

دراسة تأثير تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدلات الثلاثية الطور المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية

الدكتور المهندس رامي موسى

أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث
mosa.rami1977@gmail.com
00963992166373

الملخص

تمتلك المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية العديد من الميزات التي تمكنها من تجاوز محدودية استخدام الأنواع الأخرى من المبدلات المتعددة المستويات، بحيث أصبحت هذه المبدلات محط اهتمام العديد من مراكز البحث الأكاديمية والصناعية. تعد تقنية التعديل العرضاني للنبضة من أكثر التقنيات استخداماً للتحكم بعمل هذه المبدلات حيث يمثل تردد الإشارات الحاملة بارامتراً مهماً يؤثر في الأداء الصحيح للمبدل.

تمت في هذا البحث دراسة تأثير تغيير تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية. لدراسة هذا التأثير تم استخدام نموذج لمبدل مكون من أربع وحدات فرعية في كل ذراع، وتمت دراسة موجات التيار والتوتر في خرج هذا المبدل إضافة إلى دراسة التيار الدوراني وجهود مكثفات الوحدات الفرعية. وتم رسم منحنيات تغير الجهود والتيارات والمحتوى التوافقي بدلالة تردد الإشارات الحاملة، وذلك بهدف استخلاص القيمة الملائمة لهذا التردد الذي يحقق أفضل أداء للمبدل.

كلمات البحث: المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية، تردد الإشارات الحاملة، التشوه التوافقي الكلي THD، نمذجة المبدل، التيار الدوار، توازن جهود مكثفات الوحدات الفرعية.

Study of the effect of carrier signals frequency on the performance of three - phase modular multi-level converters

Dr. Ing: Rami Mousa

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - AL- Baath University

mousa.rami1977@gmail.com

00963992166373

Abstract

Modular multi-level converters have many advantages that enable them to bypass the limitation of other types of multi-level converters, so that these converters have become the focus of many academic and industrial research centers.

Pulse Width Modulation technic is one of the most widely used techniques to control the operation of these converters, where the frequency of the carrier signals is an important parameter that affects the correct performance of the converter.

In this paper, the effect of changing the frequency of the carrier signals on the performance of modular multi-level converters has been studied. To study this effect, a model of a converter consisting of four sub-models in each arm has been used. The output current and voltage waveforms of this converter have been studied, in addition to study the circulating current and voltages of the sub-models' capacitors. in order to extract the appropriate value for this frequency that achieves the best performance of the converter, the voltages, currents and harmonic content curves have been drawn versus of the carrier signals frequency change.

Keywords: modular multi-level converters (MMC), carrier signals frequency, total harmonic distortion (THD), converter modeling, circulating current, voltage balancing of sub-models' capacitors.

1. مقدمة

تتميز المبدلات الإلكترونية المستخدمة في نظم تحويل الطاقة الكهربائية بالكفاءة العالية، وهي تستخدم في مجال واسع من التطبيقات الصناعية مثل المضخات والضواغط والمراوح والنقل (العربات الكهربائية وتطبيقات الجر)، وتطبيقات تعويض الاستطاعة الردية والنقل بالتيار المستمر والطاقت المتجددة [1، 2، 3].

تستخدم المبدلات بمنبع جهد VSCs (Voltage Source Converters) في التطبيقات الصناعية بشكلٍ واسعٍ، ومعظم هذه المبدلات متوفرة على شكل منتجات بتوتر عمل يتراوح بين 2.3 kV و 13.8 kV. من أجل العمل عند التوترات العالية فإن هندسة هذه المبدلات تتطلب استخدام محولات رافعة للجهد أو قواطع إلكترونية ذات تحمل عالٍ للجهد. يقود استخدام المحولات الرافعة إلى زيادة حجم ووزن وتكلفة المبدل، أما استخدام قواطع إلكترونية ذات تحمل عالٍ للجهد فهو يعد خياراً مقيداً بتكنولوجيا تصنيع القواطع الإلكترونية، على سبيل المثال فإن القواطع الأكثر استخداماً في هذه المبدلات هي الترانزستورات من نوع IGBT بتوتر أعظمي 6.5 kV وبتيار أعظمي 2.4 kA [3، 4].

بهدف تجاوز مشكلات الوصل التسلسلي للقواطع الإلكترونية، من أجل زيادة قدرتها على تحمل الجهد، تم تطوير مفهوم المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية MMC (Modular Multilevel Converters). تعد هذه المبدلات نوعاً من أنواع المبدلات المتعددة المستويات، وهي تتميز ببنيتها القائمة على استخدام الوحدات الفرعية المتتابعة وبذلك يمكن للمبدل العمل عند أي مستوى للاستطاعة وللتوتر [5، 6].

تستخدم المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية في تطبيقات قيادة المحركات ذات الجهد المتوسط بتوتر حتى 7.2 kV وباستطاعة حتى 13.7 MVA. كما تستخدم في تطبيقات نظم النقل بالتيار المستمر ذات التوتر العالي بتوترات تبلغ 320 kV وباستطاعة 1000 MW [7]. يتم أيضاً استخدام هذه المبدلات في نقل الطاقة الكهربائية من المزارع الريحية البحرية بتوترات تبلغ 320 kV وباستطاعة 900 MW [8]. تعد تطبيقات تعويض الاستطاعة الردية وتعويض التوافقيات مجالاً واعداً لاستخدام هذه المبدلات التي تستخدم كمعوضات ساكنة تزامنية بتوترات تبلغ 230 kV وباستطاعة

55 MVar. من التطبيقات الواعدة أيضاً لهذه المبدلات هي استخدامها في مجال تحسين نوعية الاستطاعة كمعوّضات تسلسلية وتفرعية [9، 10].

