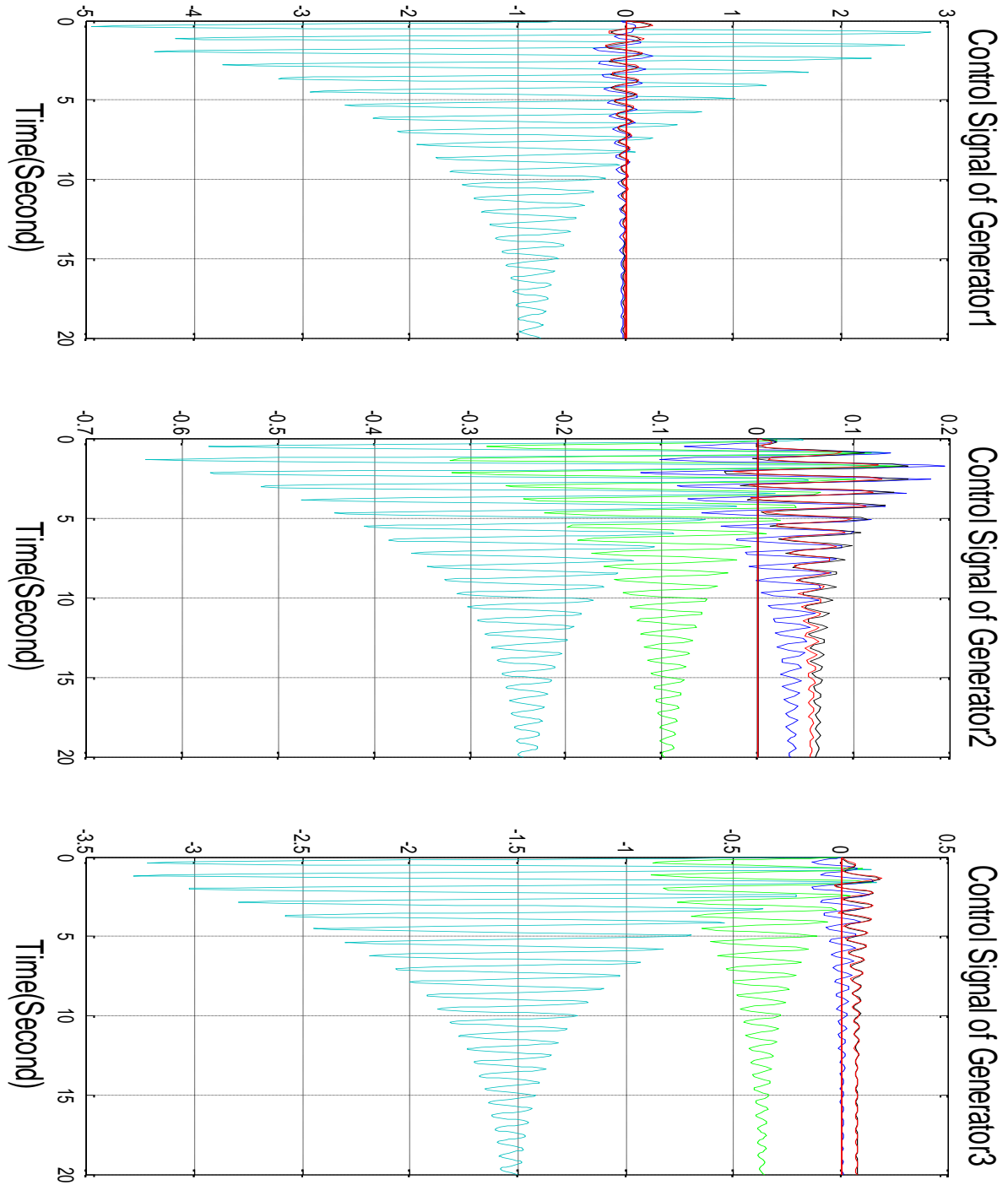
يتم تحديد قيمة المصفوفة R من خلال زيادة قيمة ρ تدريجياً مع ملاحظة تأثيرها على مطال إشارة التحكم والاهتزازات الناشئة عن زيادة قيمتها. تم دراسة الحالات الخمس التالية والشكل (6-2) يوضح ذلك. بينما يوضح الجدول (6-1) تأثير زيادة ρ على قيمة $P2P$ لإشارات التحكم الثلاث.

State1, $R = \text{diag}(1,1,1)$.
 State2, $R = \text{diag}(10,10,10)$.
 State3, $R = \text{diag}(100,100,100)$.
 State4, $R = \text{diag}(500,500,500)$.
 State5, $R = \text{diag}(1000,1000,1000)$.

State	P2P(U1)[P.U]	P2P(U2)[P.U]	P2P(U3)[P.U]
State1	7.779	0.7773	3.426
State2	1.9633	0.4726	1.0215
State3	0.5526	0.3183	0.2669
State4	0.4071	0.15435	0.21741
State5	0.3815	0.18616	0.20919

الجدول (6-1): قيم Peak2Peak لإشارات التحكم الثلاث عند قيم مختلفة للمصفوفة R

نلاحظ من الجدول (6-1) بأن قيمة $P2P$ لإشارات التحكم المشكلة للنظام الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد تتناقص مع زيادة قيمة ρ تدريجياً. بالإضافة إلى أن الاهتزازات الناتجة في إشارة التحكم عن زيادة قيمة ρ تتناقص بشكل ملحوظ.



الشكل(6-2): تأثير المصفوفة R على إشارة التحكم لتحديد قيمتها بدقة من خلال خمس حالات.

ثانياً: دراسة تأثير المصفوفة Q على أقطاب الحلقة المغلقة

بعد تحديد قيمة المصفوفة R وفق الحالة الخامسة وتأثيرها على إشارة التحكم. نحدد قيمة المصفوفة Q من خلال دراسة تأثيرها على أقطاب الحلقة المغلقة للنظام مع المتحكم الأمثل وفق مجموعة من الحالات:

$$\begin{aligned} \text{State1, } Q &= \text{diag}(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1). \\ \text{State2, } Q &= \text{diag}(2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2). \\ \text{State3, } Q &= \text{diag}(2,2,2,0.01,2,2,2,0.01,2,2,2,0.01). \\ \text{State4, } Q &= \text{diag}(10,10,10,0.01,2,2,2,0.01,2,2,2,0.01). \\ \text{State5, } Q &= \text{diag}(1,1,1,0.001,2,2,2,0.001,2,2,2,0.001). \\ \text{State6, } Q &= \text{diag}(1,1,1,0.001,4,5,5,0.001,5,5,5,0.001). \\ \text{State7, } Q &= \text{diag}(1,1,1,0.001,4,8,8,0.001,8,8,8,0.001). \\ \text{State8, } Q &= \text{diag}(1,1,1,0.001,4,10,10,0.001,10,10,10,0.001). \end{aligned}$$

نستنتج من الجدول (2-6) مايلي:

- نختار القيمة البدائية للمصفوفة Q بحيث يكون قطرها الرئيسي واحداً.
- نعمل على زيادة قيمة القطر الرئيسي للمصفوفة Q بمقدار واحد. حيث نلاحظ بأن القيم الذاتية للأقطاب (1,2,3) تبتعد عن المحور التخيلي، بينما القيم الذاتية للأقطاب (5,6,7,9,10,11) تحافظ على قيمتها كما في الحالة الأولى. أما سلوك الأقطاب (4,8,12) يختلف عن سابقتها، إذ نلاحظ بأنها تقترب من المحور التخيلي مع زيادة قيمتها لذلك نلجأ إلى إنقاص قيمتها كما في الحالة الثالثة.
- تؤكد الحالة الثالثة ما تم التوصل اليه في الحالة الثانية، إذ إن جميع الأقطاب مازالت تبتعد عن المحور التخيلي. والقيمة الذاتية للقطب الرابع أصبحت $0.0000i + 7.5593 -$ بدلاً من $-0.5246 + 7.9625i$.
- بما أن سلوك الأقطاب (1,2,3) هي الزيادة، نجعل قيمتها 10 على سبيل المثال (بعد وضع القيم الذاتية للأقطاب (4,8,12) على 0.01). نلاحظ بأن القيم الذاتية لها قريبة جداً من القيم الذاتية في الحالة الثالثة. إذا لا يوجد فائدة من زيادتها عن القيمة 1.
- بعد تثبيت قيم الأقطاب (1,2,3) على القيمة 1، نغير في قيمة الأقطاب (4,8,12) من 0.1 حتى 0.01 عندها نلاحظ ثبات القيم الذاتية للأقطاب (1,2,3) بشكل مشابهة للحالة الرابعة مع ابتعاد باقي الأقطاب عن المحور التخيلي بشكل كاف.
- عند زيادة الأقطاب (5,6,7,9,10,11) تبتعد القيم الذاتية للأقطاب من 4 إلى 12 عن المحور التخيلي بشكل ملحوظ مقارنة بالحالة الخامسة. مع احتفاظ القيم الذاتية للأقطاب (1,2,3) على بعدها عن المحور التخيلي.

- نستمر في زيادة قيم الأقطاب (5,6,7,9,10,11) تدريجياً ونلاحظ تحسن ملحوظ في ابتعاد القيم الذاتية للأقطاب من 4 إلى 12 عن المحور التخيلي مقارنة بالحالة السادسة باستثناء القطبين التاسع والعاشر. مع احتفاظ القيم الذاتية للأقطاب (1,2,3) على بعدها عن المحور التخيلي.
- نتابع الاستمرار في الزيادة للأقطاب (5,6,7,9,10,11) حتى الوصول إلى الحالة التاسعة عندها نقف عن الزيادة لتناقص القيم الذاتية للأقطاب (1,2,3) في ابتعادها عن المحور التخيلي.
- نلاحظ بأن القطبين التاسع والعاشر كانت في أفضل حالاتها عند الحالة السادسة، ولكن مع زيادة قيم الأقطاب (5,6,7,9,10,11) تناقصت مقارنة بالحالة السادسة مع ثبات قيمتها الذاتية في الحالة السابعة والثامنة والتاسعة. وبالتالي لا يمكن التوقف عن زيادة قيم الأقطاب التي تحسن في الابتعاد عن المحور التخيلي من أجل القطبين التاسع والعاشر التي تناقصت قيمتها ولكنها مازالت على يسار الساحة العقدية.

عند تطبيق المتحكم LQR على نظام التحكم الشبكي المستمر المدروس نختار قيمة $Q(12 \times 12)$ و $R(3 \times 3)$ وفق الآتي:

$$Q = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix}$$

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S1	-35.9060 + 0.0000i	-34.1283 + 0.0000i	-30.0925 + 0.0000i	-0.5246 + 7.9625i	-0.5246 - 7.9625i	-0.1744 + 7.3559i	-0.1744 - 7.3559i	-4.0559 + 0.0000i	-0.4342 + 4.2019i	-0.4342 - 4.2019i	-1.8862 + 0.0000i	-1.1062 + 0.0000i
S2	-47.8480 + 0.0000i	-44.4433 + 0.0000i	-39.3778 + 0.0000i	-0.4737 - 7.9447i	-0.4737 - 7.9447i	-0.1749 + 7.3650i	-0.1749 - 7.3650i	-3.3323 + 0.0000i	-0.4109 + 4.1667i	-0.4109 - 4.1667i	-1.5814 + 0.0000i	-1.0806 + 0.0000i
S3	-19.0030 + 0.0000i	-17.1134 + 0.0000i	-14.7914 + 0.0000i	-7.5593 + 0.0000i	-0.4608 + 8.0160i	-0.4608 - 8.0160i	-0.2666 + 7.2745i	-0.2666 - 7.2745i	-4.2432 + 0.0000i	-2.6922 + 0.0000i	-0.5263 + 4.2432i	-0.5263 - 4.2432i
S4	-18.9927 + 0.0000i	-17.0045 + 0.0000i	-13.7221 + 0.0000i	-9.4091 + 0.0000i	-0.4533 + 8.0657i	-0.4533 - 8.0657i	-0.4181 + 7.2167i	-0.4181 - 7.2167i	-0.5554 + 4.2198i	-0.5554 - 4.2198i	-2.6968 + 0.0000i	-4.5236 + 0.0000i
S5	-18.8077 + 0.0000i	-16.8730 + 0.0000i	-14.5964 + 0.0000i	-7.4956 + 0.0000i	-0.4550 + 8.0089i	-0.4550 - 8.0089i	-0.2316 + 7.2807i	-0.2316 - 7.2807i	-4.2502 + 0.0000i	-2.7281 + 0.0000i	-0.5233 + 4.2463i	-0.5233 - 4.2463i
S6	-18.6223 + 0.0000i	-16.6298 + 0.0000i	-14.3761 + 0.0000i	-7.8683 + 0.0000i	-0.5744 + 7.9951i	-0.5744 - 7.9951i	-0.2324 + 7.3271i	-0.2324 - 7.3271i	-5.1695 + 0.0000i	-3.9539 + 0.0000i	-0.5821 + 4.2797i	-0.5821 - 4.2797i
S7	-18.4282 + 0.0000i	-16.3973 + 0.0000i	-14.0494 + 0.0000i	-8.4561 + 0.0000i	-5.7358 + 0.0000i	-4.9372 + 0.0000i	-0.5954 + 8.0006i	-0.5954 - 8.0006i	-0.2286 + 7.3334i	-0.2286 - 7.3334i	-0.6245 + 4.2881i	-0.6245 - 4.2881i
S8	-18.2935 + 0.0000i	-16.2524 + 0.0000i	-13.7282 + 0.0000i	-9.0328 + 0.0000i	-5.8831 + 0.0000i	-5.6009 + 0.0000i	-0.6077 + 8.0040i	-0.6077 - 8.0040i	-0.2263 + 7.3369i	-0.2263 - 7.3369i	-0.6503 + 4.2924i	-0.6503 - 4.2924i
S9	-17.9366 + 0.0000i	-15.9365 + 0.0000i	-11.7611 + 1.0546i	-11.7611 - 1.0546i	-6.5331 + 0.3697i	-6.5331 - 0.3697i	-0.6340 + 8.0116i	-0.6340 - 8.0116i	-0.2213 + 7.3441i	-0.2213 - 7.3441i	-0.7088 + 4.3008i	-0.7088 - 4.3008i

الجدول (2-6): تأثير المصفوفة Q على أقطاب الحلقة المغلقة

6.6.3 حساب قيمة المصفوفة P:

نحسب قيمة المصفوفة P من العلاقة (6-19):

6.2499	4.9343	-0.0063	-0.021	-3.0420	-117.4433	-0.1027	-0.0068	-0.11	86.35	-0.095	-0.0035
4.9343	$1.57E + 04$	46.7718	1.5609	101.3558	$-5.9E + 03$	2.6681	$-1.8E - 05$	-113.1833	$4.3E + 03$	-8.8766	-0.48
-0.0063	46.7718	3.3634	0.1403	2.4035	-198.2972	-0.0256	-0.0053	0.4964	-362.174	0.4639	0.02
-0.0210	1.5609	0.1403	0.0064	0.1349	-6.0898	$5.4E - 04$	$-9.8E - 05$	0.0527	-14.4195	0.0183	$8.1E - 04$
-3.0420	101.3558	2.4035	0.1349	7.4866	34.0873	0.7717	0.0402	-0.2219	74.2635	-0.2095	-0.0063
-117.4433	$-5.9E + 03$	-198.2972	-6.0898	34.0873	$2.3E + 04$	6.9576	0.8403	77.3516	$2.3E + 04$	-37.0931	-1.5655
-0.1027	2.6681	-0.0256	$5.4E - 04$	0.7719	6.9576	2.0075	0.0822	0.4498	-4.8837	-0.07	-0.0023
-0.0068	$-1.8E - 05$	-0.0053	$-9.8E - 05$	0.0402	0.8403	0.0822	0.0038	0.0266	0.1258	-0.0039	$-1.33E - 04$
-0.1100	-113.1833	0.4964	0.0527	-0.2219	77.3516	0.498	0.0266	21.0825	174.95	1.0762	0.0647
86.3559	$4.3E + 03$	-362.1745	-14.4195	74.2635	$2.3E + 04$	-4.8837	0.1258	174.9539	$1.7E + 05$	-196.24	-7.2562
-0.0954	-8.8766	0.4639	0.0183	-0.2095	-37.0931	-0.0700	-0.0039	1.0762	-196.24	1.749	0.0693
-0.0035	-0.4819	0.0201	$8.1E - 04$	-0.0063	-1.5655	-0.0023	$-1.3E - 04$	0.0647	-7.2562	0.0693	0.0032

يوضح الجدول (6-3) قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P، وبما أن P مصفوفة موجبة التحديد P_d (جميع محدداته الخاصة أكبر من الصفر) فالنظام مستقر ويمكن أمثله.

P1=6.2499	P2=9.8200e+04	P3=3.1661e+05	P4=140.5721	P5=338.7001	P6=6.2266e+05
P7=1.1071e+06	P8=473.7362	P9=7.6502e+03	P10=5.3929e+08	P11=7.5859e+08	P12=3.3522e+05

الجدول (6-3): قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P لثلاث مجموعات توليد شبكية

6.6.4 حساب قيمة عناصر مصفوفة الربح الخلفي K:

بعد حساب قيمة P نطبق العلاقة (6-18) لإيجاد عناصر مصفوفة الربح الخلفي K فتكون أرباح المتحكم التريبيعي الأمثل كما يلي:

$$\begin{aligned}
 K_{11} &= [0.016816 \quad -1.248700 \quad -0.112220 \quad -0.005098] \\
 K_{12} &= [-0.107890 \quad 4.871900 \quad -0.000435 \quad 0.000079] \\
 K_{13} &= [-0.042185 \quad 11.53600 \quad -0.014631 \quad -0.000649] \\
 K_{21} &= [0.006097 \quad 0.000017 \quad 0.004761 \quad 0.000089] \\
 K_{22} &= [-0.036174 \quad -0.756290 \quad -0.074018 \quad -0.003454] \\
 K_{23} &= [-0.023896 \quad -0.11324 \quad 0.003539 \quad 0.0001204] \\
 K_{31} &= [0.0035432 \quad -0.48189 \quad 0.020087 \quad -0.000811] \\
 K_{32} &= [0.0063483 \quad 1.5655 \quad 0.0023165 \quad 0.00013378] \\
 K_{33} &= [-0.064655 \quad -7.2562 \quad 0.069285 \quad -0.0032193]
 \end{aligned}$$

عند حل المعادلة (6-18) نحصل على إشارات التحكم $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ كما في العلاقة (6-22) للتغذية العكسية الناتجة من الأنظمة الفرعية الثلاثة المكونة لنظام التحكم الشبكي وفق العلاقة (5-14) والتي من الممكن أن تتغير حسب القيم المختارة للمصفوفات R و Q الموضحة في الشكل (6-5) وتساوي:

$$\begin{aligned}
 u_1(t) &= 0.016816\Delta\delta_1(t - \tau) - 1.248700\Delta\omega_1(t - \tau) - 0.112220\Delta e_{q_1}(t - \tau) \\
 &\quad - 0.005098\Delta e_{FD_1}(t - \tau) - 0.107890\Delta\delta_2(t - \tau) + 4.871900\Delta\omega_2(t - \tau) \\
 &\quad - 0.000435\Delta e_{q_2}(t - \tau) + 0.000079\Delta e_{FD_2}(t - \tau) - 0.042185\Delta\delta_3(t - \tau) \\
 &\quad + 11.53600\Delta\omega_3(t - \tau) - 0.014631\Delta e_{q_3}(t - \tau) - 0.000649\Delta e_{FD_3}(t - \tau) \\
 u_2(t) &= 0.006097\Delta\delta_1(t - \tau) + 0.000017\Delta\omega_1(t - \tau) + 0.004761\Delta e_{q_1}(t - \tau) \\
 &\quad + 0.000089\Delta e_{FD_1}(t - \tau) - 0.036174\Delta\delta_2(t - \tau) - 0.756290\Delta\omega_2(t - \tau) \\
 &\quad - 0.074018\Delta e_{q_2}(t - \tau) - 0.003454\Delta e_{FD_2}(t - \tau) - 0.023896\Delta\delta_3(t - \tau) \\
 &\quad - 0.11324\Delta\omega_3(t - \tau) + 0.003539\Delta e_{q_3}(t - \tau) + 0.0001204\Delta e_{FD_3}(t - \tau) \\
 u_3(t) &= 0.0035432\Delta\delta_1(t - \tau) - 0.48189\Delta\omega_1(t - \tau) + 0.020087\Delta e_{q_1}(t - \tau) \\
 &\quad - 0.000811\Delta e_{FD_1}(t - \tau) + 0.0063483\Delta\delta_2(t - \tau) + 1.5655\Delta\omega_2(t - \tau) \\
 &\quad + 0.0023165\Delta e_{q_2}(t - \tau) + 0.00013378\Delta e_{FD_2}(t - \tau) \\
 &\quad - 0.064655\Delta\delta_3(t - \tau) - 7.2562\Delta\omega_3(t - \tau) + 0.069285\Delta e_{q_3}(t - \tau) \\
 &\quad - 0.0032193\Delta e_{FD_3}(t - \tau) \quad (22 - 6)
 \end{aligned}$$

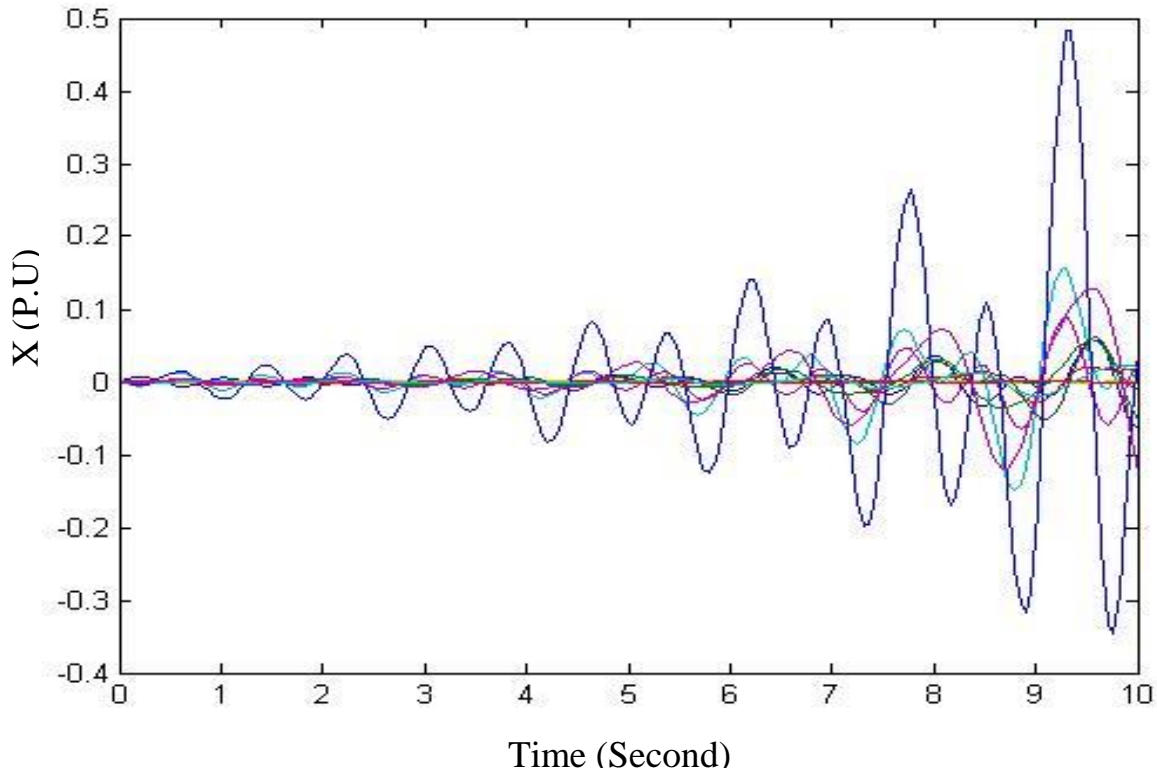
6.7 دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد:

يمثل الجدول (4-6) قيم جذور المعادلة المميزة المفتوحة والمغلقة لنظام التحكم الشبكي المستمر باستخدام المتحكم LQR. نلاحظ من قيم الجذور أن النظام في الحلقة المفتوحة يتضمن جذور قسمها الحقيقي موجب وبالتالي تقع على يمين الساحة العقدية في فضاء لابلاس S ويكون بذلك نظام التحكم الشبكي غير مستقر، بينما نستنتج من القيم الحقيقية لجذور النظام في الحلقة المغلقة بأنها سالبة وتقع كلها على يسار الساحة العقدية وبالتالي النظام مستقر باستخدام المتحكم LQR.

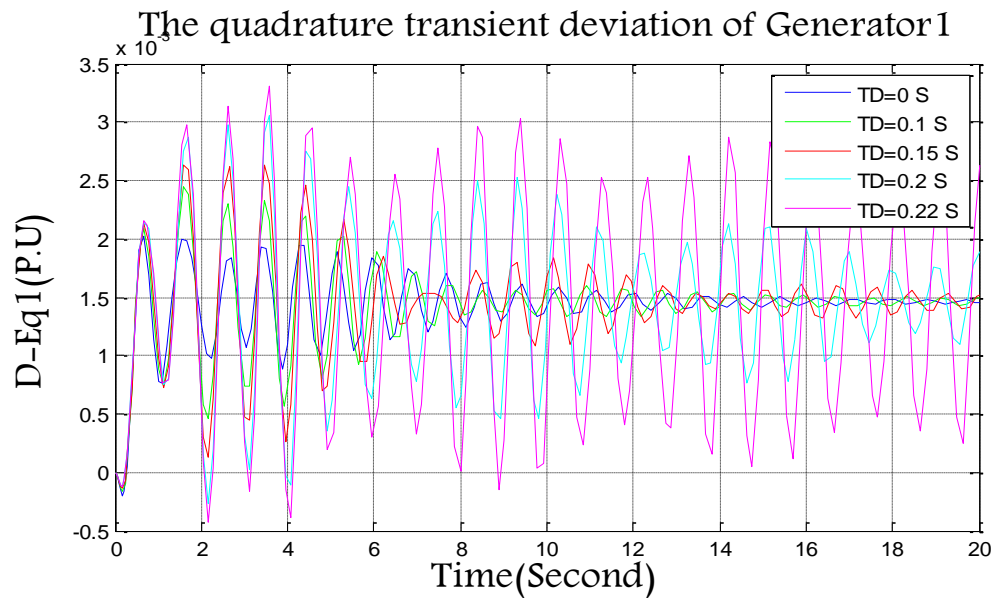
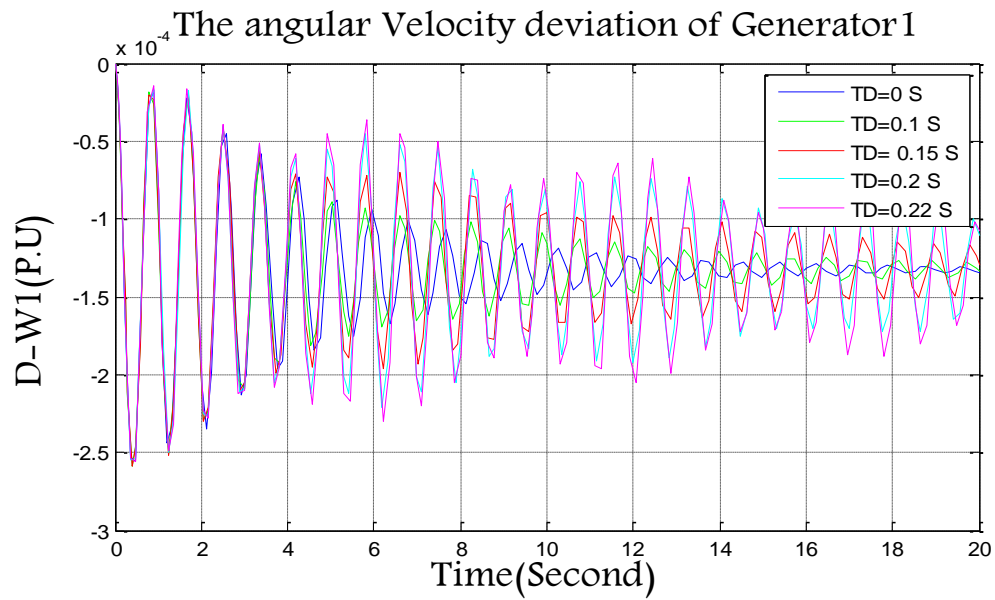
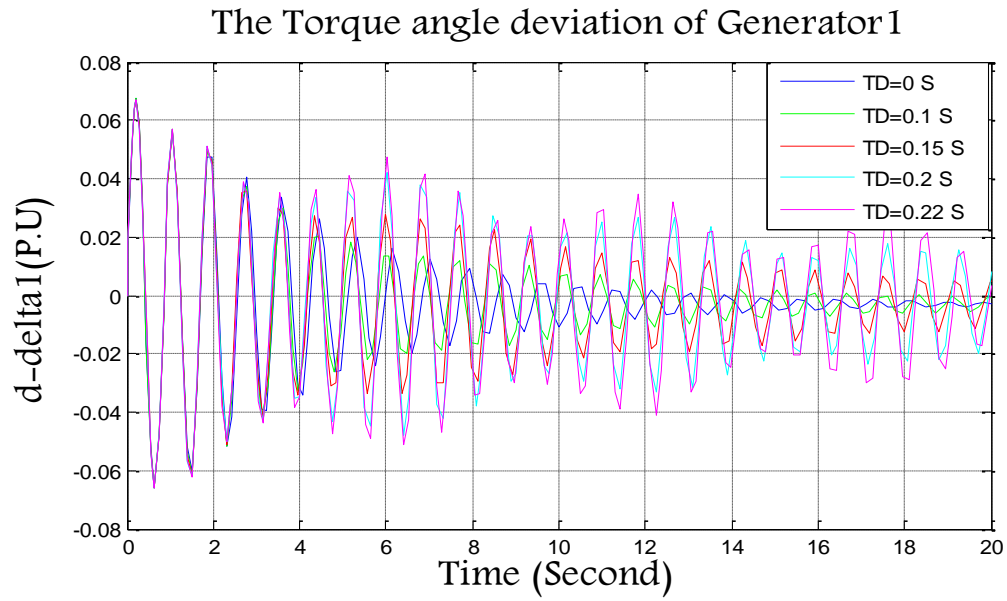
OPEN LOOP	CLOSE LOOP (LQR Controller)
-18.9067 + 0.0000i	-18.2935 + 0.0000i
-17.0247 + 0.0000i	-16.2524 + 0.0000i
-14.7709 + 0.0000i	-13.7282 + 0.0000i
0.3238 + 8.0203i	-0.6077 + 8.0040i
0.3238 - 8.0203i	-0.6077 - 8.0040i
-0.1555 + 7.2387i	-0.2263 + 7.3369i
-0.1555 - 7.2387i	-0.2263 - 7.3369i
-7.1255 + 0.0000i	-0.6503 + 4.2924i
0.4544 + 4.2083i	-0.6503 - 4.2924i
0.4544 - 4.2083i	-9.0328 + 0.0000i
-3.3831 + 0.0000i	-5.8831 + 0.0000i
-1.3876 + 0.0000i	-5.6009 + 0.0000i

الجدول (4-6): جذور المعادلة المميزة لنظام التحكم الشبكي المستمر باستخدام LQR.

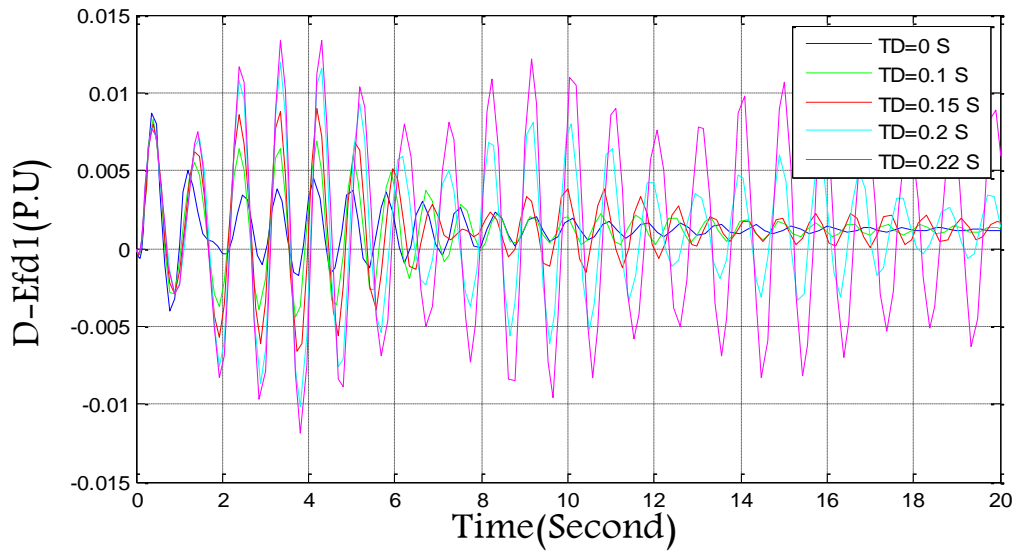
يظهر الشكل (3-6) الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة الإجمالية للنظام في الحلقة المفتوحة بدون وجود المتحكم LQR وعندما يكون التأخير الزمني معدوماً، ونلاحظ عدم استقرار أي متغير من متغيرات الحالة لنظام القدرة الكهربائية. ويعبر الشكل (4-6) عن الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة مع المتحكم LQR وعندما يأخذ التأخير الزمني مجموعة من القيم. ونستنتج أنه عند ازدياد مجال التأخير الزمني غير المحدد بين عناصر الشبكة يحدث تشوه في استجابة متغيرات الحالة للنظام الشبكي وتباطؤ في استقراره، ونستمر في الزيادة حتى نصل إلى مجال محدد من التأخير الزمني يخرج عندها النظام بالكامل عن الاستقرار على الرغم من تطبيق المتحكم LQR. وهو المجال $\tau_{Stability}$ الذي يسمح للنظام مع وجود المتحكم بأن يكون مستقراً وعند تجاوزه يخرج النظام عن الاستقرار. حيث يختلف من نظام لآخر وحسب نوع المتحكم المستخدم.



