

# دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

م. رغبة الابراهيم \* د. شفيق باصيل \* د. بسام عطيه \*\*\*

\*طالبة دراسات عليا (دكتوراه)، في قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة

البعث

\*\*أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة البعث

\*\*\*أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين

## المخلص

يركز هذا البحث على تطبيق التحكم الشعاعي بالمحركات التحريضية المستخدمة في الرافعة الجسرية. كما تضمن شرحاً للتزامن في النظم الكهروميكانيكية، وكيفية تحقيقه عند اختلاف نسب توزيع الحمل على المحركات التحريضية، باستخدام المخطط الصندوقي للرافعة الجسرية الذي قمنا بتصميمه بناءً على النموذج الرياضي المحاكى للمحرك التحريضي المتحكم به بطريقة التحكم بالفيض الموجه لكل محرك على حدى.

أخيراً أثبتت نتائج المحاكاة في بيئة Matlab\Simulink فعالية طريقة التحكم الشعاعي بالفيض مقارنة مع التحكم السلمي، على الرغم من اختلاف نسب توزيع الحمل بين المحركات، فهي تؤمن استجابة سريعة، وكفاءة أكبر في التغلب على الاضطراب الخارجي. كما ساهمت في انخفاض الحملات الصدمية وبالتالي الاهتزازات بجسم الرافعة أثناء الأعمال القاسية إلى الحدود الدنيا المسموح بها وحققت زمن استجابة قياسي.

الكلمات المفتاحية: تحكم بالفيض الموجه، رافعة جسرية، نظم كهروميكانيكية، محرك تحريضي، التزامن.

# **Synchronization Study of independent induction motors in multi- masses, multi-motors electromechanical Systems, driven by Using Vector Control**

## **Abstract**

This research focus on applying vector control to induction motors what is using in granty crane. It also includes explanation synchronization in the electromechanical systems, and How to achieve it when the load distribution ratios on the induction motors differ, using the block diagram of the gantry crane that we designed based on the simulated mathematical model of the induction motor controlled by field-oriented control way.

Finally, The simulation results in Matlab\Simulink environment proved the effectiveness of the proposed methodology compared to scalar control, despite the different load distribution ratios between the motors, as it provides a fast response, efficiency in overcoming external disturbance. It also contributed to reducing shock loads and thus vibrations in the crane body during harsh work to the minimum permissible limits and achieved a standard response time.

Key words: field-oriented control (FOC), gantry crane, electromechanical systems, induction motor, synchronization.

## 1- مقدمة

تُستخدم نظم القيادة الآلية متعددة المحركات في العديد من آليات الرفع والنقل والآليات الجبلية وتتصف هذه النظم باتصال مركب (متعدد الأبعاد) بين المحركات وعضو التشغيل من خلال وسائط نقل الحركة من جهة وعبر الهيكل المعدني للرافعة من جهة أخرى. بالإضافة إلى وجود عناصر المرونة من محاور وقنوات رفع الأحمال مع تأثير كل من عطالة المحركات وعطالة الكتل.

تتسبب هذه العناصر جميعها بحدوث حمولات وصددمات ديناميكية تفوق قيمها القيم المسموح بها للآلية الإنتاجية كما تؤدي إلى ظهور حالات عابرة اهتزازية تتسبب في تأخير العملية الإنتاجية وأحياناً في خروج الآلية عن العمل حيث أن استمرار هذه الحمولات مع اهتزازها يسرع من اهتراء الآلية الإنتاجية وخروجها من العمل قبل الفترة المخصصة لها.

وإذا تذكرنا أن الميزة الأساسية لعمل هذه الآليات هو النظام الدوري المتكرر والقصير الزمن بمعنى أنه لكل دورة عمل (إقلاع وفرملة وعكس اتجاه الحركة) ستظهر تلك الحمولات الصدمية التي تؤثر على القسمين الميكانيكي والكهربائي وخاصة أن غالبية هذه الآليات تستخدم المحركات التحريضية والتي تمثل عناصر غير خطية لذا فإن وجودها في نظام التحكم أيضاً يضيف مشكلة جديدة وهامة عند عمل هذه الآليات.

## 2- أهمية البحث

تبرز أهمية البحث في تصميم نموذج قيادة كهربائي بطريقة التحكم الشعاعي بالفيض الموجه لنظام كهروميكانيكي ثنائي الكتل - ثنائي المحركات التحريضية بهدف تطوير وتحسين جودة عمل هذه النظم وإنشاء نظم فعّالة وبسيطة وقليلة الاستهلاك للطاقة وتحقيق التوازن الفعلي عند عمل الروافع في الظروف القاسية المتمثلة بالتوزع غير المتساوي للحمولات على المحركات المستخدمة في الرافعة لأن أي اختلاف مهما كان صغيراً في سرعتها سينشأ عنه حمولات ديناميكية إضافية أخرى تسيء إلى عمل الآليات وإلى إنتاجيتها وتشكل خطورة على هيكلها المعدني.

### 3- طريقة البحث وخطواته

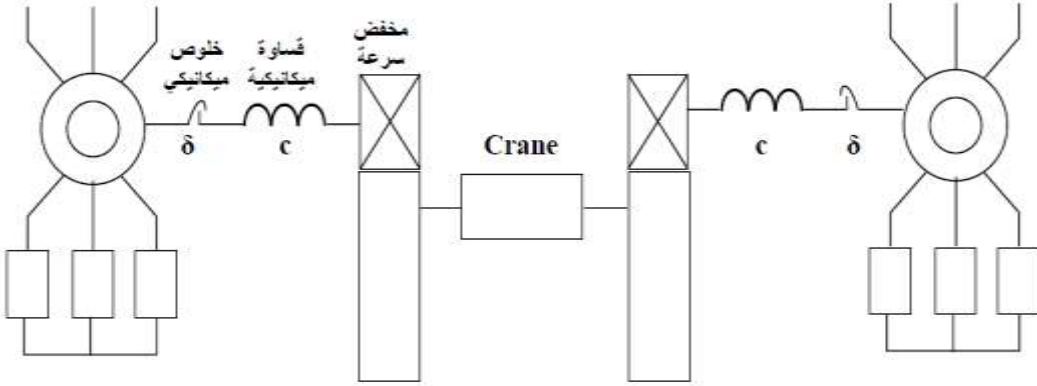
لتحقيق الهدف الأساسي أجرينا نمذجة للنظام الكهروميكانيكي مع المتحكمات الشعاعية بالمحركات التحريضية المستقلة المستخدمة، ومن ثم وظفنا مخطط المحاكاة هذا لقيادة الرافعة ثنائية القنال بالإضافة لدارات تغذية عكسية لتحقيق العمل المتزامن، ومن ثم درسنا توزيع الحمولة بشكل غير متساوي على القنالين وبنسب مختلفة لتكون الإشارات أقرب للواقع العملي، مما حسن أداء النظام وخفّض زمن الحالة العابرة بشكل كبير وهذا ما تؤكدته نتائج المحاكاة في بيئة .Matlab/Simulink

### 4- دراسة تزامن حركة عدة محركات في الرافعة

إن الصفة العامة لآليات الرفع هو عملها في نظام العمل الدوري المتكرر والقصير الزمن وبالتالي بالنسبة لها من المهم جداً التقليل من الحمولات الديناميكية وفي بعض الأحيان يتطلب العمل تحقيق الحد الأدنى لزمن الحالة العابرة وفي أحيان أخرى قد يتطلب الأمر تأمين الحركة التزامنية لعدة محركات مستقلة كما في الشكل (1) لأن أي اختلاف مهما كان صغيراً في سرعتها سينشأ عنه حمولات ديناميكية إضافية أخرى تسيء إلى عمل الآليات و إنتاجيتها وتشكل خطورة على هيكلها المعدني.

بشكل عام تتميز آليات الرفع بالعمل على سرعات منخفضة مع نظام عمل من النوع القاسي حيث أن زمن الاستمرارية بحدود /60%/ وبعده من المرات يتراوح بين /40-60/ مرة بالساعة إن ضرورة السرعات المنخفضة تأتي من ضرورة تنفيذ عمليات نقل ورفع الحمولات مع عمليات التنسيق بسلاسة وببطء ولكنها لا تتطلب تنظيماً دقيقاً وناعماً بالإضافة لذلك يجب الانتباه بشكل جدي إلى الحمولات الديناميكية التي تنشأ عند العمل لذا فالمهم دوماً في هذه الآليات هو التقليل قدر الإمكان من زمن الحالة العابرة مع تأمين الإنتاجية الأعظمية ضمن مجالات التسارع

المطلوبة للآلية والتي لا يمكن تجاوزها كونها موضوعة أساساً وفق المواصفات العملية التكنولوجية [1].



الشكل (1) الدارة الحركية لآلية الرفع المرفئية (Crane)

تستخدم هذه الآلية بشكل واسع المحركات التحريضية المتميزة بالبساطة والموثوقية والرخص ولكن مشكلتها الأساسية هي صعوبة التحكم بعزم وسرعة المحركات التحريضية بمساعدة إدخال المقاومات إلى دارة الدوار لا تسمح بالحصول على تنظيم ناعم وسرعات منخفضة ومستقرة في حالة العمل القاسي جداً مما يؤدي إلى خروج الآلية عن نطاق التحكم والسيطرة.

من أجل وضع الحلول الهندسية لمشكلة العمل المتزامن لعدة محركات تقود حركة آلية المسير في الرافعة من المفضل أن تكون هذه الحلول غير محتوية على أية تجهيزات إضافية ولذلك يفضل استبعاد الحلول الميكانيكية كون الجملة الكهروميكانيكية في الرافعة ذات تركيب هيكل معقد.

وبالتالي سوف نعتمد على استخدام الحل بالطرق الكهربائية من خلال التحكم بالفيض الموجه للمحركات التحريضية و دارات التغذية العكسية.

إن التغذية العكسية السالبة تساهم في التقليل من قيمة الخطأ عند الخرج. كما يعد تحقيق الحركة المتزامنة أمراً هاماً لعدة أسباب نذكر منها [2]:

1. يؤثر الاختلاف في المسير الناتج عن الاختلاف في سرعة المحركات على أجزاء الرافعة ويزيد من تحميلها بحمولات ديناميكية إضافية تتسبب في زيادة اهتزاز الرافعة أثناء العمل وبالتالي يقلل من دقة العمل ويؤخر العملية الإنتاجية.

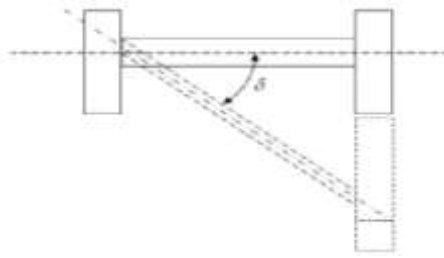
دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

2. ظهور الاختلاف بالمسير يسيء إلى جودة أداء الرافعة وخاصة في حالة رفع الأحمال المعلقة بأمراس حيث يؤدي إلى زيادة اهتزاز الحمل المعلق وتبدو هذه المشكلة بشكل أخطر إذا كانت الأحمال مواد سائلة أو معادن مصهورة.

3. يزيد الاختلاف بالمسير من صعوبة تأمين التوقف الدقيق في المكان المطلوب.

4. كل ما ذكر يساهم بشكل عام في خفض الإنتاجية الفعلية للرافعة.

ويعرف انزياح هيكل الرافعة بأنه انحراف الجسور العرضانية للهيكل بزوايا عن الوضعية الطبيعية العمودية على السكة التي تتحرك عليها الرافعة كما هو موضح في الشكل (2):



الشكل (2) انحراف المسار بين محركي الرافعة

ويظهر هذا الانزياح بسبب اختلاف القيم اللحظية للسرعات الخطية وللتسارعات الخاصة بمحاور الارتكاز في هيكل الرافعة أثناء الحركة وينتج هذا الاختلاف عن أحد الأسباب التالية:

1. الأخطاء الحاصلة في تصنيع السكة التي تسيير عليها الرافعة أو دواليب تسيير الرافعة.

2. اختلاف وضعية المسير تحت هيكل الرافعة.

3. اختلاف نسبة تحميل المحركات بسبب اختلاف أماكن توضع الحمل المعلق بالمرس المرن.

4. عدم تناظر المميزات الميكانيكية للمحركات الكهربائية التي تقود حركة الرافعة عند محاور الارتكاز [3].