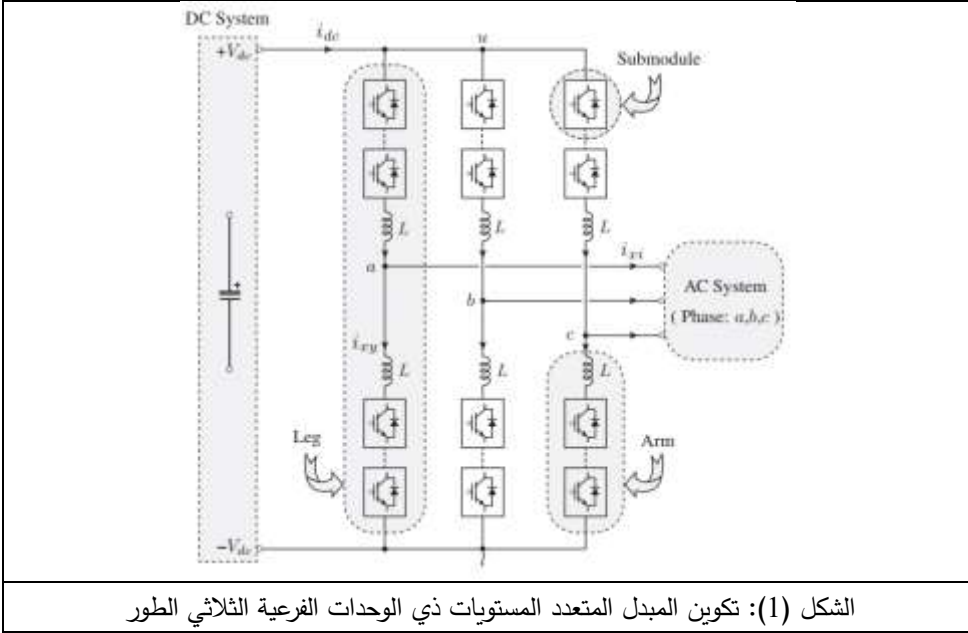
تعد تقنيات التعديل النبضي العرضاني من أشهر التقنيات المستخدمة لقيادة المبدلات المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية. من بين هذه التقنيات تحظى طريقة التعديل النبضي العرضاني ذي الانزياح الطوري للإشارات الحاملة باهتمام خاص لأنها تؤمن إمكانية ضبط جهود المكثفات ويمكن تطبيقها على عدد كبير من الوحدات بدون تعقيد وتؤمن الحصول على موجات خرج ذات نوعية جيدة [11]. في جميع هذه التقنيات يوجد بارامتران أساسيان يتحكمان بخرج الـ PWM وعلى أساسهما يتم توليد نبضات القرح لقواطع المبدل. هذان البارامتران هما دليل التعديل المطالي وتردد الإشارات الحاملة. تمت دراسة تأثير قيمة دليل التعديل المطالي في أداء المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية في المرجعين [12، 13]، حيث بينت الدراسة أهمية الاختيار المتقن لقيمة هذا الدليل وتأثيره الملحوظ في أداء المبدل. وفي هذا البحث تمت دراسة تأثير تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدل.

2. بنية المبدل والوحدات الفرعية

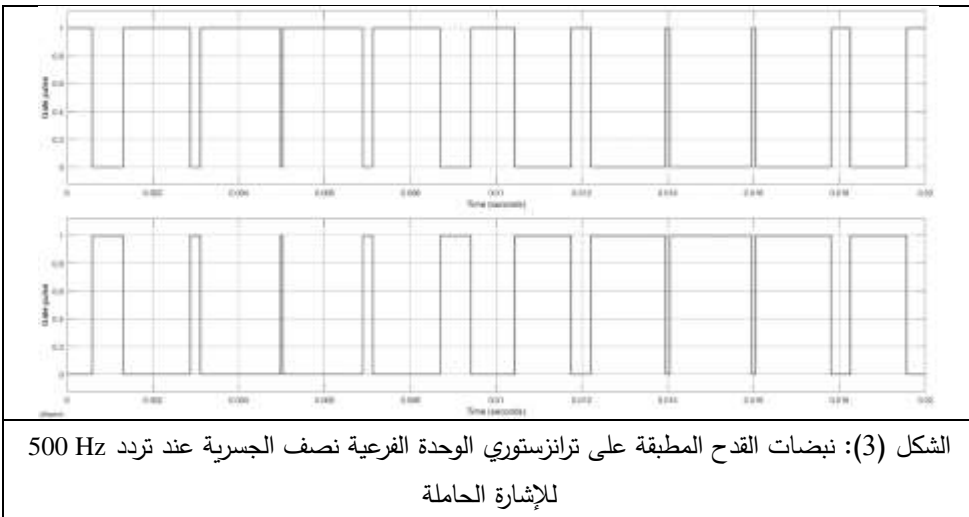
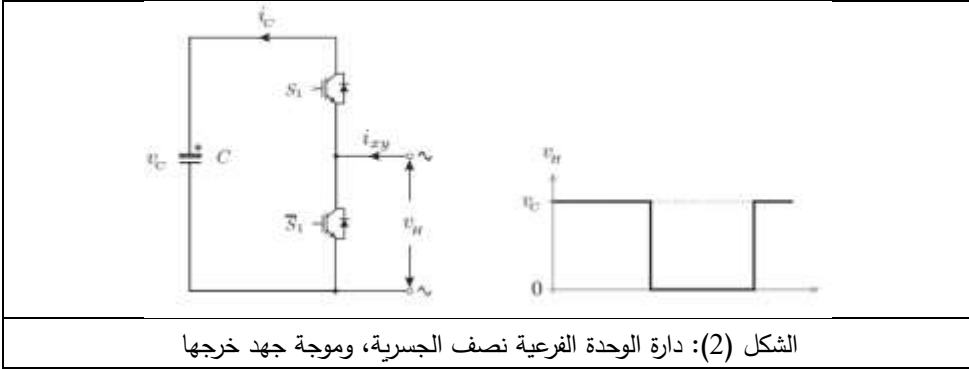
يبين الشكل (1) البنية الرئيسية للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية [14]. يتم ربط النهايات الموجة والسالبة للمنبع المستمر (أو ما يسمى وصلة التيار المستمر) مع سيقان المبدل. تتكون كل ساق من ذراعين: ذراع علوية تربط مع النهاية الموجبة للمنبع المستمر يشار إليها بالدليل (u) وذراع سفلية تربط مع النهاية السالبة للمنبع المستمر يشار إليها بالدليل (l). تتكون كل ذراع من مجموعة من الوحدات الفرعية ومن ملف (L) موصول على التسلسل معها، حيث يقوم هذا الملف بالحد من التيار الناتج عن فرق التوتر اللحظي بين الأذرع. يتم ربط النظام المتناوب ثلاثي الطور مع النقاط الوسطية لكل ساق (a, b, c).