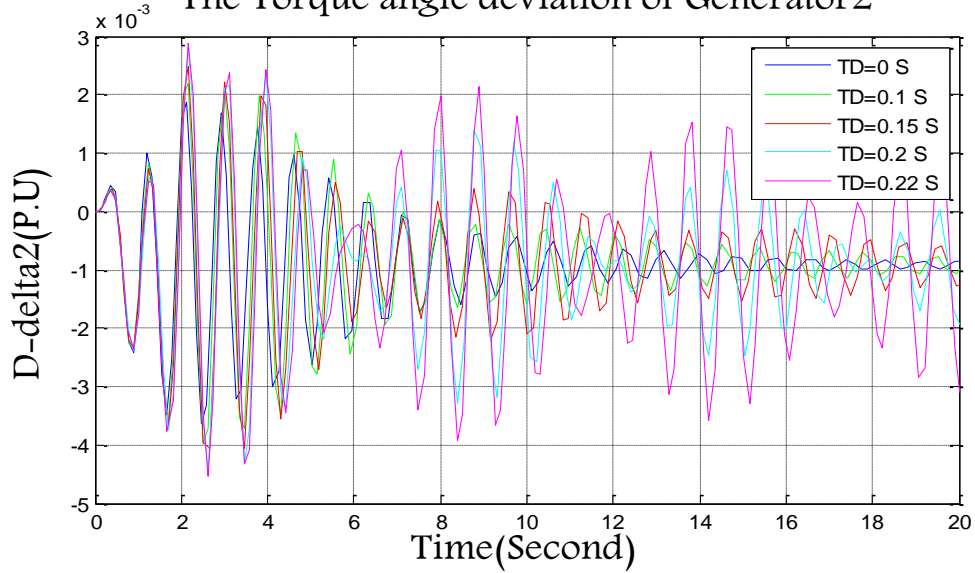
الشكل (3-6) الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة للنظام الشبكي في الحلقة المفتوحة ($\tau = 0s$)



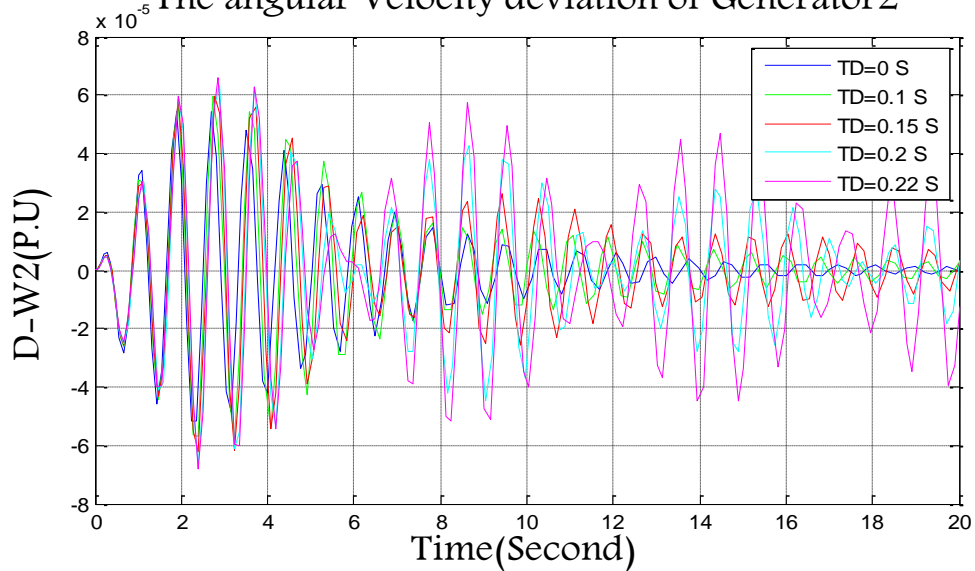
The exciter output variation deviation of Generator1

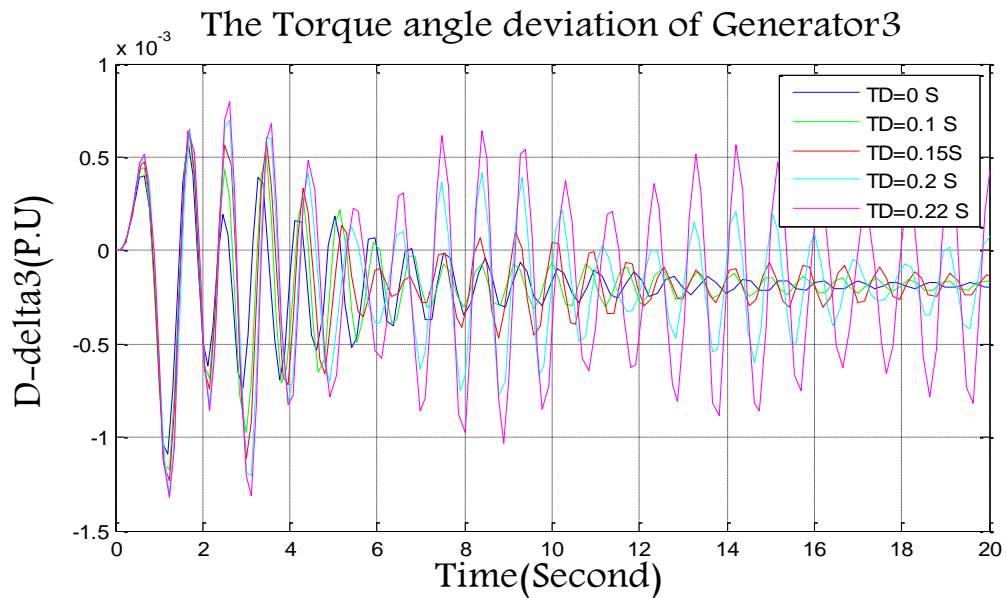
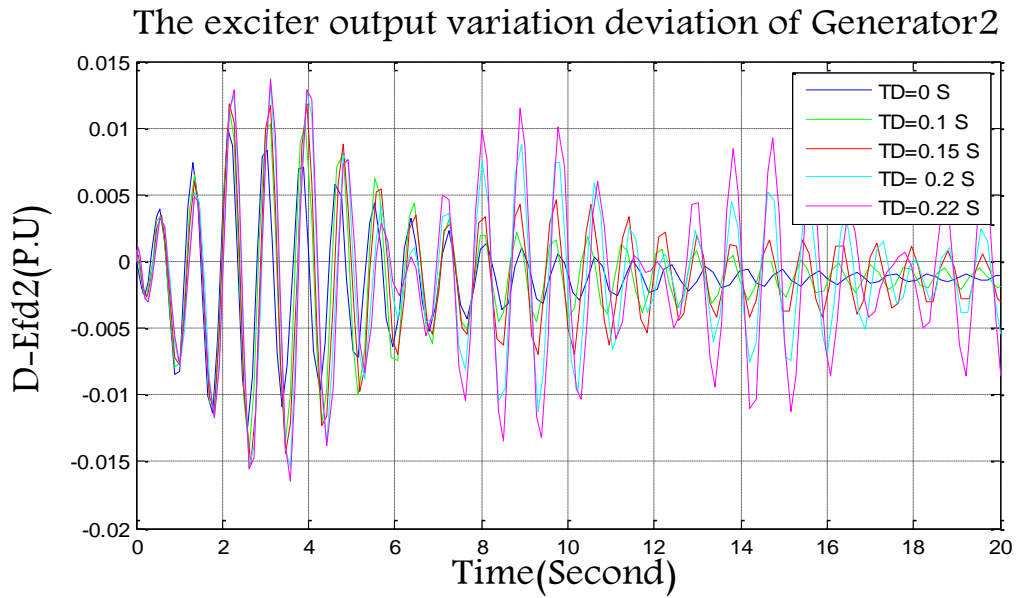
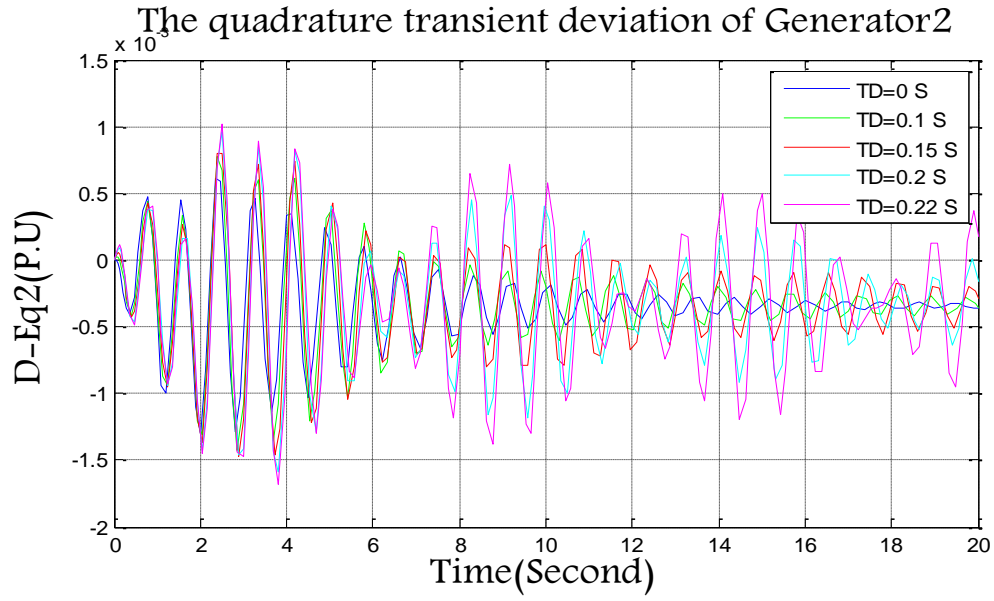


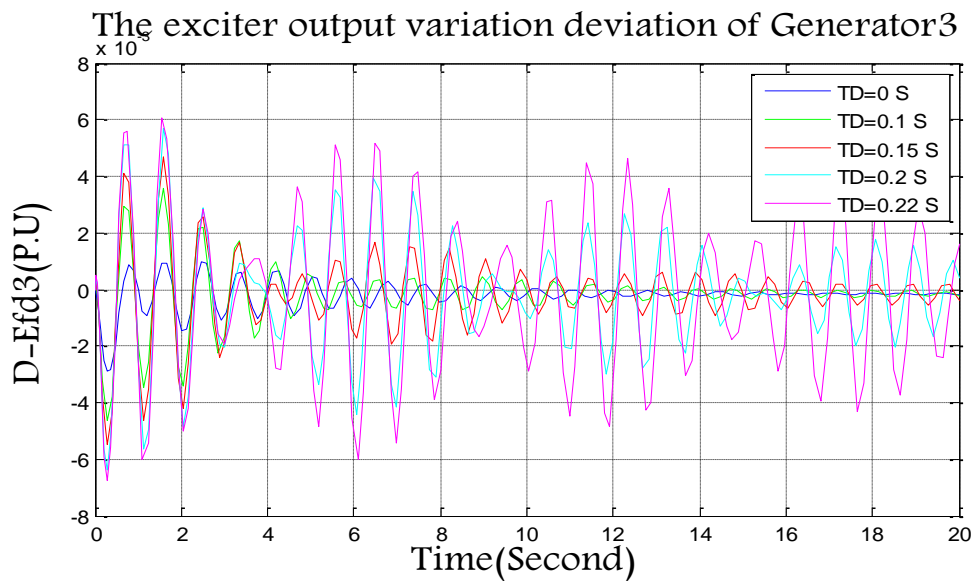
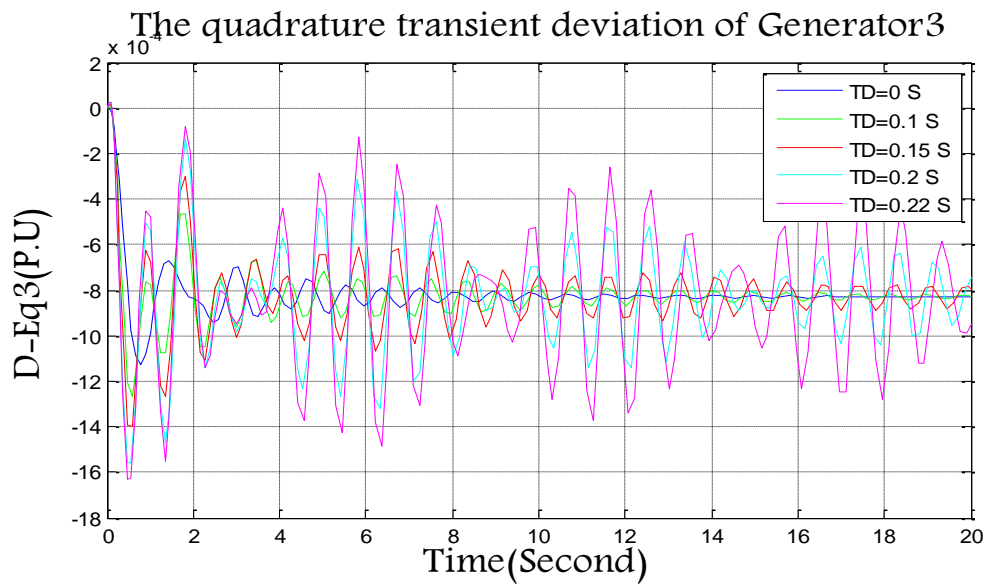
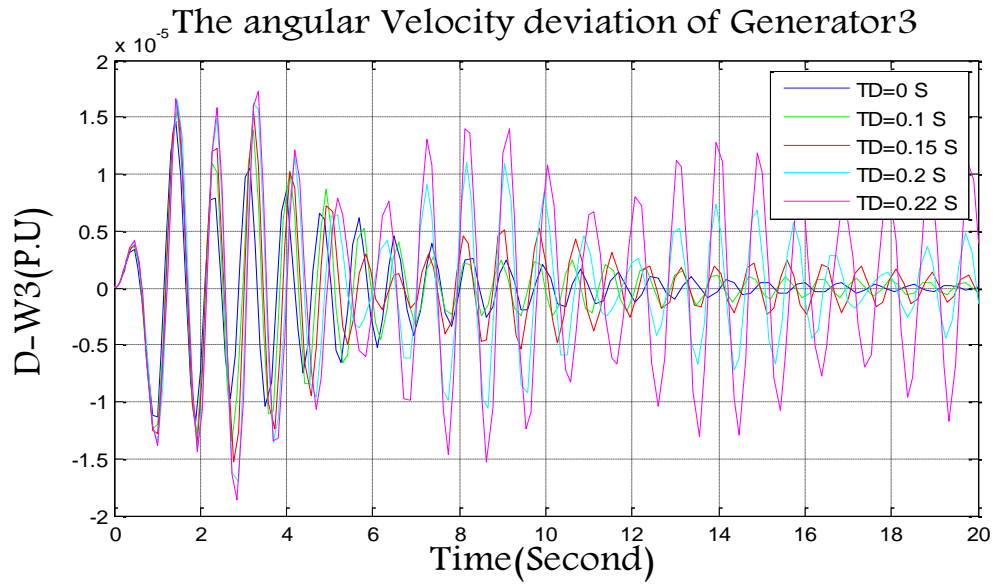
The Torque angle deviation of Generator2



The angular Velocity deviation of Generator2



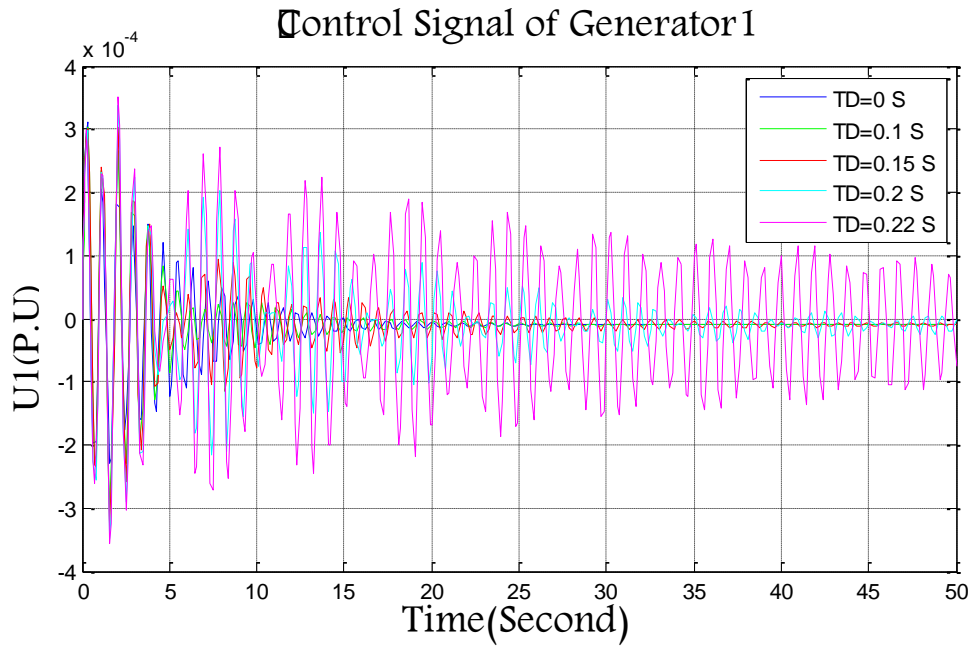


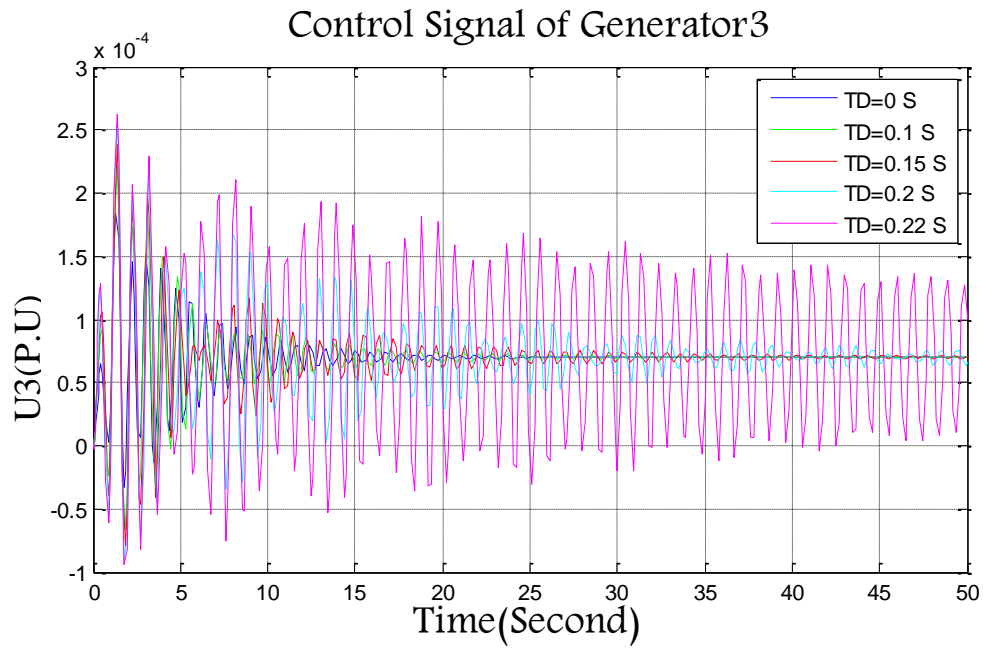
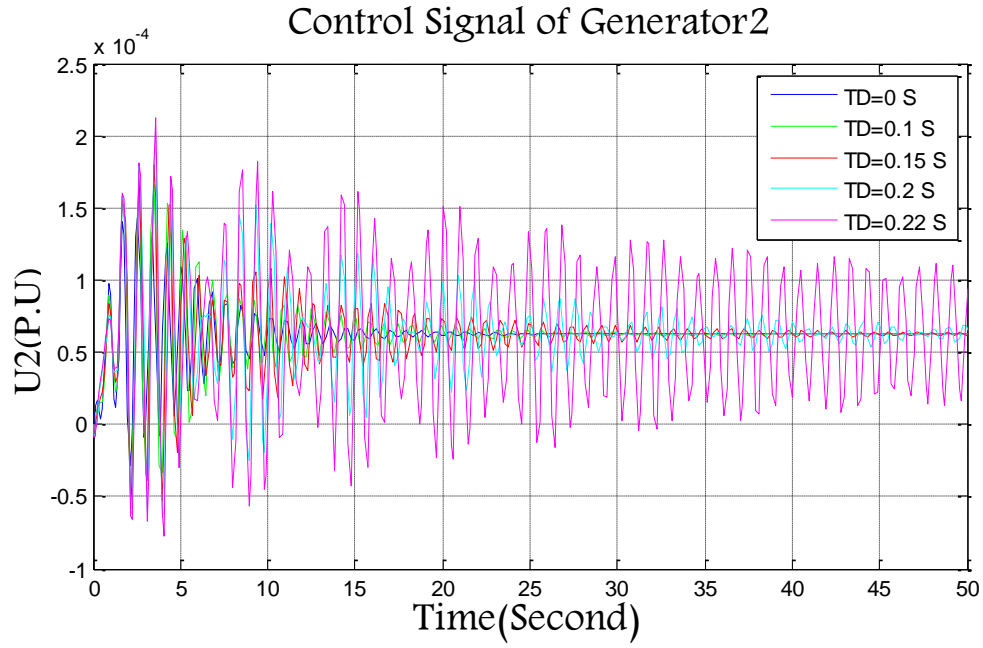


الشكل (4-6) الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة للنظام الشبكي في الحلقة المغلقة عند تأخيرات زمنية متغيرة

نلاحظ من الشكل (4-6) الذي يصف متغيرات الحالة بالنسبة للنظام الشبكي بأنه عند زيادة التأخير الزمني غير المحدد تزداد مطال الاهتزازات حتى الوصول إلى عدم الاستقرار. ولكن من الضرورة معرفة قيمة التأخير الزمني التي يخرج عندها النظام من الاستقرار $\tau_{Stability}$ وهي حسب الشكل (4-6) تكون قريبة من القيمة $0.2 S$. لذلك سندرس الخوارزمية التي تعطي هذه القيمة وبدقة متناهية حتى يتمكن الباحث من دراسة استقرار أي نظام شبكي تحت تأثير التأخير الزمني غير المحدد وابتعد عن التجريب والمحاكاة.

بينما يوضح الشكل (5-6) الاستجابة الزمنية لتغير إشارة التحكم لنظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث وحدات توليد $(u_1(t), u_2(t), u_3(t))$ وعندما يأخذ التأخير الزمني مجموعة من القيم. ونستنتج من الشكل (5-6) بأن إشارات التحكم لمجموعات التوليد الثلاث تستقر عند القيمة 0 بعد $25 S$ عند تأخير زمني معدوم. بينما نلاحظ ازدياد قليل في مطال الاهتزازات حول نقطة الاستقرار عند زيادة التأخير الزمني ضمن المجال $(0-0.15 S)$. وعند زيادة التأخير الزمني عن القيمة $0.15 S$ يزداد مطال الاهتزازات تدريجياً بشكل كبير حتى الوصول إلى القيمة $0.22 S$ عندها يخرج النظام عن الاستقرار، مع صعوبة تحديد القيمة التي يخرج عندها النظام عن الاستقرار بشكل دقيق من خلال الأشكال البيانية.





الشكل (5-6) الاستجابة الزمنية لتغير إشارة التحكم لنظام التحكم الشبكي المستمر.

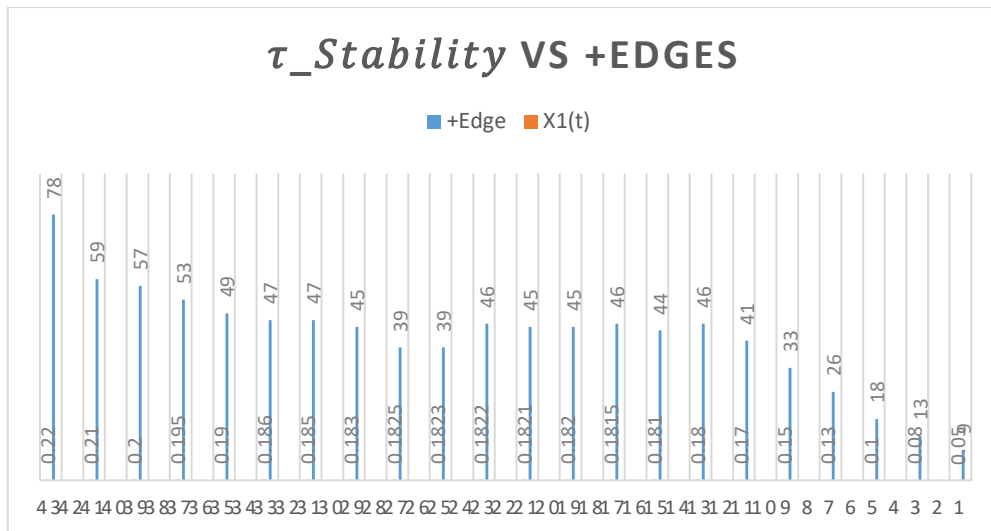
6.8 دراسة الاستجابة الزمنية لمتغير الحالة الأول:

لتوضيح علاقة $\tau_{Stability}$ مع بارامترات الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة الاجمالية لنظام التحكم الشبكي المستمر المدروس. يدرس الجدول (5-6) علاقة $\tau_{Stability}$ مع بارامترات الاستجابة الزمنية لمتغير الحالة الأول (تغير زاوية دوران عزم المولد) فقط.

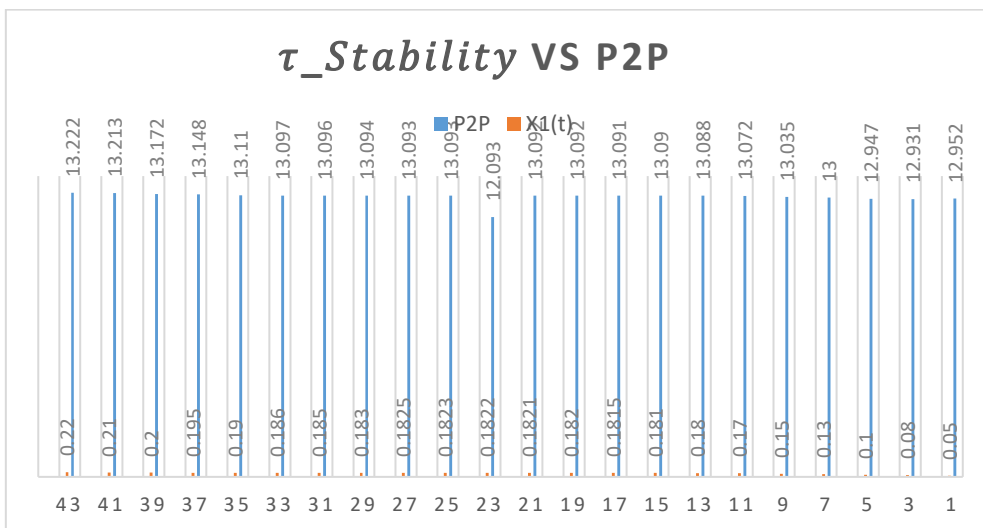
X1(t)	MAX	MIN	P2P	+Edge	+RT(ms)	+SR	-Edge	-FT(ms)	-SR	+OV(%)	-OV(%)	T(ms)	F(Hz)
0.05	6.691 0.004s	-6.262 0.011	12.952	9	49.744	21.443	10	50.525	-22.134	182.921	-167.621	828.523	1.207
0.08	6.669 0.004	-6.262 0.025	12.931	13	46.529	17.133	14	47.868	-17.920	145.061	-242.235	818.400	1.222
0.1	6.658 0.004	-6.289 0.025	12.947	18	38.313	14.949	19	38.055	-15.844	217.988	-270.807	819.310	1.221
0.13	6.667 0.004	-6.333 0.025	13.000	26	43.343	13.645	27	44.936	-14.366	213.491	-301.610	821.594	1.217
0.15	6.672 0.004	-6.363 0.025	13.035	33	46.677	13.261	34	47.245	-13.814	191.869	-241.889	846.847	1.181
0.17	6.680 0.004	-6.392 0.025	13.072	41	49.884	12.809	42	50.028	-13.312	203.503	-210.899	823.346	1.215
0.18	6.685 0.004	-6.404 0.024	13.088	46	52.377	12.532	47	53.832	-12.971	192.772	-243.986	823.999	1.214
0.181	6.687 0.004	-6.404 0.024	13.090	44	46.139	13.157	45	47.535	-13.592	215.222	-235.087	824.445	1.213
0.1815	6.687 0.004	-6.404 0.024	13.091	46	51.551	12.740	47	51.101	-13.158	201.921	-237.127	841.927	1.188
0.182	6.688 0.004	-6.404 0.024	13.092	45	47.876	13.094	46	49.360	-13.375	196.020	-244.111	842.945	1.187
0.1821	6.688 0.004	-6.404 0.024	13.092	45	46.729	13.135	46	50.293	-13.357	199.253	-241.746	842.588	1.187
0.1822	6.689 0.004	-6.404 0.024	12.093	46	48.392	12.920	47	52.397	-13.127	192.943	-237.022	824.376	1.213
0.1823	6.689 0.004	-6.404 0.024	13.093	39	47.727	14.640	40	50.589	-14.924	171.712	-203.019	825.029	1.212
0.1825	6.689 0.004	-6.404 0.024	13.093	39	47.142	14.675	40	51.110	-14.911	173.711	-215.258	825.045	1.212
0.183	6.690 0.004	-6.404 0.024	13.094	45	44.786	13.246	46	48.821	-13.471	218.669	-264.473	825.010	1.212
0.185	6.693	-6.403 0.024	13.096	47	50.475	12.847	48	50.912	-13.279	210.424	-247.615	841.732	1.188
0.186	6.695 0.004	-6.403 0.024	13.097	47	48.809	12.959	48	49.461	-13.448	204.529	-230.707	824.426	1.213
0.19	6.7 0.004	-6.410 0.011	13.110	49	49.140	12.827	50	51.081	-13.310	180.056	-207.655	824.603	1.213
0.195	6.706 0.004	-6.442 0.011	13.148	53	53.633	12.311	54	53.163	-12.830	214.301	-231.954	825.005	1.212
0.2	6.712 0.004	-6.461 0.011	13.172	57	56.605	12.149	58	57.445	-12.534	191.532	-224.977	825.405	1.212
0.21	6.720 0.004	-6.493 0.011	13.213	59	49.782	12.780	60	51.829	-13.256	217.967	-231.532	882.766	1.133
0.22	6.672 0.004	-6.501 0.011	13.222	78	81.655	11.327	79	80.251	-11.656	151.305	-146.760	1093	0.9146

الجدول (5-6): الاستجابة الزمنية لخرج مجموعة التوليد الأولى فقط.

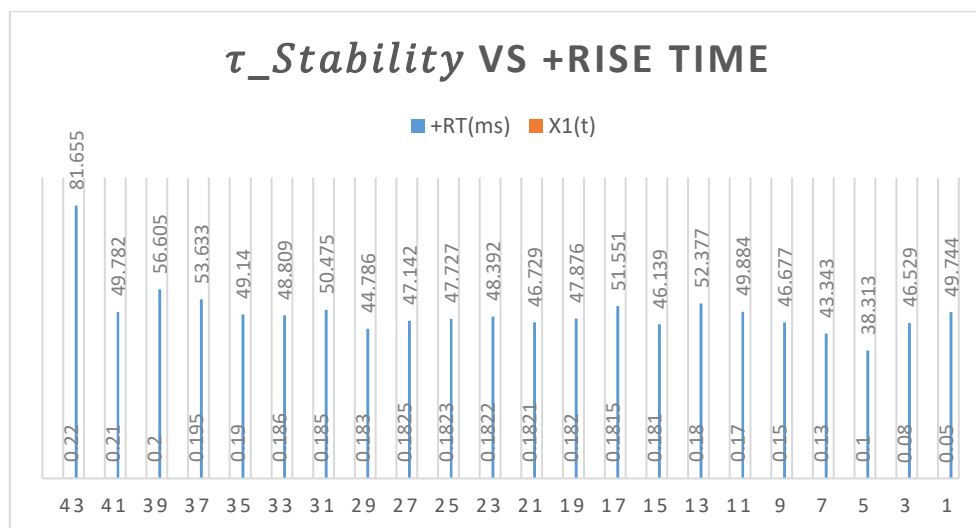
بالاعتماد على الجدول (5-6) نوضح فيما يلي الاشكال البيانية المعبرة عن علاقة $\tau_{Stability}$ مع بارامترات الاستجابة الزمنية لخرج مجموعة التوليد الأولى.



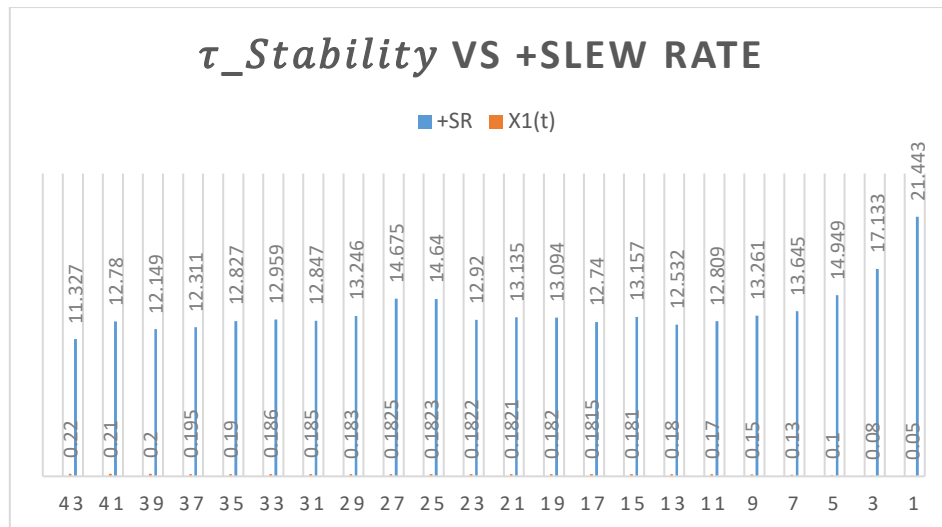
الشكل (6-6): علاقة $\tau_{Stability}$ مع عدد الحواف الصاعدة الموجبة



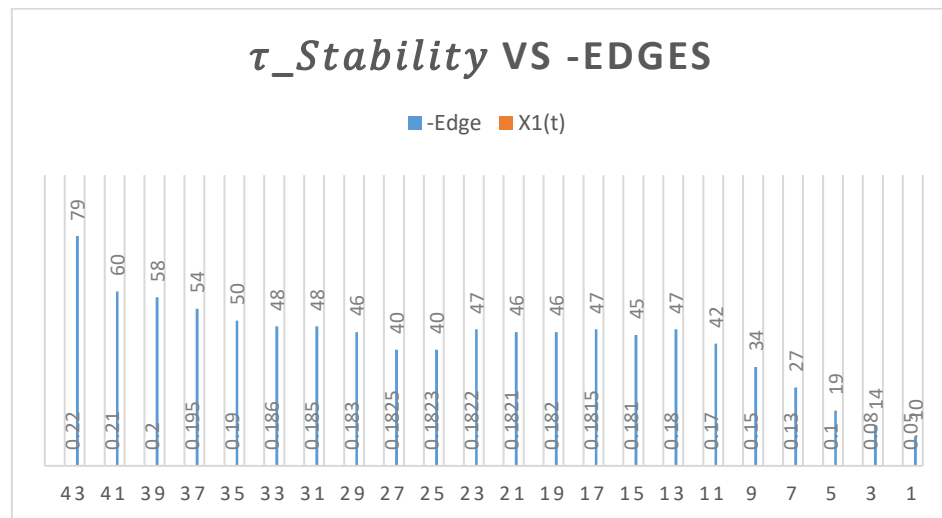
الشكل (6-7): علاقة $\tau_{Stability}$ مع القيمة Peak2Peak



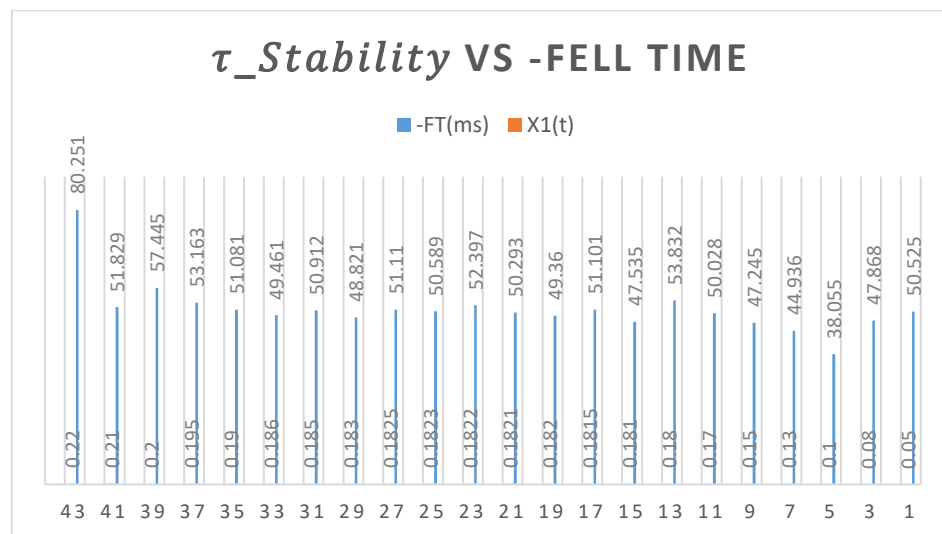
الشكل (6-8): علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن الارتفاع الموجب



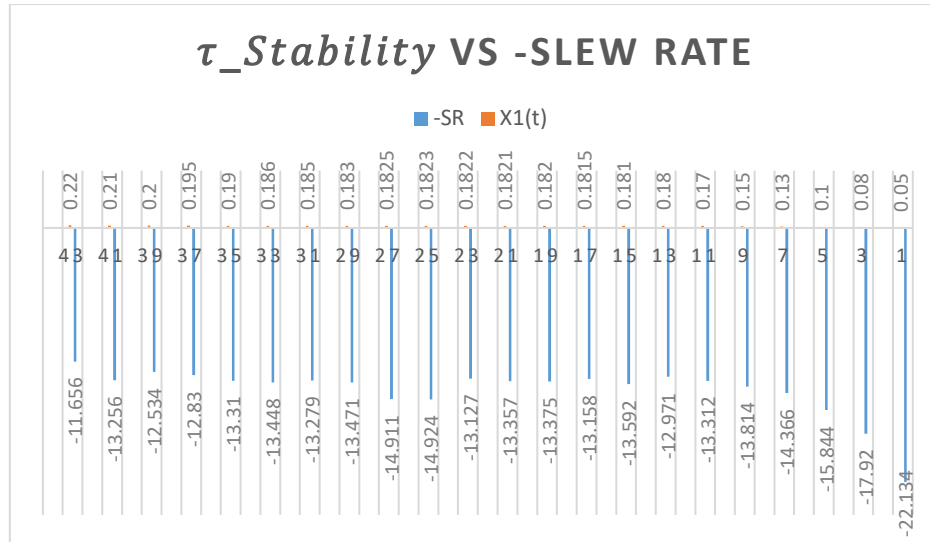
الشكل (6-9): علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن الانحدار الموجب



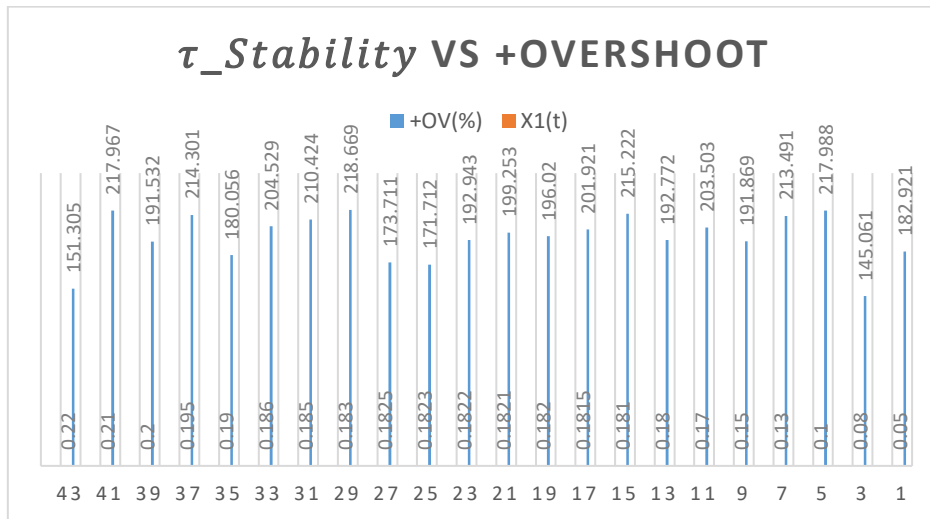
الشكل (6-10): علاقة $\tau_{Stability}$ مع عدد الحواف السالبة