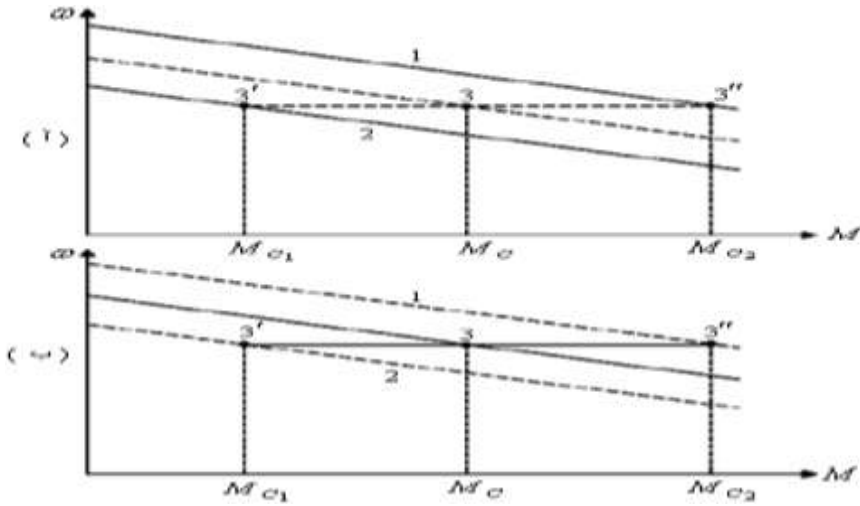
ويتسبب هذا الانزياح بنشوء حمولات إضافية في عناصر الجملة الكهروميكانيكية للرافعة تؤدي بدورها إلى تداخل في توازن القوى والعزوم المؤثرة نتيجة لعزم المرونة الناجم عن اختلاف المسير.

إن حل مشكلة الانحراف بالمسار في الجسم الهيكلي للرافعة يتحقق بالتأثير على عمل نظام العمل محرك تحريضي - مبدلة ترددية وبشكل عام إن مبدأ عمل التغذية العكسية السالبة هدفه خفض نسبة الانحراف، "طبعاً الانحراف سببه اختلاف سرعتي المحركين" ولذلك يستخدم عادةً نوعان من التغذية العكسية:

أ- تغذية عكسية بفرق سرعتين: تغذية عكسية مرنة.

ب- تغذية عكسية بفرق المسافة: تغذية عكسية قاسية.

يبين الشكل (3) المميزات الميكانيكية التي تظهر حالة التزامن في الأجزاء المتحركة للآلية.



الشكل (3) المميزات الميكانيكية التي تظهر عمل نظام التزامن

أ- من أجل جهود دخل غير متساوية  $U_{Z1} \neq U_{Z2}$  ،

ب- من أجل حمولات غير متساوية على المحركات  $M_{C1} \neq M_{C2}$

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

على الشكل (3) تظهر مجموعتين من المميزات الميكانيكية: مجموعة منقطة ومجموعة بخط عريض مستمر تحت تأثير نظام عمل المحرك مع المتحكم والمحددتين بالنقطتين (1,2) وبالنقاط الثلاثة ("3,3',3") بعد نهاية الحالة العابرة عند التأثير على التوالي:

1- إما على حساب القساوة الميكانيكية.

2- إما على حساب الوصلات الكهربائية في دارة التغذية العكسية للمنظم

الشكل (3-أ)

يظهر عمل الدارة مع قيم متساوية للعزم الستاتيكي على المميزات الميكانيكية ذات القساوة الميكانيكية المتساوية حالة تساوي ثوابت التضخيم في نظام الدارة المفتوحة لنظام التحكم بعمل المبدل ولكن من أجل جهود دخل مختلفة  $U_{z1} > U_{z2}$  وتحديداً لذلك نقاط التشغيل هنا النقطتان (1,2).

الآن عندما يتم حذف الانحراف بالسرعتين على حساب قساوة الهيكل المعدني أي على حساب القساوة عندئذ كلا المحركين في نهاية الحالة العابرة سوف يعملان بسرعة واحدة في النقاط ("3,3'). لذلك قساوة الهيكل المعدني توازن عمل المحركات على حساب إعادة توزيع الحمل بين محوري المحركين ولكن دون أي تغير في الميزة الميكانيكية لكل منهما وهي على حساب انتقال نقاط العمل من وضعية أولى إلى وضعية ثانية  $2M_c = M_{c1} + M_{c2}$ . ولكن عند تأثير فقط وصلات التغذية العكسية (دارات المنظم) فإن كلا المحركين يدوران بسرعات متساوية والممثلة بالنقطة (3) على حساب نقل المحركات إلى مميزات ميكانيكية جديدة مشابهة تماماً للميزة بالخط المنقط.

الشكل (3-ب)

يظهر نفس الصورة المبينة في (3-أ) ولكن بشروط جهود الدخل المتساوية  $U_{z1} = U_{z2}$  وعدم تساوي الأحمال النقطتان (1,2). هنا أيضاً النقطة (3) الموافقة للعمل بسرعة ثابتة لكلا المحركين بعد تأمين عمل حالة التوازن التي تحقق توازن الحمولات على المحركات  $M_c = 0.5(M_{c1} + M_{c2})$ ، وفي نفس الوقت أنظمة التوازن الكهربائي تقود إلى العمل مع نفس السرعة ولكن في النقطتين ("3,3') على مميزتين جديدتين.



الآن: عند العمل بنفس الوقت في التأثير على قساوة المميزة الميكانيكية وعلى نظام التزامن (وهو عملياً ممكن) سنحقق عندئذ كلتا الحالتين:

أولاً: إعادة توزيع الأحمال، ثانياً: الانتقال للعمل على مميزة ميكانيكية جديدة.

انطلاقاً مما تقدم تصبح مسألة تصميم طرق التحليل الرياضي ووضع النماذج الرياضية للحمولات الديناميكية في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل ذات المحركات التحريضية العديدة المقادة بطرق التحكم المختلفة مع الأخذ بالحسبان أثر الوصلات المرنة بين المحرك والآلية وحالة اهتزاز الحمل المعلق إلى حبل مرن مسألة هامة جداً لا سيما عند دراسة حالات الاستقرار في شروط الجودة والاستقرار المطلوبين مسبقاً بشروط العملية التقنية.

## 5- طرق التحكم بالمحرك التحريضي

إحدى أشهر الخوارزميات المستخدمة في أنظمة القيادة الكهربائية ذات الحلقة المفتوحة هي خوارزمية القيادة السلمية ( $V/f=ct$ ) يقوم المبدأ النظري للخوارزمية على الحفاظ على نسبة ثابتة بين الجهد والتردد المطبقين على المحرك، مما يعني ثبات الفيض المغناطيسي في المحرك، والمحافظة على عزم ثابت. لضمان العمل مع فيض مغناطيسي ثابت في المحرك لا بد من الحفاظ على نسبة ثابتة بين القوة المحركة الكهربائية العكسية والتردد، أي أن جهد التغذية الواجب تطبيقه على المحرك يجب أن يتغير وفق نسبة ثابتة مع التردد المطبق، ويتم اختيار هذه النسبة بحيث تتساوى قيمة الفيض الناتجة مع قيمة الفيض الإسمية للمحرك. تبين المعادلة (1) القانون الأساسي ( $V/f=ct$ ).

$$\frac{V_s - R_s I_s}{2\pi f_s} = \Phi_s = ct \quad (1)$$

بإهمال هبوط الجهد على مقاومة الثابت لصغره عند السرعات العالية نسبياً فإن القوة المحركة الكهربائية العكسية يمكن تقريبها إلى قيمة الجهد المطبق، وبالمقابل عند السرعات المنخفضة تكون قيمة القوة المحركة الكهربائية العكسية صغيرة جداً بينما يكون هبوط الجهد على مقاومة الثابت ملحوظاً، لذا لا بد من تعويض هبوط الجهد هذا، من خلال حقن جهد إضافي لدعم المحرك عند السرعات المنخفضة لضمان فيض مغناطيسي ثابت فيه، وغالباً ما يتم اختيار قيمته بحدود (0-15%) من الجهد الإسمي للمحرك ويسمى (Boosting Voltage) [2].

أظهرت الأبحاث أن خوارزمية القيادة السلمية ( $V/f = ct$ ) تعاني من مشاكل عدة عند السرعات العالية والمنخفضة، فعند السرعات المنخفضة يظهر أثر هبوط الجهد في مقاومة الثابت، لذلك يتم تعويض هذا الهبوط بجهد داعم كما تم شرحه سابقاً، أما في السرعات العالية فإن وجود الجهد الداعم يسبب زيادة في قيمة الجهد المغذي للمحرك مما يسبب دخول المحرك في الإشباع، وبالتالي فإن إضافة الجهد الداعم غير ضروري في السرعات العالية [5]. من أجل التخلص من هذه المشاكل ظهرت خوارزمية القيادة السلمية في نظام الحلقة المغلقة وهي أيضاً تعد من أبسط الطرق لتنظيم سرعة المحرك.

كما هو معلوم من العلاقة (1) فإن خوارزمية القيادة ( $V/f = ct$ ) قائمة على فرضية ثبات النسبة (طويلة فيض الثابت) بين طويلة شعاع الجهد والتردد الزاوي في الثابت. يمكن إذاً بناء خوارزمية ( $V/f = ct$ ) في نظام الحلقة المغلقة مع تنظيم كل من السرعة وطويلة شعاع فيض الثابت وبالتالي التخلص نهائياً من الجهد الداعم.

رغم عمل نظام القيادة السلمية ( $V/f = ct$ ) في الحلقة المغلقة عند تنظيم السرعة مع إضافة جهد داعم أو من دون إضافة جهد داعم عبر تنظيم فيض الثابت مع تنظيم التيارات أو من دون تنظيمها، إلا أن أداء النظام في الحالة الديناميكية كان منخفضاً، حيث يتم الاعتماد على قانون سلمي في توليد جهود أو تيارات الثابت الثلاثية، أي أن النظام الثلاثي لا يمنح معلومة دقيقة عن طويلة شعاع الجهد وزاويته (مكان شعاع الجهد) عند مختلف ظروف التشغيل، لذلك يبقى نظام القيادة هذا محصوراً في التطبيقات ذات الأداء الديناميكي المنخفض، أما أجل التطبيقات ذات الأداء العالي فلا بد من استخدام نظام قيادة ذي أداء مرتفع في الحالتين الديناميكية والستاتيكية كنظام التحكم الشعاعي (FOC). الذي اقترح من قبل Hasse بعام 1969 و Blaschke في 1972، ويشكل، المثال الأكثر أهمية بالنظرية والتدريب على التحكم بالمحركات التحريضية. بالتعريف، الهدف من توجيه الفيض هو جعل المحرك التحريضي يحاكي محرك التيار المستمر ذو التهيج المستقل كمنبع للعزم القابل للتعديل، [6] (العزم الكهرومغناطيسي يتناسب طرماً مع مركبة التيار  $i_{s\beta}$  وذلك في جملة محاور إحداثيات ثنائية  $(\alpha, \beta)$  دوارة بسرعة الساحة المغناطيسية  $(\omega_k, \omega_s)$ )، منذ ذلك الوقت واصل الباحثون تطوير هذه الخوارزمية، إلى أن أصبحت خوارزمية التحكم الشعاعي في عصرنا الحالي منتشرة بكثرة في التطبيقات الصناعية ذات الأداء المرتفع.

في هذا البحث قمنا بالاستفادة من تصميم نظام القيادة الشعاعية للمحرك التحريضي FOC الذي ساهم بتحسين أداء المحرك التحريضي (الذي قمنا بتقديمه في البحث المقبول للنشر في مجلة جامعة البعث بتاريخ 3-4-2022) في تحسين أداء النظم الكهروميكانيكية [10].