تتكون الوحدات الفرعية من مبدل مستمر - متناوب بسيط، حيث يتم عادة استخدام ترانزستورات IGBT بتحمل جهد بين 1200 V و 1700 V، بالإضافة إلى مكثفات. يوجد تشكيلات متعددة للوحدات الفرعية، فيمكن أن تكون وحدات نصف جسمية

أو وحدات بجسر كامل أو وحدات ذات مكثفات طيارة أو وحدات نصف جسرية ذات وصل متتابع [14، 15].

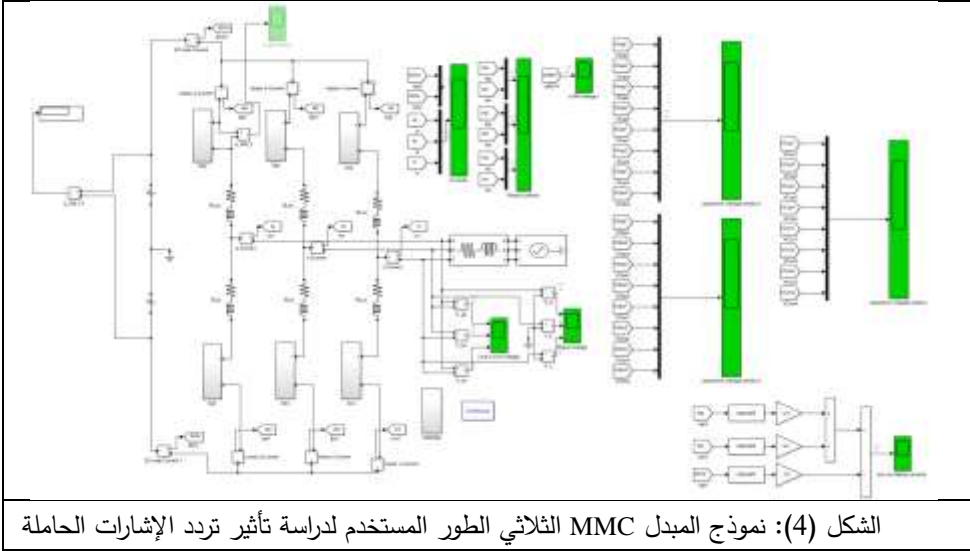


تعد الوحدات الفرعية نصف الجسرية الأكثر انتشاراً واستخداماً بسبب بساطة تكوينها وتصميمها وسهولة التحكم بعملها، كما تتميز هذه الوحدات بضياعات قليلة وبالتالي يكون مردود المبدل مرتفعاً. يبين الشكل (2) الدارة الأساسية للوحدة الفرعية نصف الجسرية وموجة جهد الخرج الناتج منها. تتكون هذه الوحدة من قاطعين S_1 و \bar{S}_1 ومن مكثف C. يتكون كل قاطع من ترانزستور IGBT ومن ديود موصول على التوازي وبشكل متعاكس مع الترانزستور. يكون عمل كل ترانزستور في هذه الوحدة مكملاً لعمل الآخر بحيث يتم ضبط وتنظيم الجهد المستمر v_c المكثف. يبين الشكل (3) نبضات القدر المطبقة على الترانزستورين ليكون عمل كل منهما مكملاً للآخر، حيث تمت عملية المحاكاة باستخدام برنامج ماتلاب من أجل تردد للإشارة الحاملة يساوي 500 Hz. يكون جهد خرج الوحدة الفرعية v_H مكوناً من مستويين 0 و v_c فعندما يكون القاطع S_1 مغلقاً يكون جهد خرج الوحدة مساوياً v_c وعندما يكون مفتوحاً يكون جهد خرج الوحدة مساوياً 0.



3. نموذج ماتلاب للمبدل

يبين الشكل (4) نموذج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية الثلاثية الطور باستخدام بيئة Matlab – Simulink. يمثل هذا النموذج مبدلاً متعدد المستويات بأربع وحدات فرعية نصف جسرية في كل ذراع. تتوضع هذه الوحدات ضمن الصناديق العلوية والسفلية $S_{ap}, S_{bp}, S_{cp}, S_{an}, S_{bn}, S_{cn}$. يؤمن هذا النموذج إمكانية استخلاص موجات جهود وتيارات خرج المبدل وجهود مكثفات الوحدات الفرعية لكل طور، بالإضافة إلى موجة التيار الدوار في بنية المبدل.

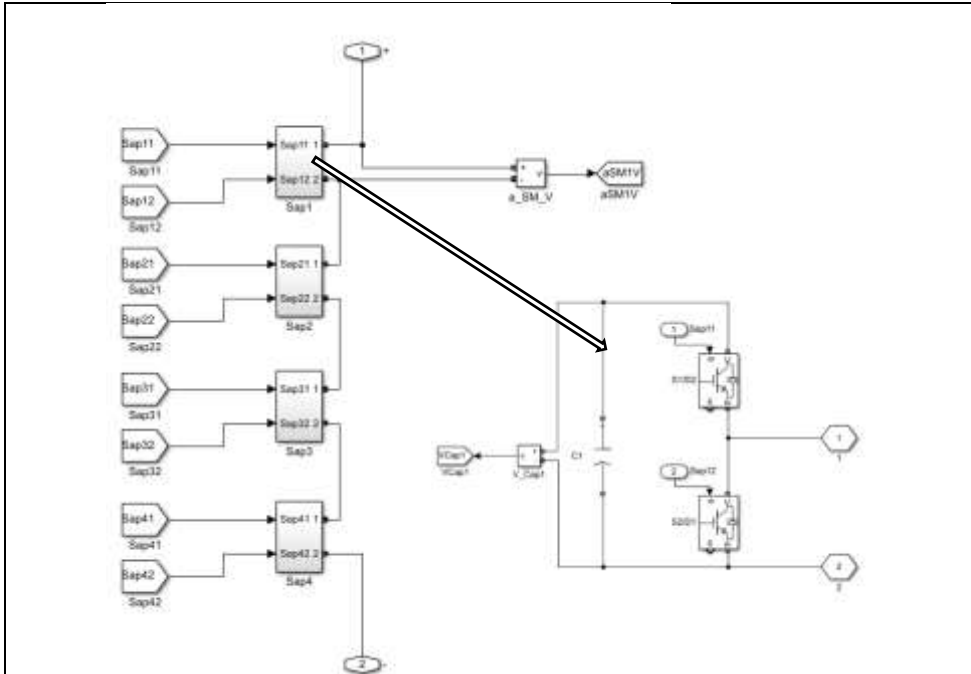


الشكل (4): نموذج المبدل MMC الثلاثي الطور المستخدم لدراسة تأثير تردد الإشارات الحاملة