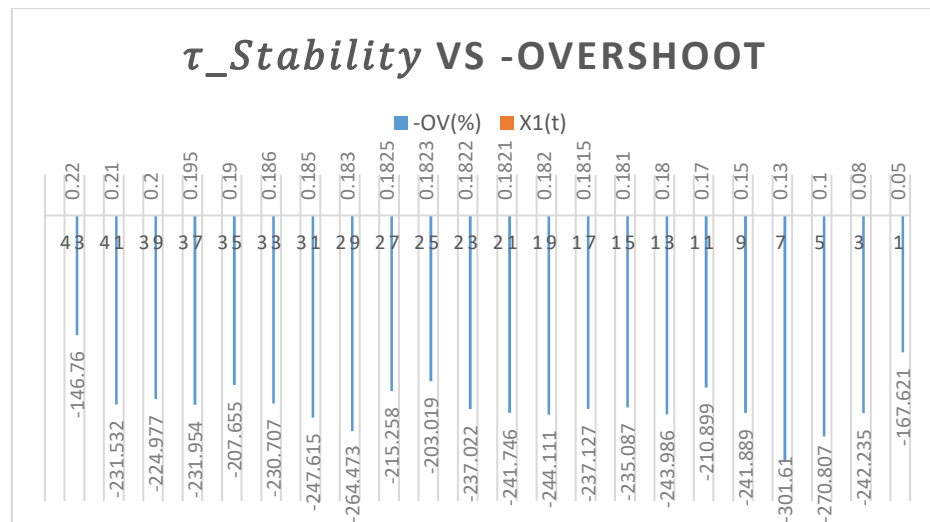
الشكل (6-11): علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن السقوط السالب



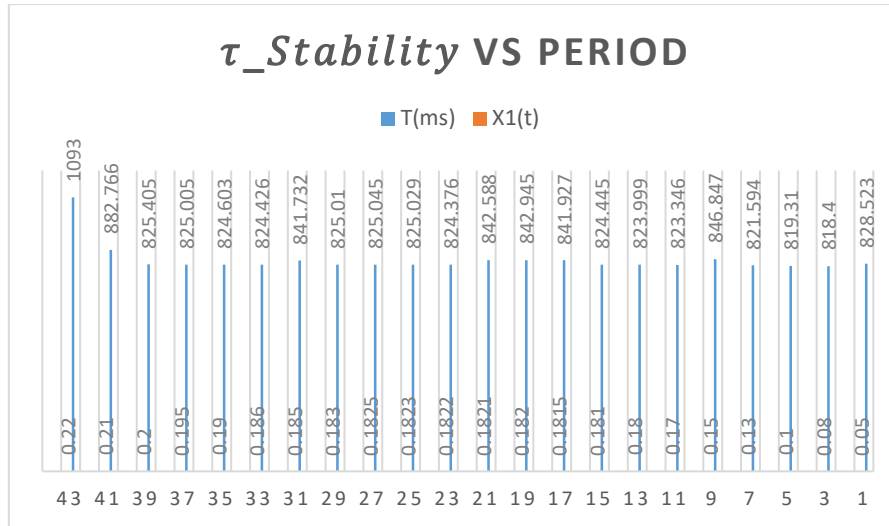
الشكل (6-12): علاقة $\tau_{Stability}$ مع زمن الانحدار السالب



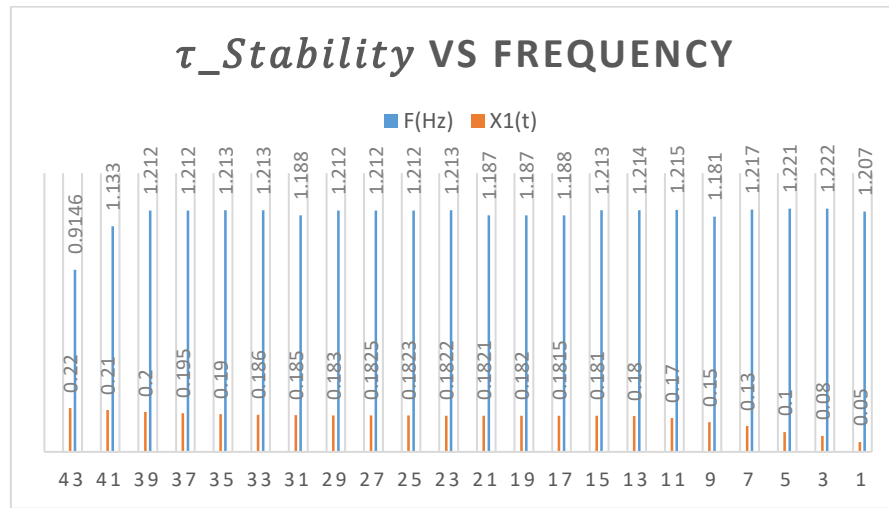
الشكل (6-13): علاقة $\tau_{Stability}$ مع التجاوز الأعظمي الموجب



الشكل (6-14): علاقة $\tau_{Stability}$ مع التجاوز الأعظمي السالب



الشكل (6-15): علاقة $\tau_{Stability}$ مع الدور



الشكل (6-16): علاقة $\tau_{Stability}$ مع التردد

نستنتج من الأشكال البيانية علاقة $\tau_{Stability}$ مع بارامترات الاستجابة الزمنية لمتغير الحالة الأول:

- ازدياد طفيف في قيمة المقدار P2P (هو عبارة عن المطال من أعلى قمة إلى أدنى قمة) مع زيادة $\tau_{Stability}$ ابتداءً بالقيمة 12.952 عند $\tau = 0.05S$ حتى 13.222 عند $\tau = 0.22S$.
- زيادة ملحوظة في عدد الحواف الصاعدة Rising Edge حتى الوصول إلى القيمة 78 بالنسبة للحواف الموجبة +Edge و 79 للحواف السالبة -Edge عند $\tau = 0.22S$ ، وهنا يظهر جلياً تأثير زيادة التأخير الزمني غير المحدد على السرعة الزاوية لوحدة التوليد الأولى.
- تناقص قيمة معدل الانحدار الموجب Slew Rate من القيمة 21.443 عند $\tau = 0.05S$ حتى الوصول إلى القيمة 11.327 عند $\tau = 0.22S$ ، بالإضافة إلى ازدياد معدل الانحدار السالب Slew Rate- من القيمة -22.134 عند $\tau = 0.05S$ حتى الوصول إلى -11.656 عند $\tau = 0.22S$.

- اقتراب القيمة المطلقة العظمى MAX (أعلى مطال في الإشارة) من القيمة المطلقة الصغرى MIN (أصغر مطال في الإشارة) مع زيادة $\tau_{Stability}$ وذلك لأن البارامتر المطلوب دراسته هو التغير في السرعة الزاوية لوحدة التوليد الأولى.
- نلاحظ بأن أعظم قيمة للمطال MAX تكون دائماً عند زمن محدد 0.004S مهما ازداد $\tau_{Stability}$ ، بينما الفترات الزمنية لمطال القيمة الدنيا MIN تتغير تغيراً طفيفاً جداً.
- تأخذ قيمة زمن الارتفاع Rise Time مجال متغير من 49.774 عند $\tau = 0.05S$ حتى 49.140 عند $\tau = 0.19S$ وهو متغير له تأثير هام جداً في دراسة نظم التحكم الحديث ولكن تأرجحه هنا ضمن هذه القيمة يعود إلى أن النظام التحكمي مازال مستقراً على الرغم من زيادة $\tau_{Stability}$ وينظر في هذه الحالة إلى عدد الحواف الصاعدة والهابطة لكونها مؤشر ودليل قوي على تأثير التأخير الزمني على استقرار متغير الحالة. وعند زيادة التأخير الزمني عن القيمة $\tau = 0.19S$ واستمراره في الزيادة يزداد زمن الارتفاع بشكل ملحوظ حتى القيمة 81.655 عند القيمة $\tau = 0.22S$ للدلالة على أن متغير الحالة الأول فقد الاستقرار حتى مع وجود المتحكم الأمثل LQR.
- كما هو ملاحظ فإن زمن السقوط Fall Time يسلك سلوك زمن الارتفاع Rise Time حيث يتأرجح في مجال متغير من القيم مع زيادة $\tau_{Stability}$ وذلك لأن البارامتر المطلوب دراسته هو التغير في السرعة الزاوية لوحدة التوليد الأولى حتى الوصول إلى القيمة 80.251 عند القيمة $\tau = 0.22S$.
- تأرجح في قيمة التردد وبالتالي الدور حول القيمة 800ms للدور و 1.2Hz للتردد حتى الوصول إلى القيمة $\tau = 0.22S$ عندها نلاحظ تغيراً كبيراً في الدور والتردد $f = 0.9416Hz$, $T = 1.093S$
- تأرجح ملحوظ في قيمة +Overshoot وقيمة -Overshoot حول القيمة 150% و 215% مع زيادة $\tau_{Stability}$ من 0.05S وحتى 0.22S.

6.9 الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau_{Stability}$ في نظم التحكم الشبكية المستمرة:

تعطى المعادلات التفاضلية التي تصف نظام التحكم الشبكي المؤلف من ثلاث وحدات توليد مع أخذ التأخير الزمني بعين الاعتبار والتي استنتجت من الفصل الخامس بالعلاقة (6-23):

$$\begin{aligned} x_1(t) &= (A_{11} - B_1 K_{11})x_1(t) + A_{12}x_2(t) + A_{13}x_3(t) - B_1 K_{12}x_2(t - \tau) - B_1 K_{13}x_3(t - \tau) \\ x_2(t) &= A_{21}x_1(t) + (A_{22} - B_2 K_{22})x_2(t) + A_{23}x_3(t) - B_2 K_{21}x_1(t - \tau) - B_2 K_{23}x_3(t - \tau) \\ x_3(t) &= A_{31}x_1(t) + A_{32}x_2(t) + (A_{33} - B_3 K_{33})x_3(t) - B_3 K_{31}x_1(t - \tau) - B_3 K_{32}x_2(t - \tau) \end{aligned} \quad (23 - 6)$$

عندها يمكن إعادة كتابة المعادلات التفاضلية السابقة بالشكل المصفوفي وفق العلاقة (6-24):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - B_1 K_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} - B_2 K_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} - B_3 K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -B_1 K_{12} & -B_1 K_{13} \\ -B_2 K_{21} & 0 & -B_2 K_{23} \\ -B_3 K_{31} & -B_3 K_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t - \tau) \\ x_2(t - \tau) \\ x_3(t - \tau) \end{bmatrix} \quad (24 - 6)$$

وتكتب العلاقة (24-6) بشكلها العام (25-6):

$$\dot{x}(t) = A_M x(t) + B_M x(t - \tau) \quad (25 - 6)$$

ولإيجاد $\tau_{Stability}$ من العلاقة (25-6) ضمن التركيب الرياضي $x(t - \tau)$ نطبق العلاقة (21-5) والتي بُرهنَت في الفصل الخامس. والتي نعيد كتابتها:

$$x(t - \tau) = x(t) - \tau \dot{x}(t)$$

بتعويض العلاقة (21-5) بالعلاقة (25-6) نحصل على العلاقة (26-6):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_M x(t) + B_M x(t) - \tau B_M \dot{x}(t) \\ \dot{x}(t)(1 + \tau B_M) &= (A_M + B_M)x(t) \\ \dot{x}(t) &\cong \frac{A_M + B_M}{1 + \tau B_M} x(t) \\ \dot{x}(t) &\cong \phi(t)x(t) \end{aligned} \quad (26 - 6)$$

ويمكن كتابة المصفوفة $\phi(t)$ ذات الأبعاد 12×12 وفق العلاقة (27-6):

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \frac{\begin{bmatrix} A_{11} - B_1 K_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} - B_2 K_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} - B_3 K_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -B_1 K_{12} & -B_1 K_{13} \\ -B_2 K_{21} & 0 & -B_2 K_{23} \\ -B_3 K_{31} & -B_3 K_{32} & 0 \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -B_1 K_{12} & -B_1 K_{13} \\ -B_2 K_{21} & 0 & -B_2 K_{23} \\ -B_3 K_{31} & -B_3 K_{32} & 0 \end{bmatrix}} \\ \phi(t) &= \frac{\begin{bmatrix} A_{11} - B_1 K_{11} & A_{12} - B_1 K_{12} & A_{13} - B_1 K_{13} \\ A_{21} - B_2 K_{21} & A_{22} - B_2 K_{22} & A_{23} - B_2 K_{23} \\ A_{31} - B_3 K_{31} & A_{32} - B_3 K_{32} & A_{33} - B_3 K_{33} \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -B_1 K_{12} & -B_1 K_{13} \\ -B_2 K_{21} & 0 & -B_2 K_{23} \\ -B_3 K_{31} & -B_3 K_{32} & 0 \end{bmatrix}} \quad (27 - 6) \end{aligned}$$

نستنتج من العلاقة (27-6) بأن نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث وحدات توليد يعتبر مستقراً على نطاق واسع باستخدام المتحكم الأمثل LQR مع أخذ التأخير الزمني غير المحدد بعين الاعتبار إذا كانت أقطاب الحلقة المغلقة للنظام الشبكي مع المتحكم تقع على يسار الساحة العقدية في الفضاء لابلاس.

if $\lambda_i(\phi) \in C^-, for i = 1, 2, 3, \dots, n$

أو يمكن القول بأن نظام التحكم الشبكي المستمر يعتبر مستقراً على نطاق واسع إذا كان التأخير الزمني غير المحدد يحقق المتراجحة (28-6):

$$0 < \tau < \tau_{Stability} \quad (28 - 6)$$

إذ أن $\tau_{Stability}$ تعبر عن قيمة التأخير الزمني التي تبقى على النظام الشبكي المستمر بحالة استقرار، وتتوضع أقطابه على يسار الساحة العقدية في الفضاء لابلاس. عندها يمكن كتابة هذه النظرية بشكلها العام لنظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من n نظاماً فرعياً بالعلاقة (29-6):

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ * \\ * \\ * \\ x_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} - B_1 K_{11} & A_{12} & A_{13} & * & * & * & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} - B_2 K_{22} & A_{23} & * & * & * & A_{2n} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} - B_3 K_{33} & * & * & * & A_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ A_{n1} & A_{n2} & A_{n3} & * & * & * & A_{nn} - B_n K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ * \\ * \\ * \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -B_1 K_{12} & -B_1 K_{13} & * & * & * & -B_1 K_{1n} \\ -B_2 K_{21} & 0 & -B_2 K_{23} & * & * & * & -B_2 K_{2n} \\ -B_3 K_{31} & -B_3 K_{32} & 0 & * & * & * & -B_3 K_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ -B_n K_{n1} & -B_n K_{n2} & -B_n K_{n3} & * & * & * & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t - \tau) \\ x_2(t - \tau) \\ x_3(t - \tau) \\ * \\ * \\ * \\ x_n(t - \tau) \end{bmatrix} \quad (29 - 6)$$

وتكتب العلاقة (29-6) بشكلها العام وفق العلاقة (30-6):

$$\dot{x}(t) = A_{TOT}x(t) + B_{TOT}x(t - \tau) \quad (30 - 6)$$

بتعويض العلاقة (21-5) بالعلاقة (30-6) نحصل على العلاقة (31-6):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &\cong \frac{A_{TOT} + B_{TOT}}{1 + \tau B_{TOT}} x(t) \\ \dot{x}(t) &\cong \Phi_{TOT}(t)x(t) \end{aligned} \quad (31 - 6)$$

ويمكن كتابة المصفوفة $\Phi_{TOT}(t)$ ذات الابعاد 12×12 وفق العلاقة (32-6):

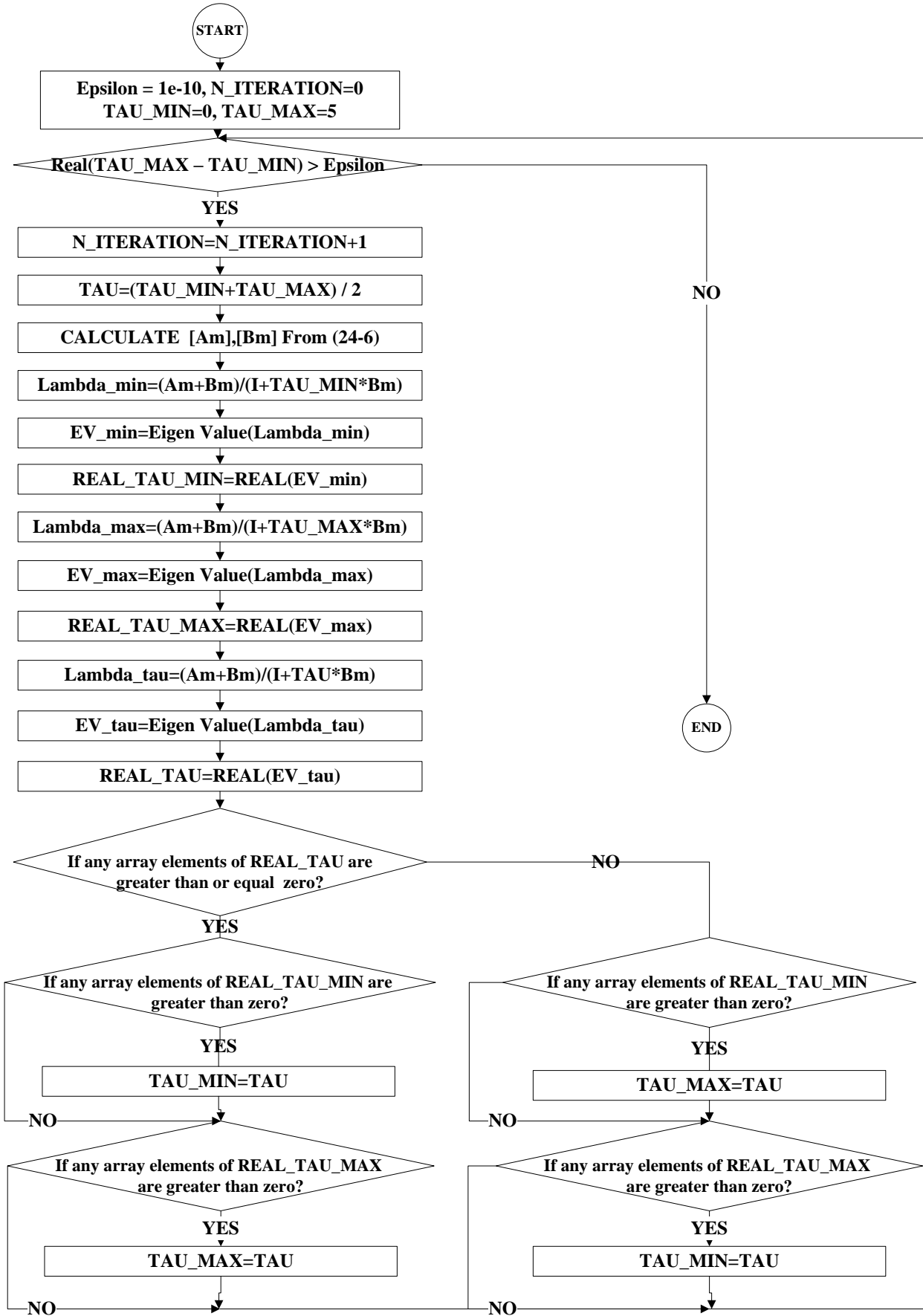
$$\Phi_{TOT}(t) = \frac{\begin{bmatrix} A_{11} - B_1 K_{11} & A_{12} - B_1 K_{12} & A_{13} - B_1 K_{13} & * & * & * & A_{1n} - B_1 K_{1n} \\ A_{21} - B_2 K_{21} & A_{22} - B_2 K_{22} & A_{23} - B_2 K_{23} & * & * & * & A_{2n} - B_2 K_{2n} \\ A_{31} - B_3 K_{31} & A_{32} - B_3 K_{32} & A_{33} - B_3 K_{33} & * & * & * & A_{3n} - B_3 K_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ A_{n1} - B_n K_{n1} & A_{n2} - B_n K_{n2} & A_{n3} - B_n K_{n3} & * & * & * & A_{nn} - B_n K_{nn} \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -B_1 K_{12} & -B_1 K_{13} & * & * & * & -B_1 K_{1n} \\ -B_2 K_{21} & 0 & -B_2 K_{23} & * & * & * & -B_2 K_{2n} \\ -B_3 K_{31} & -B_3 K_{32} & 0 & * & * & * & -B_3 K_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ -B_n K_{n1} & -B_n K_{n2} & -B_n K_{n3} & * & * & * & 0 \end{bmatrix}} \quad (32-6)$$

نستنتج من العلاقة (32-6) بأن نظام التحكم الشبكي المستمر بشكله العام والمؤلف من عدد n من وحدات التوليد يعتبر مستقراً على نطاق واسع باستخدام المتحكم الأمثل LQR مع أخذ التأخير الزمني غير المحدد بعين الاعتبار إذا كانت أقطاب الحلقة المغلقة للنظام الشبكي مع المتحكم تقع على يسار الساحة العقدية في الفضاء لابلاس.

if $\lambda_i(\Phi_{TOT}) \in C^-, for i = 1, 2, 3, \dots, n$

أو يمكن القول بأن نظام التحكم الشبكي الاجمالي المستمر يعتبر مستقراً على نطاق واسع إذا كان مجال التأخير الزمني $[0 - \tau_{Stability}]$.

ولحساب قيمة $\tau_{Stability}$ في نظام التحكم الشبكي المستمر بشكله العام والمؤلف من عدة أنظمة فرعية (مجموعات توليد فرعية) وفق العلاقة (31-6) نطبق الخوارزمية المقترحة الموضحة في الشكل (6-17).



الشكل (6-17): الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau_{Stability}$

خطوات تنفيذ الخوارزمية المقترحة:

- A. بداية الخوارزمية START.
- B. نفترض القيم البدائية التالية وهي: $Epsilon=1e-10$ ✓ وهي أصغر قيمة يمكن أن تظهر للحد $\tau_{Stability}$ ، كما أنها تحدد دقة النتيجة (عدد خانات النتيجة).
- ✓ N-iteration=0: تعبر عن عدد مرات التكرار للوصول إلى القيمة المناسبة لـ $\tau_{Stability}$ والتي تحقق الشرط:

$$if \lambda(\Phi_{TOT}) \in C^-, for i = 1,2,3 \dots n$$
- ✓ TAU_MIN=0: تعبر عن المجال الأصغري لـ $\tau_{Stability}$.
- ✓ TAU_MAX=5: تعبر عن المجال الأعظمي لـ $\tau_{Stability}$ (يمكن اختيار أي قيمة عظمى بناء على وضع النظام المراد دراسته).
- C. حساب القيمة الحقيقية للمقدار $Real (TAU_MAX - TAU_MIN) > Epsilon$
- D. زيادة التكرار بمقدار واحد $N-iteration = N-iteration + 1$
- E. حساب المجال المتوسط لـ $\tau_{Stability}$ $TAU = (TAU_MIN + TAU_MAX) / 2$
- F. حساب قيمة المصفوفات A_m, B_m الناتجة من العلاقة (24-6)
- G. إيجاد القسم الحقيقي (REAL) لأقطاب الحلقة المغلقة (Eigenvalues) لنظام التحكم المستمر ضمن الفضاء لابلاس من أجل المجال الأصغري لـ $\tau_{Stability}$ من خلال الأوامر التالية:

$$\begin{aligned} \text{Lambda_min} &= (A_m + B_m) / (I + TAU_MIN * B_m) \\ \text{EV_min} &= \text{EigenValue} (\text{Lambda_min}) \\ \text{REAL_TAU_MIN} &= \text{REAL} (\text{EV_min}) \end{aligned}$$
- H. إيجاد القسم الحقيقي (REAL) لأقطاب الحلقة المغلقة (Eigenvalues) لنظام التحكم المستمر ضمن الفضاء لابلاس من أجل المجال الأعظمي لـ $\tau_{Stability}$ من خلال الأوامر التالية:

$$\begin{aligned} \text{Lambda_max} &= (A_m + B_m) / (I + TAU_MAX * B_m) \\ \text{EV_max} &= \text{EigenValue} (\text{Lambda_max}) \\ \text{REAL_TAU_MAX} &= \text{REAL} (\text{EV_max}) \end{aligned}$$
- I. إيجاد القسم الحقيقي (REAL) لأقطاب الحلقة المغلقة (Eigenvalues) لنظام التحكم المستمر ضمن الفضاء لابلاس من أجل المجال المتوسط لـ $\tau_{Stability}$ من خلال الأوامر التالية:

$$\begin{aligned} \text{Lambda_tau} &= (A_m + B_m) / (I + TAU * B_m) \\ \text{EV_tau} &= \text{EigenValue} (\text{Lambda_tau}) \\ \text{REAL_TAU} &= \text{REAL} (\text{EV_tau}) \end{aligned}$$

J. إذا كان أي عنصر من عناصر القسم الحقيقي للقيم الذاتية من أجل المجال المتوسط (REAL_TAU) $\tau_{Stability}$ أكبر أو يساوي الصفر (Positive) اذهب إلى الخطوة K وإلا (Negative) اذهب إلى الخطوة M.

K. إذا كان أي عنصر من عناصر القسم الحقيقي للقيم الذاتية من أجل المجال الأصغري (REAL_TAU_MIN) $\tau_{Stability}$ أكبر تماماً من الصفر (Positive) يتم اسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأصغري $TAU_MIN = TAU$.

L. إذا كان أي عنصر من عناصر القسم الحقيقي للقيم الذاتية من أجل المجال الأعظمي (REAL_TAU_MAX) $\tau_{Stability}$ أكبر تماماً من الصفر (Positive) يتم اسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأعظمي $TAU_MAX = TAU$ ثم انتقل إلى الخطوة C.

M. إذا كان أي عنصر من عناصر القسم الحقيقي للقيم الذاتية من أجل المجال الأصغري (REAL_TAU_MIN) $\tau_{Stability}$ أكبر تماماً من الصفر (Positive) يتم اسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأعظمي $TAU_MAX = TAU$.

N. إذا كان أي عنصر من عناصر القسم الحقيقي للقيم الذاتية من أجل المجال الأعظمي (REAL_TAU_MAX) $\tau_{Stability}$ أكبر تماماً من الصفر (Positive) يتم اسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأصغري $TAU_MIN = TAU$ ثم انتقل إلى الخطوة C.

O. نهاية الخوارزمية END.

بينما يوضح الجدول (6-6) نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث مجموعات توليد

N	TAU_MIN	TAU	TAU_MAX	REAL_TAU_MIN	REAL_TAU	REAL_TAU_MAX
1	0.000000000	2.500000000	5.000000000	Negative	Positive	Positive
2	0.000000000	1.250000000	2.500000000	Negative	Positive	Positive
3	0.000000000	0.625000000	1.250000000	Negative	Positive	Positive
4	0.000000000	0.312500000	0.625000000	Negative	Positive	Positive
5	0.000000000	0.156250000	0.312500000	Negative	Negative	Positive
6	0.156250000	0.234375000	0.312500000	Negative	Positive	Positive
7	0.156250000	0.195312500	0.234375000	Negative	Positive	Positive
8	0.156250000	0.175781250	0.195312500	Negative	Negative	Positive
9	0.175781250	0.185546875	0.195312500	Negative	Positive	Positive
10	0.175781250	0.180664063	0.185546875	Negative	Negative	Positive
11	0.180664063	0.183105469	0.185546875	Negative	Positive	Positive
12	0.180664063	0.181884766	0.183105469	Negative	Negative	Positive
13	0.181884766	0.182495117	0.183105469	Negative	Positive	Positive
14	0.181884766	0.182189941	0.182495117	Negative	Negative	Positive
15	0.182189941	0.182342529	0.182495117	Negative	Negative	Positive
16	0.182342529	0.182418823	0.182495117	Negative	Positive	Positive
17	0.182342529	0.182380676	0.182418823	Negative	Negative	Positive
18	0.182380676	0.182399750	0.182418823	Negative	Positive	Positive
19	0.182380676	0.182390213	0.182399750	Negative	Positive	Positive
20	0.182380676	0.182385445	0.182390213	Negative	Negative	Positive
21	0.182385445	0.182387829	0.182390213	Negative	Negative	Positive
22	0.182387829	0.182389021	0.182390213	Negative	Negative	Positive
23	0.182389021	0.182389617	0.182390213	Negative	Negative	Positive
24	0.182389617	0.182389915	0.182390213	Negative	Negative	Positive
25	0.182389915	0.182390064	0.182390213	Negative	Negative	Positive
26	0.182390064	0.182390139	0.182390213	Negative	Positive	Positive
27	0.182390064	0.182390101	0.182390139	Negative	Negative	Positive
28	0.182390101	0.182390120	0.182390139	Negative	Positive	Positive
29	0.182390101	0.182390111	0.182390120	Negative	Positive	Positive
30	0.182390101	0.182390106	0.182390111	Negative	Positive	Positive
31	0.182390101	0.182390104	0.182390106	Negative	Positive	Positive
32	0.182390101	0.182390102	0.182390104	Negative	Negative	Positive
33	0.182390102	0.182390103	0.182390104	Negative	Negative	Positive
34	0.182390103	0.182390103	0.182390104	Negative	Positive	Positive
35	0.182390103	0.182390103	0.182390103	Negative	Negative	Positive
36	0.182390103	0.182390103	0.182390103	Negative	Positive	Positive

الجدول (6-6): نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث مجموعات توليد

إذاً وباستخدام الخوارزمية المقترحة حصلنا على $\tau_{Stability}$ لنظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث وحدات توليد بقيمة مقدارها 0.182390103 بعد تكرار 36 خطوة وبدقة كبيرة مقدارها 9 خانات بعد الفاصلة.

ولضمان استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر عند أكبر حد ممكن للتأخير الزمني غير المحدد، يتم أخذ البارامترات الإضافية المشكلة لسلسلة تايلور بعين الاعتبار في تخمين $\tau_{Stability}$ ، وإعادة تطبيق الخوارزمية المقترحة على البارامترات الجديدة لنحصل على الجدول (6-7).

$R_N(x, \tau)$	$x(t - \tau)$	$\tau_{Stability}[\text{Sec}]$
$N = 1$	$x(t) - \tau x'(t)$	0.182390103
$N = 3$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t)$	0.201289554
$N = 5$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) - \left(\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t)$	0.201369845
$N = 7$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) - \left(\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t) + \left(\frac{\tau^6}{720}\right) x^{(6)}(t) - \left(\frac{\tau^7}{5040}\right) x^{(7)}(t)$	0.201369955
$N = 9$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) - \left(\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t) + \left(\frac{\tau^6}{720}\right) x^{(6)}(t) - \left(\frac{\tau^7}{5040}\right) x^{(7)}(t) + \left(\frac{\tau^8}{40320}\right) x^{(8)}(t) - \left(\frac{\tau^9}{362880}\right) x^{(9)}(t)$	0.201369955

الجدول (6-7): $\tau_{Stability}$ مع الحدود المضافة من سلسلة تايلور لنظام التحكم الشبكي المستمر.

ويتضح من الجدول (6-7) مايلي:

1. وجود زيادة ملحوظة في قيمة $\tau_{Stability}$ عند أخذ حدود إضافية من التأخير الزمني غير المحدد من سلسلة تايلور بعين الاعتبار وعدم تجاهلها.
2. تزداد قيمة $\tau_{Stability}$ عند $N = 3$ بشكل ملحوظ عن قيمتها عند $N = 1$ ، بينما عند $N > 3$ تصبح الزيادة صغيرة جداً. ولكن مع ذلك يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار، لأن هنالك العديد من الأنظمة التحكمية الحساسة جداً لتأثير تغيرات التأخير الزمني غير المحدد على استقرارها.
3. تحافظ $\tau_{Stability}$ على قيمتها عند $N \geq 7$ ، وذلك لأن إضافة بارامترات جديدة من سلسلة تايلور متعلقة بالتأخير الزمني لن تؤثر على قيمة $\tau_{Stability}$. وذلك لأن الحدود المضافة أصبحت صغيرة بما فيه الكفاية.

ويوضح الجدول (6-8) توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المستمر ضمن الفضاء لابلاس مع الأخذ بعين الاعتبار قيم التأخير الزمني الإجمالي ($\tau = \tau_{12} + \tau_{13} + \tau_{23}$) المفروضة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث وحدات توليد.

λ_{12}	λ_{11}	λ_{10}	λ_9	λ_8	λ_7	λ_6	λ_5	λ_4	λ_3	λ_2	λ_1	τ
-5.6009 + 0.0000i	-5.8831 + 0.0000i	-9.0328 + 0.0000i	-0.6503 - 4.2924i	-0.6503 + 4.2924i	-0.2263 - 7.3369i	-0.2263 + 7.3369i	-0.6077 - 8.0040i	-0.6077 + 8.0040i	-13.7282 + 0.0000i	-16.2524 + 0.0000i	-18.2935 + 0.0000i	0.0
-5.0038 - 0.4709i	-5.0038 + 0.4709i	-8.1427 + 0.0000i	-0.5629 - 4.4729i	-0.5629 + 4.4729i	-0.1523 - 7.3569i	-0.1523 + 7.3569i	-0.6050 - 8.4908i	-0.6050 + 8.4908i	-14.8481 + 0.0000i	-17.6584 + 0.0000i	-18.5065 + 0.0000i	0.05
-4.8623 + 0.0000i	-4.5224 + 0.0000i	-7.9842 + 0.0000i	-0.5066 - 4.5549i	-0.5066 + 4.5549i	-0.1289 - 7.3660i	-0.1289 + 7.3660i	-0.5170 - 8.7589i	-0.5170 + 8.7589i	-15.0186 + 0.0000i	-18.0139 + 0.0000i	-19.1239 + 0.0000i	0.08
-7.9157 + 0.0000i	-5.0217 + 0.0000i	-4.0372 + 0.0000i	-0.4710 - 4.6013i	-0.4710 + 4.6013i	-0.1175 - 7.3714i	-0.1175 + 7.3714i	-0.4361 - 8.9228i	-0.4361 + 8.9228i	-15.0858 + 0.0000i	-18.0744 + 0.0000i	-19.6640 + 0.0000i	0.1
-7.8413 + 0.0000i	-5.0906 + 0.0000i	-3.5759 + 0.0000i	-0.4220 - 4.6615i	-0.4220 + 4.6615i	-0.1045 - 7.3785i	-0.1045 + 7.3785i	-0.2922 - 9.1466i	-0.2922 + 9.1466i	-15.1546 + 0.0000i	-18.1066 + 0.0000i	-20.4687 + 0.0000i	0.13
-7.8037 + 0.0000i	-5.1137 + 0.0000i	-3.3391 + 0.0000i	-0.3925 - 4.6968i	-0.3925 + 4.6968i	-0.0978 - 7.3827i	-0.0978 + 7.3827i	-0.1855 - 9.2823i	-0.1855 + 9.2823i	-15.1877 + 0.0000i	-18.1153 + 0.0000i	-20.9822 + 0.0000i	0.15
-5.1290 + 0.0000i	-7.7729 + 0.0000i	-3.1390 + 0.0000i	-0.3656 - 4.7293i	-0.3656 + 4.7293i	-0.0923 - 7.3864i	-0.0923 + 7.3864i	-0.0725 - 9.4083i	-0.0725 + 9.4083i	-15.2142 + 0.0000i	-18.1198 + 0.0000i	-21.4761 + 0.0000i	0.17
-5.1348 + 0.0000i	-7.7595 + 0.0000i	-3.0497 + 0.0000i	-0.3530 - 4.7446i	-0.3530 + 4.7446i	-0.0899 - 7.3882i	-0.0899 + 7.3882i	-0.0141 - 9.4679i	-0.0141 + 9.4679i	-15.2254 + 0.0000i	-18.1211 + 0.0000i	-21.7162 + 0.0000i	0.18
-5.1353 + 0.0000i	-7.7583 + 0.0000i	-3.0411 + 0.0000i	-0.3518 - 4.7461i	-0.3518 + 4.7461i	-0.0897 - 7.3883i	-0.0897 + 7.3883i	-0.0082 - 9.4738i	-0.0082 + 9.4738i	-15.2265 + 0.0000i	-18.1212 + 0.0000i	-21.7400 + 0.0000i	0.181
-5.1356 + 0.0000i	-7.7576 + 0.0000i	-3.0369 + 0.0000i	-0.3512 - 4.7469i	-0.3512 + 4.7469i	-0.0896 - 7.3884i	-0.0896 + 7.3884i	-0.0053 - 9.4767i	-0.0053 + 9.4767i	-15.2270 + 0.0000i	-18.1213 + 0.0000i	-21.7519 + 0.0000i	0.1815
-5.1359 + 0.0000i	-7.7570 + 0.0000i	-3.0326 + 0.0000i	-0.3506 - 4.7476i	-0.3506 + 4.7476i	-0.0895 - 7.3885i	-0.0895 + 7.3885i	-0.0023 - 9.4796i	-0.0023 + 9.4796i	-15.2275 + 0.0000i	-18.1213 + 0.0000i	-21.7637 + 0.0000i	0.182
-5.1359 + 0.0000i	-7.7569 + 0.0000i	-3.0318 + 0.0000i	-0.3504 - 4.7478i	-0.3504 + 4.7478i	-0.0894 - 7.3885i	-0.0894 + 7.3885i	-0.0017 - 9.4802i	-0.0017 + 9.4802i	-15.2276 + 0.0000i	-18.1214 + 0.0000i	-21.7661 + 0.0000i	0.1821
-5.1360 + 0.0000i	-7.7568 + 0.0000i	-3.0309 + 0.0000i	-0.3503 - 4.7479i	-0.3503 + 4.7479i	-0.0894 - 7.3885i	-0.0894 + 7.3885i	-0.0011 - 9.4808i	-0.0011 + 9.4808i	-15.2277 + 0.0000i	-18.1214 + 0.0000i	-21.7685 + 0.0000i	0.1822
-5.1360 + 0.0000i	-7.7567 + 0.0000i	-3.0305 + 0.0000i	-0.3503 - 4.7480i	-0.3503 + 4.7480i	-0.0894 - 7.3886i	-0.0894 + 7.3886i	-0.0008 - 9.4811i	-0.0008 + 9.4811i	-15.2278 + 0.0000i	-18.1214 + 0.0000i	-21.7697 + 0.0000i	0.18225
-5.1361 + 0.0000i	-7.7565 + 0.0000i	-3.0293 + 0.0000i	-0.3501 - 4.7482i	-0.3501 + 4.7482i	-0.0894 - 7.3886i	-0.0894 + 7.3886i	-0.0000 - 9.4819i	-0.0000 + 9.4819i	-15.2279 + 0.0000i	-18.1214 + 0.0000i	-21.7730 + 0.0000i	0.182390103
-5.1361 + 0.0000i	-7.7565 + 0.0000i	-3.0293 + 0.0000i	-0.3501 - 4.7482i	-0.3501 + 4.7482i	-0.0894 - 7.3886i	-0.0894 + 7.3886i	0.0000 - 9.4819i	0.0000 + 9.4819i	-15.2279 + 0.0000i	-18.1214 + 0.0000i	-21.7730 + 0.0000i	0.182390104

الجدول (6-8): قيم τ المفروضة على نظام التحكم مع توضع أقطاب الحلقة المغلقة في الفضاء S .