## 6- التمثيل الرياضي للمحرك التحريضي ثلاثي الطور و تنظيم سرعته بالاعتماد على نظام القيادة الشعاعية:

يعطى النموذج الرياضي للمحرك التحريضي ثلاثي الطور الذي يستخدم مركبتي شعاع فيض الدوار  $\Phi_{r\alpha}^k, \Phi_{r\beta}^k$  مع مركبتي شعاع تيار الثابت  $i_{s\alpha}^k, i_{s\beta}^k$  كمتحولات حالة، في نظام محاور الإحداثيات الثنائية المتعامدة والدوارة بسرعة عشوائية  $\omega_k$  كما يلي [8]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha}^k \\ \dot{i}_{s\beta}^k \\ \dot{\Phi}_{r\alpha}^k \\ \dot{\Phi}_{r\beta}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_5 & \omega_k & a_3 & a_4\omega \\ -\omega_k & -a_5 & -a_4\omega & a_3 \\ a_2 & 0 & -a_1 & \omega_k - \omega \\ 0 & a_2 & -\omega_k + \omega & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha}^k \\ i_{s\beta}^k \\ \Phi_{r\alpha}^k \\ \Phi_{r\beta}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha}^k \\ v_{s\beta}^k \end{bmatrix} \quad (2)$$

حيث أن ثوابت المعادلة السابقة تعطى بالعلاقات التالية:

$$a_1 = \frac{R_r}{L_r}, \quad a_2 = \frac{L_m R_r}{L_r}, \quad a_3 = \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}, \quad a_4 = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r},$$

$$a_5 = \frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}, \quad b = \frac{1}{\sigma L_s}$$

أما علاقة العزم الكهرومغناطيسي فيمكن كتابتها بدلالة مركبات التيار في الجزء الثابت ومركبات فيض الجزء الدوار كما يلي:

$$T_{em} = \frac{PL_m}{L_r} (\Phi_{r\alpha}^k i_{s\beta}^k - \Phi_{r\beta}^k i_{s\alpha}^k) \quad (3)$$

والمعادلة الميكانيكية يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (T_{em} - T_d) - \frac{f}{J} \omega \quad (4)$$

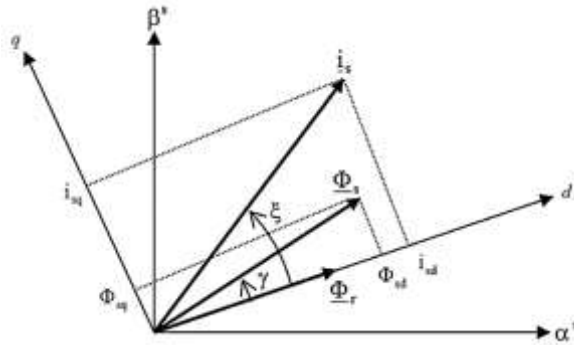
حيث  $v_{s\beta}^k, v_{s\alpha}^k$ : مركبتا شعاع جهد الثابت في نظام محاور إحداثيات ثنائية متعامدة ودوارة بسرعة عشوائية  $\omega_k$ .

$\omega = p\Omega$ : السرعة الزاوية الكهربائية للدوار وتساوي حاصل ضرب السرعة الزاوية الميكانيكية للدوار  $\Omega$  بعدد أزواج الأقطاب  $p$ ،  $L_m$ : المحارضة المتبادلة للثابت والدوار،  $L_s$ : المحارضة للثابت،  $L_r$ : المحارضة للدوار،  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$  وتعرف بعامل التشتت،  $J$ : عزم العطالة،  $T_d$ : عزم الحمل المقاوم،  $f$ : ثابت عزم الاحتكاك اللزج.

في المعادلتين (2) و (3) المقادير الكهربائية (التيارات، الفيوض والجهود) في الثابت والدوار التي تم التعبير عنها في نظام محاور الإحداثيات المتعامدة  $\alpha^k, \beta^k$  والدوارة بسرعة عشوائية  $\omega_k$ .

في الواقع، بالاعتماد على نظام القيادة الشعاعية، يمكن تقريب أداء المحرك التحريضي ثلاثي الطور بمحرك تيار مستمر ذي تهيج مستقل حيث يمكن تمثيله رياضياً وذلك باعتبار نظام محاور الإحداثيات الثنائية دوار بسرعة الحقل الدوار، أي  $\omega_k = \omega_s$ ، وتوجيه شعاع فيض الدوار  $\underline{\Phi}_r$  باتجاه المحور  $\alpha$  كما هو مبين في الشكل (4) أي أن:

$$\begin{aligned} \Phi_r &= \Phi_{r\alpha} = \Phi_r \\ \Phi_{r\beta} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$



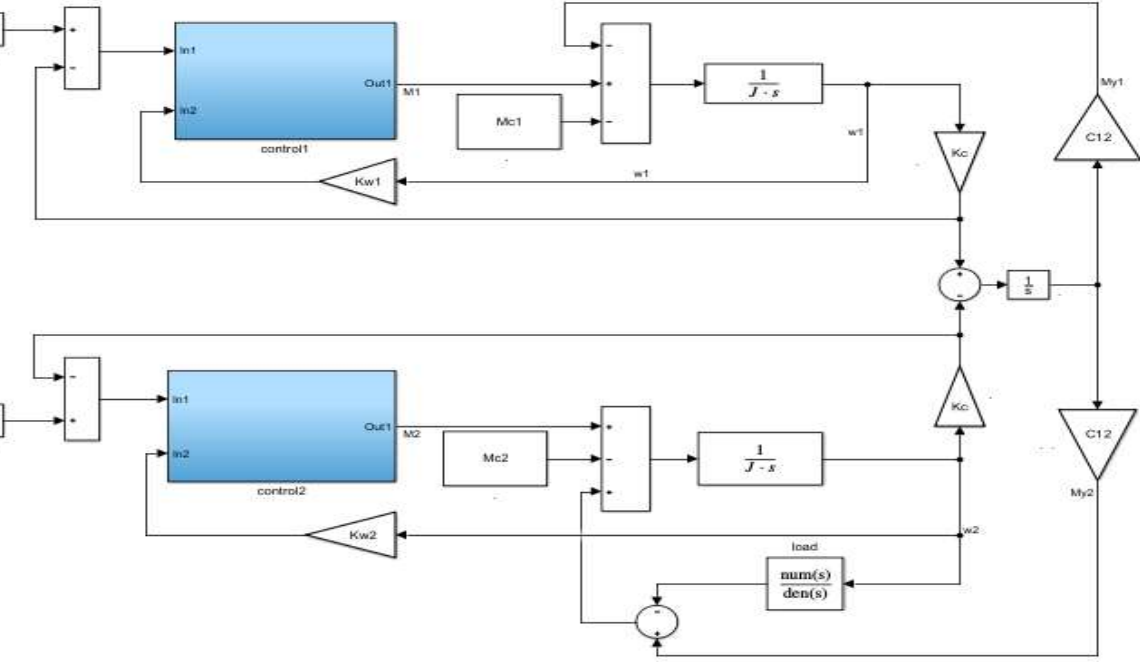
الشكل (4): توجيه شعاع فيض الدوار باتجاه المحور  $d$

7- محاكاة نموذج النظام الكهروميكانيكي ثنائي الكتل، ثنائي المحركات التحريضية المقادة شعاعياً:

انطلاقاً من النموذج الرياضي للتحكم بالفيض الموجه بمحرك تحريضي ثلاثي الطور قمنا ببناء المخطط الصندوقي لقيادة نظام كهروميكانيكي ثنائي الكتل - ثنائي المحركات التحريضية وهو عبارة عن رافعة رصيف مرفئية جسرية وقمنا بمناقشة حالات تحميل مختلفة وذلك في بيئة ماتلاب/ سيمولينك.

الشكل (5) يوضح المخطط الصندوقي الممثل للرافعة الجسرية:

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي



الشكل (5) المخطط الصندوقي الممثل للرافعة الجسرية

حيث:  $M_{c1} = M_{c2} = 162.8 [N.m]$  عزم المقاومة الستاتيكي

$C_{12} = 3677.4 [N.m / rad]$  القساوة الميكانيكية منقولة لمحور المحرك.

$K_{\omega}$  ثابت التغذية العكسية بالسرعة

$J = \frac{J_M}{m}$  : عزم عطالة الآلية،  $m$  عدد المحركات.

بلوكة Load تعبر عن الحمل مع مرس التعليق حيث تمثل عملية اهتزاز وتأرجح الحمل بمعادلة تفاضلية غير متجانسة من الدرجة الثانية

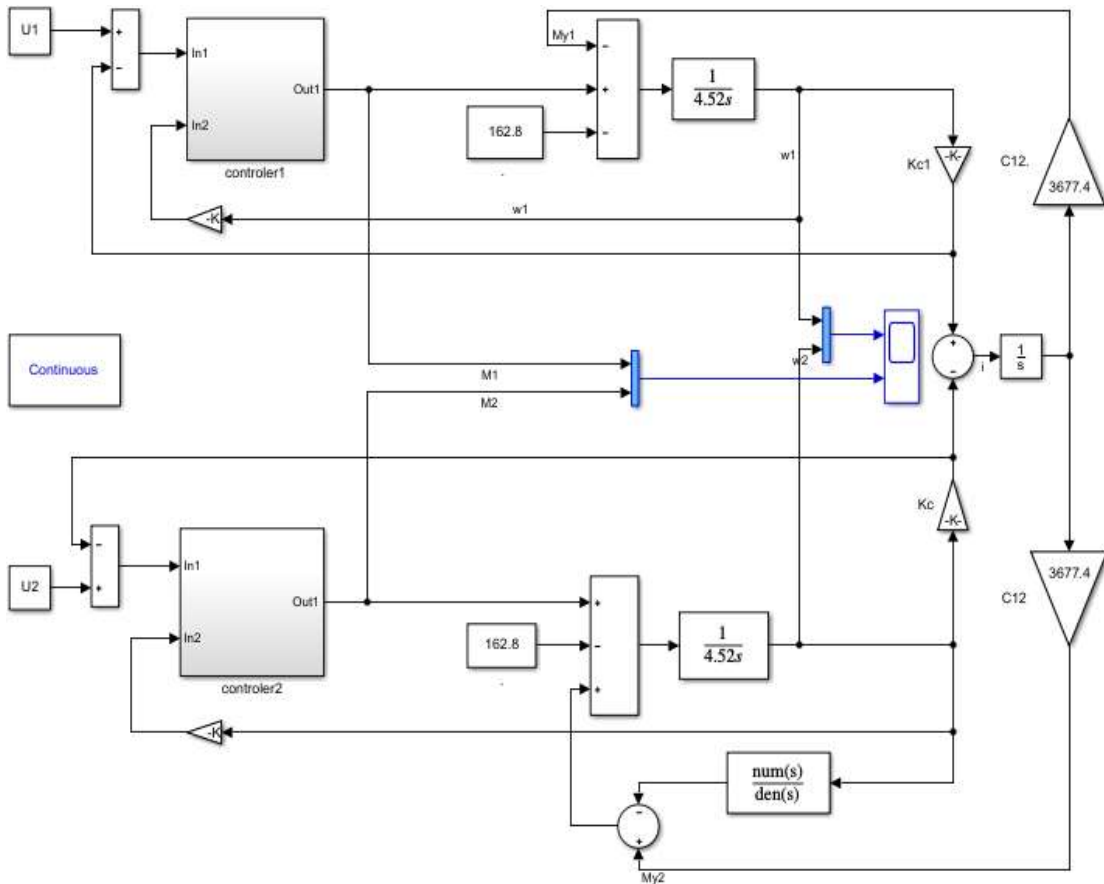
$$H_{load}(s) = \frac{M_{load}(s)}{\omega(s)} = \frac{J_{load}(s)}{T^2 s^2 + 1} \quad (6)$$

وفي الجدول (1) نبين مواصفات الحمولة التي يقودها المحرك.