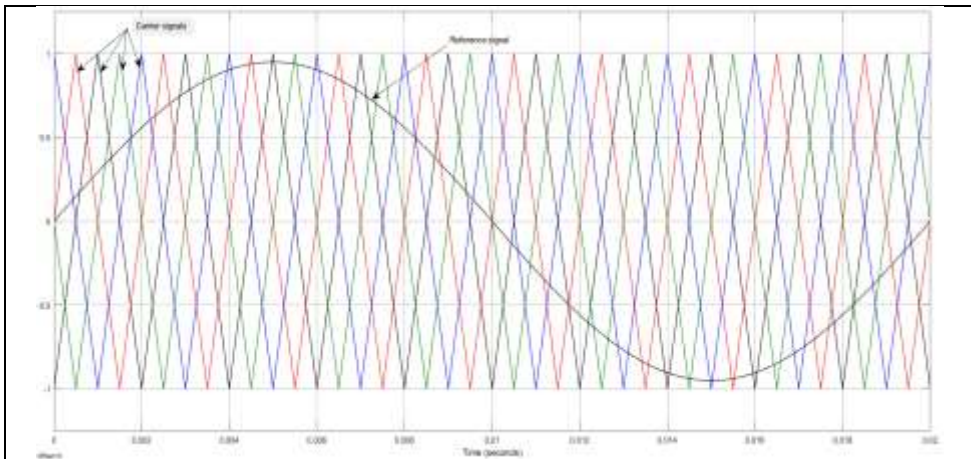
بهدف التحكم بعمل المبدل تم اختيار تقنية التعديل النبضي العرضاني بطريقة الحوامل المتعددة ذات الانزياح الطوري. وفقاً لهذه الطريقة فإن الإشارات الحاملة تتوضع بشكل أفقي وتكون ذات مطالات متساوية بانزياح طوري يحدده عدد الوحدات الفرعية في كل ذراع، حيث يكون عدد الإشارات الحاملة مساوياً لعدد الوحدات الفرعية في الذراع وتكون الإزاحة الطورية \emptyset بين هذه الإشارات مساوية لـ:

$$\emptyset = \frac{360^\circ}{N} \quad (1)$$

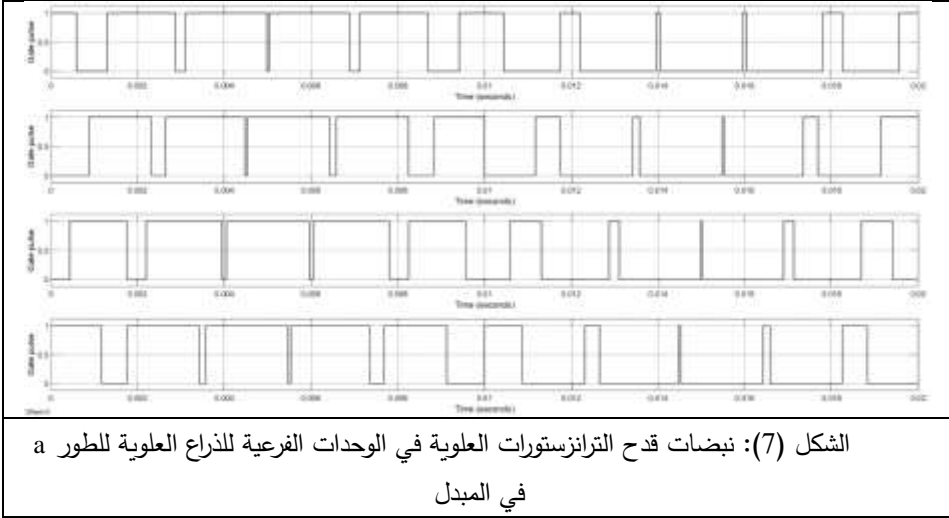
حيث N هو عدد الوحدات الفرعية في الذراع [16، 17]. في دراستنا هذه تم استخدام أربع وحدات فرعية في كل ذراع وبالتالي تكون الإزاحة الطورية بين الإشارات الحاملة مساوية 90° . يبين الشكل (5) نموذج الوحدات الفرعية المكونة لذراع المبدل ونموذج الوحدة الفرعية نصف الجسرية، ويبين الشكل (6) الإشارات الحاملة المثلثية ذات التردد 500 Hz والإشارة المرجعية ذات التردد 50 Hz، المستخدمة لتوليد نبضات قرح ترانزستورات الوحدات الفرعية، كما يبين الشكل (7) نبضات قرح الترانزستورات العلوية في الوحدات الفرعية في الذراع العلوية للطور a للمبدل عند تردد 500 Hz للإشارات الحاملة. إن القيمة 500 Hz لتردد الإشارات الحاملة هي قيمة اختيارية هنا بهدف التوضيح.



الشكل (5): نموذج الوحدات الفرعية المكونة لذراع المبدل ونموذج الوحدة الفرعية نصف الجسرية المستخدمة



الشكل (6): الإشارات الحاملة المثالية ذات التردد 500 Hz والإشارة المرجعية الجيبية ذات التردد 50 Hz