نستنتج من الجدول (6-8) ما يلي:

- قيم القسم الحقيقي لأقطاب الحلقة المغلقة في نظام التحكم الشبكي تقترب من المحور التخيلي في الفضاء S مع زيادة $\tau_{Stability}$ المفروض على النظام الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث وحدات توليد، إذ تبلغ $REAL(\lambda_1) = -18.29$ عند عدم وجود تأخير زمني ($\tau = 0$) حتى القيمة $REAL(\lambda_1) = -21.7730$ عند أعظم قيمة لـ $\tau_{Stability}$ ($\tau = 0.182390103$) والتي يبقى فيها النظام التحكمي المستمر مستقراً.
- عند الوصول إلى القيمة الحدية ($\tau_{Stability} = 0.182390103$) في نظام التحكم الشبكي المستمر، نلاحظ بأن القيم الحقيقية للقطين الرابع والخامس من أقطاب الحلقة المغلقة تصبح أصغر قيمة رقمية مقارنة للمحور التخيلي $REAL(\lambda_{4,5}) = -0.0000$.
- نلاحظ بأن النظام التحكمي يفقد الاستقرار من خلال اقتراب القطين الرابع والخامس من المحور التخيلي للفضاء لابلاس، إذ أن سلوك القطين الرابع والخامس في سرعة الاقتراب من المحور التخيلي تختلف عن باقي الأقطاب.
- يبقى النظام التحكمي المستمر مستقراً على نطاق واسع مع أخذ التأخير الزمني الإجمالي بعين الاعتبار بين وحدات التوليد الثلاث عند تحقق $0 < \tau_{Stability} < 0.182390103 \text{ Sec}$ وعندما $\tau_{Stability} = 0.182390103$ يصبح النظام على حافة الاستقرار (استقراراً حرج) لتوضع القطين الرابع والخامس على المحور التخيلي للفضاء لابلاس.
- نستنتج أن بعض القيم الحقيقية لأقطاب الحلقة المغلقة تتجاوز المحور التخيلي، عند تجاوز قيمة التأخير الزمني المفروض على النظام الشبكي الحد الأعظمي له (القطين الرابع والخامس عند $\tau = 0.182390104$ تكون قيمة $REAL(\lambda_{4,5}) = +0.0000$)، ليصبح النظام الشبكي غير مستقر.

6.10 تصميم المتحكم LQR لنظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من مجموعتي التوليد الأولى والثانية:

- انطلاقاً من ضخامة النظام الشبكي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد مع إضافة التأخير الزمني غير المحدد بين أنظمتها الفرعية الثلاث. تم دراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار النظام الشبكي المؤلف من مجموعتي التوليد الأولى والثانية معاً ومن ثم الثانية والثالثة معاً، وذلك بهدف ما يلي:
- إمكانية نمذجة وتوصيف النظام التحكمي الشبكي الجديد المؤلف من أجزاء (أنظمة فرعية) من النظام التحكمي الشبكي القديم.

- استنتاج تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار متغيرات الحالة (8 متغيرات حالة) للنظام التحكمي الجديد المؤلف من مجموعتي توليد، ومقارنته مع النظام التحكمي المؤلف من ثلاث مجموعات توليد (12 متغيرات حالة).
- دراسة فعالية الخوارزمية المقترحة التي تم من خلالها استنتاج $\tau_{Stability}$ ، مع ملاحظة تغير مجال $\tau_{Stability}$ بين النظام المؤلف من مجموعتي توليد والنظام المؤلف من ثلاث مجموعات.
- بما أن حجم البيانات المتبادلة عبر الشبكة لمجموعتي التوليد أقل منها لثلاث مجموعات، فإنه من المفترض أن يكون $\tau_{Stability}$ لمجموعتي التوليد أكبر منه لثلاث مجموعات (مع اختلاف القيمة بين النظام المكون من مجموعتي التوليد الأولى والثانية والنظام المكون من مجموعتي التوليد الثانية والثالثة)، أي سيكون لدى النظام الجديد مجال أكبر من التأخير الزمني غير المحدد ليبقى مستقرًا على نطاق واسع.

يوصف النظام الشبكي الجديد المؤلف من مجموعتي التوليد الأولى والثانية بالعلاقة (6-33) والنظام المؤلف من مجموعتي التوليد الثانية والثالثة بالعلاقة (6-34) وفق الشكل المصفوفي وذلك بعد استنتاج معادلات الحالة التي تصفه. إذ تكون أبعاد مصفوفات الحالة للنظام الجديد وفق الآتي: المصفوفة A مربعة أبعادها $[8 \times 8]$ ، المصفوفة B أبعادها $[8 \times 2]$ ، المصفوفة F أبعادها $[8 \times 2]$ ، المصفوفة C أبعادها $[2 \times 8]$ ، المصفوفة D أبعادها $[2 \times 2]$.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Delta \delta_1(t) \\ \Delta \omega_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \\ \Delta \delta_2(t) \\ \Delta \omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.147 & -0.039 & -0.013 & 0 & 0.022 & 0.004 & 0 & 0 \\ -0.266 & -0.393 & -0.922 & 1 & -0.087 & 0.754 & 0.024 & 0 \\ -30.1 & -309.14 & -60.943 & -20 & 24.599 & -91.99 & -3.501 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ 0.004 & -0.034 & -0.087 & 0 & -0.149 & 0.032 & -0.008 & 0 \\ 0.121 & 1.131 & 0.021 & 0 & -1.6 & -1.8854 & -0.21 & 1 \\ -18.48 & -64.47 & -12.55 & 0 & 106.09 & -516.11 & -21.67 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1(t) \\ \Delta \omega_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \\ \Delta \delta_2(t) \\ \Delta \omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 800 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 900 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.05 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(t) \\ w_2(t) \end{bmatrix} \\
 y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1(t) \\ \Delta \omega_1(t) \\ \Delta e_{q_1}(t) \\ \Delta e_{FD_1}(t) \\ \Delta \delta_2(t) \\ \Delta \omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{E1}(t) \\ u_{E2}(t) \end{bmatrix} \quad (33 - 6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.149 & 0.032 & -0.008 & 0 & 0.079 & -0.028 & 0 & 0 \\ -1.6 & -1.8854 & -0.21 & 1 & 0.467 & 0.754 & 0.06 & 0 \\ 106.09 & -516.11 & -21.67 & -20 & 16.99 & -171.91 & -11.41 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ 0.017 & -0.01 & 0 & 0 & -0.056 & -0.017 & -0.009 & 0 \\ 0.22 & 0 & 0.011 & 0 & -1.2 & -1.131 & -0.197 & 1 \\ 1.7 & -46.37 & -2.1 & 0 & 70.1 & -893.49 & -54.4 & -20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 900 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_2(t) \\ w_3(t) \end{bmatrix} \\
 y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2(t) \\ \Delta\omega_2(t) \\ \Delta e_{q_2}(t) \\ \Delta e_{FD_2}(t) \\ \Delta\delta_3(t) \\ \Delta\omega_3(t) \\ \Delta e_{q_3}(t) \\ \Delta e_{FD_3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{E2}(t) \\ u_{E3}(t) \end{bmatrix} \quad (34-6)
 \end{aligned}$$

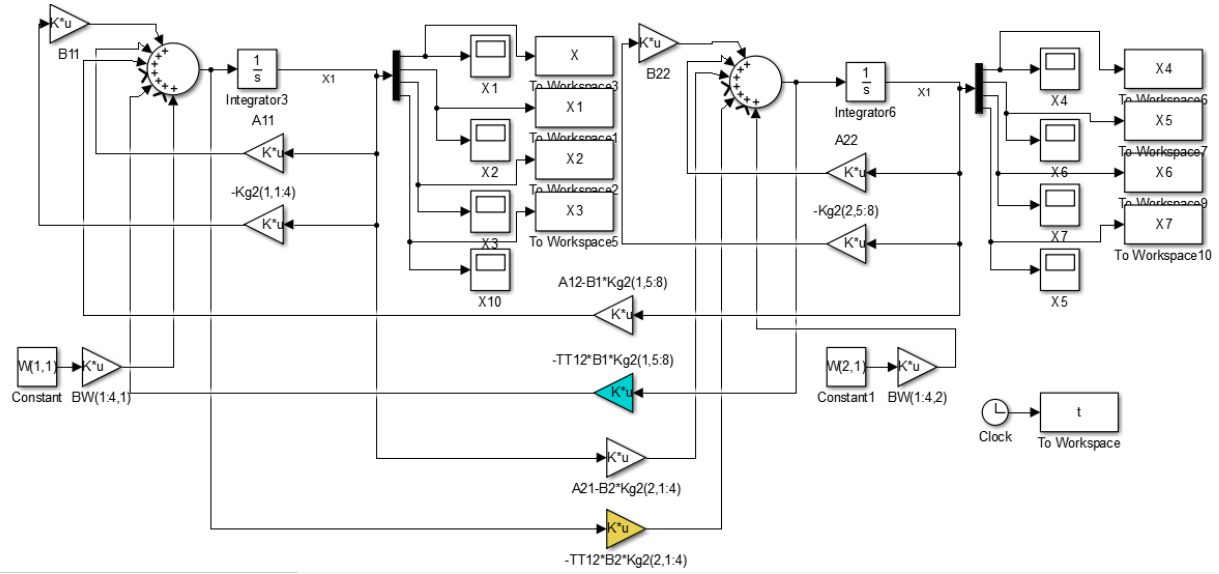
من العلاقة (23-5) التي تصف نظام التحكم الشبكي لمنظومة الطاقة الكهربائية المؤلف من n نظاماً فرعياً، وبتعويض مجموعتي التوليد الأولى والثانية نحصل على العلاقة (35-6) مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد، وإضافة ضجيج بقيمة 5% لمجموعة التوليد الأولى فقط.

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &= (A_{11} - B_1 K_{11})x_1(t) + (A_{12} - B_1 K_{12})x_2(t) + \tau_{21} B_1 K_{12} x_2(t) + F_1 w_1(t) \\
 x_2(t) &= (A_{21} - B_2 K_{21})x_1(t) + (A_{22} - B_2 K_{22})x_2(t) + \tau_{12} B_2 K_{21} x_1(t) + F_2 w_2(t) \quad (35-6)
 \end{aligned}$$

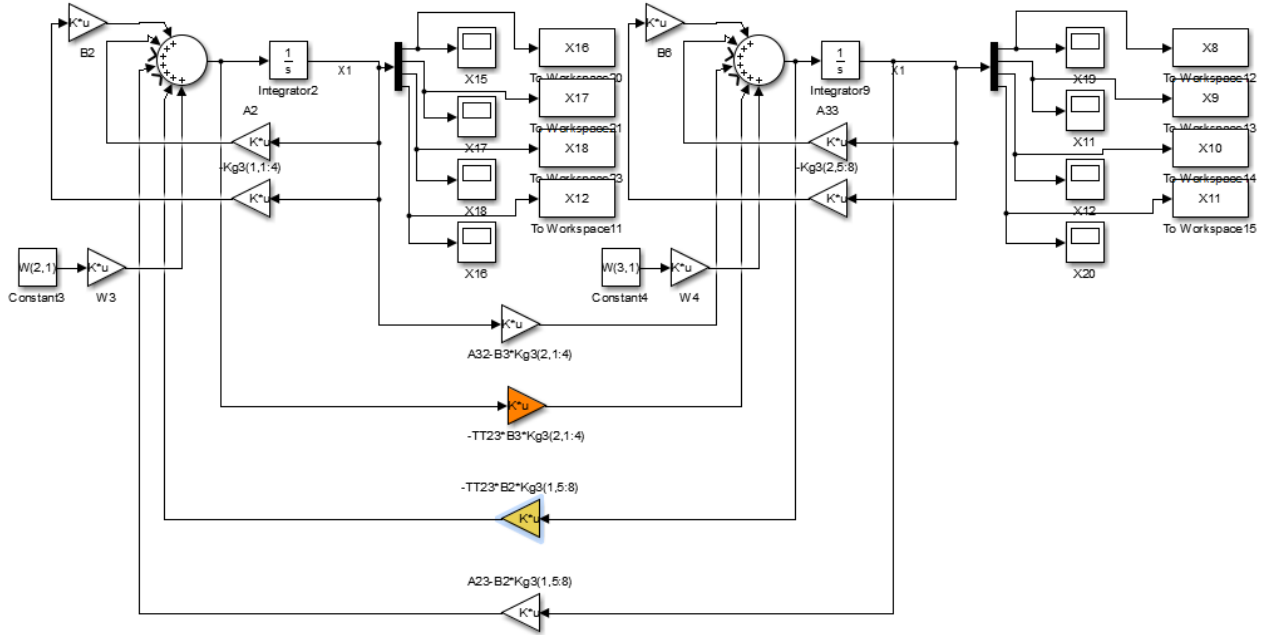
بينما عند تعويض مجموعتي التوليد الثانية والثالثة نحصل على العلاقة (36-6)، مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد، وإضافة ضجيج بقيمة 5% لمجموعة التوليد الأولى فقط.

$$\begin{aligned}
 x_2(t) &= (A_{22} - B_2 K_{22})x_2(t) + (A_{23} - B_2 K_{23})x_3(t) + \tau_{32} B_2 K_{23} x_3(t) + F_2 w_2(t) \\
 x_3(t) &= (A_{32} - B_3 K_{32})x_2(t) + (A_{33} - B_3 K_{33})x_3(t) + \tau_{23} B_3 K_{32} x_2(t) + F_3 w_3(t) \quad (36-6)
 \end{aligned}$$

يوضح الشكل (18-6) دارة MATLAB/SIMULINK لمجموعتي التوليد الأولى والثانية متضمنة إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين المجموعتين كما تم وصفها وفق العلاقة (35-6)، بينما يوضح الشكل (19-6) دارة MATLAB/SIMULINK لمجموعتي التوليد الثانية والثالثة متضمنة إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين المجموعتين كما تم وصفها وفق العلاقة (36-6)



الشكل (6-18): دارة MATLAB/SIMULINK لمجموعي التوليد الأولى والثانية



الشكل (6-19): دارة MATLAB/SIMULINK لمجموعي التوليد الثانية والثالثة

لتصميم المتحكم LQR لمجموعي التوليد الأولى والثانية نتأكد من أن النظام تحكمي كامل في فضاء الحالة وذلك بحساب قيمة المصفوفة M من العلاقة (6-20)، وكذلك الأمر بالنسبة لمجموعي التوليد الثانية والثالثة.

وبما أن نظام التحكم الشبكي الجديد مؤلف من مجموعتي توليد، إذاً فهو يتألف من مدخلين وعندها فإن أبعاد المصفوفة B هي 8×2 . بما أن للنظام أكثر من مدخل فإن المصفوفة M هي مصفوفة غير مربعة. وبالنتيجة $\text{rank}(M) = n = 8$ إذا نظام التحكم الشبكي المؤلف من مجموعتي توليد تحكمي كامل في فضاء الحالة ويمكن تصميم متحكم LQR له.

عند تطبيق المتحكم الأمثل LQR على نظام التحكم الشبكي الجديد نختار قيم مصفوفات الموازنة $Q(8 \times 8)$ و $R(2 \times 2)$ وفق الاتي:

$$Q = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1000 & 0 \\ 0 & 1000 \end{bmatrix}$$

نحسب قيمة المصفوفة P لمجموعتي التوليد الأولى والثانية P_{12} ولمجموعتي التوليد الثانية والثالثة P_{23} من العلاقة (19.6):

$$P_{12} = \begin{bmatrix} 6.17 & 7.51 & -0.6086 & -0.0495 & -4.0621 & -97.1806 & -0.1765 & -0.0103 \\ 7.51 & 1.5E+04 & 75.0265 & 2.3677 & 80.8187 & -9.63E+03 & 4.4901 & 0.0353 \\ -0.6086 & 75.0265 & 2.5551 & 0.1062 & 2.9222 & -147.5387 & -0.0796 & -0.0076 \\ -0.0495 & 2.3677 & 0.1062 & 0.0049 & 0.1573 & -3.8187 & -0.0019 & -2.07E-04 \\ -4.0621 & 80.8187 & 2.922 & 0.1573 & 8.0636 & 12.4083 & 0.7881 & 0.0405 \\ -97.1806 & -9.63E+03 & -147.5387 & -3.8187 & 12.4083 & 2.11E+04 & 9.6407 & 0.9664 \\ -0.1765 & 0.0353 & -0.0796 & -0.0019 & 0.7881 & 9.6407 & 2.0036 & 0.0821 \\ -0.0103 & 0.0353 & -0.0076 & -2.07E-04 & 0.0405 & 0.9664 & 0.0821 & 0.0038 \end{bmatrix}$$

$$P_{23} = \begin{bmatrix} 49.2672 & -9.3179 & 2.6131 & 0.1210 & -33.619 & -133.63 & -1.302 & -0.0626 \\ -9.3719 & 1.17E+05 & -25.524 & 0.9410 & 141.51 & -5.9E+04 & 29.1599 & 0.241 \\ 2.6131 & -25.5245 & 0.458 & 0.0204 & -1.34 & -1.8042 & -0.0742 & -0.0033 \\ 0.1210 & 0.9410 & 0.0204 & 0.001 & -0.0561 & -1.1658 & -0.0027 & -1.34E-04 \\ -33.6193 & 141.5101 & -1.3483 & -0.0561 & 48.813 & 107.66 & 2.8664 & 0.1516 \\ -133.6359 & -5.96E+04 & -1.8042 & -1.16 & 107.66 & 2.6E+05 & -280.93 & -9.6337 \\ -1.3020 & 29.1599 & -0.0742 & -0.0027 & 2.8664 & -280.93 & 1.93 & 0.0771 \\ -0.0626 & 0.2413 & -0.0033 & -1.34E-04 & 0.1516 & -9.6337 & 0.077 & 0.0036 \end{bmatrix}$$

يوضح الجدول (9-6) قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P_{12} والمصفوفة P_{32} ، وبما أن P_{32} ، P_{12} مصفوفات موجبة التحديد P_d فالنظام المؤلف من مجموعة التوليد الأولى والثانية مستقر ويمكن أمثلته، وكذلك الأمر بالنسبة لمجموعة التوليد الثانية والثالثة.

P_{12}			
P11=6.1705	P22=9.6103e+04	P33=1.8241e+06	P44=144.9838
P55=3.5924e+03	P66=8.2499e+08	P77=3.5265e+05	P88=137.2581
P_{32}			
P11=49.2672	P22=5.8084e+06	P33=1.8241e+06	P44=144.9838
P55=3.5924e+03	P66=8.2499e+08	P77=1.1643e+09	P88=5.1421e+05

الجدول (9-6): قيم المحددات الخاصة بالمصفوفات موجبة التحديد P_{12}, P_{32}

وبعد حساب المصفوفات موجبة التحديد P_{12}, P_{32} نطبق العلاقة (6-18) لإيجاد عناصر مصفوفة الربح الخلفي K لمجموعة التوليد الأولى والثانية فتكون أرباح المتحكم التربيعي الأمثل:

$$\begin{aligned} K_{11} &= [-0.0396 \quad 1.8942 \quad 0.0849 \quad 0.0040] \\ K_{12} &= [0.1258 \quad -3.0550 \quad -0.0016 \quad -0.0002] \\ K_{21} &= [-0.0092 \quad 0.0318 \quad -0.0069 \quad -0.0002] \\ K_{22} &= [0.0365 \quad 0.8698 \quad 0.0739 \quad 0.0034] \end{aligned}$$

بينما تكون عناصر مصفوفة الربح الخلفي K لمجموعة التوليد الثانية والثالثة:

$$\begin{aligned} K_{22} &= [0.1089 \quad 0.8469 \quad 0.0183 \quad 0.0009] \\ K_{23} &= [-0.0505 \quad -1.0492 \quad -0.0024 \quad -0.0001] \\ K_{32} &= [-0.0626 \quad 0.2413 \quad -0.0033 \quad -0.0001] \\ K_{33} &= [0.1516 \quad -9.6337 \quad 0.0771 \quad 0.0036] \end{aligned}$$

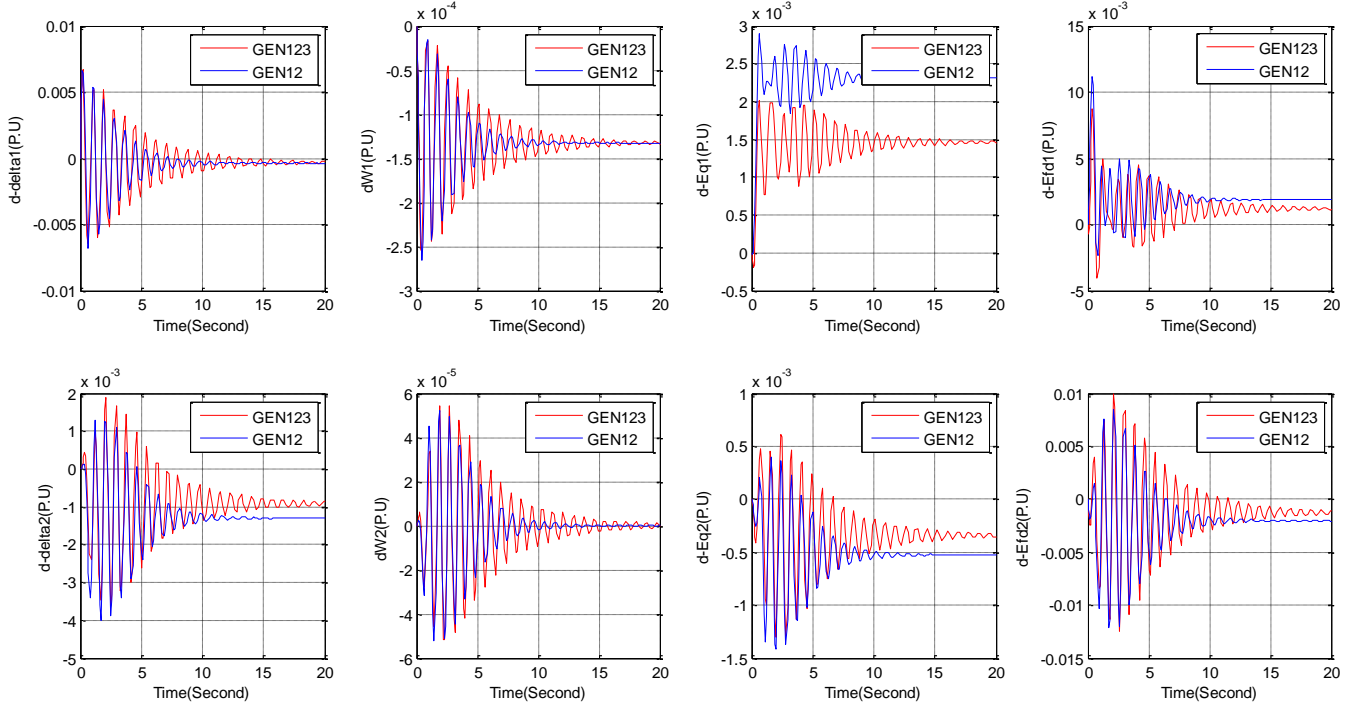
6.11 دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر الجديد:

يمثل الجدول (6-10) قيم جذور المعادلة المميزة المغلقة لنظام التحكم الجديد باستخدام المتحكم LQR. نلاحظ من جذور المعادلة المميزة بأن النظام الشبكي الجديد مستقر وكامل جذوره تقع على يسار الساحة العقدية.

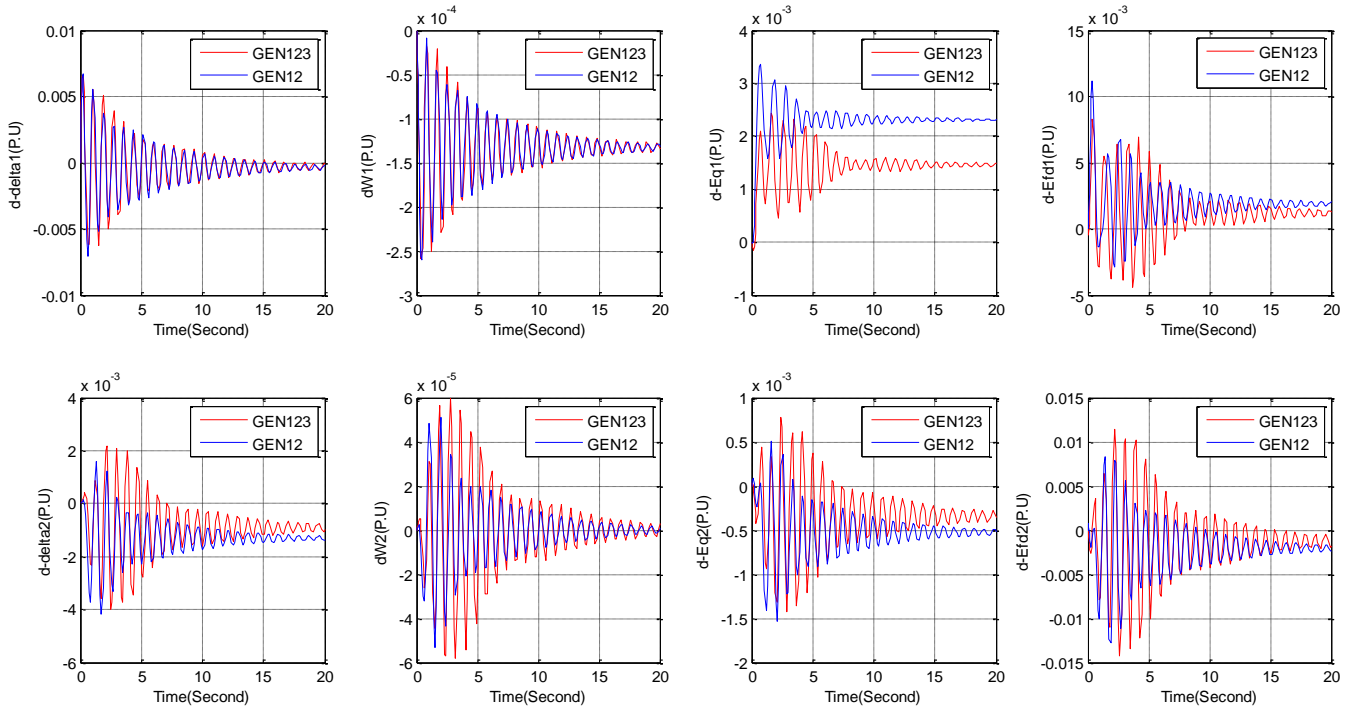
جذور المعادلة المميزة المغلقة لمجموعة التوليد الأولى والثانية	جذور المعادلة المميزة المغلقة لمجموعة التوليد الثانية والثالثة
$-18.2865 + 0.0000i$	$-18.7732 + 0.0000i$
$-15.3468 + 0.0000i$	$-15.1255 + 0.0000i$
$-5.8516 + 0.2050i$	$-7.9146 + 0.0000i$
$-5.8516 - 0.2050i$	$-0.0960 + 7.7655i$
$-0.6358 + 7.8183i$	$-0.0960 - 7.7655i$
$-0.6358 - 7.8183i$	$-0.2564 + 4.0797i$
$-0.3979 + 7.1884i$	$-0.2564 - 4.0797i$
$-0.3979 - 7.1884i$	$-2.2646 + 0.0000i$

الجدول (6-10): جذور المعادلة المميزة لمجموعتي التوليد الأولى والثانية باستخدام LQR

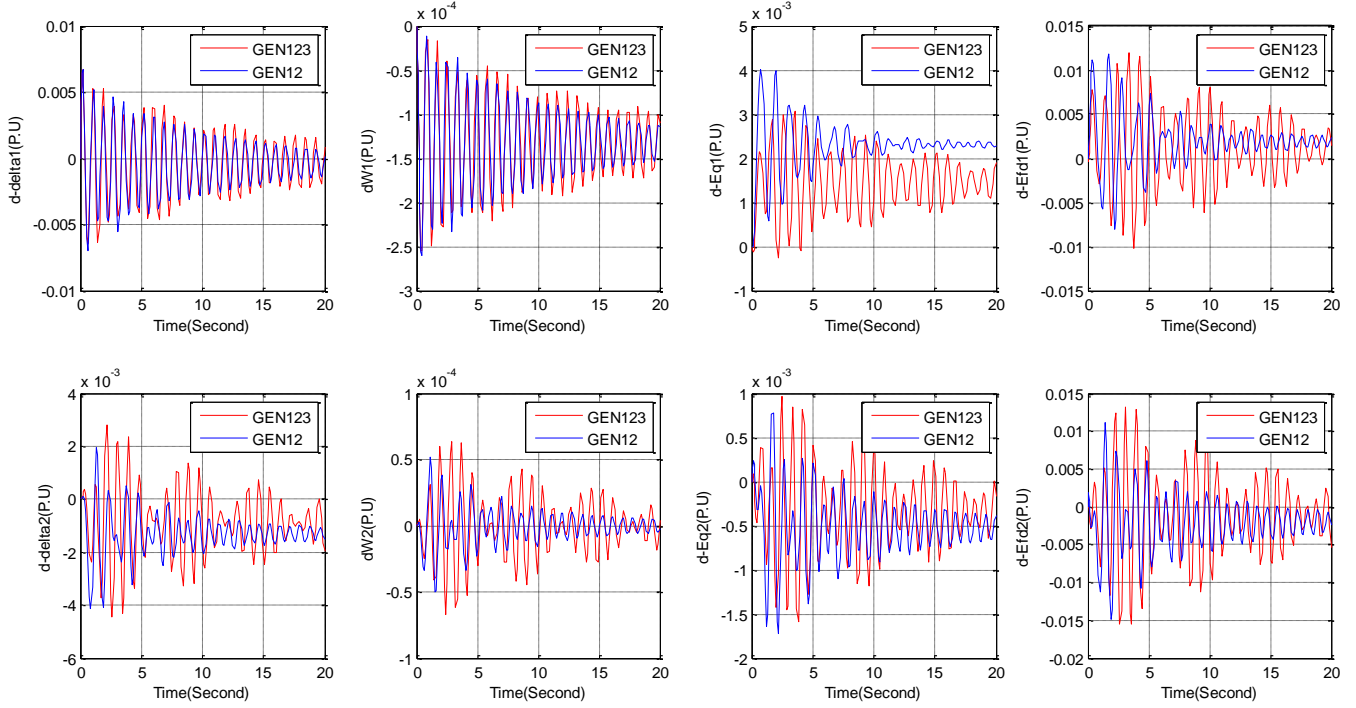
يوضح الشكل (6-20) الاستجابة الزمنية لمتغيرات الحالة الإجمالية للنظام الشبكي الجديد المؤلف من وحدتي التوليد الأولى والثانية ومقارنته مع النظام الشبكي القديم المؤلف من ثلاث وحدات توليد، مع وجود التأخير الزمني غير المحدد وفق مجموعة من القيم $(a)\tau=0$ S, $(b)\tau=0.1$ S, $(c)\tau=0.2$ S, $(d)\tau=0.22$ S.



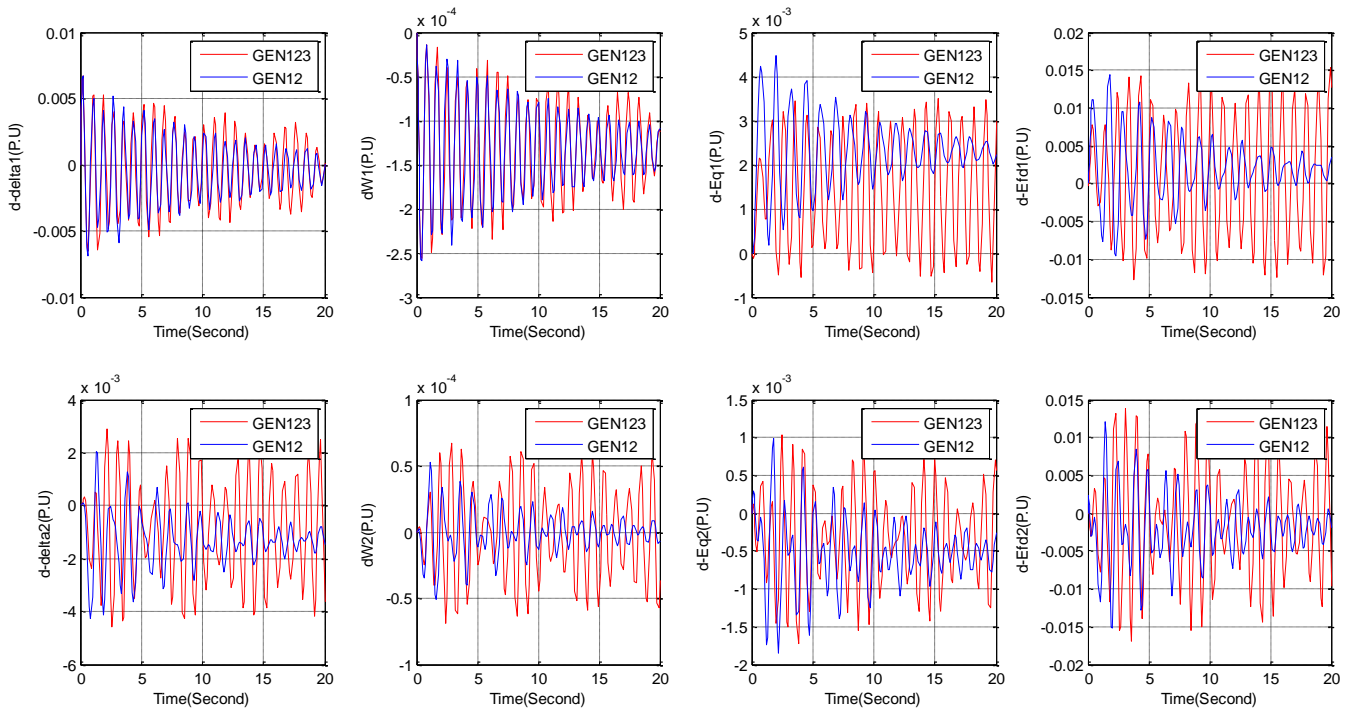
الشكل (20-6-a): الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند ($\tau = 0 S$)



الشكل (20-6-b): الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند ($\tau = 0.1 S$)



الشكل (20-6-c): الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند $(\tau = 0.2 S)$



الشكل (20-6-d): الاستجابة الزمنية لوحدي التوليد الأولى والثانية عند $(\tau = 0.22 S)$

بينما يوضح الجدول (11-6) بارامترات الاستجابة الزمنية لكل من النظام الشبكي المستمر القديم المؤلف من ثلاث وحدات توليد والنظام الشبكي المستمر الجديد المؤلف من وحدتي توليد.

$\tau = 0 \text{ S}$									
		$\Delta\delta_1(t)$	$\Delta\omega_1(t)$	$\Delta E_{q_1}(t)$	$\Delta E_{fd_1}(t)$	$\Delta\delta_2(t)$	$\Delta\omega_2(t)$	$\Delta E_{q_2}(t)$	$\Delta E_{fd_2}(t)$
M	G123	6.715	-17.20	2.060	8.739	1.883	54.271	616.01	9.909
	G12	6.7	-7.248	2.919	11.323	1.471	54.392	387.73	7.870
ST	G123	31.21	34.98	31.37	29.33	26.46	29.13	30.44	31.69
	G12	17.72	30.48	18.18	17.26	15.02	20.24	17.41	17.57
$\tau = 0.1 \text{ S}$									
		$\Delta\delta_1(t)$	$\Delta\omega_1(t)$	$\Delta E_{q_1}(t)$	$\Delta E_{fd_1}(t)$	$\Delta\delta_2(t)$	$\Delta\omega_2(t)$	$\Delta E_{q_2}(t)$	$\Delta E_{fd_2}(t)$
M	G123	6.658	-18.41	2.443	8.274	2.186	59.841	770.40	11.415
	G12	6.661	-10.56	3.339	11.173	1.526	47.890	479.20	8.608
ST	G123	47.63	46.415	39.49	41.27	41.49	46.21	40.93	41.08
	G12	40.03	41.71	30.94	32.72	33.7	37.56	35.95	37.24
$\tau = 0.1823 \text{ S}$									
		$\Delta\delta_1(t)$	$\Delta\omega_1(t)$	$\Delta E_{q_1}(t)$	$\Delta E_{fd_1}(t)$	$\Delta\delta_2(t)$	$\Delta\omega_2(t)$	$\Delta E_{q_2}(t)$	$\Delta E_{fd_2}(t)$
M	G123	6.689	-18.01	2.849	10.769	2.692	61.099	904.15	12.725
	G12	6.716	-10.98	3.889	11.066	1.872	50.828	716.28	10.628
ST	G123	103.2	109.8	82.55	88.54	100	92.8	100.2	100
	G12	77.26	71.4	47.9	53.23	57.6	55.66	81.48	71.77
$\tau = 0.2 \text{ S}$									
		$\Delta\delta_1(t)$	$\Delta\omega_1(t)$	$\Delta E_{q_1}(t)$	$\Delta E_{fd_1}(t)$	$\Delta\delta_2(t)$	$\Delta\omega_2(t)$	$\Delta E_{q_2}(t)$	$\Delta E_{fd_2}(t)$
M	G123	6.712	-16.19	3.059	11.972	2.792	63.135	966.37	13.228
	G12	6.720	-11.29	4.006	11.861	1.895	50.940	757.87	11.094
ST	G123	122	122.7	97.18	111.13	113.6	98.63	115.5	116
	G12	82.02	78.99	54.22	56.68	62.75	64.1	85.56	73.5

الجدول (11-6): مقارنة بارامترات الاستجابة الزمنية لكل من نظام التحكم الشبكي القديم والجديد.