الجدول (1) مواصفات الحمولة التي يقودها المحرك [9]:

الحمولة	وزن الجسم الدوار	سرعة الانتقال	نسبة التخفيض	التسارع المسموح به	قطر دولاب العربة	عدد المحركات
15T	76.5T	1.42m / sec	$i = 24.9$	$0.5m / sec^2$	0.71m	2-IM

ومنه وبعد تعويض القيم المحسوبة والتصميمية للرافعة المدروسة نحصل على الشكل (6) الذي يوضح المخطط التنفيذي لها مع الراسم المستخدم لإظهار تغيرات كل من سرعات وعزوم المحركين المستخدمين:

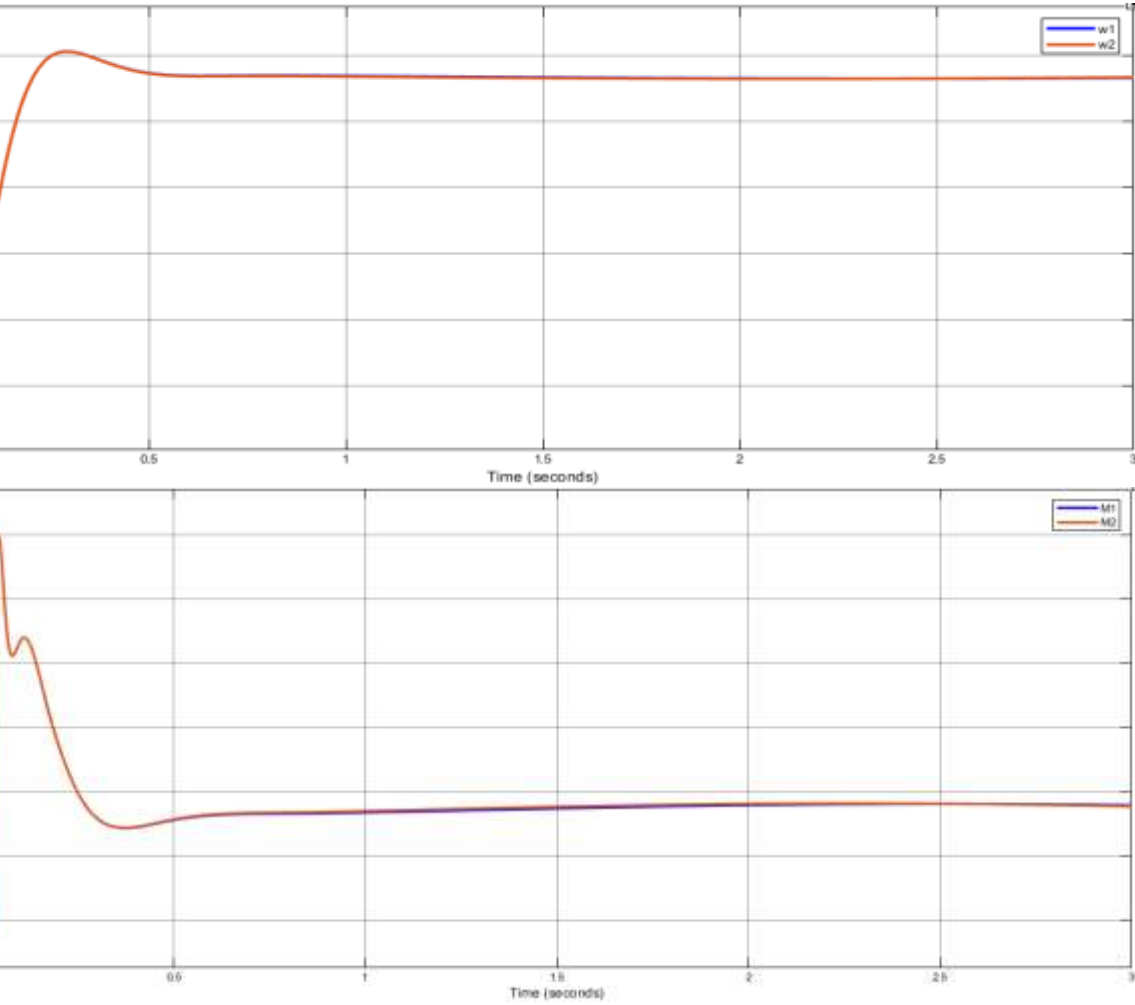


دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

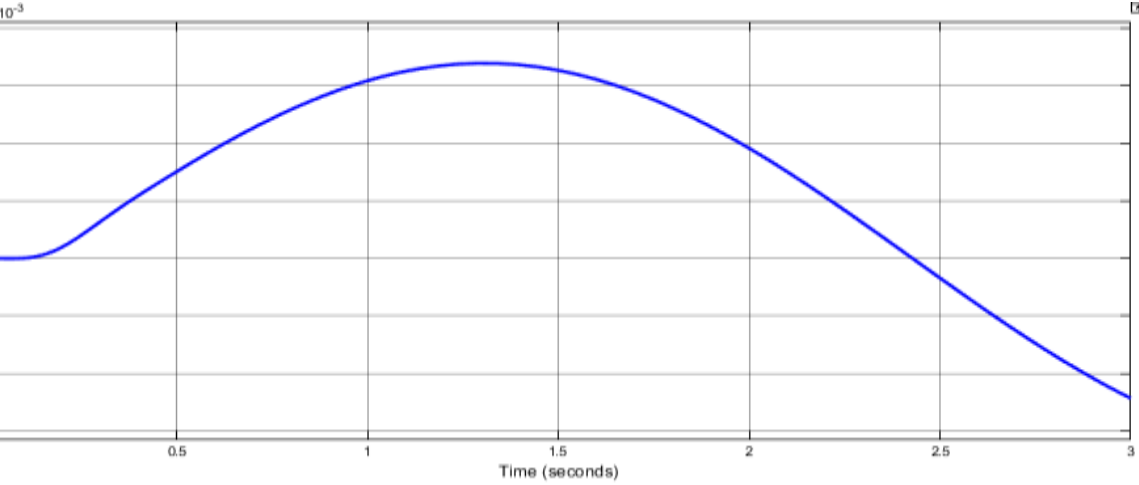
الشكل (6) المخطط الصندوقي للتنفيذي للرافعة عديدة الكتل عديدة المحركات المقادة باستخدام  
التحكم الشعاعي

من خلال المخطط التنفيذي السابق سنقوم بمناقشة تسع حالات لتوزع الحمولة على المحركين أولاً  
بشكل متساوي ومن ثم بشكل غير متساوي وبنسب مختلفة كما يلي:

أولاً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0$  أي الحمولة موزعة بالتساوي على المحركين  
التحريضيين المستقلين، يبين الشكل (7) تغير سرع وعزوم المحركين وتغير إشارة فرق المسير:







الشكل (7) النتائج عند توزيع الحمولة بالتساوي

أ-  $\omega_1, \omega_2$  سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

ب-  $M_1, M_2$  العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

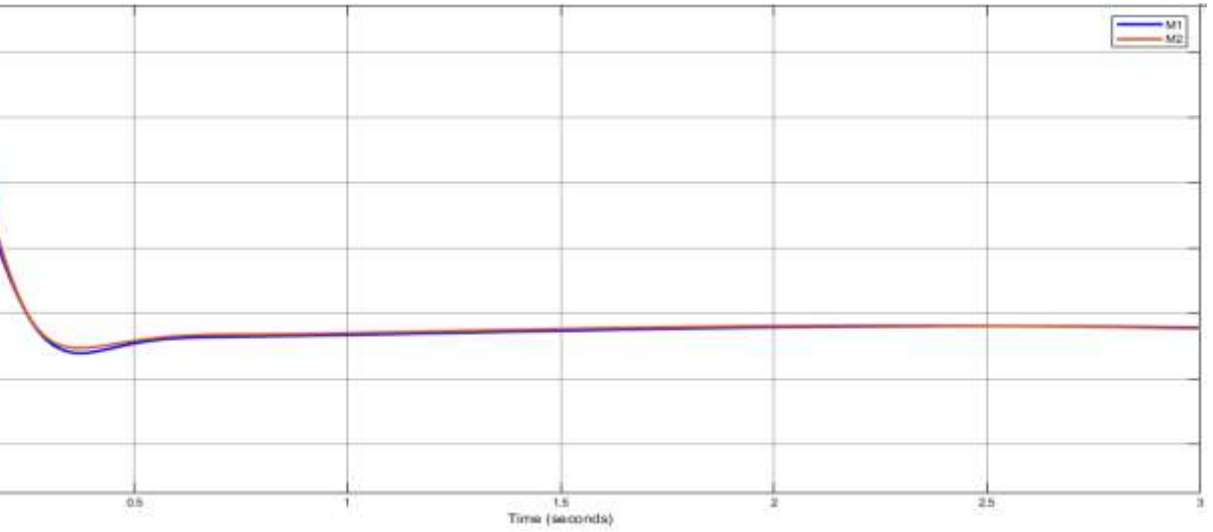
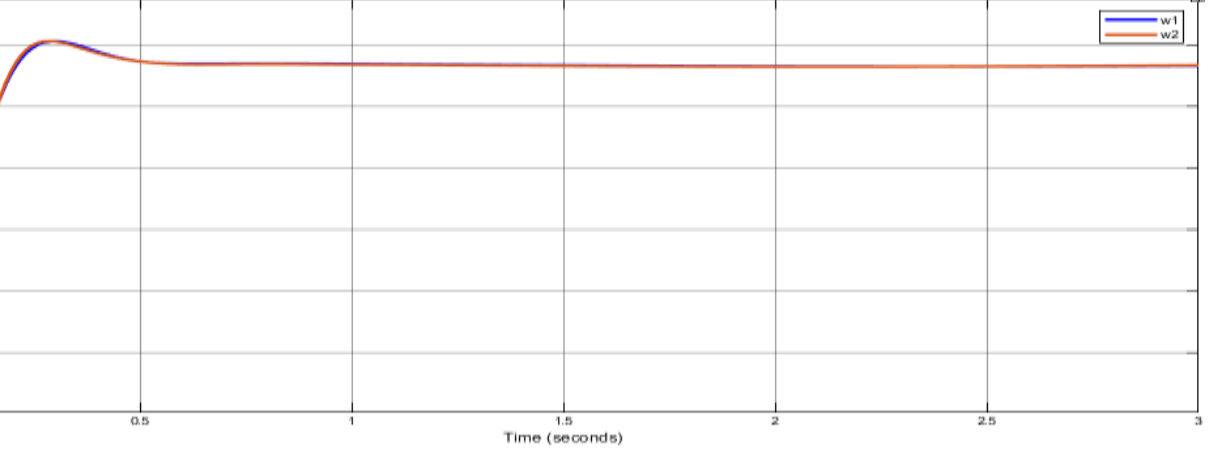
ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

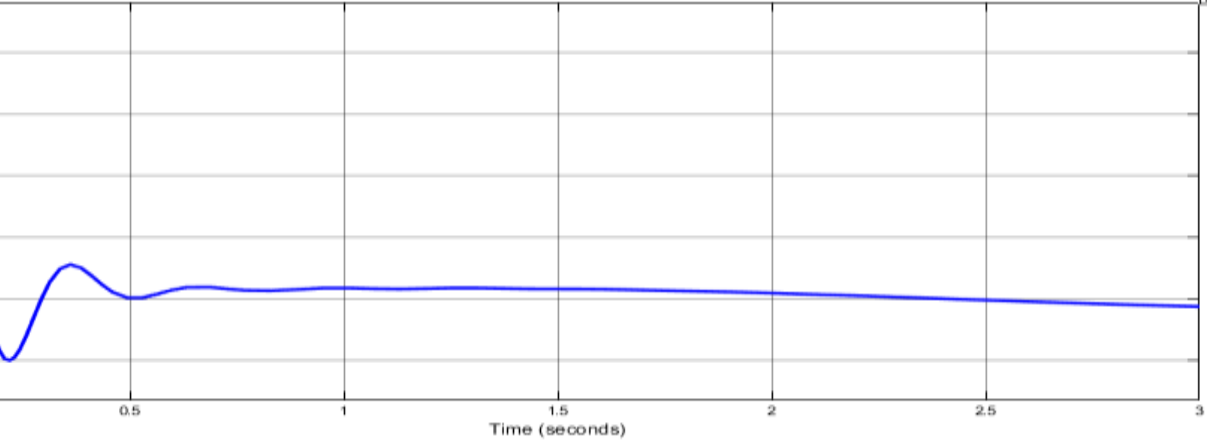
في هذه الحالة نلاحظ:

- انطباق منحنيات سرعتي المحركين وكذلك منحنيات العزم الخاصة بهما بسبب توزيع الحمولة بشكل متساوي على المحركين
- انسيابية هذه المنحنيات وعدم ظهور أي تأرجحات بالسرعة
- العزم لم يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك والمحددة بالمواصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6 [sec]$ .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم صغيرة جداً من رتبة الميلي راديان أكبر قيمة له  $.3.4 \times 10^{-3} [rad]$

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

ثانياً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.2$  نلاحظ في الشكل (8) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 40% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 60% من الحمل الكامل.