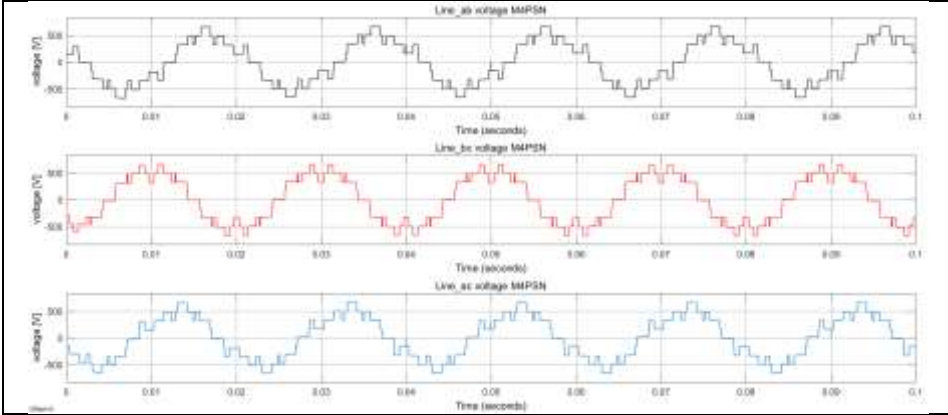
4. نتائج المحاكاة

انطلاقاً من نموذج المبدل المبين في الشكل (4) وبهدف دراسة تأثير قيمة تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدل، تم تغيير تردد الإشارات الحاملة ضمن مجال يتراوح بين ضعفي وأربعين ضعف تردد الإشارة المرجعية ذات التردد 50 Hz وذلك من أجل قيمة ثابتة لدليل التعديل المطالي تساوي 0.95. كما تم اختيار قيمة جهد الدخل المستمر للمبدل بحيث تساوي 680 V وذلك للحصول على خرج موافق لجهد الشبكة الكهربائية أي بحدود 400 V كقيمة فعالة.

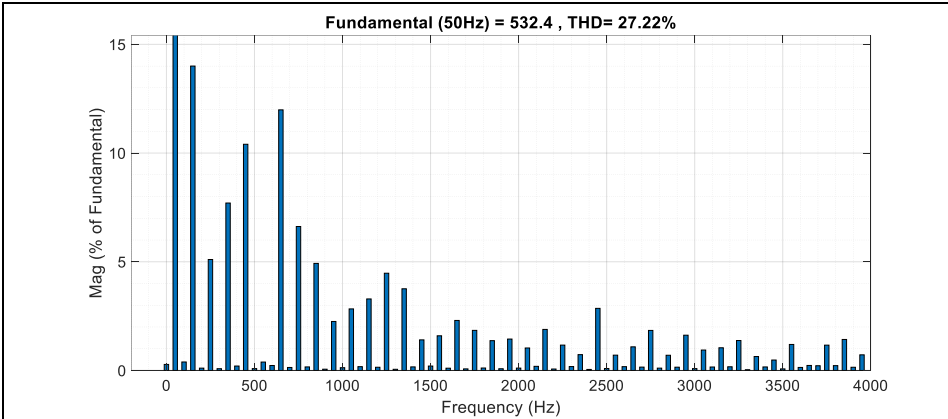
في الأشكال الآتية (من الشكل (8) وحتى الشكل (21)) سوف نبين نتائج المحاكاة من أجل حالتين لعمل المبدل: الحالة الأولى هي حالة العمل عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz والحالة الثانية هي حالة العمل عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 2000 Hz.

يبين الشكلان (8 و 9) موجات جهود الخطوط الثلاثية الطور في خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz، ويبين الشكلان (10 و 11) موجات تيارات خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد 100 Hz للإشارات الحاملة. يبين الشكلان (12 و 13) موجة التيار الدوار للمبدل والتحليل التوافقي لها، ويبين

الشكل (14) جهود مكثفات الوحدات الفرعية للطور a عند تردد 100 Hz للإشارات الحاملة.



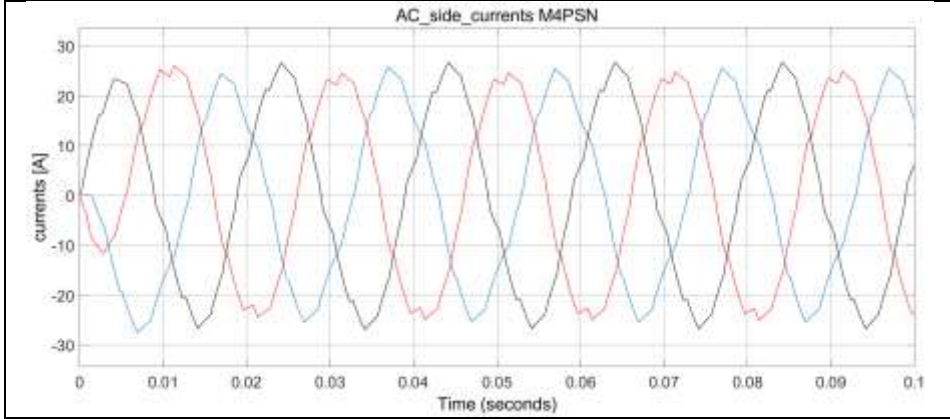
الشكل (8): موجات جهود الخطوط في خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz



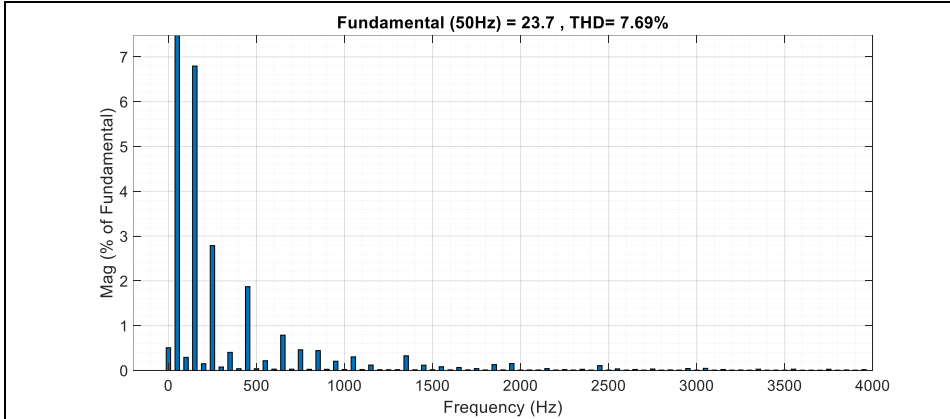
الشكل (9): التحليل التوافقي لموجات جهود الخطوط في خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

يتضح من الشكل (8) أن موجة جهد الخط للمبدل مكونة من تسعة مستويات وهذا يتفق مع قواعد هذه المبدلات التي تنص على أن عدد المستويات في موجة جهد الخط يساوي $2N + 1$ حيث N هو عدد الوحدات الفرعية في الذراع (أربع وحدات في حالتنا المدروسة). يبين الشكل (9) أن التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخط يساوي $THD = 27.22\%$ ، وأن مطال التوافقية الثالثة ذات التردد 150 Hz يشكل حوالي 14%

من مطال المركبة الأساسية ذات التردد 50 Hz، وبشكل عام فإن التوافقيات المؤثرة في موجة جهد الخط هي التوافقيات الفردية.