نستنتج من الجدول (11-6) والشكل (20-6) النقاط التالية:

- عند زيادة التأخير الزمني غير المحدد تحافظ القمة العظمى للمطال (MAX Peak: M) على قيمتها ضمن مجال صغير بالنسبة للنظامين الشبكيين وذلك لمجمل متغيرات الحالة، من ناحية أخرى يتأثر زمن الاستقرار (Stealing Time: ST) بشكل كبير بزيادة التأخير الزمني.
- نلاحظ بأن قيمة زمن الاستقرار بالنسبة للنظام الشبكي G123 تزداد بشكل بسيط عن النظام G12 عند زيادة التأخير الزمني ضمن المجال (0-0.1823 S). وذلك لأن قيمة التأخير الزمني التي تبقي على النظام الشبكي المستمر G123 بحالة استقرار $\tau_{Stability123} = 0.182390103 \text{ S}$ ، أي أن النظام G123 يبقى مستقرًا

حتى يتجاوز $\tau_{Stability}$. وعند تجاوزها يصبح الفرق واضحاً في زمن الاستقرار بين النظامين، مع بقاء G12 في حالة استقرار. وهذا ما يؤكد الشكل (20-6-c).

- نلاحظ من الشكل (20-6) بأنه عند زيادة التأخير الزمني يزداد مطال الاهتزازات بالنسبة للنظامين الشبكيين حتى الوصول إلى عدم الاستقرار. مع ضمان مجال أكبر للاستقرار بالنسبة للنظام G12 $(\tau_{Stability12} > \tau_{Stability123})$.

6.12 حساب $\tau_{Stability}$ غير المحدد لنظام التحكم الشبكي الجديد:

عند تطبيق الخوارزمية المقترحة وفق العلاقة (26-6) لحساب $\tau_{Stability12}$ لنظام التحكم الشبكي المستمر الجديد نحصل على المصفوفة $\Phi_{12}(t)$ لمجموعة التوليد الأولى والثانية وفق العلاقة (37-6) والمصفوفة $\Phi_{23}(t)$ لمجموعة التوليد الثانية والثالثة وفق العلاقة (38-6).

$$\Phi_{12}(t) = \frac{\begin{bmatrix} A_{11} - B_1 K_{11} & A_{12} - B_1 K_{12} \\ A_{21} - B_2 K_{21} & A_{22} - B_2 K_{22} \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -B_1 K_{12} \\ -B_2 K_{21} & 0 \end{bmatrix}} \quad (37 - 6)$$

$$\Phi_{23}(t) = \frac{\begin{bmatrix} A_{22} - B_2 K_{22} & A_{23} - B_2 K_{23} \\ A_{32} - B_3 K_{32} & A_{33} - B_3 K_{33} \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -B_2 K_{23} \\ -B_3 K_{32} & 0 \end{bmatrix}} \quad (38 - 6)$$

نستنتج من العلاقتين (37-6) و (38-6) بأن نظام التحكم الشبكي المستمر الجديد يعتبر مستقراً على نطاق واسع باستخدام المتحكم الأمثل LQR مع أخذ التأخير الزمني غير المحدد بعين الاعتبار إذا كانت أقطاب الحلقة المغلقة للنظام الشبكي مع المتحكم تقع على يسار الساحة العقدية في الفضاء لابلاس.

$$if \lambda_i(\Phi_{12}) \in C^-, for i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$if \lambda_i(\Phi_{23}) \in C^-, for i = 1, 2, 3, \dots, n$$

أو يمكن القول بأن نظام التحكم الشبكي المستمر الجديد يعتبر مستقراً على نطاق واسع إذا كان التأخير الزمني غير المحدد يحقق المتراجحة (39-6):

$$0 < \tau < \tau_{Stability12} \text{ OR } 0 < \tau < \tau_{Stability23} \quad (39 - 6)$$

ولحساب قيمة الحد $\tau_{Stability12}$ أو $\tau_{Stability23}$ في نظام التحكم الشبكي المستمر الجديد نطبق الخوارزمية المقترحة الموضحة في الشكل (17-6)، عندها تكون نتائج تنفيذ الخوارزمية لمجموعة التوليد الأولى والثانية موضحة في الجدول (12-6) ولمجموعة التوليد الثانية والثالثة موضحة في الجدول (13-6)

N	TAU_MIN	TAU1,2	TAU_MAX	REAL_TAU_MIN	REAL_TAU	REAL_TAU_MAX
1	0.000000000	2.500000000	5.000000000	Negative	Positive	Positive
2	0.000000000	1.250000000	2.500000000	Negative	Positive	Positive
3	0.000000000	0.625000000	1.250000000	Negative	Positive	Positive
4	0.000000000	0.312500000	0.625000000	Negative	Positive	Positive
5	0.000000000	0.156250000	0.312500000	Negative	Negative	Positive
6	0.156250000	0.234375000	0.312500000	Negative	Positive	Positive
7	0.156250000	0.195312500	0.234375000	Negative	Negative	Positive
8	0.195312500	0.214843750	0.234375000	Negative	Negative	Positive
9	0.214843750	0.224609375	0.234375000	Negative	Negative	Positive
10	0.224609375	0.229492188	0.234375000	Negative	Positive	Positive
11	0.224609375	0.227050781	0.229492188	Negative	Positive	Positive
12	0.224609375	0.225830078	0.227050781	Negative	Negative	Positive
13	0.225830078	0.226440430	0.227050781	Negative	Positive	Positive
14	0.225830078	0.226135254	0.226440430	Negative	Positive	Positive
15	0.225830078	0.225982666	0.226135254	Negative	Negative	Positive
16	0.225982666	0.226058960	0.226135254	Negative	Positive	Positive
17	0.225982666	0.226020813	0.226058960	Negative	Negative	Positive
18	0.226020813	0.226039886	0.226058960	Negative	Negative	Positive
19	0.226039886	0.226049423	0.226058960	Negative	Positive	Positive
20	0.226039886	0.226044655	0.226049423	Negative	Negative	Positive
21	0.226044655	0.226047039	0.226049423	Negative	Negative	Positive
22	0.226047039	0.226048231	0.226049423	Negative	Positive	Positive
23	0.226047039	0.226047635	0.226048231	Negative	Positive	Positive
24	0.226047039	0.226047337	0.226047635	Negative	Negative	Positive
25	0.226047337	0.226047486	0.226047635	Negative	Negative	Positive
26	0.226047486	0.226047561	0.226047635	Negative	Negative	Positive
27	0.226047561	0.226047598	0.226047635	Negative	Positive	Positive
28	0.226047561	0.226047579	0.226047598	Negative	Positive	Positive
29	0.226047561	0.226047570	0.226047579	Negative	Negative	Positive
30	0.226047570	0.226047575	0.226047579	Negative	Positive	Positive
31	0.226047570	0.226047572	0.226047575	Negative	Negative	Positive
32	0.226047572	0.226047573	0.226047575	Negative	Positive	Positive
33	0.226047572	0.226047573	0.226047573	Negative	Negative	Positive
34	0.226047573	0.226047573	0.226047573	Negative	Positive	Positive
35	0.226047573	0.226047573	0.226047573	Negative	Positive	Positive
36	0.226047573	0.226047573	0.226047573	Negative	Negative	Positive

الجدول (6-12): نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من مجموعتي التوليد الأولى والثانية.

N	TAU_MIN	TAU2,3	TAU_MAX	REAL_TAU_MIN	REAL_TAU	REAL_TAU_MAX
1	0.000000000	2.500000000	5.000000000	Negative	Positive	Positive
2	0.000000000	1.250000000	2.500000000	Negative	Positive	Positive
3	0.000000000	0.625000000	1.250000000	Negative	Positive	Positive
4	0.000000000	0.312500000	0.625000000	Negative	Positive	Positive
5	0.312500000	0.468750000	0.625000000	Negative	Negative	Positive
6	0.468750000	0.546875000	0.625000000	Negative	Negative	Positive
7	0.546875000	0.585937500	0.625000000	Negative	Positive	Positive
8	0.546875000	0.566406250	0.585937500	Negative	Positive	Positive
9	0.546875000	0.556640625	0.566406250	Negative	Negative	Positive
10	0.556640625	0.561523438	0.566406250	Negative	Negative	Positive
11	0.561523438	0.563964844	0.566406250	Negative	Positive	Positive
12	0.561523438	0.562744141	0.563964844	Negative	Positive	Positive
13	0.561523438	0.562133789	0.562744141	Negative	Negative	Positive
14	0.562133789	0.562438965	0.562744141	Negative	Negative	Positive
15	0.562438965	0.562591553	0.562744141	Negative	Negative	Positive
16	0.562591553	0.562667847	0.562744141	Negative	Positive	Positive
17	0.562591553	0.562629700	0.562667847	Negative	Positive	Positive
18	0.562591553	0.562610626	0.562629700	Negative	Positive	Positive
19	0.562591553	0.562601089	0.562610626	Negative	Positive	Positive
20	0.562591553	0.562596321	0.562601089	Negative	Positive	Positive
21	0.562591553	0.562593937	0.562596321	Negative	Positive	Positive
22	0.562591553	0.562592745	0.562593937	Negative	Negative	Positive
23	0.562592745	0.562593341	0.562593937	Negative	Negative	Positive
24	0.562593341	0.562593639	0.562593937	Negative	Positive	Positive
25	0.562593341	0.562593490	0.562593639	Negative	Negative	Positive
26	0.562593490	0.562593564	0.562593639	Negative	Positive	Positive
27	0.562593490	0.562593527	0.562593564	Negative	Positive	Positive
28	0.562593490	0.562593509	0.562593527	Negative	Positive	Positive
29	0.562593490	0.562593499	0.562593509	Negative	Negative	Positive
30	0.562593499	0.562593504	0.562593509	Negative	Negative	Positive
31	0.562593504	0.562593506	0.562593509	Negative	Positive	Positive
32	0.562593504	0.562593505	0.562593506	Negative	Positive	Positive
33	0.562593504	0.562593504	0.562593505	Negative	Negative	Positive
34	0.562593504	0.562593505	0.562593505	Negative	Positive	Positive
35	0.562593504	0.562593505	0.562593505	Negative	Negative	Positive
36	0.562593505	0.562593505	0.562593505	Negative	Positive	Positive

الجدول (6-13): نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المستمر المؤلف من مجموعتي التوليد الثانية والثالثة.

إذاً وباستخدام الخوارزمية المقترحة حصلنا على $\tau_{Stability12}$ لنظام التحكم الشبكي المستمر الجديد والمؤلف من وحدتي توليد الأولى والثانية بقيمة مقدارها 0.226047573 ولوحدتي التوليد الثانية والثالثة $\tau_{Stability23}$ بقيمة مقدارها 0.562593505 بعد تكرار 36 خطوة وبدقة كبيرة مقدارها 9 خانات بعد الفاصلة.

ولضمان استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر الجديد عند أكبر حد ممكن للتأخير الزمني غير المحدد، يتم أخذ البارامترات الإضافية المشكلة لسلسلة تايلور بعين الاعتبار في تخمين $\tau_{Stability12}\tau_{Stability23}$ ، وإعادة تطبيق الخوارزمية المقترحة على البارامترات الجديدة لنحصل على الجدول (6-14).

$R_N(x, \tau)$	$x(t - \tau)$	$\tau_{Stability12}[\text{Sec}]$	$\tau_{Stability23}[\text{Sec}]$
$N = 1$	$x(t) - \tau x'(t)$	0.226047573	0.562593505
$N = 3$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t)$	0.256024937	0.794736473
$N = 5$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) - \left(\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t)$	0.256244381	0.825992062
$N = 7$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) - \left(\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t) + \left(\frac{\tau^6}{720}\right) x^{(6)}(t) - \left(\frac{\tau^7}{5040}\right) x^{(7)}(t)$	0.256244870	0.826880980
$N = 9$	$x(t) - \tau x'(t) + \left(\frac{\tau^2}{2}\right) x''(t) - \left(\frac{\tau^3}{6}\right) x'''(t) + \left(\frac{\tau^4}{24}\right) x^{(4)}(t) - \left(\frac{\tau^5}{120}\right) x^{(5)}(t) + \left(\frac{\tau^6}{720}\right) x^{(6)}(t) - \left(\frac{\tau^7}{5040}\right) x^{(7)}(t) + \left(\frac{\tau^8}{40320}\right) x^{(8)}(t) - \left(\frac{\tau^9}{362880}\right) x^{(9)}(t)$	0.256244871	0.826892233

الجدول (6-14): قيمة $\tau_{Stability12}$ ، $\tau_{Stability23}$ مع الحدود المضافة من سلسلة تايلور لنظام التحكم الشبكي المستمر الجديد.

ويوضح الجدول (6-15) توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المستمر الجديد لوحدتي التوليد الأولى والثانية ضمن الفضاء لابلاس مع الأخذ بعين الاعتبار قيم التأخير الزمني الإجمالي ($\tau = \tau_{12} + \tau_{13} + \tau_{23}$) المفروضة على نظام التحكم الشبكي المستمر الجديد، بينما يوضح الجدول (6-16) توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المستمر الجديد لوحدتي التوليد الثانية والثالثة.

λ_8	λ_7	λ_6	λ_5	λ_4	λ_3	λ_2	λ_1	τ
-18.2865 + 0.0000i	-15.3468 + 0.0000i	-5.8516 - 0.2050i	-5.8516 + 0.2050i	-0.6358 - 7.8183i	-0.6358 + 7.8183i	-0.3979 - 7.1884i	-0.3979 + 7.1884i	0.0
-5.1053 - 0.7075i	-5.1053 + 0.7075i	-0.1899 - 7.2319i	-0.1899 + 7.2319i	-0.7045 - 8.3683i	-0.7045 + 8.3683i	-18.3724 + 0.0000i	-17.0345 + 0.0000i	0.05
-4.8157 - 0.6088i	-4.8157 + 0.6088i	-0.1353 - 7.2555i	-0.1353 + 7.2555i	-0.6360 - 8.6601i	-0.6360 + 8.6601i	-17.6722 + 0.0000i	-18.5613 + 0.0000i	0.08
-4.6614 - 0.4791i	-4.6614 + 0.4791i	-0.1103 - 7.2704i	-0.1103 + 7.2704i	-0.5695 - 8.8388i	-0.5695 + 8.8388i	-17.8989 + 0.0000i	-18.8270 + 0.0000i	0.1
-4.5912 + 0.0000i	-4.3512 + 0.0000i	-0.0836 - 7.2906i	-0.0836 + 7.2906i	-0.4504 - 9.0862i	-0.4504 + 9.0862i	-18.0353 + 0.0000i	-19.3642 + 0.0000i	0.13
-4.8224 + 0.0000i	-3.8477 + 0.0000i	-0.0672 - 7.3063i	-0.0672 + 7.3063i	-0.3342 - 9.2850i	-0.3342 + 9.2850i	-18.0798 + 0.0000i	-19.8583 + 0.0000i	0.156250000
-4.8674 + 0.0000i	-3.6777 + 0.0000i	-0.0605 - 7.3137i	-0.0605 + 7.3137i	-0.2705 - 9.3832i	-0.2705 + 9.3832i	-18.0928 + 0.0000i	-20.1118 + 0.0000i	0.17
-4.9209 + 0.0000i	-3.4195 + 0.0000i	-0.0505 - 7.3261i	-0.0505 + 7.3261i	-0.1499 - 9.5548i	-0.1499 + 9.5548i	-18.1078 + 0.0000i	-20.5637 + 0.0000i	0.195312500
-4.9492 + 0.0000i	-3.2522 + 0.0000i	-0.0446 - 7.3346i	-0.0446 + 7.3346i	-0.0549 - 9.6797i	-0.0549 + 9.6797i	-18.1147 + 0.0000i	-20.8985 + 0.0000i	0.214843750
-4.9623 + 0.0000i	-3.1672 + 0.0000i	-0.0417 - 7.3390i	-0.0417 + 7.3390i	-0.0011 - 9.7473i	-0.0011 + 9.7473i	-18.1175 + 0.0000i	-21.0816 + 0.0000i	0.225830078
-4.9625 + 0.0000i	-3.1655 + 0.0000i	-0.0417 - 7.3391i	-0.0417 + 7.3391i	-0.0000 - 9.7486i	-0.0000 + 9.7486i	-18.1175 + 0.0000i	-21.0852 + 0.0000i	0.226047039
-4.9625 + 0.0000i	-3.1655 + 0.0000i	-0.0417 - 7.3391i	-0.0417 + 7.3391i	-0.0000 - 9.7486i	-0.0000 + 9.7486i	-18.1175 + 0.0000i	-21.0852 + 0.0000i	0.226047561
-4.9625 + 0.0000i	-3.1655 + 0.0000i	-0.0417 - 7.3391i	-0.0417 + 7.3391i	-0.0000 - 9.7486i	-0.0000 + 9.7486i	-18.1175 + 0.0000i	-21.0852 + 0.0000i	0.226047572
-4.9625 + 0.0000i	-3.1655 + 0.0000i	-0.0417 - 7.3391i	-0.0417 + 7.3391i	-0.0000 - 9.7486i	-0.0000 + 9.7486i	-18.1175 + 0.0000i	-21.0852 + 0.0000i	0.226047573
-4.9625 + 0.0000i	-3.1654 + 0.0000i	-0.0417 - 7.3391i	-0.0417 + 7.3391i	-0.0001 - 9.7487i	-0.0001 + 9.7487i	-18.1175 + 0.0000i	-21.0854 + 0.0000i	0.226059579

الجدول (15-6): توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المستمر الجديد لوحدتي التوليد الأولى والثانية

λ_8	λ_7	λ_6	λ_5	λ_4	λ_3	λ_2	λ_1	τ
-2.2646 + 0.0000i	-7.9146 + 0.0000i	-0.2564 - 4.0797i	-0.2564 + 4.0797i	-0.0960 - 7.7655i	-0.0960 + 7.7655i	-15.1255 + 0.0000i	-18.7732 + 0.0000i	0.0
-2.2696 + 0.0000i	-7.9859 + 0.0000i	-0.2075 - 4.0382i	-0.2075 + 4.0382i	-0.1109 - 7.8081i	-0.1109 + 7.8081i	-15.1285 + 0.0000i	-18.7646 + 0.0000i	0.1
-2.2746 + 0.0000i	-15.1283 + 0.0000i	-18.7565 + 0.0000i	-8.0565 + 0.0000i	-0.1601 - 3.9972i	-0.1601 + 3.9972i	-0.1261 - 7.8521i	-0.1261 + 7.8521i	0.2
-2.2800 + 0.0000i	-0.1085 - 3.9520i	-0.1085 + 3.9520i	-8.1353 + 0.0000i	-0.1436 - 7.9035i	-0.1436 + 7.9035i	-15.1242 + 0.0000i	-18.7478 + 0.0000i	0.312500000
-2.2872 + 0.0000i	-0.0397 - 3.8903i	-0.0397 + 3.8903i	-8.2439 + 0.0000i	-0.1687 - 7.9779i	-0.1687 + 7.9779i	-15.1115 + 0.0000i	-18.7366 + 0.0000i	0.468750000
-2.2908 + 0.0000i	-0.0066 - 3.8601i	-0.0066 + 3.8601i	-8.2981 + 0.0000i	-0.1816 - 8.0164i	-0.1816 + 8.0164i	-15.1020 + 0.0000i	-18.7314 + 0.0000i	0.546875000
-2.2909 + 0.0000i	-0.0053 - 3.8589i	-0.0053 + 3.8589i	-8.3002 + 0.0000i	-0.1821 - 8.0180i	-0.1821 + 8.0180i	-15.1016 + 0.0000i	-18.7312 + 0.0000i	0.55
-2.2912 + 0.0000i	-0.0025 - 3.8563i	-0.0025 + 3.8563i	-8.3048 + 0.0000i	-0.1832 - 8.0213i	-0.1832 + 8.0213i	-15.1007 + 0.0000i	-18.7307 + 0.0000i	0.556640625
-2.2914 + 0.0000i	-0.0004 - 3.8544i	-0.0004 + 3.8544i	-8.3082 + 0.0000i	-0.1840 - 8.0237i	-0.1840 + 8.0237i	-15.1000 + 0.0000i	-18.7304 + 0.0000i	0.561523438
-2.2915 + 0.0000i	-0.0001 - 3.8541i	-0.0001 + 3.8541i	-8.3088 + 0.0000i	-0.1842 - 8.0242i	-0.1842 + 8.0242i	-15.0998 + 0.0000i	-18.7304 + 0.0000i	0.562438965
-2.2915 + 0.0000i	-0.0000 - 3.8540i	-0.0000 + 3.8540i	-8.3089 + 0.0000i	-0.1842 - 8.0243i	-0.1842 + 8.0243i	-15.0998 + 0.0000i	-18.7303 + 0.0000i	0.562592745
-2.2915 + 0.0000i	-0.0000 - 3.8540i	-0.0000 + 3.8540i	-8.3089 + 0.0000i	-0.1842 - 8.0243i	-0.1842 + 8.0243i	-15.0998 + 0.0000i	-18.7303 + 0.0000i	0.562593490
-2.2915 + 0.0000i	-0.0000 - 3.8540i	-0.0000 + 3.8540i	-8.3089 + 0.0000i	-0.1842 - 8.0243i	-0.1842 + 8.0243i	-15.0998 + 0.0000i	-18.7303 + 0.0000i	0.562593504
-2.2915 + 0.0000i	-0.0000 - 3.8540i	-0.0000 + 3.8540i	-8.3089 + 0.0000i	-0.1842 - 8.0243i	-0.1842 + 8.0243i	-15.0998 + 0.0000i	-18.7303 + 0.0000i	0.562593505
-2.2915 + 0.0000i	-0.0001 - 3.8539i	-0.0001 + 3.8539i	-8.3091 + 0.0000i	-0.1842 - 8.0244i	-0.1842 + 8.0244i	-15.0998 + 0.0000i	-18.7303 + 0.0000i	0.562793505

الجدول (6-16): توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المستمر الجديد لوحدي التوليد الثانية والثالثة.

6.13 استنتاجات:

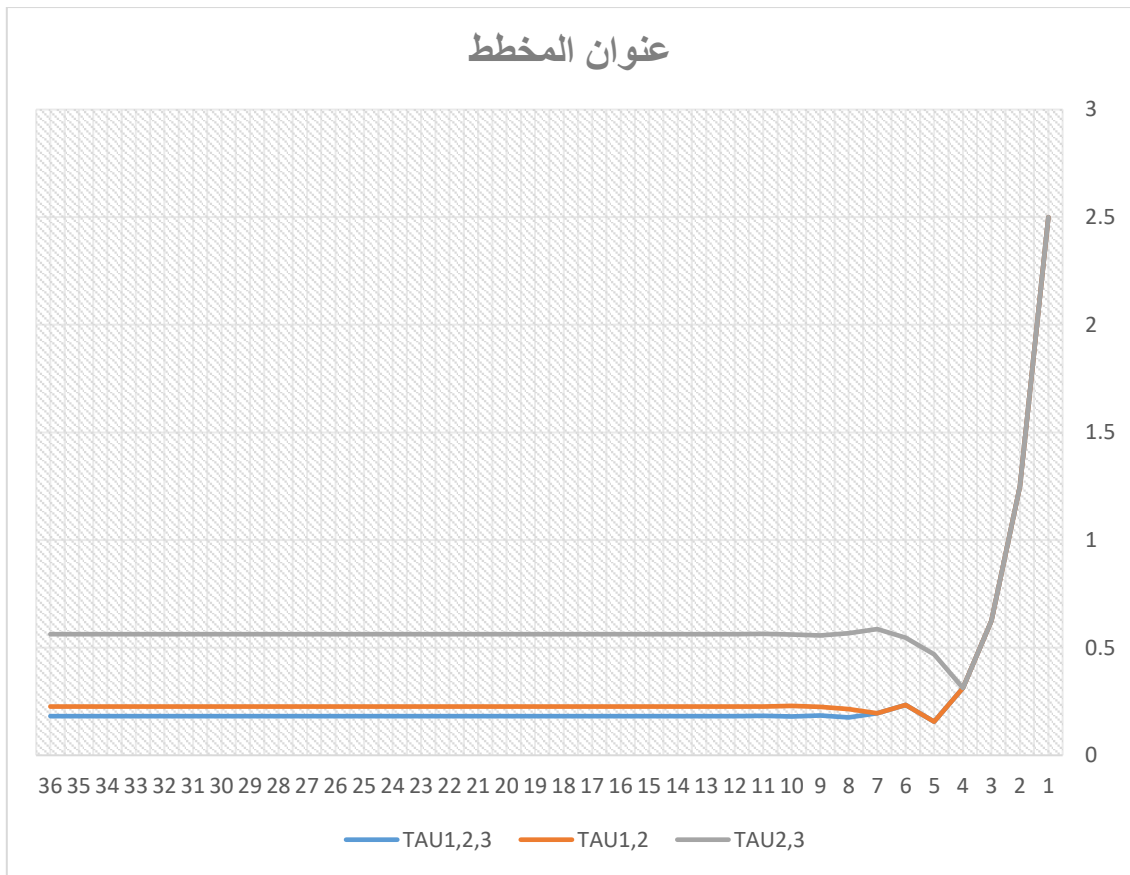
- يوضح الشكل (6-21) علاقة $\tau_{Stability}$ مع تكرار الخوارزمية، إذ إنه مع زيادة تكرار الخوارزمية يبدأ $\tau_{Stability}$ بالتناقص من أعلى قيمة (يمكن للمستخدم أن يحددها بناء على معرفته بالنظام المدروس) $2.5 S$ حتى يستقر عند القيمة المناسبة والتي تحافظ على أقطاب الحلقة المغلقة على يسار الساحة العقدية في فضاء لابلاس، وهي:

$$\tau_{Stability} = 0.182390103 S$$

$$\tau_{Stability12} = 0.226047573 S$$

$$\tau_{Stability23} = 0.5625935047 S$$

- نستنتج بأن $\tau_{Stability}$ يزداد مع انخفاض عدد البيانات التي يتم ترسلها عبر الشبكة، وهذا بدوره يؤثر على استقرار النظام الشبكي المستمر المدروس ويعطي مجال أكبر للنظام بأن يبقى مستقرًا على الرغم من وجود التأخير الزمني. إذ إنه بمقارنة النظام الشبكي المستمر المؤلف من ثلاث وحدات توليد (12 متغير حالة، لكل مولد 4 متغيرات حالة) مع النظام المؤلف من وحدتي توليد (8 متغيرات حالة) نجد أن $\tau_{Stability}$ بالنسبة لنظام المولدات الثلاث أقل منه بالنسبة لوحدتي التوليد.
- ليس بالضرورة أن تكون قيمة $\tau_{Stability}$ بالنسبة لوحدتي التوليد متقاربة، إذا لوحظ بأنه عند دراسة وحدتي التوليد الأولى والثانية $\tau_{Stability12}$ اختلفت القيمة كثيراً عند دراسة وحدتي التوليد الثانية والثالثة $\tau_{Stability23}$. وهذا يعود لبنية النظام الشبكي العام المؤلف من وحدتي التوليد بالإضافة إلى حجم البيانات التي ترسل عبر الشبكة.
- نلاحظ من خلال الشكل (6-21) بأن الخوارزمية المقترحة بإمكانها الوصول إلى مجال ضيق جداً للتأخير الزمني بعد الدور السابع، وتستمر بالتكرار من الدور السابع حتى النهاية لإيجاد أقرب رقم دقيق مؤلف من 9 خانات بعد الفاصلة يحدد القيمة المثالية التي تجعل النظام الشبكي المستمر مستقرًا.
- فعالية الخوارزمية المقترحة ودقتها في إيجاد قيمة $\tau_{Stability}$ مع اختلاف بنية النظام وحجمه.
- تمكن الخوارزمية المقترحة من معرفة $\tau_{Stability}$ للنظام الشبكي المستمر المدروس مهما اختلفت بنيته وعدد مداخله ومخارجة، ليتمكن من معرفة شروط الاستقرار للنظام، وبأن النظام يفقد استقراره عند تجاوز هذه القيمة بسبب وجود أحد أقطابه على يمين الساحة العقدية.



الشكل (6-21): علاقة $\tau_{Stability}$, $\tau_{Stability12}$, $\tau_{Stability23}$ مع تكرار الخوارزمية المقترحة

الفصل السابع

تصميم متحكم أمثل لمعالجة
تأثير التأخير الزمني غير المحدد في
نظم التحكم الشبكية المتقطعة

7.1 مقدمة:

يوصف النظام المتقطع الخطي غير المتجانس بالعلاقة (1-7) [198] حيث U إشارة الدخل للنظام أو إشارة التحكم:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad (1-7)$$

نريد أن نحدد قيمة المصفوفة K التي تحقق قانون التحكم الخطي بحيث يتم انقاص دالة الإنجاز الموصوفة بالعلاقة (2-7) [199]:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [x^*(k)Qx(k) + u^*(k)Ru(k)] \quad (2-7)$$

Q مصفوفة مربعة متناظرة موجبة التحديد (Pd) أو شبه موجبة التحديد (Ps_d)، والمصفوفة R موجبة التحديد. نريد أن نوجد إشارة التحكم التي تجعل النظام مستقراً بالشكل الأمثل أو أن نوجد المتحكم (مصفوفة التغذية الخلفية K) الذي يحقق أفضل استقرار للنظام بمفهوم ليبانوف، ويتم التحكم بهذا النوع من النظم حسب قانون التحكم المتقطع الخطي المعطى بالعلاقة (3-7) [199]:

$$K = (R + H^*PH)^{-1} H^*PG \quad (3-7)$$

يمكننا باستخدام بعض العمليات الحسابية، والاستفادة من العمليات على المصفوفات أن نتوصل إلى العلاقة التي نحسب منها P المثلى التي لاتباع K كما في العلاقة (4-7) [199]:

$$P = Q + G^*P(I + HR^{-1}H^*P)^{-1}G \quad (4-7)$$

7.2 قابلية التحكم (Controllability) في النظم المتقطعة:

نقول عن النظام المتقطع إنه تحكمي كامل في فضاء الحالة إذا تمكنا من نقل النظام من أي حالة ابتدائية إلى أي حالة أخرى. ومن ثم يكون النظام تحكمي إذا كان من الممكن التحكم بكل متغير حالة خلال زمن محدد بتطبيق إشارة تحكم غير مشروطة. بمعنى آخر فإن الدخل يجب أن يؤثر على كل متغير حالة في النظام. وإذا وجد متغير حالة لا يؤثر عليه فإن النظام غير قابل للتحكم بشكل كامل.

لمعرفة ان كان النظام الخطي المتقطع الموصوف بالعلاقة (1-7) تحكيمياً كاملاً في فضاء الحالة أم لا نحسب المصفوفة M وفق المعادلة (5-7) [198]:

$$M = [H: GH: G^2H: \dots \dots G^{n-1}H] \quad (5-7)$$

يجب أن تكون المصفوفة M نظامية non-singular ولاختيار ذلك هناك حالتان:

- إذا كانت المصفوفة M مربعة نحسب محدد المصفوفة M ، إذا كان محدد المصفوفة M غير مساوٍ للصفر $\det(M) \neq 0$ يكون النظام تحكيمياً كاملاً بالحالة.

- إذا كانت المصفوفة M غير مربعة وهذا يحدث إذا كان للمصفوفة H أكثر من عمود أي للنظام أكثر من دخل واحد، هنا يكون النظام تحكمياً كاملاً إذا كان $\text{rank}(M) = n$ حيث n عدد متغيرات الحالة.

7.3 نمذجة نظام التحكم الشبكي المتقطع والمؤلف من n نظاماً فرعياً مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين انظمته الفرعية:

انطلاقاً من العلاقة (5-13) التي تصف النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي المستمر المستقل باستخدام فضاء الحالة والتي نعيد كتابتها.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Fw(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned}$$

بوصف النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي المتقطع المستقل [200] وفق العلاقة (7-6)، إذ يتم تقطيع النظام المستمر الموصوف بالعلاقة (5-13) وفق طريقة ماسك المعطيات الصفري (ZOH: Zero-Order-Hold).

$$\begin{aligned} x((k+1)T) &= G(k)x(kT) + H(k)u(kT) + F(k)w(kT) \\ y(kT) &= C(k)x(kT) + D(k)u(kT) \end{aligned} \quad (6-7)$$

يعبر $x(k) \in R^n$ عن شعاع متغيرات الحالة للنظام المتقطع عند العينة k ، و $u(k) \in R^r$ شعاع التحكم، $w(k) \in R^l$ إشارة الضجيج الخارجية التي يمكن أن يتعرض لها النظام، $y(k) \in R^p$ خرج النظام و T زمن أخذ العينات. بينما أبعاد مصفوفات الحالة التي تصف نظام التحكم الشبكي المتقطع الموضح في العلاقة (7-6):

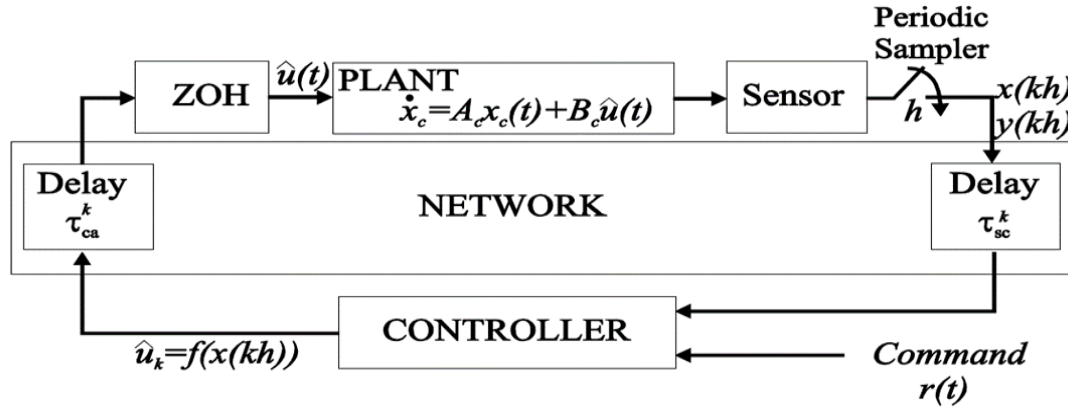
المصفوفة G مربعة أبعادها $[n \times n]$ ، المصفوفة H أبعادها $[n \times r]$ ، المصفوفة F أبعادها $[n \times l]$ ، المصفوفة C أبعادها $[p \times n]$ ، المصفوفة D أبعادها $[p \times r]$. حيث n درجة نظام التحكم الشبكي المتقطع، r عدد مداخل النظام، l الضجيج المطبق على النظام، p عدد مخارج النظام.

وتحسب المصفوفات $F(k), H(k), G(k)$ الموصوفة في العلاقة (7-6) وفق العلاقة (7-7) [200]:

$$G(k) = e^{AT}, H(k) = \int_0^T e^{At} B dt, F(k) = \int_0^T e^{At} F dt \quad (7-7)$$

يوضح الشكل (7-1) عناصر نظام التحكم الشبكي المتقطع المستقل. إذ تعطى إشارة التحكم المتقطع بالعلاقة (7-8) حيث تعبر K عن مصفوفة الربح الخلفي لمتحكم LQR و τ هي التأخير الزمني الإجمالي والمعطى في العلاقة (5-15).

$$\begin{aligned} U(k) &= -KX(kT - \tau) \\ \tau &= \tau_{sc} + \tau_c + \tau_{ca} + dT \end{aligned} \quad (8-7)$$



الشكل (1-7) وحدة تحكم شبكية متقطعة مستقلة مع أخذ التأخيرات الزمنية بالحسبان.