الشكل (8) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.2$

أ- سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

ب- العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

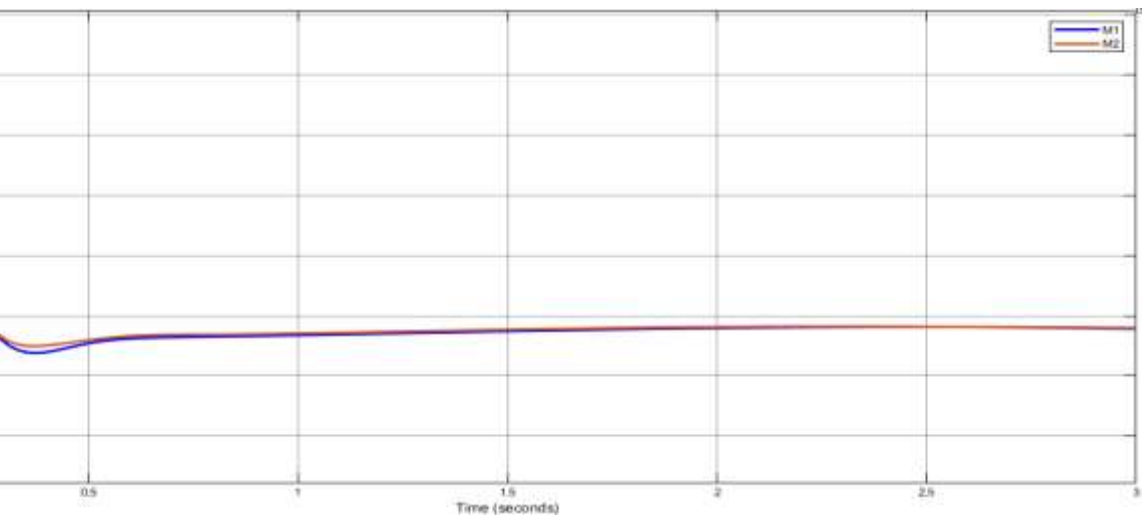
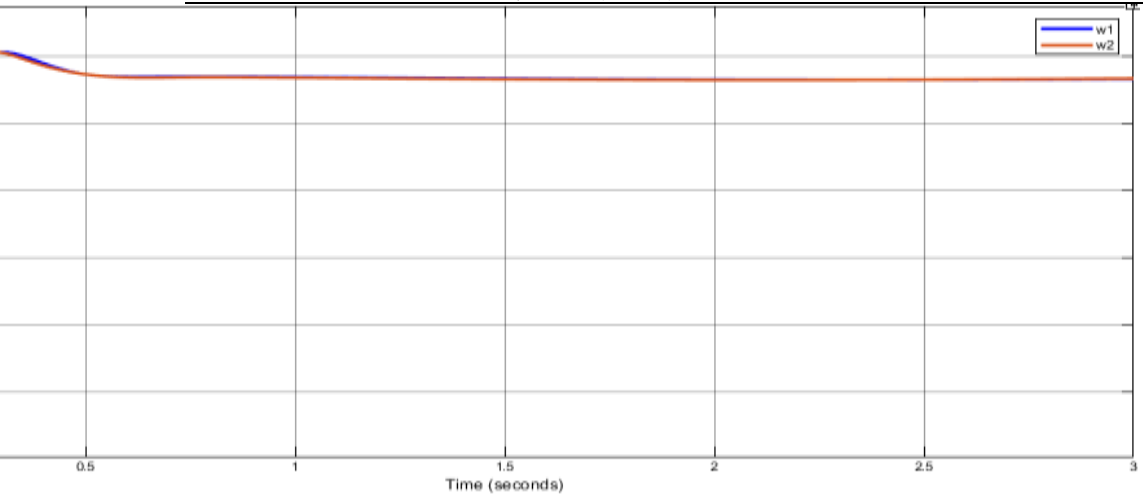
ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

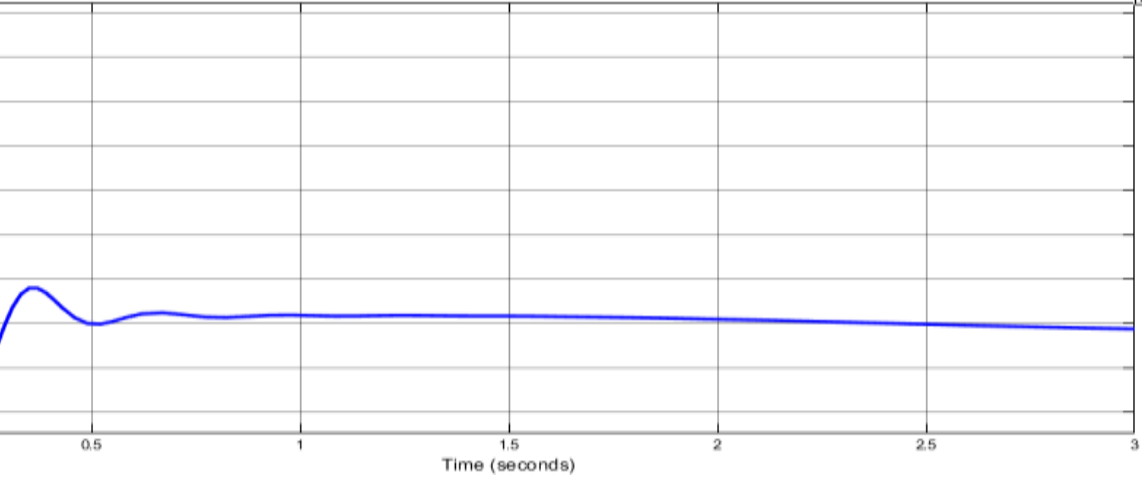
في هذه الحالة نلاحظ:

- انزياح بسيط بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.
- انسيابية هذه المنحنيات وعدم ظهور أي تأرجحات بالسرعة
- العزم لكلا المحركين لم يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك والمحددة بالموصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$ .
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6[sec]$ .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $83.5 \times 10^{-3} [rad]$

ثالثاً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.3$  نلاحظ في الشكل (9) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 35% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 65% من الحمل الكامل.

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي





الشكل (9) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.3$

أ-  $\omega_1, \omega_2$  سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

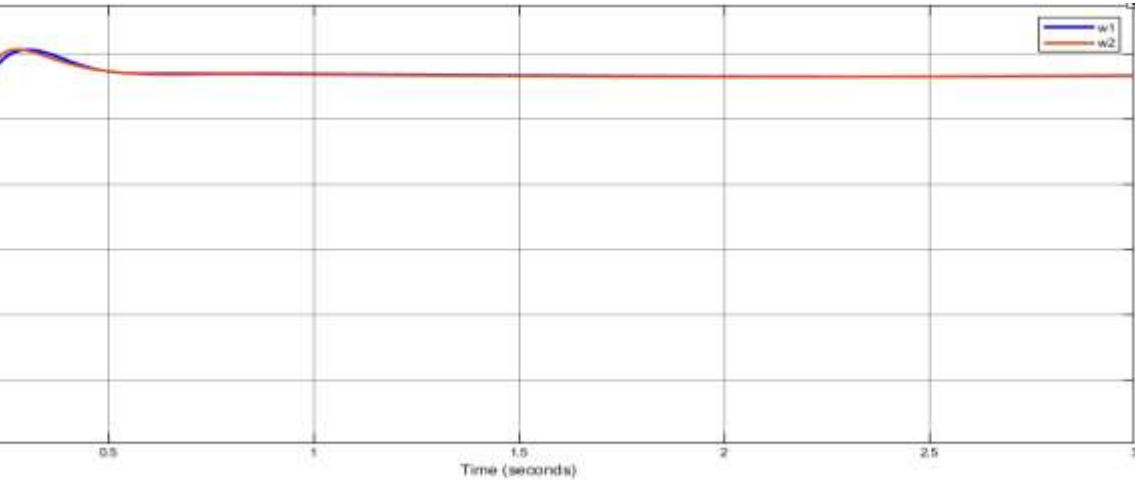
ب-  $M_1, M_2$  العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

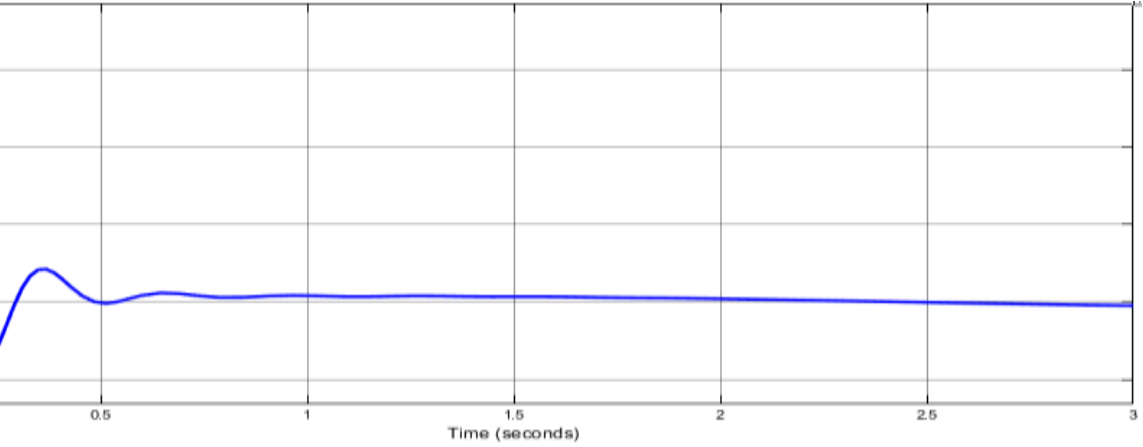
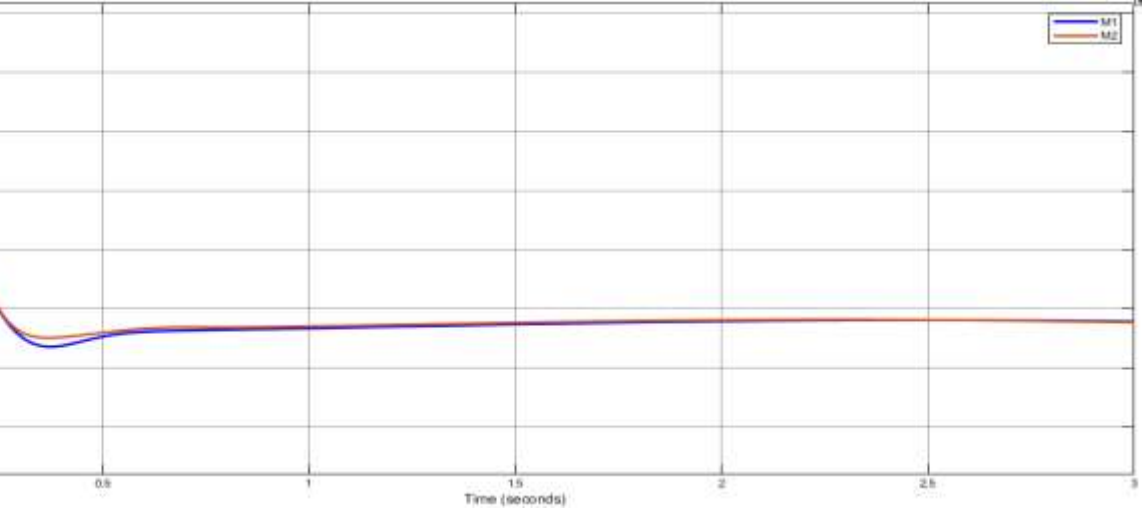
ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

في هذه الحالة نلاحظ:

- انزياح أوضح بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.
- العزم لكلا المحركين لم يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك والمحددة بالموصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$ .
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6[sec]$ .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $125 \times 10^{-3} [rad]$

رابعاً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.4$  نلاحظ في الشكل (10) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 30% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 70% من الحمل الكامل.





الشكل (10) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.4$

أ- سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $\omega_1, \omega_2$

ب- العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $M_1, M_2$

ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

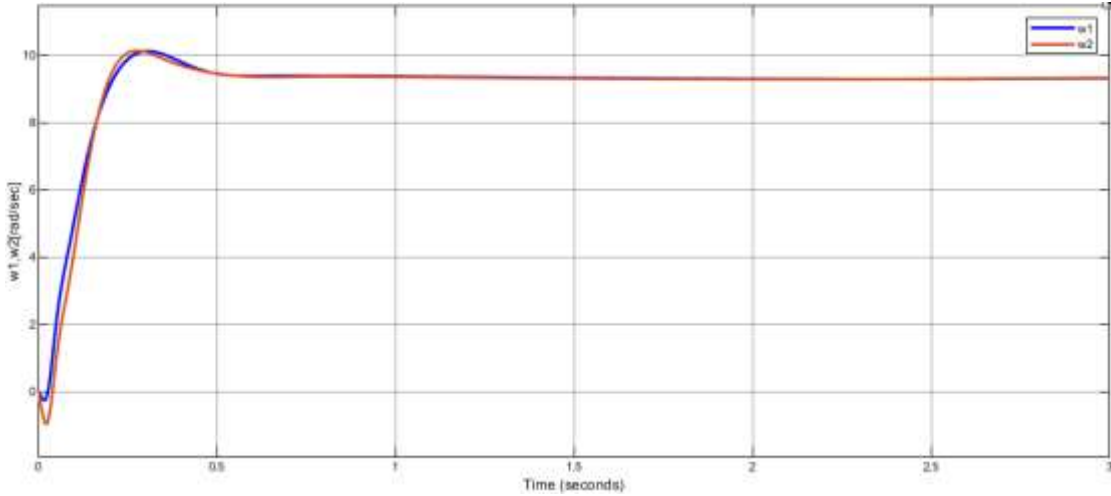
في هذه الحالة نلاحظ:

- انزياح أوضح بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.