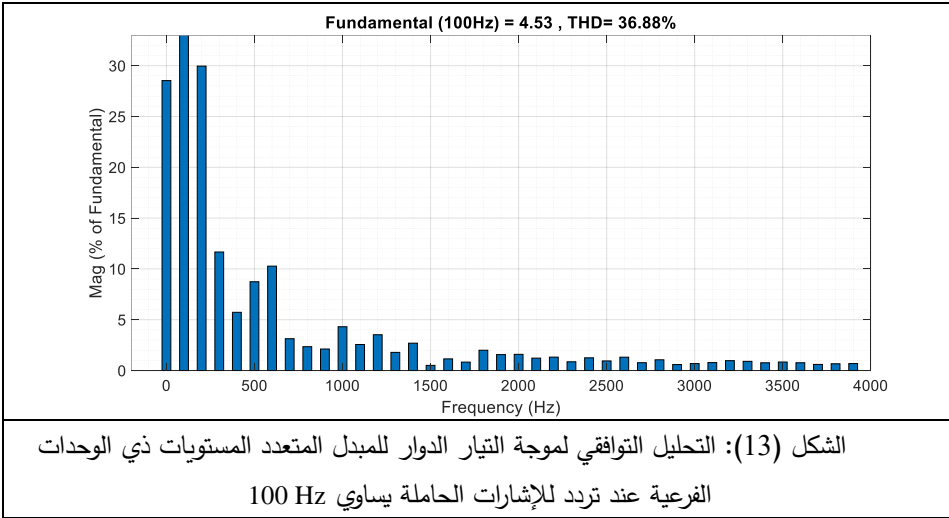
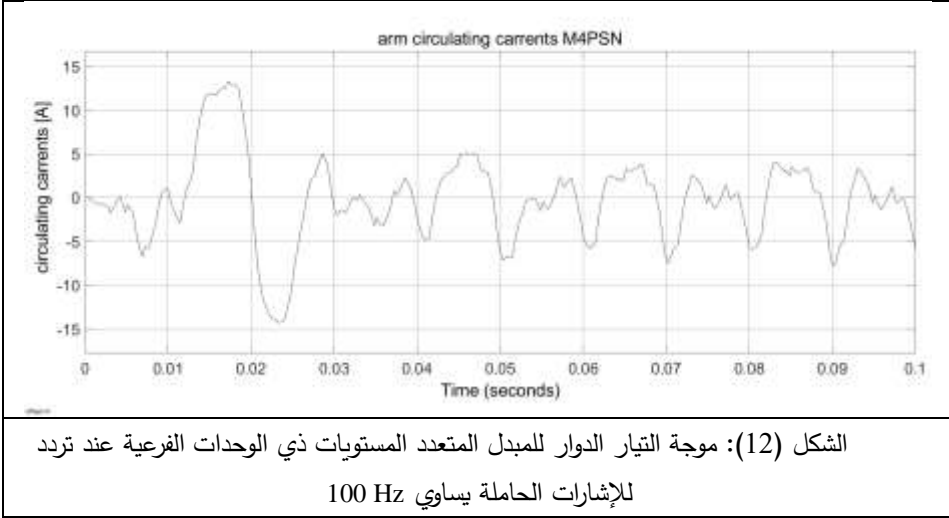


الشكل (10): موجات تيارات خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

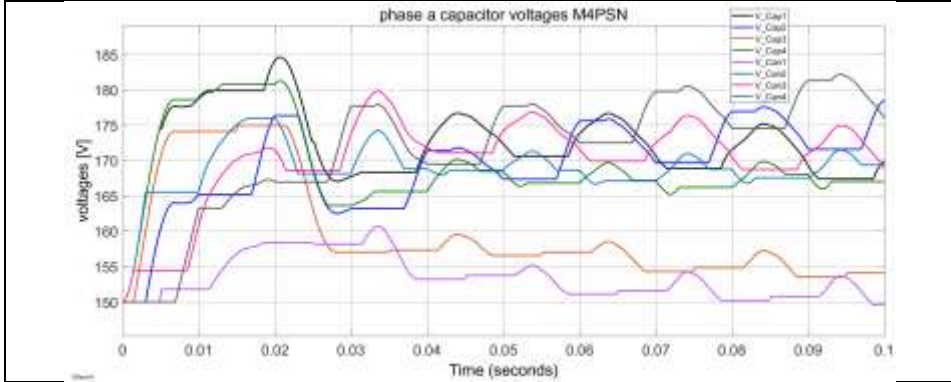


الشكل (11): التحليل التوافقي لموجات تيارات خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

يتضح من الشكل (10) أن تيارات خرج المبدل هي موجات جيبية متناوبة بتشوه توافقي كبير وهذا ما يؤكد التحليل التوافقي في الشكل (11) الذي يبين أن التشوه التوافقي الكلي $THD = 7.69\%$ وأن مطال التوافقية الثالثة يشكل حوالي 7% من مطال المركبة الأساسية للتيار.



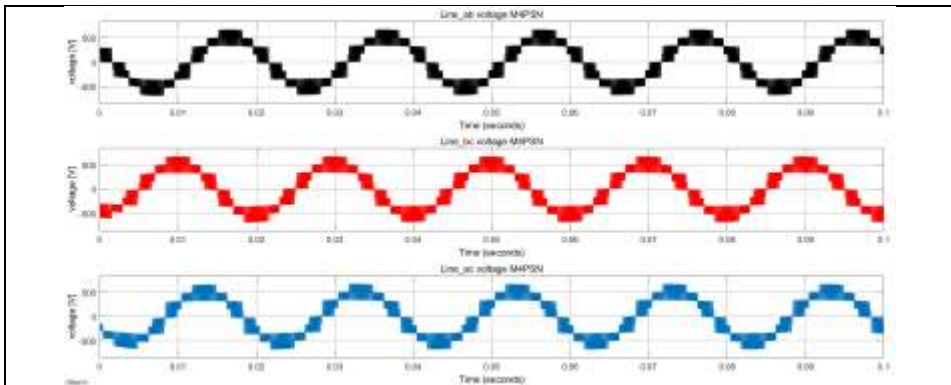
يبين الشكل (13) أن موجة التيار الدوار تتميز بمحتوى توافقي عالٍ جداً وأن التشوه التوافقي الكلي لها يساوي $THD = 36.88\%$ ، كما تتميز بوجود مركبة مستمرة عالية القيمة تبلغ حوالي 29% من مطال المركبة الأساسية. يدور هذه التيار ويغلق نفسه في بنية المبدل ولا يظهر في خرجه ويتسبب بنسبة كبيرة من ضياعات المبدل.