عندها يمكن استنتاج النموذج الرياضي لـ n نظام تحكم فرعي متقطع متصل مع بعضه البعض وفق علاقة خطية عبر شبكة اتصالات تحكمية وفق العلاقة (7-9):

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= G_{11}x_1(k) + H_1u_1(k) + \sum_{j=2}^n G_{1j}x_j(k) + F_1w_{(1)}(k) \\ x_2(k+1) &= G_{22}x_2(k) + H_2u_2(k) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n G_{2j}x_j(k) + F_2w_2(k) \\ x_n(k+1) &= G_{nn}x_n(k) + H_nu_n(k) + \sum_{j=1, j \neq n}^{n-1} G_{nj}x_j(k) + F_nw_n(k) \\ y_n(k) &= C_{nn}x_n(k) + D_nu_n(k) \end{aligned} \quad (9-7)$$

n عدد الأنظمة الفرعية المتصلة ضمن نظام التحكمي الشبكي المتقطع، و G_{ij} مصفوفة تعبر عن تأثير النظام الفرعي i بالنظام الفرعي j . وبما أن قانون التحكم مؤلف من المتحكم المحلي والإشرافي وفق العلاقة (7-10):

$$u_i = u_i^{local} + u_i^{supervisor} = -(K_{ii}x_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^n K_{ij}x_j(kT - \tau_{ji})) \quad (10-7)$$

بتعويض العلاقة (7-10) في العلاقة (7-9) نحصل على العلاقة (7-11):

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= G_{11}x_1(k) - H_1(K_{11}x_1(k) + \sum_{j=2}^n K_{1j}x_j(kT - \tau_{j1})) + \sum_{j=2}^n G_{1j}x_j(k) + F_1w_1(k) \\ x_2(k+1) &= G_{22}x_2(k) - H_2(K_{22}x_2(k) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n K_{2j}x_j(kT - \tau_{j2})) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n G_{2j}x_j(k) + F_2w_2(k) \\ x_n(k+1) &= G_{nn}x_n(k) - H_n(K_{nn}x_n(k) + \sum_{j=1, j \neq n}^n K_{nj}x_j(kT - \tau_{jn})) + \sum_{j=1, j \neq n}^n G_{nj}x_j(k) + F_nw_n(k) \\ y_n(k) &= C_{nn}x_n(k) + D_nu_n(k) \end{aligned} \quad (11-7)$$

نلاحظ من العلاقة (11-7) وجود التأخير الزمني غير المحدد ضمن التركيب الرياضي $x_j(kT - \tau_{jn})$ ، لذلك، طبقت العلاقة (12-7) ليتم عزله من التركيب الرياضي:

$$x(kT - \tau) = x(kT) - \tau x(k + 1) \quad (12 - 7)$$

وعند تطبيق العلاقة (12-7) في العلاقة (11-7) نحصل على العلاقة النهائية (13-7) التي تمثل النموذج الرياضي العام لأي نظام تحكم شبكي متقطع مؤلف من مجموعة من الأنظمة الفرعية تربط فيما بينها علاقة خطية مع وجود التأخيرات الزمنية بين عناصر الشبكة.

$$\begin{aligned} x_1(k + 1) &= (G_{11} - H_1 K_{11})x_1(k) + \sum_{j=2}^n (G_{1j} - H_1 K_{1j})x_j(k) + \sum_{j=2}^n \tau_{j1} H_1 K_{1j} x_j(k + 1) + F_1 w_1(k) \\ x_2(k + 1) &= (G_{22} - H_2 K_{22})x_2(k) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n (G_{2j} - H_2 K_{2j})x_j(k) + \sum_{j=1, j \neq 2}^n \tau_{j2} H_2 K_{2j} x_j(k + 1) + F_2 w_2(k) \\ x_n(k + 1) &= (G_{nn} - H_n K_{nn})x_n(k) + \sum_{j=1, j \neq n}^n (G_{nj} - H_n K_{nj})x_j(k) + \sum_{j=1, j \neq n}^n \tau_{jn} H_n K_{nj} x_j(k + 1) + F_n w_n(k) \\ y_n(k) &= C_{nn} x_n(k) + D_n u_n(k) \end{aligned} \quad (13 - 7)$$

7.4 تصميم المتحكم التربيعي الأمثل لنظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد:

دُرس في الفصل السادس تصميم متحكم LQR لمعالجة آثار التأخير الزمني غير المحدد في نظم التحكم الشبكية المستمرة، ومن ثم تخمين قيمة التأخير الزمني التي تبقى على النظام الشبكي المستمر بحالة استقرار $\tau_{Stability}$.

في هذا الفصل سندرس تصميم المتحكم التربيعي المتقطع الأمثل لمنظومة القدرة الكهربائية المؤلفة من ثلاث مجموعات توليد والتي دُرست ضمن الفصل الخامس مع توضيح آثار التأخير الزمني غير المحدد بين مجموعات التوليد الثلاث. بعد ذلك سنصمم المتحكم التربيعي المتقطع الأمثل لمجموعتي التوليد الأولى مع الثانية وكذلك الأمر بالنسبة لمجموعتي التوليد الثانية مع الثالثة، وندرس تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار النظام الشبكي المتقطع الجديد وتخمين $\tau_{DStability}$ بغية ملاحظة تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين النظام الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مولدات والنظام المتقطع المؤلف من مولدين، والاختلاف في قيمة $\tau_{DStability}$ بين النظامين.

انطلاقاً من العلاقة (13-7) التي تصف نظام التحكم الشبكي المتقطع لمنظومة الطاقة الكهربائية المؤلف من n نظاماً فرعياً، وبتعويض مجموعات التوليد المدروسة الثلاث ($n=3$) نحصل على العلاقة (14-7) التي تصف نظام التحكم الشبكي المتقطع لمجموعات التوليد الثلاث مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد، مع إضافة ضجيج بقيمة 5% لمجموعة التوليد الأولى فقط.

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= (G_{11} - H_1 K_{11})x_1(k) + (G_{12} - H_1 K_{12})x_2(k) + (G_{13} - H_1 K_{13})x_3(k) \\
 &\quad + \tau_{21} H_1 K_{12} x_2(k+1) + \tau_{31} H_1 K_{13} x_3(k+1) + F_1 w_1(k) \\
 x_2(k+1) &= (G_{21} - H_2 K_{21})x_1(k) + (G_{22} - H_2 K_{22})x_2(k) + (G_{23} - H_2 K_{23})x_3(k) \\
 &\quad + \tau_{12} H_2 K_{21} x_1(k+1) + \tau_{13} H_2 K_{23} x_3(k+1) + F_2 w_2(k) \\
 x_3(k+1) &= (G_{31} - H_3 K_{31})x_1(k) + (G_{32} - H_3 K_{32})x_2(k) + (G_{33} - H_3 K_{33})x_3(k) \\
 &\quad + \tau_{13} H_3 K_{31} x_1(k+1) + \tau_{23} H_3 K_{32} x_2(k+1) + F_3 w_3(k)
 \end{aligned} \quad (14-7)$$

يوضح الشكل (2-7) دارة MATLAB/SIMULINK لنظام التحكم الشبكي المتقطع الموصوف بالعلاقة (14-7) مع إدخال تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين أنظمتها الفرعية الثلاث.

لتصميم المتحكم التريبيعي المتقطع الأمثل لنظام التحكم الشبكي المتقطع الموصوف بالعلاقة (14-7) نتبع خطوات التصميم التالية:

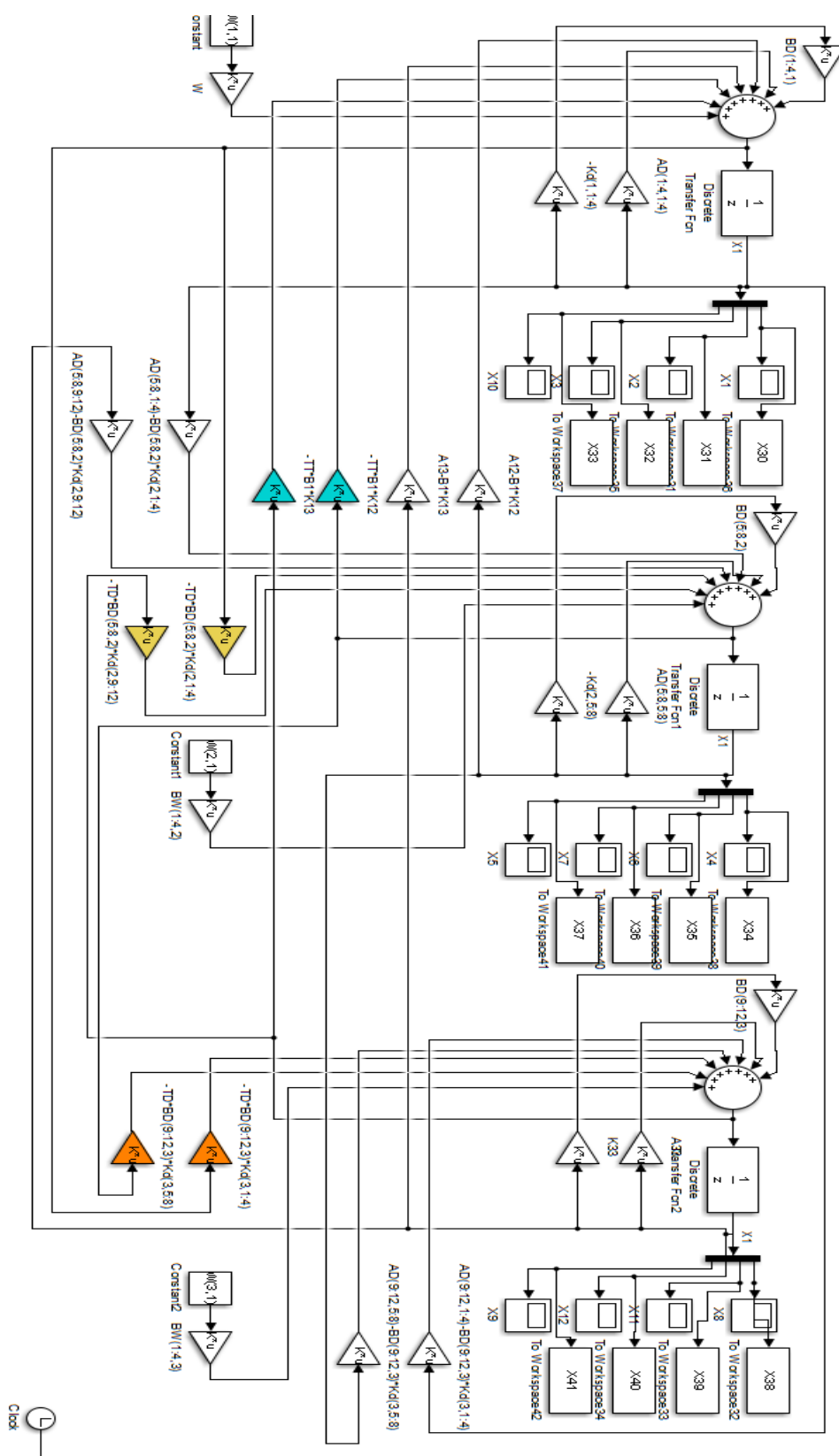
- ✓ التأكد من أن نظام التحكم الشبكي المتقطع قابل للتحكم الكامل في فضاء الحالة وفق العلاقة (5-7).
- ✓ اختيار مصفوفات التوزين للمتحكم LQR.
- ✓ حساب قيمة المصفوفة P وفق العلاقة (4-7) والتأكد من أنها موجبة التحديد.
- ✓ حساب قيمة عناصر الربح الخلفي K وفق العلاقة (3-7).

نحسب المصفوفة M من العلاقة (5-7). وبما أن نظام التحكم الشبكي المتقطع عبارة عن نظام شبكي مؤلف من ثلاث مجموعات توليد، إذاً فهو يتألف من ثلاثة مداخل وعندها فإن أبعاد المصفوفة H هي 12×3 . بما أن للنظام أكثر من مدخل فإن المصفوفة M غير مربعة. وبالنسبة $\text{rank}(M) = n = 12$ إذاً نظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد تحكمي كامل في فضاء الحالة ويمكن تصميم متحكم LQR.

عند تطبيق المتحكم LQR على نظام التحكم الشبكي المتقطع نختار قيمة Q (12×12) و R (3×3) بحيث تكون مصفوفات مربعة متناظرة موجبة التحديد أو شبه موجبة التحديد:

$$Q = \begin{bmatrix} 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 \end{bmatrix}$$



الشكل (7-2): نمذجة منظومة التحكم الشبكية المتقطعة لمجموعات التوليد الثلاث

بعد حساب قيمة المصفوفة P من العلاقة (4-7)، نضع ضمن الجدول (1-7) قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P ، والتي يجب أن تكون جميع محدداته الخاصة أكبر من الصفر حتى يكون النظام المتقطع مستقرًا ويمكن أمثلته.

$P1=625.63$	$P2=9.83e+08$	$P3=3.17e+11$	$P4=1.45e+10$	$P5=3.59e+12$	$P6=7.47e+17$
$P7=1.37e+20$	$P8=7.07e+18$	$P9=1.15e+22$	$P10=8.31e+28$	$P11=1.21e+31$	$P12=6.3e+29$

الجدول (1-7): قيم المحددات الخاصة بالمصفوفة P لثلاث مجموعات توليد شبكية متقطعة

بعد حساب قيمة P نطبق العلاقة (3-7) لإيجاد عناصر المصفوفة K فتكون أرباح المتحكم LQR المتقطع:

$$\begin{aligned} K_{11} &= [-0.0184 \quad 1.1858 \quad 0.1100 \quad 0.0050] \\ K_{12} &= [0.1090 \quad -4.5672 \quad 5.7313e-04 \quad -6.5750e-05] \\ K_{13} &= [0.0444 \quad -11.2420 \quad 0.0142 \quad 6.3360e-04] \\ K_{21} &= [-0.0062 \quad -0.0121 \quad -0.0051 \quad -9.9900e-05] \\ K_{22} &= [0.0363 \quad 0.8007 \quad 0.0724 \quad 0.0034] \\ K_{23} &= [0.0243 \quad 0.1466 \quad -0.0036 \quad -1.2202e-04] \\ K_{31} &= [-0.0034 \quad -0.4856 \quad 0.0198 \quad 8.0088e-04] \\ K_{32} &= [-0.0059 \quad -1.5369 \quad -0.0022 \quad -1.2761e-04] \\ K_{33} &= [0.0657 \quad -7.0021 \quad 0.0675 \quad 0.0032] \end{aligned}$$

وعند حل المعادلة (3-7) نحصل على إشارات التحكم $u_1(k), u_2(k), u_3(k)$ وفق العلاقة (7-15) للتغذية العكسية الناتجة من الأنظمة الفرعية الثلاث المكونة لنظام التحكم الشبكي المتقطع وفق العلاقة (7-8) والتي من الممكن أن تتغير حسب القيم المختارة للمصفوفات R و Q وتساوي:

$$\begin{aligned} u_1(k) &= 0.0184\Delta\omega_1(kT - \tau) - 1.1858\Delta\delta_1(kT - \tau) - 0.1100\Delta e_{q_1}(kT - \tau) \\ &\quad - 0.0050\Delta e_{FD_1}(kT - \tau) - 0.1090\Delta\omega_2(kT - \tau) + 4.5672\Delta\delta_2(kT - \tau) \\ &\quad - 5.7313e-04\Delta e_{q_2}(kT - \tau) + 6.5750e-05\Delta e_{FD_2}(kT - \tau) \\ &\quad - 0.0444\Delta\omega_3(kT - \tau) + 11.2420\Delta\delta_3(kT - \tau) - 0.0142\Delta e_{q_3}(kT - \tau) \\ &\quad - 6.3360e0 - 4\Delta e_{FD_3}(kT - \tau) \\ u_2(k) &= 0.0062\Delta\omega_1(kT - \tau) + 0.0121\Delta\delta_1(kT - \tau) + 0.0051\Delta e_{q_1}(kT - \tau) + 9.990e \\ &\quad - 05\Delta e_{FD_1}(kT - \tau) - 0.0363\Delta\omega_2(kT - \tau) - 0.8007\Delta\delta_2(kT - \tau) \\ &\quad - 0.0724\Delta e_{q_2}(kT - \tau) - 0.0034\Delta e_{FD_2}(kT - \tau) - 0.0243\Delta\omega_3(kT - \tau) \\ &\quad - 0.1466\Delta\delta_3(kT - \tau) + 0.0036\Delta e_{q_3}(kT - \tau) + 1.2202e \\ &\quad - 04\Delta e_{FD_3}(kT - \tau) \\ u_3(k) &= 0.0034\Delta\omega_1(kT - \tau) + 0.4856\Delta\delta_1(kT - \tau) - 0.0198\Delta e_{q_1}(kT - \tau) - 8.0088e \\ &\quad - 04\Delta e_{FD_1}(kT - \tau) + 0.0059\Delta\omega_2(kT - \tau) + 1.5369\Delta\delta_2(kT - \tau) \\ &\quad + 0.0022\Delta e_{q_2}(kT - \tau) + 1.2761e - 04\Delta e_{FD_2}(kT - \tau) \\ &\quad - 0.0657\Delta\omega_3(kT - \tau) + 7.0021\Delta\delta_3(kT - \tau) - 0.0675\Delta e_{q_3}(kT - \tau) \\ &\quad - 0.0032\Delta e_{FD_3}(kT - \tau) \quad (15 - 7) \end{aligned}$$

7.5 دراسة استقرار نظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد:

يمثل الجدول (7-2) قيم جذور المعادلة المميزة والقيمة المطلقة لنظام حلقة التحكم المفتوحة والمغلقة باستخدام المتحكم LQR. نلاحظ بأن بعض قيم القسم الحقيقي لجذور النظام في الحلقة المفتوحة موجبة وبالتالي تقع على يمين الساحة العقدية في فضاء لابلاس S ويكون بذلك نظام التحكم الشبكي المستمر غير مستقر. كما أن القيم المطلقة لجذور المعادلة المميزة في الحلقة المفتوحة أكبر تماماً من الواحد، ويكون بذلك نظام التحكم الشبكي المتقطع غير مستقر لأن القيم المطلقة لجذور المعادلة المميزة في الحلقة المفتوحة تقع خارج الدائرة الواحدة في الفضاء Z. بينما نستنتج بأن القيمة المطلقة لجذور النظام في الحلقة المغلقة تقع كلها داخل الدائرة الواحدة في الفضاء Z (أصغر تماماً من الواحد) وبالتالي فإن النظام الشبكي المتقطع مستقر باستخدام المتحكم LQR.

OPEN LOOP		CLOSE LOOP	
Eigenvalues	ABS	Eigenvalues	ABS
-18.9067 + 0.0000i	18.9067	0.8328 + 0.0000i	0.8328
-17.0247 + 0.0000i	17.0247	0.8500 + 0.0000i	0.8500
-14.7709 + 0.0000i	14.7709	0.8718 + 0.0000i	0.8718
0.3238 + 8.0203i	8.0268	0.9136 + 0.0000i	0.9136
0.3238 - 8.0203i	8.0268	0.9908 + 0.0795i	0.9939
-0.1555 + 7.2387i	7.2404	0.9908 - 0.0795i	0.9939
-0.1555 - 7.2387i	7.2404	0.9951 + 0.0731i	0.9977
-7.1255 + 0.0000i	7.1255	0.9951 - 0.0731i	0.9977
0.4544 + 4.2083i	4.2328	0.9926 + 0.0426i	0.9935
0.4544 - 4.2083i	4.2328	0.9926 - 0.0426i	0.9935
-3.3831 + 0.0000i	3.3831	0.9429 + 0.0000i	0.9429
-1.3876 + 0.0000i	1.3876	0.9455 + 0.0000i	0.9455

الجدول (7-2): جذور المعادلة المميزة لنظام التحكم الشبكي المتقطع

7.6 الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau_{DStability}$ في نظم التحكم الشبكية المتقطعة:

بعد تقطيع المعادلات التفاضلية التي تصف نظام التحكم الشبكي المستمر (المؤلف من ثلاث وحدات توليد مع وجود التأخير الزمني) الموصوف بالعلاقة (6-21) باستخدام العلاقة (7-7) نحصل على العلاقة (7-16):

$$x_1(k+1) = (G_{11} - H_1 K_{11})x_1(k) + G_{12}x_2(k) + G_{13}x_3(k) - H_1 K_{12}x_2(kT - \tau) - H_1 K_{13}x_3(kT - \tau)$$

$$\begin{aligned}
 x_2(k+1) &= G_{21}x_1(k) + (G_{22} - H_2K_{22})x_2(k) \\
 &\quad + G_{23}x_3(k) - H_2K_{21}x_1(kT - \tau) - H_2K_{23}x_3(kT - \tau) \\
 x_3(k+1) &= G_{31}x_1(k) + G_{32}x_2(k) + (G_{33} \\
 &\quad - H_3K_{33})x_3(k) - H_3K_{31}x_1(kT - \tau) - H_3K_{32}x_2(kT - \tau) \quad (16-7)
 \end{aligned}$$

عندها يمكن إعادة كتابة المعادلات السابقة بالشكل المصفوفي وفق العلاقة (17-7):

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G_{11} - H_1K_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} - H_2K_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} - H_3K_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} \\
 &\quad + \begin{bmatrix} 0 & -H_1K_{12} & -H_1K_{13} \\ -H_2K_{21} & 0 & -H_2K_{23} \\ -H_3K_{31} & -H_3K_{32} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(kT - \tau) \\ x_2(kT - \tau) \\ x_3(kT - \tau) \end{bmatrix} \quad (17-7)
 \end{aligned}$$

وتكتب العلاقة (17-7) بشكلها العام (18-7):

$$x(k+1) = A_{DM}x(k) + B_{DM}x(kT - \tau) \quad (18-7)$$

ولإيجاد $\tau_{DStability}$ من العلاقة (18-7) المتضمنة التركيب الرياضي $x(kT - \tau)$ ، نطبق العلاقة (19-7):

$$x(kT - \tau) = x(kT) - \tau x(k+1) \quad (19-7)$$

بتعويض العلاقة (19-7) بالعلاقة (18-7) نحصل على العلاقة (20-7):

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= A_{DM}x(k) + B_{DM}x(k) - \tau B_{DM}x(kT - \tau) \\
 x(k+1)(1 + \tau B_{DM}) &= (A_{DM} + B_{DM})x(k) \\
 x(k+1) &\cong \frac{A_{DM} + B_{DM}}{1 + \tau B_{DM}} x(k) \quad (20-7) \\
 x(k+1) &\cong \phi_D(k)x(k)
 \end{aligned}$$

ويمكن كتابة المصفوفة $\phi_D(k)$ ذات الأبعاد 12×12 وفق العلاقة (21-7):

$$\begin{aligned}
 \phi_D(k) &= \frac{\begin{bmatrix} G_{11} - H_1K_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} - H_2K_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} - H_3K_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -H_1K_{12} & -H_1K_{13} \\ -H_2K_{21} & 0 & -H_2K_{23} \\ -H_3K_{31} & -H_3K_{32} & 0 \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -H_1K_{12} & -H_1K_{13} \\ -H_2K_{21} & 0 & -H_2K_{23} \\ -H_3K_{31} & -H_3K_{32} & 0 \end{bmatrix}} \\
 \phi_D(k) &= \frac{\begin{bmatrix} G_{11} - H_1K_{11} & G_{12} - H_1K_{12} & G_{13} - H_1K_{13} \\ G_{21} - H_2K_{21} & G_{22} - H_2K_{22} & G_{23} - H_2K_{23} \\ G_{31} - H_3K_{31} & G_{32} - H_3K_{32} & G_{33} - H_3K_{33} \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -H_1K_{12} & -H_1K_{13} \\ -H_2K_{21} & 0 & -H_2K_{23} \\ -H_3K_{31} & -H_3K_{32} & 0 \end{bmatrix}} \quad (21-7)
 \end{aligned}$$

نستنتج من العلاقة (21-7) بأن نظام التحكم الشبكي المتقطع (المؤلف من ثلاث وحدات توليد) يعتبر مستقراً على نطاق واسع باستخدام المتحكم الأمثل LQR مع أخذ التأخير الزمني غير المحدد بعين الاعتبار إذا كانت القيم المطلقة لأقطاب الحلقة المغلقة للنظام الشبكي المتقطع مع المتحكم تقع داخل الدائرة الواحدة في الفضاء Z (أي أصغر تماماً من الواحد). وفي حال وجود قطب واحد على الأقل يقع خارج الدائرة الواحدة يكون النظام المتقطع غير مستقر، وعند وجود قطب واحد يقع على محيط الدائرة الواحدة يكون النظام المتقطع مستقراً استقراراً حرجياً.

$$\text{if } \text{abs}(\lambda_i(\Phi_D(k))) < 1, \text{ for } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

أو يمكن القول بأن نظام التحكم الشبكي المتقطع يعتبر مستقراً على نطاق واسع إذا كان التأخير الزمني غير المحدد يحقق المتراجحة (22-7):

$$0 < \tau < \tau_{DStability} \quad (22 - 7)$$

إذ إن $\tau_{DStability}$ تعبر عن قيمة التأخير الزمني التي تبقى على النظام الشبكي المتقطع بحالة استقرار. عندها يمكن كتابة هذه النظرية بشكلها العام لنظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من n نظاماً فرعياً بالعلاقة (23-7):

$$\begin{bmatrix} x_{(1)}(k+1) \\ x_{(2)}(k+1) \\ x_{(3)}(k+1) \\ * \\ * \\ * \\ x_{(n)}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} - H_1 K_{11} & G_{12} & G_{13} & * & * & * & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} - H_2 K_{22} & G_{23} & * & * & * & G_{2n} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} - H_3 K_{33} & * & * & * & G_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & * & * & * & G_{nn} - H_n K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{(1)}(k) \\ x_{(2)}(k) \\ x_{(3)}(k) \\ * \\ * \\ * \\ x_{(n)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -H_1 K_{12} & -H_1 K_{13} & * & * & * & -H_1 K_{1n} \\ -H_2 K_{21} & 0 & -H_2 K_{23} & * & * & * & -H_2 K_{2n} \\ -H_3 K_{31} & -H_3 K_{32} & 0 & * & * & * & -H_3 K_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ -H_n K_{n1} & -H_n K_{n2} & -H_n K_{n3} & * & * & * & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{(1)}(kT - \tau) \\ x_{(2)}(kT - \tau) \\ x_{(3)}(kT - \tau) \\ * \\ * \\ * \\ x_{(n)}(kT - \tau) \end{bmatrix} \quad (23 - 7)$$

وتكتب العلاقة (23-7) بشكلها العام (24-7):

$$x(k+1) = A_{DTOT}x(k) + B_{DTOT}x(kT - \tau) \quad (24 - 7)$$

بتعويض العلاقة (7-19) بالعلاقة (7-24) نحصل على العلاقة (7-25):

$$x(k+1) \cong \frac{A_{DTOT} + B_{DTOT}}{1 + \tau B_{DTOT}} x(k) \quad (25-7)$$

$$x(k+1) \cong \Phi_{DTOT}(k)x(k)$$

ويمكن كتابة المصفوفة $\Phi_{DTOT}(k)$ ذات الابعاد 12×12 وفق العلاقة (7-26):

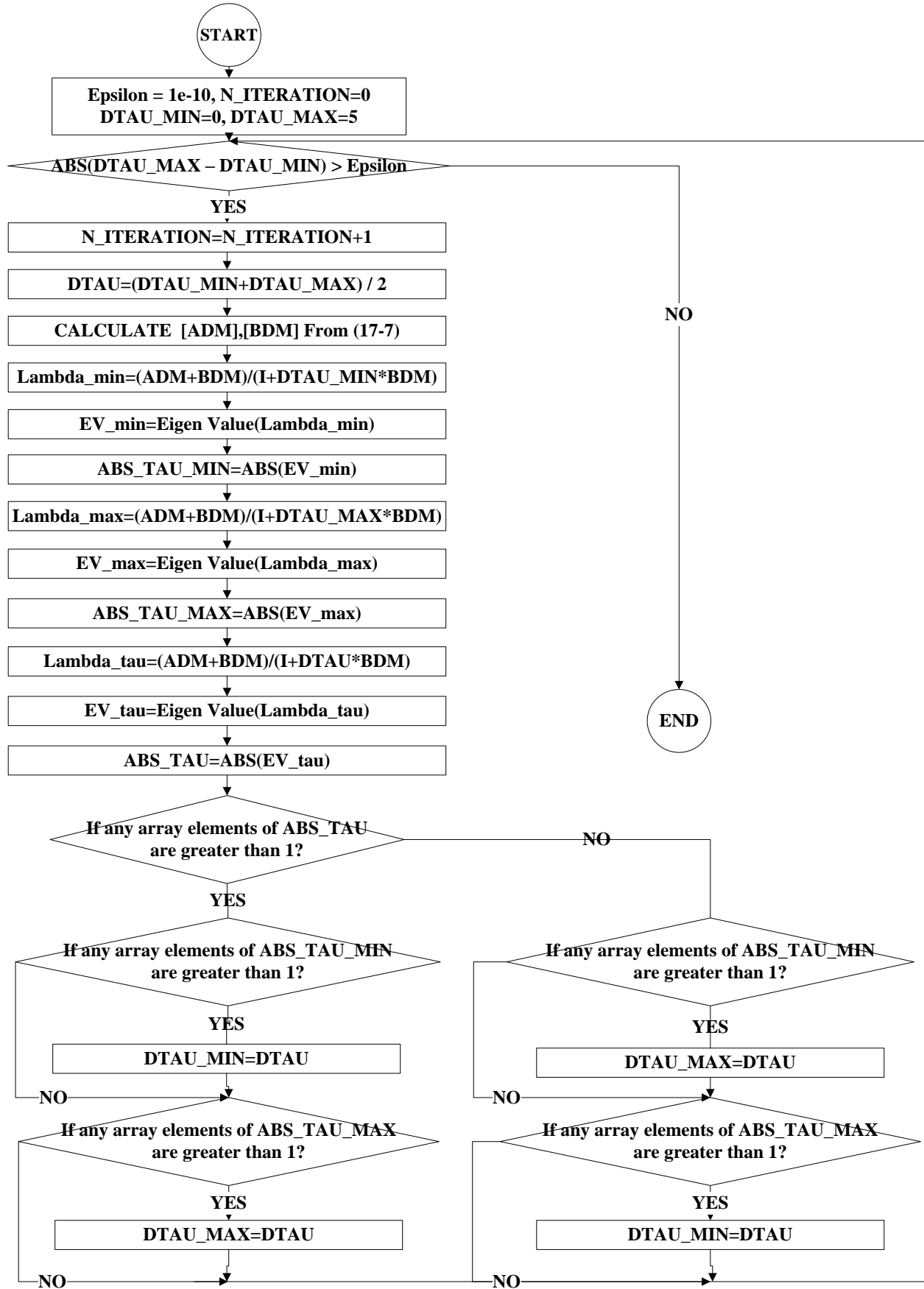
$$\Phi_{DTOT}(k) = \frac{\begin{bmatrix} G_{11} - H_1 K_{11} & G_{12} - H_1 K_{12} & G_{13} - H_1 K_{13} & * & * & * & G_{1n} - H_1 K_{1n} \\ G_{21} - H_2 K_{21} & G_{22} - H_2 K_{22} & G_{23} - H_2 K_{23} & * & * & * & G_{2n} - H_2 K_{2n} \\ G_{31} - H_3 K_{31} & G_{32} - H_3 K_{32} & G_{33} - H_3 K_{33} & * & * & * & G_{3n} - H_3 K_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ G_{n1} - H_n K_{n1} & G_{n2} - H_n K_{n2} & G_{n3} - H_n K_{n3} & * & * & * & G_{nn} - H_n K_{nn} \end{bmatrix}}{1 + \tau \begin{bmatrix} 0 & -H_1 K_{12} & -H_1 K_{13} & * & * & * & -H_1 K_{1n} \\ -H_2 K_{21} & 0 & -H_2 K_{23} & * & * & * & -H_2 K_{2n} \\ -H_3 K_{31} & -H_3 K_{32} & 0 & * & * & * & -H_3 K_{3n} \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ * & * & * & * & * & * & * \\ -H_n K_{n1} & -H_n K_{n2} & -H_n K_{n3} & * & * & * & 0 \end{bmatrix}} \quad (26-7)$$

نستنتج من العلاقة (7-26) بأن نظام التحكم الشبكي المتقطع بشكله العام (المؤلف من عدد n من وحدات التوليد) يعتبر مستقراً على نطاق واسع باستخدام المتحكم الأمثل LQR مع أخذ التأخير الزمني غير المحدد بعين الاعتبار إذا كانت القيم المطلقة لكافة أقطاب الحلقة المغلقة للنظام الشبكي المتقطع مع المتحكم تقع داخل الدائرة الواحدة في الفضاء Z (أي أصغر تماماً من الواحد).

$$if \ abs(\lambda_i(\Phi_{DTOT}(k))) < 1, for \ i = 1, 2, 3, \dots, n$$

أو يمكن القول بأن نظام التحكم الشبكي الاجمالي المتقطع يعتبر مستقراً على نطاق واسع إذا كان مجال التأخير الزمني $[0 - \tau_{DStability}]$.

ولحساب قيمة $\tau_{DStability}$ في نظام التحكم الشبكي المتقطع بشكله العام وفق العلاقة (7-24) نطبق الخوارزمية المقترحة الموضحة في الشكل (7-3)



الشكل (3-7): الخوارزمية المقترحة من قبل الباحث لتخمين $\tau_{DStability}$.

خطوات تنفيذ الخوارزمية المقترحة:

- A. بداية الخوارزمية START.
- B. نفترض القيم البدائية التالية وهي: $Epsilon=1e-10$ ✓ وهي أصغر قيمة يمكن أن تظهر للحد $\tau_{DStability}$ ، كما أنها تحدد دقة النتيجة (عدد خانات النتيجة).
- ✓ N-iteration=0: تعبر عن عدد مرات التكرار للوصول إلى القيمة المناسبة لـ $\tau_{DStability}$ والتي تحقق الشرط: $if abs(\lambda_i(\Phi_D(k))) < 1, for i = 1,2,3, \dots, n$
- ✓ DTAU_MIN=0: تعبر عن المجال الأصغري لـ $\tau_{DStability}$.
- ✓ DTAU_MAX=5: تعبر عن المجال الأعظمي لـ $\tau_{DStability}$.
- C. حساب القيمة المطلقة $ABS(DTAU_MAX - DTAU_MIN) > Epsilon$
- D. زيادة التكرار بمقدار واحد $N\text{-iteration} = N\text{-iteration} + 1$
- E. حساب المجال المتوسط لـ $\tau_{DStability}$ $DTAU = (DTAU_MIN + DTAU_MAX) / 2$
- F. حساب قيمة المصفوفات المتقطعة ADM, BDM الناتجة من العلاقة (7-17)
- G. إيجاد القيمة المطلقة لأقطاب الحلقة المغلقة (Eigenvalues) لنظام التحكم المتقطع من أجل المجال الأصغري لـ $\tau_{DStability}$ من خلال الأوامر التالية:
$$\begin{aligned} \text{Lambda_min} &= (ADM + BDM) / (I + DTAU_MIN * BDM) \\ \text{EV_min} &= \text{EigenValue}(\text{Lambda_min}) \\ \text{ABS_TAU_MIN} &= \text{ABS}(\text{EV_min}) \end{aligned}$$
- H. إيجاد القيمة المطلقة لأقطاب الحلقة المغلقة (Eigenvalues) لنظام التحكم المتقطع من أجل المجال الأعظمي لـ $\tau_{DStability}$ من خلال الأوامر التالية:
$$\begin{aligned} \text{Lambda_max} &= (ADM + BDM) / (I + DTAU_MAX * BDM) \\ \text{EV_max} &= \text{EigenValue}(\text{Lambda_max}) \\ \text{ABS_TAU_MAX} &= \text{ABS}(\text{EV_max}) \end{aligned}$$
- I. إيجاد القيمة المطلقة لأقطاب الحلقة المغلقة (Eigenvalues) لنظام التحكم المتقطع من أجل المجال المتوسط لـ $\tau_{DStability}$ من خلال الأوامر التالية:
$$\begin{aligned} \text{Lambda_tau} &= (ADM + BDM) / (I + DTAU * BDM) \\ \text{EV_tau} &= \text{EigenValue}(\text{Lambda_tau}) \\ \text{ABS_TAU} &= \text{ABS}(\text{EV_tau}) \end{aligned}$$

- J. إذا كان أي عنصر من عناصر القيمة المطلقة للقيم الذاتية من أجل المجال المتوسط (ABS_TAU) $\tau_{DStability}$ أكبر تماماً من الواحد (Positive) اذهب إلى الخطوة K وإذا كان أصغر أو يساوي الواحد (Negative) اذهب إلى الخطوة M.
- K. إذا كان أي عنصر من عناصر القيمة المطلقة للقيم الذاتية من أجل المجال الأصغري (ABS_TAU_MIN) $\tau_{DStability}$ أكبر تماماً من الواحد (Positive) يتم إسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأصغري $DTAU_MIN = DTAU$.
- L. إذا كان أي عنصر من عناصر القيمة المطلقة للقيم الذاتية من أجل المجال الأعظمي (ABS_TAU_MAX) $\tau_{DStability}$ أكبر تماماً من الواحد (Positive) يتم إسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأعظمي $DTAU_MAX = DTAU$ ثم انتقل إلى الخطوة C.
- M. إذا كان أي عنصر من عناصر القيمة المطلقة للقيم الذاتية من أجل المجال الأصغري (ABS_TAU_MIN) $\tau_{DStability}$ أكبر تماماً من الواحد (Positive) يتم إسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأعظمي $DTAU_MAX = DTAU$.
- N. إذا كان أي عنصر من عناصر القيمة المطلقة للقيم الذاتية من أجل المجال الأعظمي (ABS_TAU_MAX) $\tau_{DStability}$ أكبر تماماً من الواحد (Positive) يتم إسناد قيمة المجال المتوسط للمجال الأصغري $DTAU_MIN = DTAU$ ثم انتقل إلى الخطوة C.
- O. نهاية الخوارزمية END.