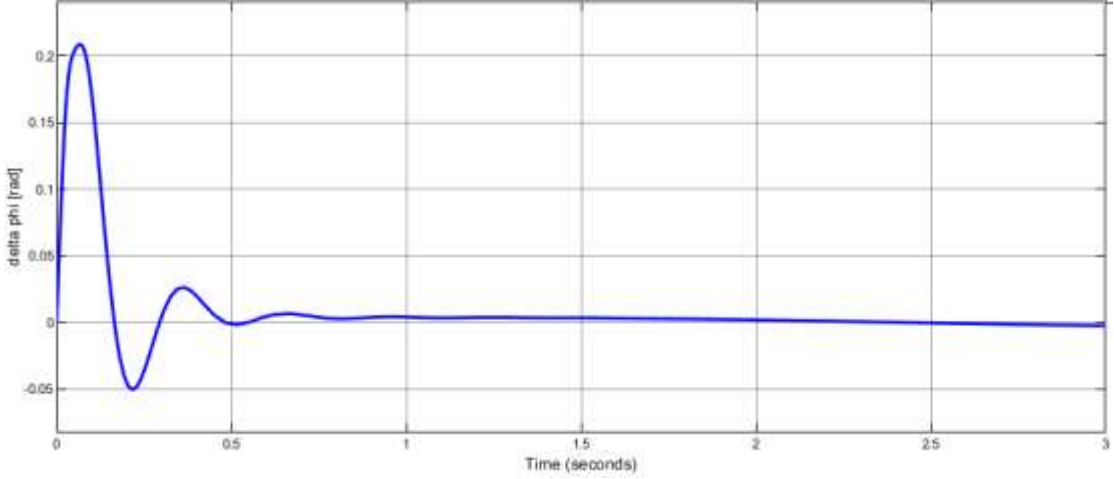
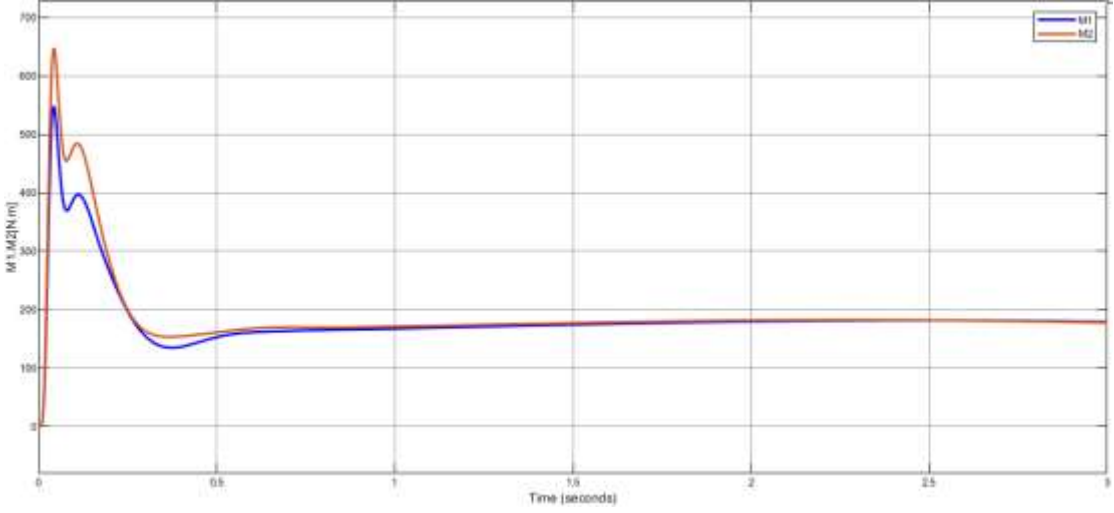
دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

- العزم لكلا المحركين لم يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك والمحددة بالموصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$  ولكنه اقترب منها للمحرك الثاني (المحمل بنسبة أكبر) حيث وصل لقيمة أعظمية  $637 [N.m]$ .
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6[sec]$ .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $.125 \times 10^{-3} [rad]$

**خامساً:** الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.5$  نلاحظ في الشكل (11) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 25% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 75% من الحمل الكامل.







الشكل (11) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.5$

أ- سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $\omega_1, \omega_2$

ب- العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $M_1, M_2$

ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

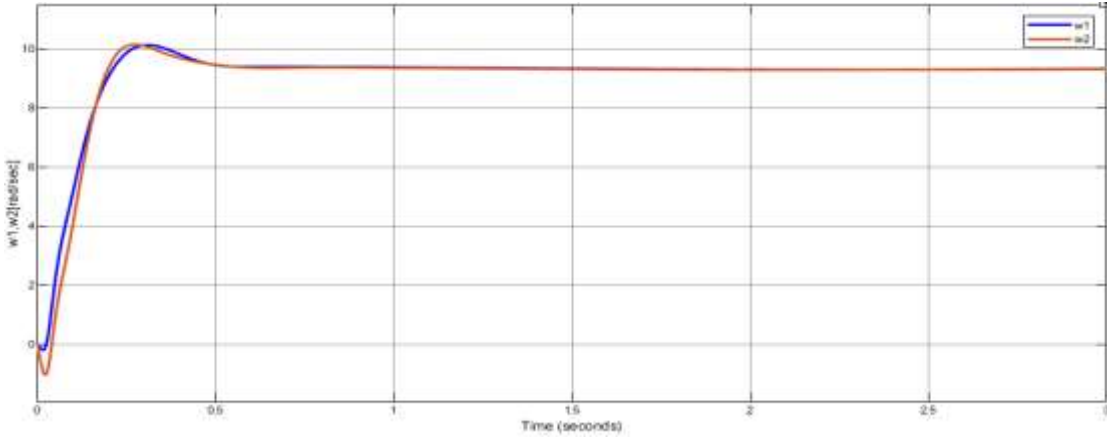
في هذه الحالة نلاحظ:

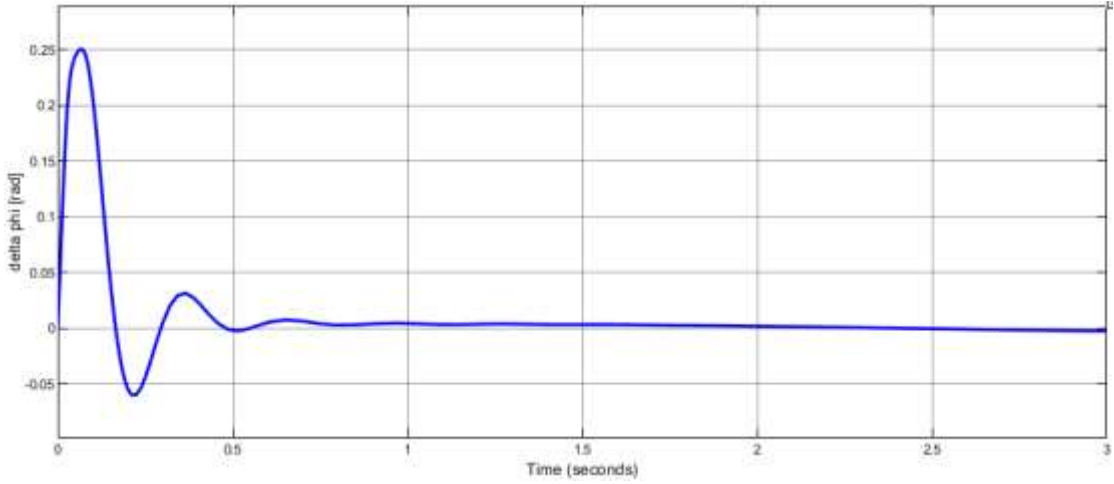
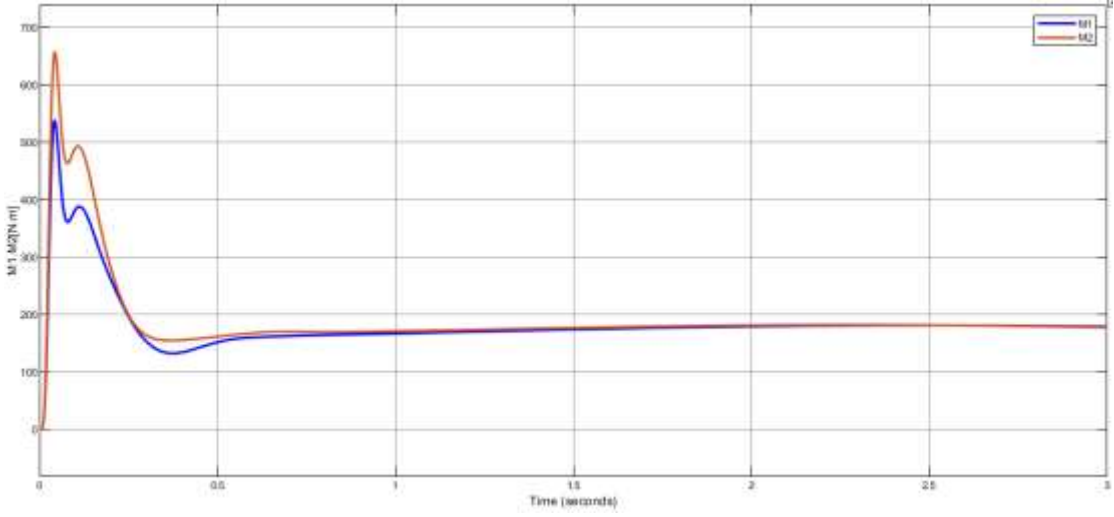
- زيادة انزياح بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

- العزم للمحرك الثاني (المحمل بالنسبة الأكبر) يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك المحددة بالمواصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$  حيث يصل لـ  $647.58 [N.m]$ ، بينما عزم المحرك الأول (المحمل بالنسبة الأصغر) يأخذ قيمة عظمى تساوي  $547.3 [N.m]$ .
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6 [sec]$ .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $208 \times 10^{-3} [rad]$

سادساً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.6$  نلاحظ في الشكل (12) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 20% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 80% من الحمل الكامل.





الشكل (12) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.6$

أ- سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $\omega_1, \omega_2$

ب- العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $M_1, M_2$

ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

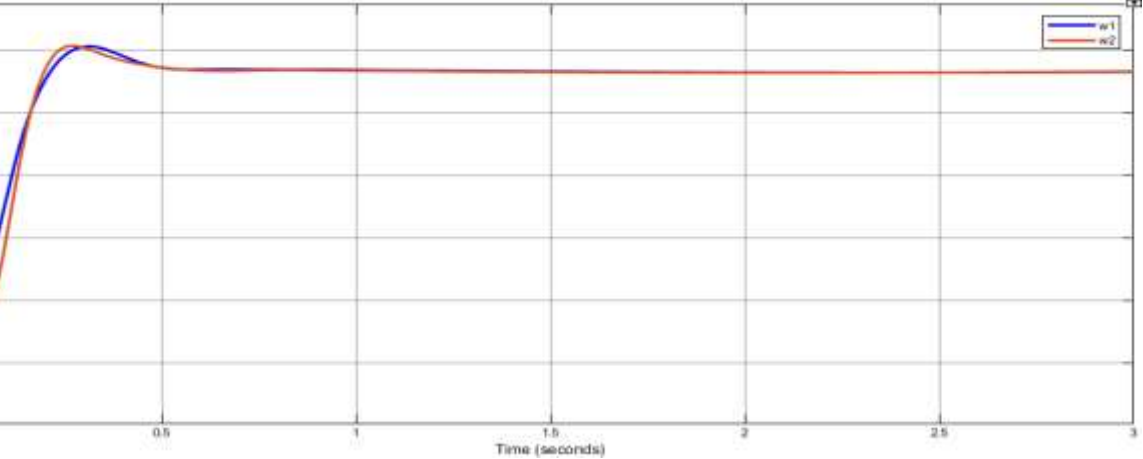
في هذه الحالة نلاحظ:

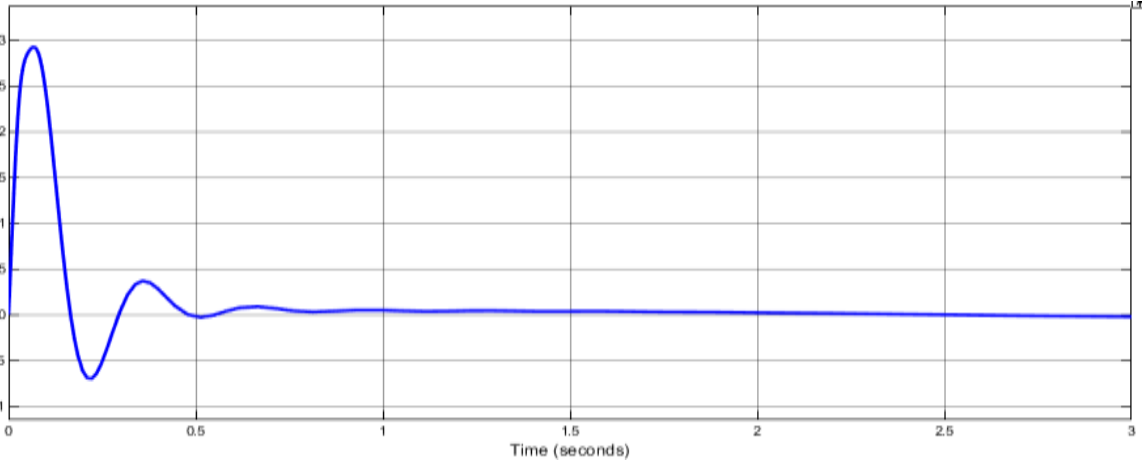
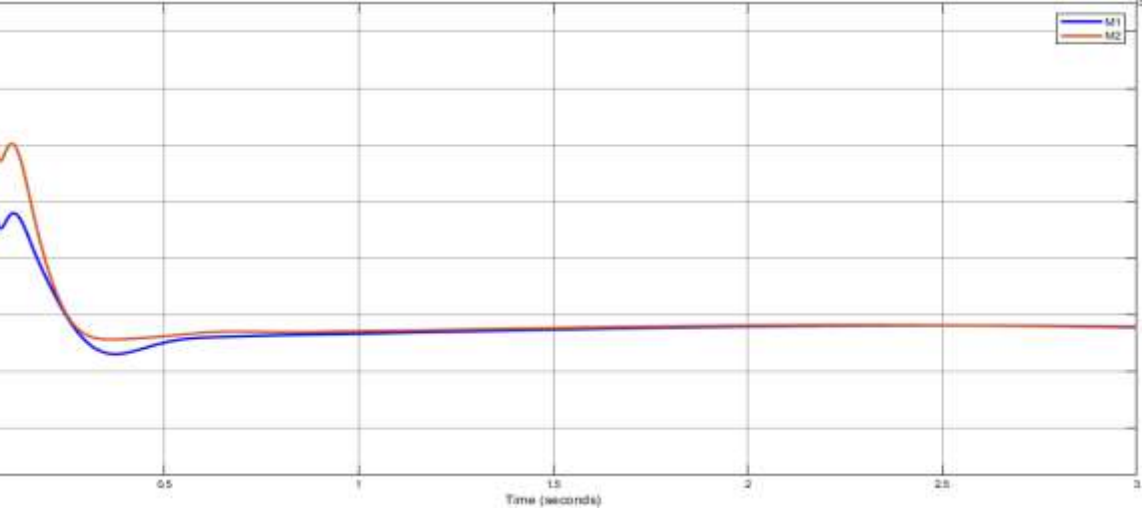
- زيادة انزياح بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

- العزم للمحرك الثاني (المحمل بالنسبة الأكبر) يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك المحددة بالمواصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$  حيث يصل لـ  $657.11 [N.m]$  ، بينما عزم المحرك الأول (المحمل بالنسبة الأصغر) يأخذ قيمة عظمى تساوي  $537 [N.m]$  فقط.
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6[sec]$ .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $.250 \times 10^{-3} [rad]$

سابعاً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.7$  نلاحظ في الشكل (13) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 15% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 85% من الحمل الكامل.





الشكل (13) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.7$

أ-  $\omega_1, \omega_2$  سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

ب-  $M_1, M_2$  العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي

ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

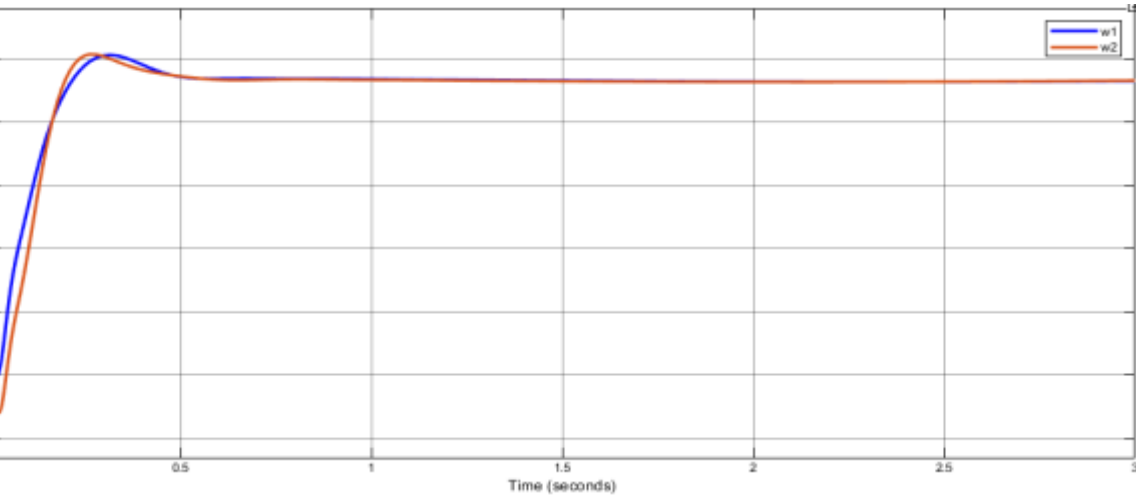
في هذه الحالة نلاحظ:

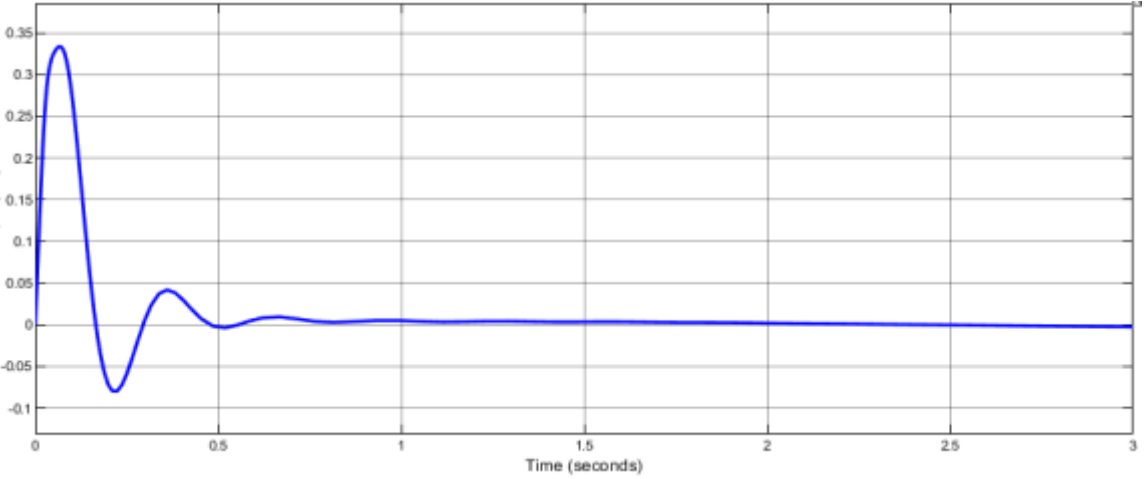
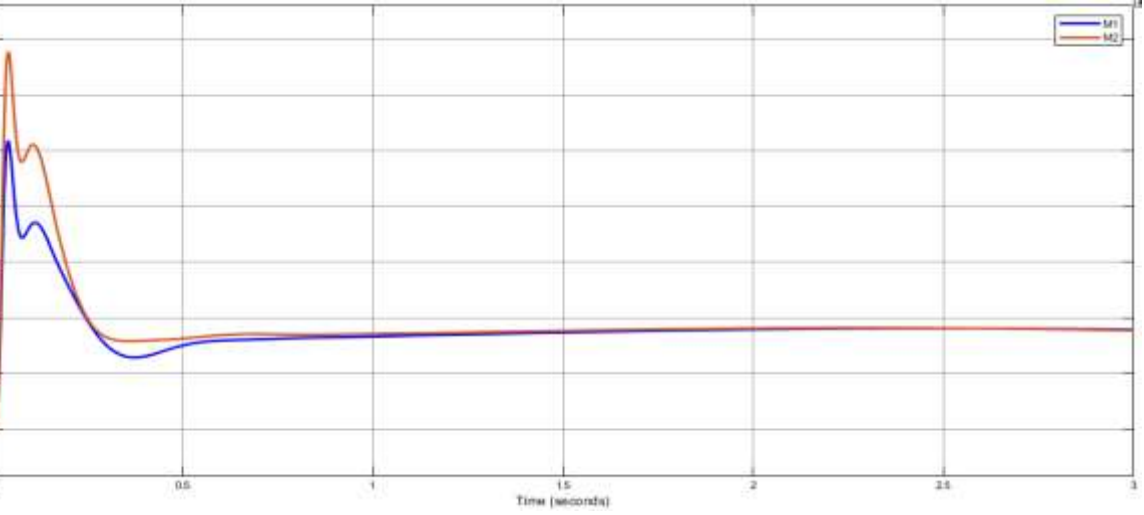
- زيادة انزياح بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

- العزم للمحرك الثاني (المحمل بالنسبة الأكبر) يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك المحددة بالموصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$  حيث يصل لـ  $667.35 [N.m]$  ، بينما عزم المحرك الأول (المحمل بالنسبة الأصغر) يأخذ قيمة عظمى تساوي  $528 [N.m]$  .
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6[sec]$  .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $.292 \times 10^{-3} [rad]$  .

ثامناً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.8$  نلاحظ في الشكل (14) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 10% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 90% من الحمل الكامل.





الشكل (14) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.8$

أ- سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $\omega_1, \omega_2$

ب- العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $M_1, M_2$

ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

في هذه الحالة نلاحظ:

- زيادة انزياح بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.