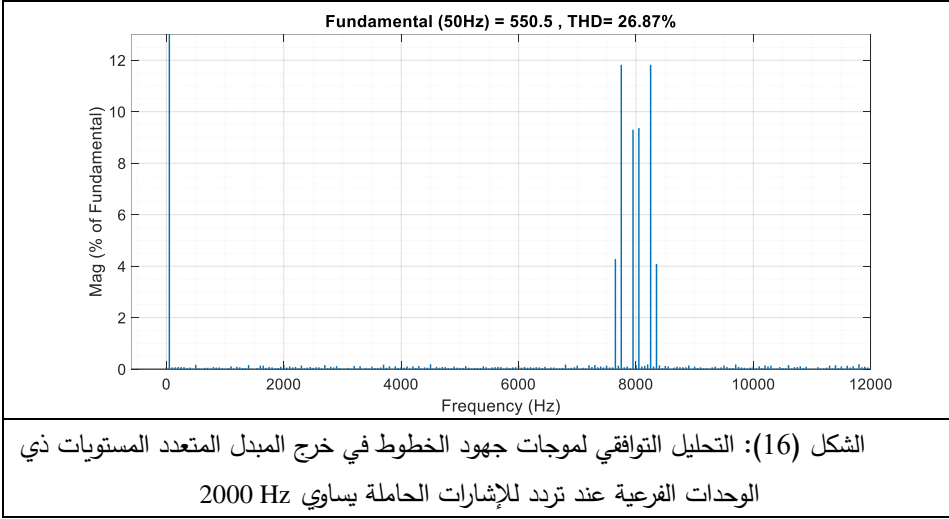
الشكل (14): موجات جهود مكثفات الوحدات الفرعية لطور a للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 100 Hz

يتضح من الشكل (14) وجود انزياح كبير في موجات جهود مكثفات الوحدات الفرعية لطور المبدل أي غياب التوازن في هذه الجهود عند قيمة التردد المدروسة، كما أن نسبة التموج المحسوبة بلغت 3.6%.

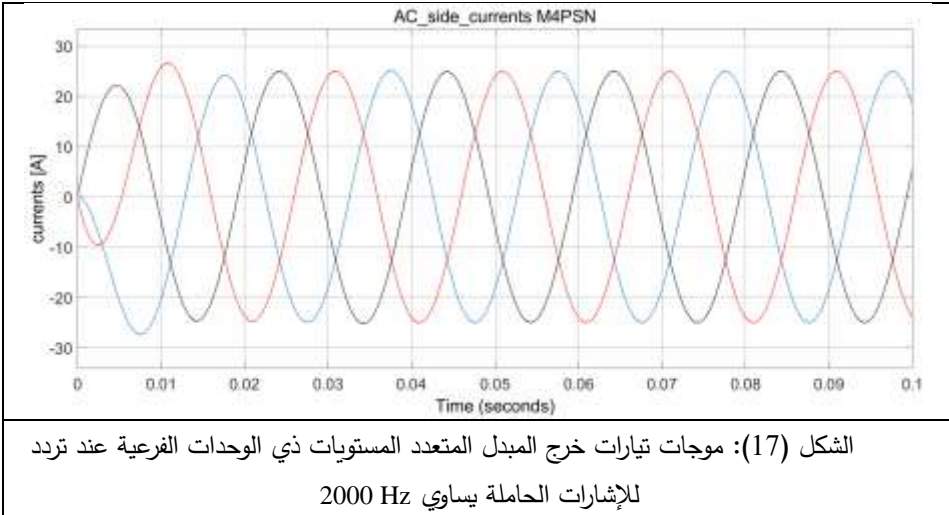
يبين الشكلان (15 و 16) موجات جهود الخطوط الثلاثية الطور في خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 2000 Hz، ويبين الشكلان (17 و 18) موجات تيارات خرج المبدل والتحليل التوافقي لها عند تردد 2000 Hz للإشارات الحاملة. يبين الشكلان (19 و 20) موجة التيار الدوار للمبدل والتحليل التوافقي لها، ويبين الشكل (21) جهود مكثفات الوحدات الفرعية للطور a عند تردد 2000 Hz للإشارات الحاملة.

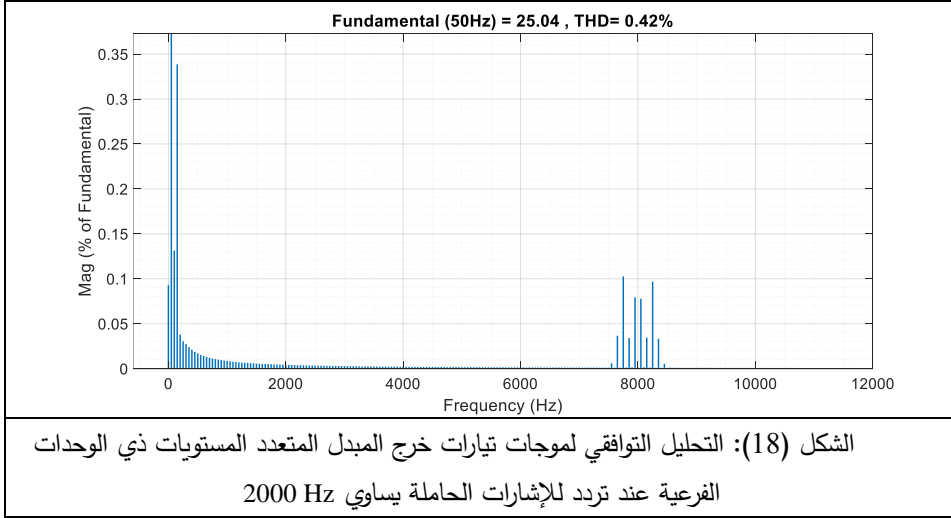


الشكل (15): موجات جهود الخطوط في خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تردد للإشارات الحاملة يساوي 2000 Hz