بينما يوضح الجدول (3-7) نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة:

N	DTAU_MIN	DTAU	DTAU_MAX	ABS_TAU_MIN	ABS_TAU	ABS_TAU_MAX
1	0.000000000	2.500000000	5.000000000	Negative	Positive	Positive
2	0.000000000	1.250000000	2.500000000	Negative	Positive	Positive
3	0.000000000	0.625000000	1.250000000	Negative	Negative	Positive
4	0.625000000	0.937500000	1.250000000	Negative	Positive	Positive
5	0.625000000	0.781250000	0.937500000	Negative	Positive	Positive
6	0.625000000	0.703125000	0.781250000	Negative	Negative	Positive
7	0.703125000	0.742187500	0.781250000	Negative	Negative	Positive
8	0.742187500	0.761718750	0.781250000	Negative	Negative	Positive
9	0.761718750	0.771484375	0.781250000	Negative	Negative	Positive
10	0.771484375	0.776367188	0.781250000	Negative	Positive	Positive
11	0.771484375	0.773925781	0.776367188	Negative	Positive	Positive
12	0.771484375	0.772705078	0.773925781	Negative	Positive	Positive
13	0.771484375	0.772094727	0.772705078	Negative	Positive	Positive
14	0.771484375	0.771789551	0.772094727	Negative	Positive	Positive
15	0.771484375	0.771636963	0.771789551	Negative	Positive	Positive
16	0.771484375	0.771560669	0.771636963	Negative	Positive	Positive
17	0.771484375	0.771522522	0.771560669	Negative	Negative	Positive
18	0.771522522	0.771541595	0.771560669	Negative	Positive	Positive
19	0.771522522	0.771532059	0.771541595	Negative	Positive	Positive
20	0.771522522	0.771527290	0.771532059	Negative	Positive	Positive
21	0.771522522	0.771524906	0.771527290	Negative	Positive	Positive
22	0.771522522	0.771523714	0.771524906	Negative	Positive	Positive
23	0.771522522	0.771523118	0.771523714	Negative	Positive	Positive
24	0.771522522	0.771522820	0.771523118	Negative	Positive	Positive
25	0.771522522	0.771522671	0.771522820	Negative	Positive	Positive
26	0.771522522	0.771522596	0.771522671	Negative	Negative	Positive
27	0.771522596	0.771522634	0.771522671	Negative	Negative	Positive
28	0.771522634	0.771522652	0.771522671	Negative	Negative	Positive
29	0.771522652	0.771522662	0.771522671	Negative	Negative	Positive
30	0.771522662	0.771522666	0.771522671	Negative	Positive	Positive
31	0.771522662	0.771522664	0.771522666	Negative	Negative	Positive
32	0.771522664	0.771522665	0.771522666	Negative	Positive	Positive
33	0.771522664	0.771522665	0.771522665	Negative	Positive	Positive
34	0.771522664	0.771522664	0.771522665	Negative	Positive	Positive
35	0.771522664	0.771522664	0.771522664	Negative	Negative	Positive
36	0.771522664	0.771522664	0.771522664	Negative	Positive	Positive

الجدول (3-7): نتائج تنفيذ الخوارزمية المقترحة على نظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث مجموعات توليد

إذاً وباستخدام الخوارزمية المقترحة حصلنا على الحد $\tau_{DStability}$ لنظام التحكم الشبكي المتقطع المؤلف من ثلاث وحدات توليد بقيمة مقدارها 0.771522664 بعد تكرار 36 خطوة وبدقة كبيرة مقدارها 9 خانات بعد الفاصلة.

ولضمان استقرار نظام التحكم الشبكي المتقطع عند أكبر حد ممكن للتأخير الزمني غير المحدد، يتم أخذ البارامترات الإضافية المشكلة لسلسلة تايلور بعين الاعتبار في تخمين $\tau_{DStability}$ ، وإعادة تطبيق الخوارزمية المقترحة على البارامترات الجديدة لنحصل على الجدول (4-7).

$R_N(x, \tau)$	$\tau_{DStability}[\text{Sec}]$
$N = 1$	0.771522664
$N = 3$	1.206765453
$N = 5$	1.433610917
$N = 7$	1.474243558
$N = 9$	1.476266043

الجدول (4-7): قيمة $\tau_{DStability}$ مع الحدود المضافة من سلسلة تايلور لنظام التحكم الشبكي المتقطع.

ويتضح من الجدول (4-7) مايلي:

4. وجود زيادة ملحوظة في قيمة $\tau_{DStability}$ عند أخذ حدود إضافية من التأخير الزمني غير المحدد من سلسلة تايلور بعين الاعتبار وعدم تجاهلها.
 5. تزداد قيمة $\tau_{DStability}$ عند $N = 3$ بشكل ملحوظ عن قيمتها عند $N = 1$ ، بينما عند $N > 5$ تصبح الزيادة صغيرة جداً. ولكن مع ذلك يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار، لأن هنالك العديد من الأنظمة التحكمية الحساسة جداً لتأثير تغيرات التأخير الزمني غير المحدد على استقرارها.
 6. تحافظ $\tau_{DStability}$ على قيمتها تقريباً عند $N \geq 7$ ، وذلك لأن إضافة بارامترات جديدة من سلسلة تايلور متعلقة بالتأخير الزمني لن تؤثر على قيمة $\tau_{DStability}$. وذلك لأن الحدود المضافة أصبحت صغيرة بما فيه الكفاية.
- ويوضح الجدول (5-7) توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المتقطع مع الأخذ بعين الاعتبار قيم متعددة للتأخير الزمني غير المحدد الإجمالي المفروضة على نظام التحكم الشبكي المتقطع، بينما يوضح الجدول (6-7) القيمة المطلقة للقيم الذاتية لأقطاب الحلقة المغلقة.

λ_{12}	λ_{11}	λ_{10}	λ_9	λ_8	λ_7	λ_6	λ_5	λ_4	λ_3	λ_2	λ_1	z
0.942843531 763050 + 0.000000000 000000i	0.945557766 860571 + 0.000000000 000000i	0.913602684 885247 + 0.000000000 000000i	0.871756951 064942 + 0.000000000 000000i	0.8500090 78958487 + 0.000000000	0.8328384 47119513 + 0.000000000	0.9926199 4653688 - 0.0426430 56976264i	0.992619946 553688 + 0.042643056 976264i	0.9950572 73038687 - 0.0731347 11721878i	0.9950572 73038687 + 0.0731347	0.9907629 72890725 - 0.0795072 89366717i	0.9907629 72890725 + 0.0795072	0.0
0.933712852 100361 + 0.000000000 000000i	0.948295971 677430 + 0.000000000 000000i	0.900921588 983162 + 0.000000000 000000i	0.881254371 372146 + 0.000000000 000000i	0.8519339 03329202 + 0.000000000	0.8328981 51854160 + 0.000000000	0.9942601 64425207 - 0.0421535 52362031i	0.994260164 425207 + 0.042153552 362031i	0.9953851 73292694 - 0.0726694 67317408i	0.9953851 73292694 + 0.0726694	0.9926102 15504446 - 0.0801679 54951437i	0.9926102 15504446 + 0.0801679	0.1823
0.930951166 140606 + 0.000000000 000000i	0.948749197 261310 + 0.000000000 000000i	0.889516595 680778 - 0.012957118 955923i	0.889516595 680778 + 0.012957118 955923i	0.8529578 22504977 + 0.000000000	0.8329258 41392387 + 0.000000000	0.9952219 23894442 - 0.0420151 72197466i	0.995221923 894442 + 0.042015172 197466i	0.9956655 79609448 - 0.0724852 93101946i	0.9956655 79609448 + 0.0724852	0.9935820 31183113 - 0.0804894 12990648i	0.9935820 31183113 + 0.0804894	0.3
0.927474455 763449 + 0.000000000 000000i	0.949403168 430251 + 0.000000000 000000i	0.885071149 266893 - 0.029470721 297613i	0.885071149 266893 + 0.029470721 297613i	0.8548674 51733026 + 0.000000000	0.8329695 98728452 + 0.000000000	0.9973523 38909647 - 0.0420105 04820471i	0.997352338 909647 + 0.042010504 820471i	0.9963755 09841945 - 0.0723364 77153339i	0.9963755 09841945 + 0.0723364	0.9956634 27116443 - 0.0809627 07434593i	0.9956634 27116443 + 0.0809627	0.6
0.926454411 809072 + 0.000000000 000000i	0.949658387 858502 + 0.000000000 000000i	0.855578978 778913 + 0.000000000 000000i	0.832981451 254930 + 0.000000000 000000i	0.8828276 73190687 - 0.0350307 31930145i	0.8828276 73190687 + 0.0350307	0.9983347 52251460 - 0.0421267 90899571i	0.998334752 251460 + 0.042126790 899571i	0.9967052 70440317 - 0.0723835 04716992i	0.9967052 70440317 + 0.0723835	0.9966408 78630169 - 0.0810597 29822919i	0.9966408 78630169 + 0.0810597	0.76
0.926391352 558245 + 0.000000000 000000i	0.949675744 605631 + 0.000000000 000000i	0.855624226 635845 + 0.000000000 000000i	0.832982064 011063 + 0.000000000 000000i	0.8826720 14676822 - 0.0353886 65487214i	0.8826720 14676822 + 0.0353886	0.9984021 10491752 - 0.0421372 01868672i	0.998402110 491752 + 0.042137201 868672i	0.9967273 41893751 - 0.0723892 91038689i	0.9967273 41893751 + 0.0723892	0.9967089 46320554 - 0.0810634 07084467i	0.9967089 46320554 + 0.0810634	0.771522634
0.926391352 460576 + 0.000000000 000000i	0.949675744 632655 + 0.000000000 000000i	0.855624226 705994 + 0.000000000 000000i	0.832982064 012027 + 0.000000000 000000i	0.8826720 14434287 - 0.0353886 66042549i	0.8826720 14434287 + 0.0353886	0.9984021 10596635 - 0.0421372 01885116i	0.998402110 596635 + 0.042137201 885116i	0.9967273 41928066 - 0.0723892 91047965i	0.9967273 41928066 + 0.0723892	0.9967089 46426662 - 0.0810634 07089895i	0.9967089 46426662 + 0.0810634	0.771522652
0.926391352 406331 + 0.000000000 000000i	0.949675744 647670 + 0.000000000 000000i	0.855624226 744939 + 0.000000000 000000i	0.832982064 012544 + 0.000000000 000000i	0.8826720 14299557 - 0.0353886 66351103i	0.8826720 14299557 + 0.0353886	0.9984021 10654908 - 0.0421372 01894267i	0.998402110 654908 + 0.042137201 894267i	0.9967273 41947116 - 0.0723892 91053121i	0.9967273 41947116 + 0.0723892	0.9967089 46485622 - 0.0810634 07092866i	0.9967089 46485622 + 0.0810634	0.771522662
0.926391352 395557 + 0.000000000 000000i	0.949675744 650698 + 0.000000000 000000i	0.855624226 752656 + 0.000000000 000000i	0.832982064 012591 + 0.000000000 000000i	0.8826720 14272643 - 0.0353886 66412883i	0.8826720 14272643 + 0.0353886	0.9984021 10665655 - 0.0421372 01896084i	0.998402110 666565 + 0.042137201 896084i	0.9967273 41950856 - 0.0723892 91054051i	0.9967273 41950856 + 0.0723892	0.9967089 46497459 - 0.0810634 07093589i	0.9967089 46497459 + 0.0810634	0.771522664
0.926391352 390073 + 0.000000000 000000i	0.949675744 652189 + 0.000000000 000000i	0.855624226 756616 + 0.000000000 000000i	0.832982064 012672 + 0.000000000 000000i	0.8826720 14259141 - 0.0353886 66443693i	0.8826720 14259141 + 0.0353886	0.9984021 10672396 - 0.0421372 01896996i	0.998402110 672396 + 0.042137201 896996i	0.9967273 41952806 - 0.0723892 91054614i	0.9967273 41952806 + 0.0723892	0.9967089 46503329 - 0.0810634 07093832i	0.9967089 46503329 + 0.0810634	0.771522665

الجدول (7-5): توضع أقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المتقطع

$abs(\lambda_{12})$	$abs(\lambda_{11})$	$abs(\lambda_{10})$	$abs(\lambda_9)$	$abs(\lambda_8)$	$abs(\lambda_7)$	$abs(\lambda_6)$	$abs(\lambda_5)$	$abs(\lambda_4)$	$abs(\lambda_3)$	$abs(\lambda_2)$	$abs(\lambda_1)$	z
0.9428435 31763050	0.9455577 66860571	0.9136026 84885247	0.8717569 51064942	0.8500090 78958487	0.8328384 47119513	0.9935354 99418379	0.9935354 99418379	0.9977412 80435881	0.9977412 80435881	0.9939480 25559541	0.9939480 25559541	0.0
0.9337128 52100361	0.9482959 71677430	0.9009215 88983162	0.8812543 71372146	0.8519339 03329202	0.8328981 51854160	0.9951533 53277563	0.9951533 53277563	0.9980343 15387563	0.9980343 15387563	0.9958423 27341471	0.9958423 27341471	0.1823
0.9309511 66140606	0.9487491 97261310	0.8896109 60433356	0.8896109 60433356	0.8529578 22504977	0.8329258 41392387	0.9961084 03987707	0.9961084 03987707	0.9983005 88067088	0.9983005 88067088	0.9968368 96535005	0.9968368 96535005	0.3
0.9274744 55763449	0.9494031 68430251	0.8855616 65090817	0.8855616 65090817	0.8548674 51733026	0.8329695 98728452	0.9982367 30662529	0.9982367 30662529	0.9989978 59126711	0.9989978 59126711	0.9989497 58542641	0.9989497 58542641	0.6
0.9264544 11809072	0.9496583 87858502	0.8555789 78778913	0.8329814 51254930	0.8835224 12127074	0.8835224 12127074	0.9992231 70300048	0.9992231 70300048	0.9993301 59596227	0.9993301 59596227	0.9999318 58056177	0.9999318 58056177	0.76
0.9263913 52558245	0.9496757 44605631	0.8556242 26635845	0.8329820 64011063	0.8833811 42621126	0.8833811 42621126	0.9992909 07601838	0.9992909 07601838	0.9993525 92199403	0.9993525 92199403	0.9999999 99821786	0.9999999 99821786	0.771522634
0.9263913 52460576	0.9496757 44632655	0.8556242 26705994	0.8329820 64012027	0.8833811 42401032	0.8833811 42401032	0.9992909 07707322	0.9992909 07707322	0.9993525 92234299	0.9993525 92234299	0.9999999 99927984	0.9999999 99927984	0.771522652
0.9263913 52406331	0.9496757 44647670	0.8556242 26744939	0.8329820 64012544	0.8833811 42278772	0.8833811 42278772	0.9992909 07765929	0.9992909 07765929	0.9993525 92253673	0.9993525 92253673	0.9999999 99986991	0.9999999 99986991	0.771522662
0.9263913 52395557	0.9496757 44650698	0.8556242 26752656	0.8329820 64012591	0.8833811 42254354	0.8833811 42254354	0.9992909 07777652	0.9992909 07777652	0.9993525 92257470	0.9993525 92257470	0.9999999 99998848	0.9999999 99998848	0.771522664
0.9263913 52390073	0.9496757 44652189	0.8556242 26756616	0.8329820 64012672	0.8833811 42242097	0.8833811 42242097	0.9992909 07783516	0.9992909 07783516	0.9993525 92259457	0.9993525 92259457	1.0000000 00004718	1.0000000 00004718	0.771522665

الجدول (6-7): القيمة المطلقة للقيم الذاتية لأقطاب الحلقة المغلقة لنظام التحكم المتقطع

نستنتج من الجدول (5-7) والجدول (6-7) ما يلي:

- القيمة المطلقة للقيم الذاتية لأقطاب الحلقة المغلقة ($abs(\lambda_n)$) في نظام التحكم الشبكي المتقطع تقترب من الواحد (محيط الدائرة الواحدة في الفضاء Z) مع زيادة $\tau_{DStability}$ المفروض على النظام الشبكي المتقطع، إذ تبلغ $abs(\lambda_1) = 0.993948025559541$ عند عدم وجود تأخير زمني حتى $abs(\lambda_1) = 0.999999999998848$ عند أعظم قيمة لـ $\tau_{DStability}$ ($\tau = 0.771522664$) والتي يبقى فيها النظام التحكمي المتقطع مستقرًا.
- عند الوصول إلى القيمة الحدية ($\tau_{DStability} = 0.771522664$) في نظام التحكم الشبكي المتقطع، نلاحظ بأن القيمة المطلقة للقيم الذاتية للقطين الأول والثاني من أقطاب الحلقة المغلقة تصبح أقرب قيمة رقمية مقارنة لمحيط الدائرة الواحدة في الفضاء Z $abs(\lambda_{1,2}) = 0.999999999998848$.
- نلاحظ بأن النظام التحكمي المتقطع يفقد الاستقرار من خلال اقتراب القيمة المطلقة للقيم الذاتية للقطين الأول والثاني من محيط الدائرة الواحدة في الفضاء Z، إذ إن سلوك القطين الأول والثاني في سرعة الاقتراب من محيط الدائرة الواحدة تختلف عن باقي الأقطاب. إذ نلاحظ أن الأقطاب السابع والثامن والتاسع أقل سرعة في الاقتراب من محيط الدائرة الواحدة على الرغم من زيادة $\tau_{DStability}$ ($abs(\lambda_9) = 0.832982064012672$) أي لديها مجال أكبر للاستقرار وهذا يعود إلى طبيعة متغير الحالة المدروس. اعتمدنا أسلوب الاظهار 15 خانة بعد الفاصلة لتوضيح تأثير $\tau_{DStability}$ على القيمة المطلقة للقيم الذاتية لأقطاب الحلقة المغلقة. إذ إنه عندما كانت النتيجة 5 خانات بعد الفاصلة لم نستطيع تحديد سرعة اقتراب القيمة الذاتية للقطين من محيط الدائرة الواحدة الا بعد تطبيق $\tau_{DStability}$ أكبر من القيمة المستنتجة.
- يبقى النظام التحكمي المتقطع مستقرًا على نطاق واسع مع أخذ التأخير الزمني الإجمالي بعين الاعتبار بين مجموعات التوليد الثلاث عند تحقق $0 < \tau_{DStability} < 0.771522665 \text{ Sec}$ ، وعندما $\tau_{DStability} = 0.771522665$ يصبح النظام غير مستقر لتوضع القطين الأول والثاني خارج الدائرة الواحدة في الفضاء Z عند القيمة $abs(\lambda_{1,2}) = 1.000000000004718$.
- يصبح النظام التحكمي المتقطع غير مستقر عند تجاوز قطب واحد على الأقل محيط الدائرة الواحدة في الفضاء Z، أو يصبح النظام التحكمي المتقطع مستقرًا استقراراً حرجاً عندما يقع قطب واحد على الأقل على محيط الدائرة الواحدة في الفضاء Z.

الفصل الثامن

النتائج والمقترحات

Results and Recommendations

8.1 مقدمة:

للتأكد من فعالية الخوارزمية المقترحة في تخمين قيمة التأخير الزمني غير المحدد $\tau_{Stability}$ التي تبقى على النظام الشبكي المستمر أو المنقطع بحالة استقرار في نظم التحكم الشبكية المؤلفة من n من الأنظمة الفرعية. قورنت الخوارزمية بعدد من الطرائق البحثية المنشورة في الأوراق العلمية من خلال المثال الآتي.

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$u(t) = [-3.75 \quad -11.5] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

يوضح الجدول (1-8) قيمة $\tau_{Stability}$ وفق الخوارزمية المقترحة مقارنة بغيرها من الطرائق.

Reference	$\tau_{Stability}[\text{Sec}]$
[202]	0.27×10^{-3}
[203]	0.45×10^{-3}
[204]	0.0538
[205]	0.7805
[206]	0.85
[207,208]	0.8695
[209]	0.8871
[210,211,212]	1.0081
[213]	1.0432
[214]	1.05
[215]	1.0551
[216]	1.113
[217,218]	1.695
[219]	1.723
[220]	1.7294
Proposed Method(N=1)	0.869565217
Proposed Method(N=2)	1.386544970
Proposed Method(N=3)	1.791224446

الجدول (1-8): قيمة $\tau_{Stability}$ وفق الخوارزمية المقترحة مقارنة بغيرها من الطرائق.

من الجدول (1-8) نلاحظ ما يلي:

1. إن قيمة $\tau_{Stability}$ في الخوارزمية المقترحة تعتبر الأفضل مقارنة بغيرها. إذ إنها تمثل القيمة الأكبر وهو الهدف المطلوب من جعل مجال الاستقرار للنظام التحكمي الذي يعاني من تأخير زمني غير محدد أكبر ما

يمكن. وبالتالي ضمان استقرار نظام التحكم باستخدام المتحكم التربيعي الخطي LQR عند حدود معينة للتأخير الزمني.

2. دقة النتائج باستخدام الخوارزمية المقترحة، إذ تصل لـ 9 خانات بعد الفاصلة مقارنة بـ 3 أو 4 للطرائق الأخرى.
3. تتميز الخوارزمية المقترحة عن الطرائق الأخرى بسهولة فهمها، إذ تتضمن باقي الطرائق تعقيداً رياضياً كبيراً. حيث هناك العديد من النظريات التي لا يمكن حلها إلا من خلال مسائل LMI، كما أن بعض الطرائق تتطلب حساب تكاملات رياضية ثلاثية.

8.2 استنتاج مجموعة من الشروط والقواعد المعممة لضمان استقرار نظام التحكم الشبكي مع وجود التأخير الزمني بين أنظمتها الفرعية:

يمكن اتباع القواعد والشروط التالية ليتمكن الباحث من دراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد على استقرار نظام التحكم الشبكي المستمر أو المتقطع:

1. الحصول على القيم والثوابت الابتدائية الممثلة لنظام التحكم الشبكي المراد دراسة تأثير التأخير الزمني غير المحدد بين عناصره الفرعية.
 2. ضرورة أن تكون العلاقة خطية بين النظم الفرعية المشكلة لنظام التحكم الشبكي.
 3. تحديد أبعاد مصفوفات الحالة A, B, C, D, F الممثلة لنظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر أو المتقطع من خلال عدد الأنظمة الفرعية (i) وعدد المداخل (u) والمخارج (y) وفي حال وجود ضجيج (F) مطبق على بعض أو كل الأنظمة الفرعية بنسب مختلفة، كما يلي:
- المصفوفة A مربعة أبعادها $[n \times n]$ ، المصفوفة B أبعادها $[n \times m]$ ، المصفوفة F أبعادها $[n \times l]$ ، المصفوفة C أبعادها $[p \times n]$ ، المصفوفة D أبعادها $[p \times m]$. حيث n درجة نظام التحكم الشبكي، m عدد مداخل النظام، l الضجيج المطبق على النظام، p عدد مخارج النظام.

فمثلاً من أجل ثلاثة أنظمة فرعية ($i=j=3$) وكل نظام فرعي مؤلف من ($n=4$) متغيرات حالة تصبح أبعاد مصفوفات الحالة وفق الآتي:

- $A_{ij}[4 \times 4], B_i[4 \times 1], F_i[4 \times 1], C_i[1 \times 4], A[12 \times 12], B[12 \times 3], F[12 \times 3], C[3 \times 12], D[3 \times 3]$
4. تعويض الثوابت والقيم الابتدائية في النموذج الرياضي لنظام التحكم الشبكي المستمر لنحصل على معادلات الحالة، ومنها نصل إلى قيم مصفوفات الحالة الممثلة للنظام الفرعي وترابطه مع غيره من الأنظمة الفرعية الأخرى بشكل مماثل للعلاقات (5-42) (5-41) (5-40).

5. تطبيق العلاقة (5-43) لاستنتاج نظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر المؤلف من $[n \times i]$ متغير حالة u مدخل، مع إضافة ضجيج F بنسب مختلفة لبعض أو كل الأنظمة الفرعية.

6. عند نمذجة نظام التحكم الشبكي المتقطع، يتم تقطيع مصفوفات الحالة A, B, C, D, F الممثلة لنظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر وفق العلاقة (7-7) لنحصل على نظام التحكم الشبكي الإجمالي المتقطع بمصفوفات الحالة المتقطعة $F(K), H(K), G(K)$ مع إمكانية تغيير طريقة التقطيع وزمن أخذ العينات T .
7. نختار قيم مصفوفات التوزيع R و Q بأن تكون موجبة التحديد P_d ، لتكون دالة الإنجاز الموصوفة بالعلاقة (10-6) بالنسبة لنظام التحكم الشبكي المستمر والعلاقة (2-7) بالنسبة لنظام التحكم الشبكي المتقطع أصغرية، وفق الأبعاد التالية:

$$Q[n \times n], R[m \times m]$$

8. التأكد من أن النظام الشبكي قابل للتحكم في فضاء الحالة وفق العلاقة (20-6) للنظام الشبكي المستمر والعلاقة (5-7) للمتقطع.

9. تطبيق المتحكم LQR على نظام التحكم الشبكي الإجمالي المستمر أو المتقطع، والتأكد من أن المصفوفة P موجبة التحديد P_d بالنسبة للنظام المستمر من العلاقة (19-6) أو المتقطع من العلاقة (4-7) عندها فإن النظام التحكمي المتقطع أو المستمر مستقر ويمكن أمثله.

10. حساب مصفوفة الربح الخلفي K للمتحكم LQR لنظام التحكم الشبكي المستمر من العلاقة (18-6) أو المتقطع من العلاقة (3-7).

11. حساب إشارات التحكم للتغذية العكسية الناتجة من الأنظمة الفرعية المكونة لنظام التحكم الشبكي المستمر وفق العلاقة (14-5) أو المتقطع وفق العلاقة (8-7).

12. حساب قيم جذور المعادلة المميزة لنظام حلقة التحكم المغلقة باستخدام المتحكم LQR ومع وجود التأخير الزمني بين الأنظمة الفرعية لنظام التحكم الشبكي. وعند التغيير في قيمة التأخير الزمني نراقب قيم القسم الحقيقي لجذور النظام. في حال وجود قيمة واحدة على الأقل تقع على يمين الساحة العقدية في فضاء لابلاس S عندها يكون نظام التحكم الشبكي المستمر غير مستقر. وعند وجود قيمة واحدة على الأقل تقع على المحور التخيلي في الفضاء S عندها فإن النظام الشبكي المستمر مستقر استقراراً حرجاً. من جهة أخرى للتأكد من استقرار نظام التحكم الشبكي المتقطع في فضاء الحالة مع وجود التأخير الزمني. نحسب القيمة المطلقة لجذور النظام في الحلقة المغلقة. في حال وجود قيمة واحدة على الأقل تقع خارج الدائرة الواحدة في الفضاء Z عندها فإن النظام الشبكي المتقطع غير مستقر باستخدام المتحكم LQR. وعند وجود قيمة واحدة على الأقل تقع على محيط الدائرة الواحدة في الفضاء Z عندها فإن النظام الشبكي المتقطع مستقر استقراراً حرجاً باستخدام المتحكم LQR.

13. استخدام الخوارزمية المقترحة وفق الشكل (17-6) في حساب قيمة التأخير الزمني غير المحدد $\tau_{Stability}$ التي تبقي على النظام الشبكي المستمر في حالة استقرار. بالإضافة إلى تقديم خوارزمية مقترحة أخرى وفق الشكل (4-7) لحساب قيمة التأخير الزمني غير المحدد $\tau_{DStability}$ التي تبقي على النظام الشبكي المتقطع حالة استقرار.

8.3 ملخص النتائج العامة للبحث:

1. اقتراح مجموعة من الخطوات التحكمية للتخلص من الحساسية العالية التي يعاني منها متنبئ سميث.
2. التوصل إلى معادلات تفاضلية عامة في فضاء الحالة تصف نظام التحكم الشبكي المستمر أو المتقطع والمؤلف من n نظاماً فرعياً.
3. خوارزمية مقترحة لتخمين قيمة التأخير الزمني غير المحدد $\tau_{Stability}$ في النظام التحكم الشبكي المستمر والمتقطع $\tau_{DStability}$.
4. التوصل في نهاية البحث إلى مجموعة من الشروط والقواعد المعممة التي تطبق على أي نظام تحكم شبكي مستمر أو متقطع متعدد المداخل والمخارج بغض النظر عن أبعاد مصفوفات الحالة التي تصفه، بالإضافة إلى الضجيج الذي يمكن أن يطبق عليه بهدف التقليل من تأثير التأخير الزمني وضمان استقرار نظام التحكم الشبكي باستخدام المتحكم التريبيعي الخطي LQR.
5. يزداد $\tau_{Stability}$ مع انخفاض عدد البيانات التي يتم ترسلها عبر الشبكة، وهذا بدوره يؤثر على استقرار النظام الشبكي المدروس ويعطي مجالاً أكبر للنظام بأن يبقى مستقراً على الرغم من وجود التأخير الزمني.
6. فعالية الخوارزمية المقترحة ودقتها في إيجاد قيمة $\tau_{Stability}$ مع اختلاف بنية النظام وحجمه.
7. قورنت الخوارزمية المقترحة لتخمين قيمة التأخير الزمني $\tau_{Stability}$ مع غيرها من الخوارزميات الأخرى، إذ إنها تمثل القيمة الأكبر وهو الهدف المطلوب من جعل مجال الاستقرار للنظام التحكمي الذي يعاني من تأخير زمني غير محدد أكبر ما يمكن. وبالتالي ضمان استقرار نظام التحكم باستخدام المتحكم التريبيعي الخطي LQR عند حدود معينة للتأخير الزمني.

8.4 المقترحات والتوصيات:

1. نقترح تطبيق أسلوب النمذجة لنظام التحكم الشبكي المستمر والمتقطع على منظومة القدرة الكهربائية في الجمهورية العربية السورية بشكل فعلي بعد الحصول على قيم الثوابت الاسمية لمجموعات التوليد، بهدف حساب قيمة التأخير الزمني غير المحدد بين مجموعات التوليد والمؤثر على استقرار المنظومة الكهربائية. وتخفيض هذا الزمن قدر الإمكان من خلال تحسين واقع البنية التحتية للشبكة التحكمية التي تصل مجموعات التوليد مع بعضها بعضاً.
2. نوصي باقتراح خوارزمية جديدة لحساب $\tau_{Stability}$ يمكن تطبيقها مع أي نوع من المتحكمات الحديثة، دون التعديل في بنية المتحكم.

فهرس المصطلحات العلمية

Index of Scientific Terms

A		
AS	Asymptotically Stable	النظام مستقر بشكل متقارب على نطاق واسع
ASP	Adaptive Smith Predictor	متنبئ سميث التكيفي
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Networks	شبكة وكالة مشاريع الأبحاث المتطورة
ADC	Analog Digital Converter	المبدل التشابهي الرقمي
ANN	Artificial Neural Network	الشبكات العصبونية
C		
CTS	Continuous Time System	التأخير الزمني في أنظمة الزمن المستمر
CAN	Controller Area Network	شبكة التحكم النطاقي
CPU	Central Processing Unit	وحدة المعالجة المركزية
D		
DI	Delay Independent	نظم تحكم تعتمد على التأخير الزمني
DD	Delay Dependent	نظم تحكم مستقلة عن التأخير الزمني
DTS	Discrete Time Systems	التأخير الزمني في أنظمة الزمن المنقطعة
DMS	Deadline Monotonic Scheduling	الجدولة الرتبية باستخدام الحد النهائي
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation	تخصيص النطاق الديناميكي
DRTCS	Distributed Real Time Control Systems	نظم التحكم الموزعة في الزمن الحقيقي
DAC	Digital Analog Converter	المبدل الرقمي التشابهي
F		
FF	Feed Forward	المسار الأمامي لنظام التحكم
FB	Feed Back	المسار العكسي لنظام التحكم
FN	Fieldbus Network	نظام تحكم شبكي من النوع الحقلي
FPIC	Fuzzy Proportional Integral Controller	متحكم ضبابي تكاملي تناسبي
FMSC	Fuzzy Sliding Mode Controller	المتحكم الانزلاقي الضبابي
FA	Firefly Algorithm	خوارزمية اليراع
FSP	Filtered Smith Predictor	متنبئ سميث المفلتر
FL	Fuzzy Logic	المنطق الضبابي
FACTS	Flexible AC Transmission System	أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة
FTC	Fault Tolerant Control	التحكم في التسامح مع الخطأ
G		
GA	Genetic Algorithm	الخوارزمية الجينية
GSA	Gravitational Search Algorithm	خوارزمية البحث بالاعتماد على الجاذبية

H		
HVDC	High Voltage Direct Current	التيار المستمر عالي الجهد
I		
ICCSs	Integrated Communication and Control Systems	أنظمة التحكم والاتصالات المتكاملة
IDS	Intrusion Detection Systems	أنظمة كشف التسلل
INs	Interconnected Networks	الشبكات المترابطة
IED	Intelligence Electronic Device	جهاز إلكتروني ذكي
L		
LAN	Local Area Network	الشبكة المحلية
LKF	Lyapunov Krasovskii Function	تابع ليابانوف كراسوفسكي
LMI	Linear Matrix Inequalities	متراجحات المصفوفات الخطية
LQR	Linear Quadratic Controller	المتحكم التربيعي الخطي
M		
MIMO	Multi Input Multi Output	نظام التحكم متعدد المداخل والمخارج
MS	Marginally Stable	النظام على حافة الاستقرار أو مستقر استقرار حرج
MMF	Maximum-Minimum Fair	معيان توزيع الطلبات المتنافسة بالاعتماد على القيمتين العظمى والصغرى
MATI	Maximum Allowable Time Interval	الحد الأقصى للفاصل الزمني المسموح به
MADB	Maximum Allowable Delay Bound	الحد الأعظمي المسموح به للتأخير الزمني
N		
NCS	Networked Control System	نظم التحكم الشبكية
Nsd	Negative Semi definition	شبه سالب التحديد
Nd	Negative definition	سالب التحديد
O		
OTDE	Online Time-Delay Estimator	مخمن التأخير الزمني أنياً
P		
PI	Proportional Integral Controller	متحكم تكاملي تناسبي
PSO	Particle swarm optimization	خوارزمية أمثلة حشد الجسيمات
PID	Proportional Integral Derivative Controller	المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي
Psd	Positive Semi definition	شبه موجب التحديد
Pd	Positive definition	موجب التحديد
PSS	Power System Stabilizer	مخمد الاهتزاز

PAFZ-PI	Parameter adaptive Fuzzy PI	المتحكم الضبابي التكيفي
R		
RTT	Round-Trip Time	زمن الذهاب والإياب ضمن الشبكة
RMS	Rate Monotonic Scheduling	الجدولة الرتيبة باستخدام المعدل
S		
SP	Smith Predictor	متنبئ سميث
SMIB	Single Machine Infinite Bus	آلة موصولة إلى قضيب تجميع لانهاائي
SISO	Single Input Single Output	نظام التحكم وحيد الدخل وحيد الخرج
SP	Supervisory Controller	المتحكم الاشرافي
SVC	Supplementary Damping Controller	وحدة تحكم التخميد التكميلية
T		
TCA	Time Delay between Controller and Actuator	التأخير الزمني بين المتحكم والمشغل
TSC	Time Delay between Sensor and Controller	التأخير الزمني بين الحساس والمتحكم
TDFES	Time Delay Fuzzy Estimation Scheme	وحدة التحكم الضبابية لتخمين التأخير الزمني
TDNES	Delay Neural network Estimation Scheme	وحدة التحكم العصبونية الشبكية لتخمين التأخير الزمني
TDS	Time Delay Systems	نظم التأخير الزمني
U		
UPFC	Unified Power Flow Controller	أجهزة التحكم في تدفق الطاقة الموحدة
W		
WAMS	Wide-Area Measurement System	نظام القياس واسع النطاق
WACA	Wide-Area Control System	نظام التحكم واسع النطاق
Z		
ZOH	Zero Order Hold	ماسك المعطيات الصفري

المراجع العلمية

- [1] Stefano Longo, Tingli Su, Guido Herrmann and Phil Barber, **Optimal and Robust Scheduling for Networked Control Systems**, CRC press, October 2017.
- [2] Ke-You You and Li-Hua XIE, **"Survey of Recent Progress in Networked Control Systems"**, Acta Automatica Sinica, vol. 39, no. 2, February 2013.
- [3] Richard Zurawski, **The Industrial Information Technology Handbook**, CRC press, ISBN 0-8493-19854, Sep 2017.
- [4] Keyou You, Nan Xiao and Lihua Xia, **"Analysis and Design of Networked Control Systems"**, Springer, ISSN 0178-5354, 2015.
- [5] M. Brindha and Dr. J K Mendiratta, **"Networked Control system- A Survey"**, I. J. Modern Education and Computer Science, 2013,6,42-48.
- [6] Rachana Ashok Gupta and Mo-Yuen Chow, **Networked Control System: Overview and Research Trends"**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, July 2010.
- [7] gor Belai and Peter Drahos, **"The Communication Systems: PROFIBUS and PROFINet"**, Applied Natural Sciences 2009.
- [8] M. Sami Fadali and Antonio Visioli, **Digital Control engineering: Analysis and Design**, Elsevier, 2nd Edition, 06 Sept 2012.
- [9] O. sename, D. Simon and D. Robert, **"Feedback Scheduling for real-time control of systems with communication delays"**, In proc. IEEE International Conference on Emerging technologies and factory Automation, Lisbon, September, 2003.
- [10] Guy Juanole and Gerard Mouney, **"Networked Control Systems: Definition and Analysis of a Hybrid Priority Scheme for the Message Scheduling."** 13th IEEE International Conference on Embedded and Real-time Computing systems applications (RTCSA 2007).
- [11] W. Zhang, M. S. Branicky and S.M. Philipps, **"Stability of Networked Control Systems"** IEEE Control systems magazine, vol. 21, no. 1, pp. 84-99, February, 2001.
- [12] Tim Tau Hsieh, **"Using Sensor Networks for highway and traffic applications"**, IEEE Potentials, vol. 23, Issue 2, April-May 2004.
- [13] Leung WLD, Vanijjirattikhan R, Liz, Xu L, Richards T, Ayhan B and Chow M-Y, **"Intelligent Space with time sensitive applications"**, In proceed. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, CA, 2005
- [14] Jie Jiang and Changlin, **"Comprehensive Control of Networked Control Systems with Multistep Delay"**, Hindawi Publishing Corporation, the Scientific Journal, vol. 2014, article ID 814245.
- [15] Sandro Zampieri, **"Trends in Networked Control systems"**, Proceed. Of the 17th World Congress, IFAC, Korea, July 6-11, 2008.