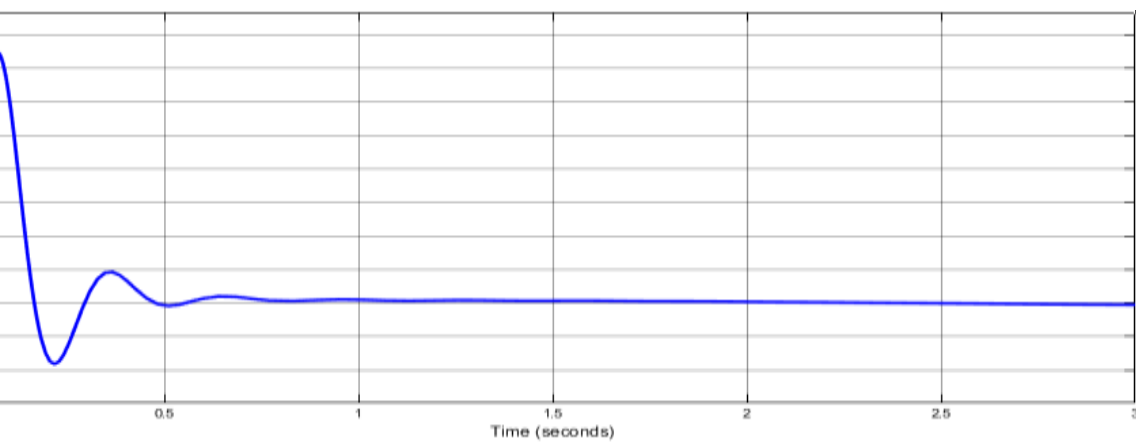
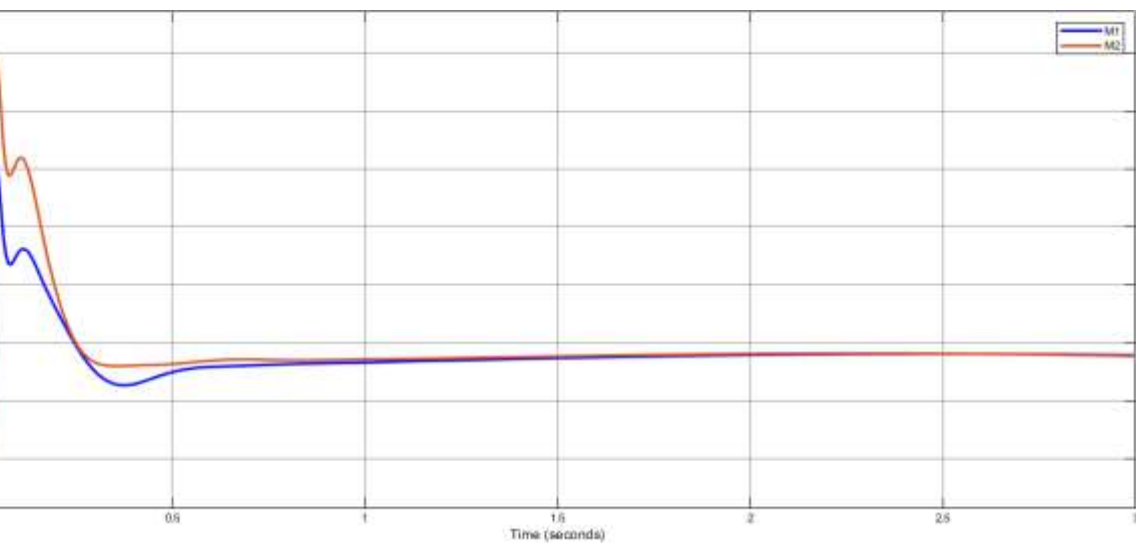
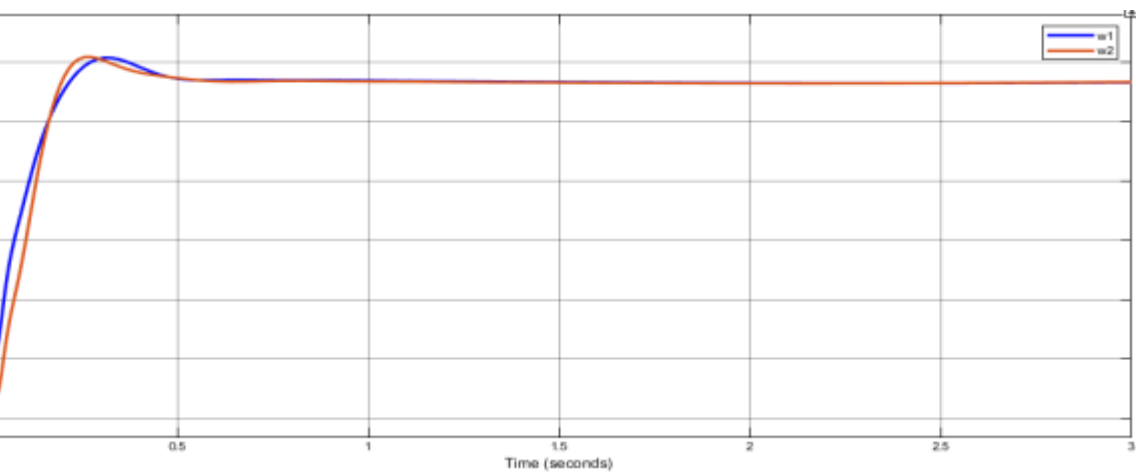
دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

---

- العزم للمحرك الثاني (المحمل بالنسبة الأكبر) يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك المحددة بالموصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$  حيث يصل لـ  $677 [N.m]$  ، بينما عزم المحرك الأول (المحمل بالنسبة الأصغر) يأخذ قيمة عظمى تساوي  $518 [N.m]$  .
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6[sec]$  .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $.334 \times 10^{-3} [rad]$

تاسعاً: الفرق بنسب توزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.9$  نلاحظ في الشكل (15) منحنيات السرعة والعزوم للمحركات إضافة إلى إشارة الخطأ بالمسار حيث يكون المحرك الأول محملاً بنسبة 5% من الحمل الكامل والمحرك الثاني بنسبة 95% من الحمل الكامل.





الشكل (15) النتائج عند فرق بتوزيع الحمولة  $\Delta M^* = 0.9$

أ- سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $\omega_1, \omega_2$

ب- العزم الكهرومغناطيسي للمحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي  $M_1, M_2$

ج- إشارة الخطأ بالمسار  $\Delta \varphi$

في هذه الحالة نلاحظ:

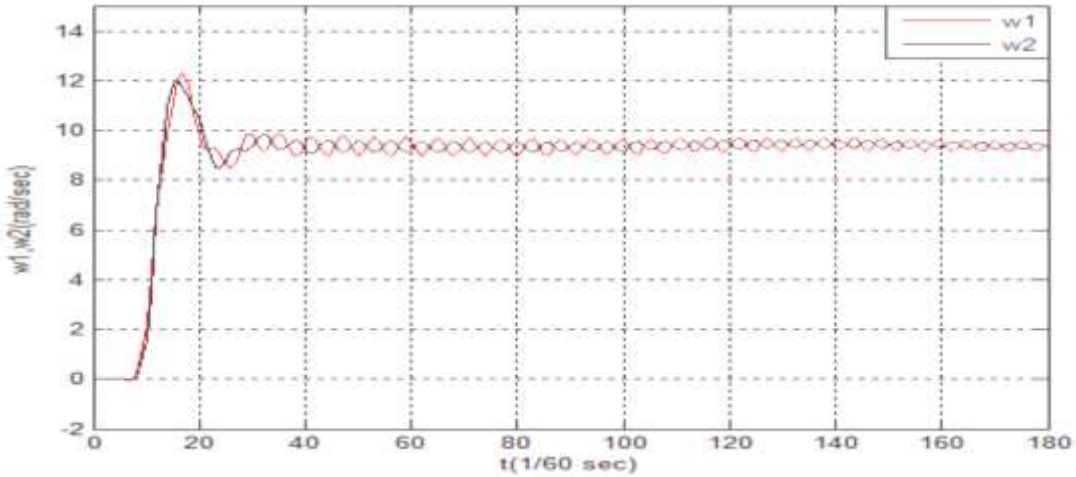
- زيادة انزياح بين منحنىي سرعتي المحركين خلال الحالة العابرة ثم في يعودان للانطباق بالحالة المستقرة.
- العزم للمحرك الثاني (المحمل بالنسبة الأكبر) يتجاوز القيمة الأعظمية لعزم المحرك المحددة بالمواصفات الإسمية له بـ  $638 [N.m]$  حيث يصل لـ  $686.7 [N.m]$  ، بينما عزم المحرك الأول (المحمل بالنسبة الأصغر) يأخذ قيمة عظمى تساوي  $508 [N.m]$ .
- زمن الحالة العابرة يساوي لـ  $0.6[sec]$ .
- الخطأ بالمسار يأخذ قيم أكبر بقليل مقارنة مع الحالة السابقة حيث يصل كقيمة عظمى لـ  $.375 \times 10^{-3} [rad]$

نستنتج من الحالات التسع المدروسة لتغير نسب التحميل على المحركين المستخدمين أنه كلما ازداد الفرق بنسبة التحميل يزداد الفرق بين منحنىي السرعتين خلال حالة العابرة ومن ثم يدخلان في الانطباق والاستقرار عند زمن استقرار  $0.6[sec]$  لم يتغير في كل الحالات وهذه ميزة هامة جداً ناتجة عن استخدام طريقة التحكم الشعاعي في قيادة المحركين المستقلين.

كما نرى من خلال منحنيات العزم الناتجة أن المحرك المحمل بنسبة أكبر يعاني من هزة خلال المرحلة العابرة وهي ضمن القيم المسموح بها حتى عند الحالة التاسعة (التي تمثل أفسى حالة عمل في الرافعة) ومن ثم يستقر العزم على القيمة المطلوبة.

نلاحظ من كافة النتائج بمختلف الحالات المدروسة القيم المنخفضة جداً لفرق المسار .

يبين الشكل (16) تغير سرعتي المحركين المستخدمين في الرافعة الجسرية المدروسة باستخدام طريقة التحكم السلمي عند توزع الحمولة بالتساوي على المحركين وفقاً للمرجع [9]:



الشكل (16)  $\omega_1, \omega_2$  سرعة المحرك التحريضي الأول والثاني على التوالي، عند فرق بتوزع

الحمولة  $\Delta M^* = 0$  بحالة التحكم السلمي ومع استخدام منظم تناسبي  $K_p=5$

بمقارنة الشكل (16) مع الأشكال (7-أ) و (8-أ) و (9-أ) و (10-أ) و (11-أ) و (12-أ) و (13-أ) و (14-أ) و (15-أ) وهي المنحنيات الممثلة لسرعتي المحركين التحريضيين المستخدمين في الرافعة المدروسة نلاحظ أن التحكم الشعاعي حقق سرعة استجابة عالية جداً واستقرار ملحوظ في السرعة على الرغم من تغير توزع الحمولة الملقاة على عاتق كل من المحركين كما تم الاستغناء عن المنظم التناسبي.

### الخلاصة والنتائج:

توصلنا في نهاية البحث إلى النتيجة التالية:

1. أدى استخدام طريقة التحكم الشعاعي في آلية الرفع الكهروميكانيكية إلى الاستغناء عن استخدام المنظمات في دارة التغذية العكسية المعتمدة في أبحاث سابقة [2] و [9].

2. هذا الاستغناء أدى إلى سرعة استجابة عالية جداً للنظام المدروس وواضح من خلال مقارنة

أزمنة الاستقرار في كلا الحالتين وبمعدل  $\frac{t_{s(Scalar)}}{t_{s(FOC)}} = \frac{2.84}{0.6} = 4.73$  [9] وهذا له دلالاته

الاقتصادية في خطوط الإنتاج عند تطبيق أنظمة التحكم.

3. نلاحظ من كافة النتائج بمختلف الحالات المدروسة القيم المنخفضة جداً لفرق المسار. وهذا يعود إلى الإمكانيات التي يحققها التحكم الشعاعي بفصل التحكم بالفيض عن التحكم بالعزم. مما أدى إلى إلغاء استخدام منظمات PID المستخدمة في الأنظمة التقليدية المعتمدة سابقاً.
4. في هذا البحث حققنا الشروط المطلوبة بعد إلغاء دارات الـ PID وبالتالي اختصرنا من ثوابت التأخير الزمني في الدارة وهذا ما انعكس على زمن الإقلاع والدخول في الاستقرار.

#### المراجع العلمية:

- 1) Kluchev V.E. Optimal of electric drive with elasticity, Jornal of electrical system 1997 N:1, P 38-43.
- 2) Jaishankar Iyer. LOAD SHARING SCHEMES IN MULTIPLE INDUCTION MOTOR DRIVE APPLICATIONS USING VOLTS-PER-HERTZ CONTROL, B.E., The University of Mumbai, India, 2006.

3) Ivan Odnokopylov. Olga Galtseva. Jiren Li. Natalia Natalinova .The control system of synchronous movement of the gantry crane supports. Journal of Physics Conference Series. January 2017.

4) HOLTZ J., 1996– On the Spatial Propagation of Transient Magnetic Fields in AC Machines, IEEE Trans. on IA, 32(4), 927-936.

5) KOGA K.; UEDA R.; SONODA T.Constitution of V/f control for reducing the steady-state speed error to zero in induction motor drive system, IEEE Trans. OnIA, **28(2)**, 463-471, 1992.

6) Quang, N. P, Dittrich. Vector Control of Three-Phase AC Machines: System Development in the Practice. 2nd ed. Berlin: Springer (2015).

7) Abdul M, Biabani Kh, Ali S. Control of Induction Motor Drive using Space Vector PWM. International Conference on Electrical, Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) ,2016.

8) Jie Huang. Control of bridge cranes with distributed-mass payloads under windy conditions. Mechanical Systems and Signal Processing · May 2016.

9. دراسة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في هندسة الطاقة الكهربائية. تحسين الأداء الديناميكي للنظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات التحريضية المقادة ثايرستورياً بالطرق الكهربائية. بإشراف: د. شفيق باصيل. إعداد: م. رولا ميهوب. جامعة البعث. 2016-2017.

10 - دراسة أداء النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل - عديدة المحركات التحريضية باستخدام طريقة التحكم الشعاعي بالفيض. بإشراف أ. د. شفيق باصيل، أ. د. بسام عطيه. إعداد: م. رغبة الابراهيم. مجلة جامعة البعث. مجلد 44 لعام 2022.

دراسة تزامن المحركات التحريضية المستقلة في النظم الكهروميكانيكية عديدة الكتل عديدة المحركات  
المقادة باستخدام التحكم الشعاعي

---