- [16] T. C. Yang, "Networked Control System: a brief survey", IEE proc. Control theory appl. Vol. 153, no. 4, July 2006.
- [17] Sachi Mittal, anwar S. Siddiqui, "Networked Control system: survey and directions", Journal of Engineering Research and Studies, vol. I, Oct-Dec. 2010/35-50.
- [18] John Baillifful and Panos J. Antsaklis, "Control and Communication Challenges in Networked Real Time Systems," Proceed. Of the IEEE, Invited paper, vol. 95, no. 1, January 2007.
- [19] Yodyium Tipsuwan and Mo-Yuen Chow, "Control methodologies in networked control systems", Control Engineering Practice 11 (2003) 1099-1111.
- [20] Lixian Zhang, Huijun Gao and Okayay Katnak, "Networked –Induced Constraints in Networked Control Systems- A Survey," IEEE Transaction on Industrial Informatics, vol. 9, no. 1, February, 2013.
- [21] Wang, Lei-Yue, Liu and Derong (Eds), Networked Control Systems: Theory and Applications, Springer, ISBN: 9878-1-84800-214-2, 2021.
- [22] Mykhaylo Andriychuk, Numerical Simulation- From Theory to Industry, Intech, ISBN 978-953-51-0749-1, September 2012.
- [23] Yang Yan-mei and Han wen-dong, "A QOS Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networked Control Systems," 2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing
- [24] Niculescu S.I. Delay effects on stability-a robust control approach. Springer, 2001.
- [25] Richard J.P. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems. Automatica, 39[10]:1667–1694, 2003.
- [26] Kharitonov V. L. Time-Delay Systems: Lyapunov Functionals and Matrices. Birkha"user, New York 2013.
- [27] Gu K., Kharitonov V.L., and Chen J. Stability of time-delay systems. Boston" user, 2003.
- [28] Brierley P., Chiasson J.N., Lee E.B., and Zak S.H. On stability independent of delay. IEEE Transactions on Automatic Control, 27[1]:252–254, 1982.
- [29] Mori T. and H. Kokame. Stability of $\dot{x}(t) = ax(t) + bx(t - \tau)$. IEEE Transactions on Automatic Control, 34[4]:460–462, 1989.
- [30] Wu M., He J., and She J-H. Stability Analysis and Robust Control of Time-Delay Systems. Springer, 2001.
- [31] Boyd S., Ghaoui L.E., Feron E., and Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: SIAM, 1994.
- [32] Mohammed Kamal Ahmed, Effects of the Feed Forward and Feedback Signals Time Delays on Speed Control of DC Motor, International Journal of Engineering Science and Computing, Vol. 7. 14069-104074, July 2017.

- [33] Ahmad Sakr, Ahmad M. El-Nagar, Mohammad El-Bardini, Mohammed Sharaf, **Fuzzy Smith Predictor for Networked Control Systems**, IEEE, PP.437-443,2016.
- [34] Fang Liu, Fenglin Li and Dandan Xiao , **The Design of Fuzzy PID Controller for Networked Systems with Random Time Delay** ,International Journal of Grid and Distributed Computing, Vol. 9, PP.117-124,NOV 2016.
- [35] Khanesar,M.A., Kaynak,O., Yin,S.and Gao,H (2015)- **Adaptive Indirect Fuzzy Sliding Mode Controller for Networked Control Systems Subject to Time-Varying Network-Induced Time Delay** – IEEE Transactions on Fuzzy System, 23(1), 205-214.
- [36] Dang,X.K., Guan,Z.H., Li,T. and Zhang,D.X.(2012)- **Joint Smith predictor and neural network estimation scheme for compensating randomly varying time-delay in networked control system**. 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, China, 23-25/5/2012. DOI: 10.1109/CCDC.2012.6244077.
- [37] Shubhasree .A.V, Dr. Vijay Kumar (2013) - **Time Delay Processing in Networked Control System Using Smith Predictor and ANN Based Error Predictor**. International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 4 Issue 5, PP 2725-2729.
- [38] Chien-Liang Lai and Pau-Lo Hsu, **Design the Remote Control System With the Time-Delay Estimator and the Adaptive Smith Predictor**, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS, Vol. 6, PP.73-80, FEB 2010.
- [39] P. J. Escamilla, N. Mort (2011)- **NEW TWO-TERM PARAMETER ADAPTIVE FUZZY CONTROL STRUCTURE FOR TIME-DELAY SYSTEMS**, Department of Automatic Control and Systems Engineering University of Sheffield.
- [40] Rahmaniar, Agus Junaidi, Rudi Salman, Ganefri, Abd. Hamid K5, Jalius Jama, Nizwardi Jalinus (2019) - Modelling and Simulation: **A Comparison of LQR Control and Unified Power Flow Controller for Dynamic Stability Improvement**. International Journal of Engineering Research and Technology. ISSN 0974-3154, Volume 12, Number 7, PP. 1033-1038.
- [41] Ashraf M. Abdelhamid and Ahmed A. M. El-Gaafary (2018) - **Optimal Decentralized LQR Control to Enhance Multi-Area LFC System Stability**. Hindawi Mathematical Problems in Engineering, Volume 2018, Article ID 7232915, PP 1-11, <https://doi.org/10.1155/2018/7232915>.
- [42] Deepak Kumar Gupta , Amitkumar V. Jha , Bhargav Appasani , Avireni Srinivasulu , Nicu Bizon and Phatiphat Thounthong (2021)- **Load Frequency Control Using Hybrid Intelligent Optimization Technique for Multi-Source Power Systems**, MDPI , 14, 1581. <https://doi.org/10.3390/en14061581>.

- [43] Guojin Pei, Ming Yu, Yaohui Xu, Cui Ma, Houhu Lai, Fokui Chen and Hui Lin, 2021 **An Improved PID Controller for the Compliant Constant-Force Actuator Based on BP Neural Network and Smith Predictor**, MDPI, Vol. 11, 2685. <https://doi.org/10.3390/app11062685>
- [44] Necdet Sinan Özbek, İlyas Eker, 2019 **Design of an optimal fractional fuzzy gain scheduled Smith Predictor for a time-delay process with experimental application**. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.009>.
- [45] Martin Steinberger, Martin Horn, October 2020-**From classical to Networked Control: Retrofitting the Concept of Smith Predictors**, Electrical Engineering and Systems Science. PP. 1-10.
- [46] Poorani, V. J., & Anand, L. V, 2013- **Comparison of PID Controller and Smith Predictor Controller for Heat Exchanger**, In Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN), (PP. 217-221).
- [47] Rao, A. S., & Chidambaram, M, 2005 - **Enhanced Smith Predictor for Unstable Processes with Time Delay**. Industrial & engineering chemistry research, 44(22), (PP. 8291-8299).
- [48] Velagic, J, 2008- **Design of Smith-like Predictive Controller with Communication Delay Adaptation**. World Academy of Science, Engineering and Technology, 47.
- [49] Ahmet Kuzu, Ozgur Songuler, 2012- Novel fuzzy — **Smith Predictor hybrid scheme for periodic disturbance reduction in Linear Time Delay System**. The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control.
- [50] J.E. Normey-Rico and E.F. Camacho, October 2007- **Control of Dead Time Processes**, London, UK: Springer - Verlag Limited, PP.167.
- [51] Dasu, B., SivaKumar, M., & Srinivasrao, R. (2019). **Interconnected multimachine power system stabilizer design using whale optimization algorithm**. Protection and Control of Modern Power Systems. <https://doi.org/10.1186/s41601-019-0116-6>.
- [52] Essallah, S., Bouallegue, A., & Khedher, A. (2019). **Integration of automatic voltage regulator and power system stabilizer: Small-signal stability in DFIG-based wind farms**. Protection and Control of Modern Power Systems, 7(5), 1115–1128.
- [53] Chao, L., Zhao, Y., Kun, M., Liang, T., & Yingduo, H. (2015). **Wide-area power system stabilizer based on model-free adaptive control**. IET Control Theory Appl, 9(13), 1996–2007.
- [54] Soliman, H. M., & Yousef, H. (2015). **Saturated robust power system stabilizers**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 73(12), 608–614.
- [55] Soliman, M. (2015). **Robust non-fragile power system stabilizer**. Electrical Power and Energy Systems, 64, 626–634.
- [56] Soliman, M. (2016). **Robust power system stabilizer design via interval arithmetic**. International Journal of Modelling, Identification and Control, 25(4), 287–300.

- [57] Abhisek Ukil, "Intelligent Systems and Signal Processing in Power Engineering", © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [58] GIBARD, M. J., Robust Design of Fixed- Parameter Power System Stabilizers over a Wide Range of Operating Conditions. IEEE Trans. 6, 2, 1991, 794-800.
- [59] KUNDUR, P; ROGERS, G . J ZYWNO, M. S. Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability. Ibid, Vol. 4. N°. 2, May 1989, 614-621.
- [60] Mohammed Abd El-Hamid, Alla Eldeen and Emad, A Comparative Study of the Effect of Different Signals of the Power System Stabilizer on the Stability of Electric Power Systems. Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research-Engineering Sciences Series Vol. (29) No. (2) 2007
- [61] Mohammed Abd El-Hamid, A Comparison between the Effect of Conventional Power System Stabilizer and PID Power System Stabilizer on the Dynamic Stability of Electrical Power System, Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (29) No. (4) 2007.
- [62] Awadallah, M. A., & Soliman, H. M. (2009). A neuro fuzzy adaptive power system stabilizer using genetic algorithms. Electric Power Components & Systems, 37, 158–173.
- [63] Soliman, H. M., & Metwally, K. A. E. I. (2017). Robust pole placement for power systems using two-dimensional membership fuzzy constrained controllers. IET Generation Transmission and Distribution, 11(16), 3966–3973.
- [64] Balsam, Mohammed and Nisreen, Damping Oscillations Improvement in Electrical Power System By Using Power System Stabilizer Based on Fuzzy Logic, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (32) No. (3) 2010.
- [65] Ngoc-Khoat Nguyen, "Intelligent Power System Stabilizers using Fuzzy Logic Technique and Sliding Mode Control Strategy" International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue 10, August 2019
- [66] Soliman, H. M. (2016). Resilient observer-based power system stabilizers. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 38(8), 981–991.
- [67] Rao, P. S., & Sen, I. (2000). Robust pole placement stabilizer design using linear matrix inequalities. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 15(2), 313–319.
- [68] Tareek, Somia and Moataz, Design neural damper vibration to the improve the stability of electric power systems, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (35) No. (6) 2013
- [69] Hasanvand, H., Babak, M. M., Aavan, R., & Amraee, T. (2015). Application of polynomial control to design a robust oscillation-damping controller in a multimachine power system. ISA Transactions, 59, 343–353.
- [70] Jumana Diab 2013, Electronic Automatic Control /4/, AL Baath University Publication.

- [71] J-J. E. Slotine and W. Li, 1991, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall.
- [72] U.A.Bakshi and M.V.Bakshi 2008, Modern Control Theory, Technical Publication Pune.
- [73] H. J. Marquez, 2003, Nonlinear Control Systems Wiley.
- [74] J.E.Normey-Rico, E.F.Camacho, 2008 Dead-time compensators: A survey Control Engineering Practice, Vol. 16 .407-428.
- [75] Ari Ingimundarson, December 2000 Robust tuning procedures of dead time compensating controllers, ISSN .1-26.
- [76] Anuradha Purty, Rajendra Murmu, January 2017 Comparative Study of Decoupler with Different Controller for Two Inputs and Two Output System, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 6. 1011-1020.
- [77] Mohammed Kamal Ahmed, July 2017 Effects of the Feed Forward and Feedback Signals Time Delays on Speed Control of DC Motor, International Journal of Engineering Science and Computing ,Vol. 7. 14069-104074.
- [78] Meghanasingh, April 2017 effects of Time Delay on different types of controller for networked control system, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 4. 993-999.
- [79] F.G. Shinskey, Process Control Systems, McGraw-Hill Book Company, 1967.
- [80] Qing-Chang Zhong, Robust Control of Time-delay Systems, Springer-Verlag London Limited 2006
- [81] Svante Bjorklund, "A Survey and Comparison of Time-Delay Estimation Methods in Linear Systems," Linkoping Studies in Science and Technology Thesis No. 1061, Linkoping 2003
- [82] Hiroshi Shinozaki, "Lambert W Function Approach to Stability and Stabilization Problems for Linear Time-Delay Systems," Kyoto Institute of Technology Thesis. December 2007.
- [83] J.P. Richard, "Time-delay Systems: An Overview of Some Recent Advances and Open Problems," Automatica, 39:1667–1694, 2003.
- [84] Wesam H. Sakallah, 2009 Comparative Study for Controller Design of Time-delay Systems. The Islamic University – Gaza.
- [85] Asim Vodencarevic March 2010 Design Of PLC-Based Smith Predictor For Controlling Process With Long Dead Time, Proceeding of The International Multiconference of Engineers and Computer Scientists. Vol II.
- [86] Shubhasree .A.V, Dr. Vijay Kumar May 2015 Time Delay Processing In Networked Control System Using Smith Predictor and ANN Based Error Predictor, International Journal of Science and Research (IJSR). Vol 4. 2725-2729.

- [87] Fang Liu, Fenglin Li and Dandan Xiao ,NOV 2016 **The Design of Fuzzy PID Controller for Networked Systems with Random Time Delay**, International Journal of Grid and Distributed Computing ,Vol. 9 .117-124.
- [88] Guojin Pei, Ming Yu, Yaohui Xu, Cui Ma, Houhu Lai, Fokui Chen and Hui Lin,2021 **An Improved PID Controller for the Compliant Constant-Force Actuator Based on BP Neural Network and Smith Predictor**, MDPI, Vol. 11, 2685. <https://doi.org/10.3390/app11062685>
- [89] Necdet Sinan Özbek, İlyas Eker, 2019 **Design of an optimal fractional fuzzy gain scheduled Smith Predictor for a time-delay process with experimental application**. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.08.009>.
- [90] Martin Steinberger, Martin Horn, October 2020-**From classical to Networked Control: Retrofitting the Concept of Smith Predictors**, Electrical Engineering and Systems Science. PP. 1-10.
- [91] Poorani, V. J., & Anand, L. V, 2013- **Comparison of PID Controller and Smith Predictor Controller for Heat Exchanger**, In Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN), (PP. 217-221).
- [92] Rao, A. S., & Chidambaram, M, 2005 - **Enhanced Smith Predictor for Unstable Processes with Time Delay**. Industrial & engineering chemistry research, 44(22), (PP. 8291-8299).
- [93] Velagic, J, 2008- **Design of Smith-like Predictive Controller with Communication Delay Adaptation**. World Academy of Science, Engineering and Technology, 47.
- [94] Ahmet Kuzu, Ozgur Songuler, 2012- Novel fuzzy — **Smith Predictor hybrid scheme for periodic disturbance reduction in Linear Time Delay System**. The 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control.
- [95] J.E. Normey-Rico and E.F. Camacho, October 2007- **Control of Dead Time Processes**, London, UK: Springer - Verlag Limited, PP.167.
- [96] Adrian-Vasile DUKA, Mircea DULĂU, Stelian-Emilian OLTEAN, 2012 **Roboust Control of a heat exchanger using smith predictor**, Interdisciplinary in Engineering International Conference, Vol. 6 .240-244.
- [97] Wang,F.Y. and Liu,D (2008)- **Networked Control Systems: Theory and Applications** — Beijing, China: Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-215-9>.
- [98] Nilsson,J(1998)- **Real-time Control Systems with Delays**. PhD Lund Institute of Technology.
- [99] Ling,W., Yu,X.D. and Zhi,E.D(2007)- **Some basic issues in networked control systems**. In: 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Harbin, China, 23-25/5/2007. DOI: 10.1109/ICIEA.2007.4318780.

- [100] Li,Z., Zhang,L. and Yu,B (2018)- H[∞] control for a kind of networked control systems with network induced time delay and data packet dropout. In: 2018 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Hangzhou, 24-27/12/2018. DOI: 10.1109/ICCAIS.2018.8570343.
- [101] K. D. Kim and P. R. Kumar, "Cyber-physical systems: a perspective at the centennial," Proc. IEEE, vol.100, no.S, pp. 1287–1308, May 2012.
- [102] L. Ding, Q.-L. Han, L. Y. Wang, and E. Sindi, "Distributed cooperative optimal control of DC microgrids with communication delays," IEEE Trans. Ind. Inform., vol. 14, no.9, pp. 3924–3935, Sep. 2018.
- [103] H. Sandberg, S. Amin, and K. H. Johansson, "Cyberphysical security in networked control systems: an introduction to the issue," IEEE Control Syst. Mag., vol.35, no.1, pp.20–23, Feb. 2015.
- [104] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. G. Xu, "A survey of recent results in networked control systems," Proc. IEEE, vol.95, no.1, pp.138–162, Jan. 2007.
- [105] Y.-L. Wang and Q.-L. Han, "Network-based modelling and dynamic output feedback control for unmanned marine vehicles in network environments," Automatica, vol. 91, pp.43–53, May 2018.
- [106] X.-M. Zhang and Q.-L. Han, "Network-based H[∞] filtering using a logic jumping-like trigger," Automatica, vol.49, no. 5, pp.1428–1435, May 2013.
- [107] Mahmood,A.K. and Khairy,H.S (2017)- Time delay compensation for wireless networked control systems based on modified smith predictor— Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 11(4), 14-23.
- [108] Ahmed,M.K (2017)- Effects of the Feed Forward and Feedback Signals Time Delays on Speed Control of DC Motor – International Journal of Engineering Science and Computing, 7(7), 14069-14074.
- [109] Meghanasingh (2017)- Effects of Time Delay on different types of controller for networked control system – International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 4(4), 993-999.
- [110] Gupta, R. A., & Chow, M. Y. (2010). Networked control system: Overview and research trends. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 57(7), 2527-2535.
- [111] Chow, M. Y., & Tipsuwan, Y. (2001). Network-based control systems: a tutorial. In Industrial Electronics Society, 2001. IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE (Vol. 3, pp. 1593-1602). IEEE.
- [112] Huo, Z., Fang, H., & Yan, G. (2005, December). Co-design for NCS robust fault tolerant control. In Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on (pp. 119-124). IEEE.
- [113] Mayank G , Avadh P , Sunil M , Bhargav A, Ersan K , Nicu B, and Phatiphat T (2021)- A Comprehensive Review of the Evolution of Networked Control System Technology and Its Future Potentials. MDPI. PP. 1–39. <https://doi.org/10.3390/su13052962>.
- [114] Yue, D.; Tian, E.; Han, Q.-L. A delay system method for designing event-triggered controllers of networked control systems. IEEE Trans. Autom. Control 2013, 58, 475–481.
- [115] Ding, D.; Han, Q.L.; Wang, Z.; Ge, X. A Survey on Model-based Distributed Control and Filtering for Industrial Cyber-Physical Systems. IEEE Trans. Ind. Inform. 2019, 15, 1551–3203.

- [116] Qi, Y.; Xu, X.; Lu, S.; Yu, Y. A waiting time based discrete event-triggered control for networked switched systems with actuator saturation. Nonlinear Anal. Hybrid Syst. 2020, 37, 100904.
- [117] Gao, H.; Shi, K.; Zhang, H. A novel event-triggered strategy for networked switched control systems. J. Frankl. Inst. 2021, 358, 251–267.
- [118] Guo, L.; Yu, H.; Hao, F. Event-triggered control for stochastic networked control systems against Denial-of-Service attacks. Inf. Sci. 2020, 527, 51–69.
- [119] Song, J.-S.; Chang, X.-H. H ∞ controller design of networked control systems with a new quantization structure. Appl. Math. Comput. 2020, 376, 125070.
- [120] Casavola, A.; Franze, G. Coordination strategies for networked control systems: A power system application. In Proceedings of the 2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Hanoi, Vietnam, 17–20 December 2008; pp. 503–508.
- [121] Yi, X.; Yang, T.; Wu, J.; Johansson, K.H. Distributed event-triggered control for global consensus of multi-agent systems with input saturation. Automatica 2019, 100, 1–9.
- [122] Deng, F.; Zu, Y.; Mao, Y.; Zeng, X.; Li, Z.; Tang, X.; Wang, Y. A method for distribution network line selection and fault location based on a hierarchical fault monitoring and control system. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2020, 123, 106061.
- [123] Kun Liu, Emilia Fridman and Yuanqing Xia Networked Control Under Communication Constraints, Springer, Vol 11, <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4230-5>, 2020.
- [124] B. Etkin, L.D. Reid, Dynamics of Flight: Stability and Control (Wiley, New York, 1996).
- [125] H. Chan, Ü. Özgüner, Closed-loop control of systems over a communications network with queues. Int. J. Control 62(3), 493–510 (1995).
- [126] Ozguner, U., Goktas, H., Chan, H., Winkelman, J., Liubakka, M., & Krtolica, R. (1992, September). Automotive suspension control through a computer communication network. In Control Applications, 1992. First IEEE Conference on (pp. 895-900). IEEE.
- [127] Boustany, N., Folkerts, M., Rao, K., Ray, A., Troxel, L., & Zhang, Z. (1992, June). A simulation based methodology for analyzing network-based intelligent vehicle control systems. In Intelligent Vehicles' 92 Symposium, Proceedings of the (pp. 138-143). IEEE.
- [128] J.E.F. Baruch, M.J. Cox, Remote control and robots: an Internet solution. Computer. Control Eng. J. 7, 39–45 (1996).
- [129] K.B. Lee, R.D. Schneeman, Internet-based distributed measurement and control applications. IEEE Instrum. Meas. Mag. 2(2), 23–27 (1999).
- [130] Wang, F. Y., & Liu, D. (2008). Networked control systems. Springer, London.

- [131] Gupta, R. A., & Chow, M. Y. (2008). **Overview of networked control systems**. In Networked Control Systems (pp. 1-23). Springer London.
- [132] Overstreet, J. W., & Tzes, A. (1999). **An Internet-based real-time control-engineering laboratory**. Control Systems, IEEE, 19(5), 19-34.
- [133] Almutairi, N. B., Chow, M. Y., & Tipsuwan, Y. (2001). **Network-based controlled DC motor with fuzzy compensation**. In Industrial Electronics Society, 2001. IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE (Vol. 3, pp. 1844-1849). IEEE.
- [134] Tipsuwan, Y., & Chow, M. Y. (2002, November). **Gain adaptation of networked mobile robot to compensate QoS deterioration**. In IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the] (Vol. 4, pp. 3146-3151). IEEE.
- [135] Chow, M. Y., & Tipsuwan, Y. (2005). **Time sensitive network-based control systems and applications**. IEEE IES Network Based Control Newsletter, 5(2), 13-18.
- [136] Tipsuwan, Y., & Chow, M. Y. (2003). **Control methodologies in networked control systems**. Control engineering practice, 11(10), 1099-1111.
- [137] Vieira, M. A. M., Coelho, C. N., da Silva Jr, D. C., & da Mata, J. M. (2003, September). **Survey on wireless sensor network devices. In Emerging Technologies and Factory Automation**, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference (Vol. 1, pp. 537-544). IEEE.
- [138] Park, S., Kim, J. W., Lee, K., Shin, K. Y., & Kim, D. (2006, April). **Embedded sensor networked operating system. In Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing**, 2006. ISORC 2006. Ninth IEEE International Symposium on (pp. 5-pp). IEEE.
- [139] Olariu, S., & Xu, Q. (2005, April). **Information assurance in wireless sensor networks. In Parallel and Distributed Processing Symposium**, 2005. Proceedings. 19th IEEE International (pp. 5-pp). IEEE.
- [140] Yamasaki, K., & Ohtsuki, T. (2005, May). **Design of energy-efficient wireless sensor networks with censoring, on-off, and censoring and on-off sensors based on mutual information**. In Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st (Vol. 2, pp. 1312-1316). IEEE.
- [141] Chang, C. K., Overhage, J. M., & Huang, J. (2005, March). **An application of sensor networks for syndromic surveillance. In Networking, Sensing and Control**, 2005. Proceedings. 2005 IEEE (pp. 191-196).
- [142] Rathinam, S., Kim, Z., & Sengupta, R. (2006). Vision-based following of structures using an unmanned aerial vehicle (UAV). Institute of Transportation Studies.
- [143] Altman, E., Başar, T., & Srikant, R. (1999). **Congestion control as a stochastic control problem with action delays**. Automatica, 35(12), 1937-1950.

- [144] Mascolo, S. (1999). Classical control theory for congestion avoidance in high-speed internet. In Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on (Vol. 3, pp. 2709-2714). IEEE.
- [145] Mascolo, S. (1999). Congestion control in high-speed communication networks using the Smith principle. Automatica, 35(12), 1921-1935.
- [146] Mykhaylo Andriychuk, Numerical Simulation- From Theory to Industry, Intech, ISBN 978-953-51-0749-1, September 2012.
- [147] Yang Yan-mei and Han wen-dong, "A QOS Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networked Control Systems," 2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing.
- [148] Zhang, L. Gao, H., & Kaynak, O. (2013). Network-induced constraints in networked control systems—a survey. Industrial Informatics, IEEE Transactions on, 9(1), 403-416.
- [149] Nesic, D., & Teel, A. R. (2004). Input-output stability properties of networked control systems. Automatic Control, IEEE Transactions on, 49(10), 1650-1667.
- [150] Nesic, D., & Teel, A. R. (2004). Input-to-state stability of networked control systems. Automatica, 40(12), 2121-2128.
- [151] Dačić, D. B., & Nešić, D. (2007). Quadratic stabilization of linear networked control systems via simultaneous protocol and controller design. Automatica, 43(7), 1145-1155.
- [152] Tabbara, M., Nesic, D., & Teel, A. R. (2007). Stability of wireless and wireline networked control systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 52(9), 1615-1630.
- [153] Carnevale, D., Teel, A. R., & Nesic, D. (2007). A Lyapunov proof of an improved maximum allowable transfer interval for networked control systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 52(5), 892.
- [154] Li, J., & AlRegib, G. (2007). Rate-constrained distributed estimation in wireless sensor networks. Signal Processing, IEEE Transactions on, 55(5), 1634-1643.
- [155] Wittenmark, B., Nilsson, J., & Törngren, M. (1995). Timing problems in real-time control systems. In Proceedings of the American Control Conference.
- [156] Fridman, E., Seuret, A., & Richard, J. P. (2004). Robust sampled-data stabilization of linear systems: an input delay approach. Automatica, 40(8), 1441-1446.
- [157] Kwon, C.; Hwang, I. Reachability analysis for safety assurance of cyber-physical systems against cyber-attacks. IEEE Trans. Autom. Control 2018, 63, 2272–2279.
- [158] Zhang, F.; Kodituwakku, H.A.D.E.; Hines, J.W.; Coble, J. Multi-Layer Data-Driven Cyber-Attack Detection System for Industrial Control Systems Based on Network, System, and Process Data. IEEE Trans. Ind. Inform. 2019, 15, 4362–4369.

- [159] Liu, J.; Wu, Z.-G.; Yue, D.; Park, J.H. Stabilization of Networked Control Systems with Hybrid-Driven Mechanism and Probabilistic Cyber Attacks. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 2019.
- [160] Dzung, D., Naedele, M., Von Hoff, T. P., & Crevatin, M. (2005). Security for industrial communication systems. Proceedings of the IEEE, 93(6), 1152-1177.
- [161] Tsang, C. H., & Kwong, S. (2005, December). Multi-agent intrusion detection system in industrial network using ant colony clustering approach and unsupervised feature extraction. In Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on (pp. 51-56). IEEE.
- [162] Xu, Y., Song, R., Korba, L., Wang, L., Shen, W., & Lang, S. (2005, November). Distributed device networks with security constraints. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 1, No. 4, pp 217-225.
- [163] Ahmadian, M.M.; Shajari, M.; Shafiee, M.A. Industrial control system security taxonomic framework with application to a comprehensive incidents survey. Int. J. Crit. Infrastruct. Prot. 2020, 29, 100356.
- [164] Patankar, R. P. (2004). A model for fault-tolerant networked control system using TTP/C communication. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 53(5), 1461-1467.
- [165] Åström, K. A., & Wittenmark, B. (1994). Computer-controlled systems: theory and design: Prince Hall.
- [166] Fridman, E., & Dambrine, M. (2009). Control under quantization, saturation and delay: An LMI approach. Automatica, 45(10), 2258-2264.
- [167] Tsumura, K., Ishii, H., & Hoshina, H. (2009). Tradeoffs between quantization and packet loss in networked control of linear systems. Automatica, 45(12), 2963-2970.
- [168] Tian, Engang, Dong Yue, and Chen Peng. "Quantized output feedback control for networked control systems." Information Sciences 178.12 (2008): 2734-2749.
- [169] Zhang, W., Branicky, M. S., & Phillips, S. M. (2001). Stability of networked control systems. Control Systems, IEEE, 21(1), 84-99.
- [170] Tasdelen, U., & Ozbay, H. (2013, June). On Smith predictor-based controller design for systems with integral action and time delay. In Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian (pp. 1-6). IEEE.
- [171] Poorani, V. J., & Anand, L. V. (2013, March). Comparison of PID controller and Smith predictor controller for heat exchanger. In Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICE-CCN), 2013 International Conference on (pp. 217-221). IEEE.
- [172] Lian, F. L., Moyne, J. R., & Tilbury, D. M. (2001). Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet. Control Systems, IEEE, 21(1), 66-83.
- [173] Singh, A. (2012). Predictive controller design for networked systems (Doctoral dissertation). National Institute of Technology, Rourkela.
- [174] ASHFAQ, H. Electrical Power System. CBS Publishers & Distributions, New Delhi, 1999, 538.

- [175] Peter w. Saver, M. a. PAI, "**Power System Dynamics and stability**" Prentice Hall, Inc. 1998.
- [176] ANDERSON, P.M.; FOUAD, A.A. **Power System Control & Stability**. IOWA State University Press, USA, 1986,796.
- [177] LARSEN, E. V.; SWANN, D. A. **Applying Power System Stabilizer** Part I, II, III. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 6, 1981, 3017-3045.
- [178] KUNDUR, P; ROGERS, G. J ZYWNO, M. S. **Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability**. Ibid, Vol. 4. N°. 2, May 1989, 614-621.
- [179] VESEL, Y. V.; HARSANYI, L. **PSS Design via Disturbance Attenuation Method**. Journal of electrical Engineering, Vol. 56, No.3-4, 2005, 110-112.
- [180] P . Kundur , D . C . Lee H . M . Zein El - Din , " **Power system stabilizers for thermal units : Analytical techniques and on – site validation** " , IEEE Trans. , vol. PAS -100 , No. 1 , January 1981 , pp 81 - 95 .
- [181] EL-METWALLY, K.A.; MALIK, O.P. **Fuzzy Logic Power System Stabilizer**. IEEE Proc-Gener. Transm.Distrib,Vol.142,No.3,1995, 277-281.
- [182] PETER. **Power System Dynamics and Stability**. Prentice Hall, New Jersy, 1998,353.
- [183] J. Stahlhut, T. Browne, G. Heydt and V. Vittal, **Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide-area power system control signals**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23(1), pp. 84–91, 2008.
- [184] H. Wu, K. Tsakalis and G. Heydt, **Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19(4), pp. 1935–1941, 2004.
- [185] W. Wang, Y. Xu and M. Khanna, **A survey of the communication architectures in the smart grid**, Computer Networks, vol. 55, pp. 3604–3629. 2011.
- [186] C. Taylor, D. Erickson, K. Martin, R. Wilson and V. Venkatasubramanian, **WACS – Wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration**, Proceedings of the IEEE, vol. 93(5), pp. 892–906, 2005.
- [187] R. Wilson, **An investigation of time transfer accuracies over a utility microwave communications channel**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8(3), pp. 993–999, 1993.
- [188] W. Yao, L. Jiang, Q. Wu, J. Wen and S. Cheng, **Delay-dependent stability analysis of a power system with a wide-area damping controller embedded**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26(1), pp. 233–240, 2011.
- [189] B. Chaudhuri, R. Majumder and B. Pal, **Wide-area measurement-based stabilizing control of a power system considering signal transmission delays**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19(4), pp. 1971–1979. 2004.
- [190] M. Koaizawa, M. Nakane, K. Omata and Y. Kokai, **Actual operating experience of on-line transient stability control systems (TSC systems)**, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, pp. 84–89, 2000.

- [191] H. Ota, Y. Kitayama, H. Ito, N. Fukushima, K. Omata, K. Morita and Y. Kokai, **Development of transient stability control system (TSC system) based on on-line stability calculation**, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11(3), pp. 1463–1472, 1996.
- [192] K. Vrdoljak, N. Perić and I. Petrović, 2010 - **Sliding mode based load-frequency control in power systems**. Electric Power Systems Research 80, PP. 514-527.
- [193] Xiangjie Liu, Huiyun Nong, Ke Xi, and Xiuming Yao, 2013- **Robust Distributed Model Predictive Load Frequency Control of Interconnected Power System**. Mathematical Problems in Engineering. PP. 1-10.
- [194] Chen, C.L. & Hsu, Y.Y., **Coordinated Synthesis of Multimachine Power System Stabilizer Using an Efficient Decentralized Modal Control (DMC) Algorithm**, IEEE Transactions on Power Systems, 2, (3) 543-550, 1987.
- [195] Chan, W.-C. & Hsu, Y.-Y. 1983. **An Optimal Variable Structure Stabilizer for Power System Stabilization**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (6) 1738-1746, 1983.
- [196] Fleming, R.J., Mohan, M.A., & Parvatisam, K, **Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power Systems. Power Apparatus and Systems**, IEEE Transactions on, PAS-100, (5) 2329-2333, 1981
- [197] M. Hanmandlu and N.V. Suryanarayana, **High-gain stabilizer for a multimachine power system**, IEEE PROCEEDINGS-D, Vol. 140, No. 4, JULY 1993
- [198] Katsuhiko Ogata. **Modern Control Engineering**. Pearson, 2009.
- [199] Jeffery B. Burl, (1999) - **Linear Optimal Control**, Addison-Wesley.
- [200] Kun L ,Anton S and Emilia F (2019)- **Survey on time-delay approach to networked control**. Elsevier Science. PP. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2019.06.005>
- [201] OLUGBENGA O (2014) - **DESIGN OF NONLINEAR NETWORKED CONTROL FOR WASTEWATER DISTRIBUTED SYSTEMS**. Cape Peninsula University of Technology.
- [202] Branicky, M. S., Phillips, S. M., & Wei, Z., 2000. **Stability of networked control systems: explicit analysis of delay**, In Proceedings of 2000 American Control Conference, 28-30 June, Danvers, MA, USA, pp. 2352-2357.
- [203] Zhang, W., Branicky, M.S., & Phillips, S.M. 2001. **Stability of networked control systems**. IEEE Control Systems Magazine, 21, (1) 84-99.
- [204] Park, H.S., Kim, Y.H., Kim, D.-S., & Kwon, W.H. 2002. **A scheduling method for network-based control systems**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 10, (3) 318-330.
- [205] Wang, F.Y., Liu, D., Yang, S.X., & Li, L. 2007. **Guest Editorial: Networking, Sensing, and Control for Networked Control Systems: Architectures, Algorithms, and Applications. Systems, Man, and Cybernetics**, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, 37, (2) 157-159

- [206] Zhang, Y., Zhong, Q., & Wei, L., 2008. Stability analysis of networked control systems with transmission delays, In Chinese Control and Decision Conference, July 2-4, Yantai, Shandong, China: IEEE, pp. 340-343.
- [207] Yue, D., Han, Q.L., & Peng, C. 2004. State feedback controller design of networked control systems. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 51, (11) 640-644.
- [208] Naghshtabrizi, P. 2007. Delay Impulsive Systems: A Framework for Modeling Networked Control Systems. PhD University of California Santa Barbara.
- [209] YUE D, HAN Q L, LAM J. Network-based robust H^∞ control of systems with uncertainty. Automatica, 2005, 41: 999-1007.
- [210] HE Y, WANG Q G, LIN C, WU M. Delay-range-dependent stability for systems with time-varying delay. Automatica, 2007, 43: 371–376.
- [211] HE Y, WANG Q G, XIE L, LIN C. Further improvement of free-weighting matrices technique for systems with time varying delay. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(2): 293–299.
- [212] Jiang, X., Han, Q.L., Liu, S., & Xue, A. 2008. A new H^∞ stabilization criterion for networked control systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 53, (4) 1025-1032
- [213] HE Y, LIU G P, REES D, WU M. Improved stabilization method for networked control systems. IET Proceedings of Control Theory & Applications, 2007, 1(6): 1580–1585.
- [214] Zhang, Y., Zhong, Q., & Wei, L., 2008. Stability of networked control systems with communication constraints, In Chinese Control and Decision Conference, July 2-4, Yantai, Shandong, China: IEEE. pp. 335-339.
- [215] Jian, S., Liu, G., & Jie, C., 2008. State feedback stabilization of networked control systems, In Proceedings of 2008 Chinese Control Conference, 16-18 July, Piscataway, NJ, USA: IEEE, pp. 457-461.
- [216] Naghshtabrizi, P., Hespanha, J. P., & Teel, A. R. (2008). Exponential stability of impulsive systems with application to uncertain sampled-data systems. Systems and Control Letters, 57(5), 378–385.
- [217] Fridman, E. (2010). A refined input delay approach to sampled-data control. Automatica, 46(2), 421–427.
- [218] Liu, K., Suplin, V., & Fridman, E. (2010). Stability of linear systems with general sawtooth delay. IMA Journal of Mathematical Control and Information, 27(4), 419–436.
- [219] Seuret, A. (2012). A novel stability analysis of linear systems under asynchronous samplings. Automatica, 48(1), 177–182.
- [220] Seuret, A. (2015). Stability analysis of uncertain sampled-data systems with incremental delay using looped-functionals. Automatica, 55(1), 274–278

Syrian Arab Republic
Al Baath University
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering
Department of Automatic Control and Computers Engineering



A Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the
PhD Degree in Automatic Control and Computers Engineering

Title:

**Study and Manipulate the Effects of Uncertain Time-Delay in
Networked Control Systems**

Prepared by

Eng. Mohammad Morhaf Alnifawi

Supervised by

Supervisor

Dr. Eng. Bassem Omran
Assistant Professor in
Automatic Control and Computers
Engineering Department
Al Baath University

CO - Supervisor

Dr. Eng. Goumana Diab
Assistant Professor in
Electronics and Communication
Engineering Department
Al Baath University

1443 A.H- 2022 A.D