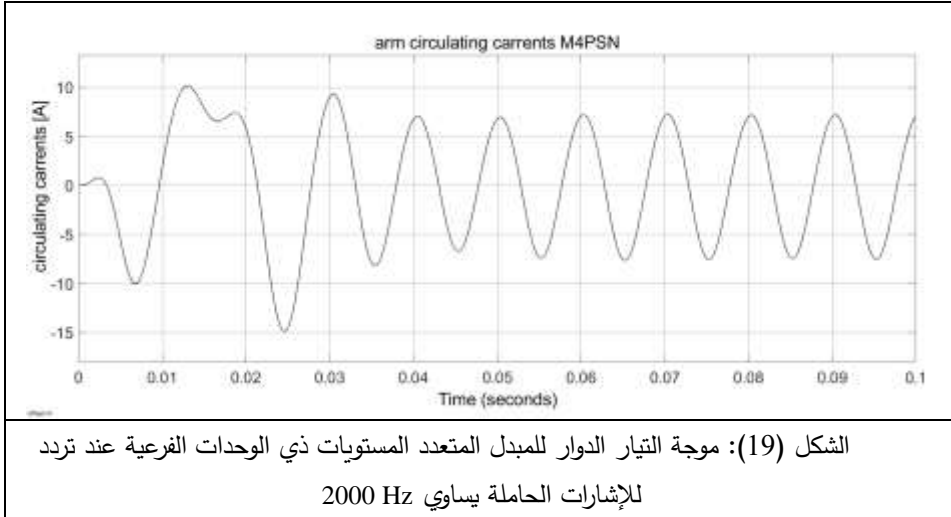


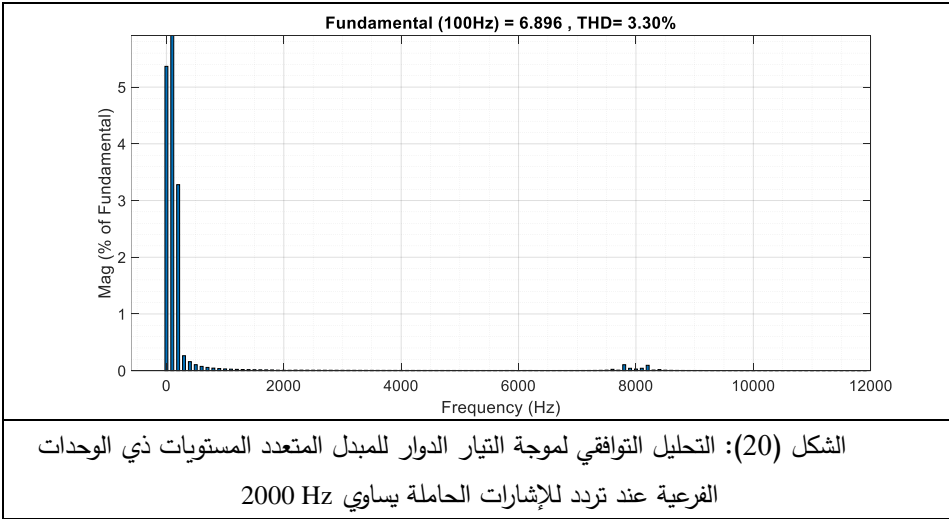
يبين الشكل (15) تحسن شكل موجة جهود الخطوط في خرج المبدل عند زيادة تردد الإشارات الحاملة إلى 2000 هرتز بالمقارنة مع حالة استخدام تردد 100 هرتز، كما أن المحتوى التوافقي قد انخفض وأصبح عدد مستويات جهد الخط البالغ تسعة مستويات أكثر وضوحاً. يبين الشكل (16) أن التشوه التوافقي الكلي يساوي $THD = 26.87\%$ وأن تردد التوافقيات المسيطرة قد ازداد بشكل كبير وهذه التوافقيات تتوضع بجوار التردد 8000 هرتز أي ما يعادل أربعة أضعاف تردد الإشارات الحاملة.



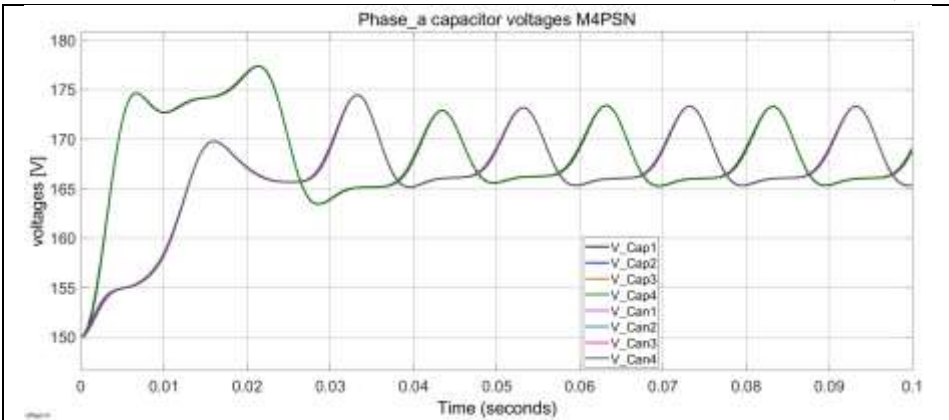


يبين الشكل (17) أن موجات تيارات خرج المبدل أصبحت جيئية نقية وأن المحتوى التوافقي لها ضعيف جداً، فبحسب الشكل (18) نجد أن التشوه التوافقي الكلي لموجة تيار الخرج يساوي 0.42%.





يبين الشكل (19) أن موجة التيار الدوار، وبعد تجاوز الحالة الابتدائية العابرة، أصبحت موجة جيبية شبه نقية بمحتوى توافقي مقبول جداً وأصبح واضحاً أن تردد موجة هذا التيار يساوي ضعفي تردد الإشارة المرجعية. يبين الشكل (20) أن التشوه التوافقي الكلي لموجة التيار الدوار يساوي $THD = 3.3\%$.



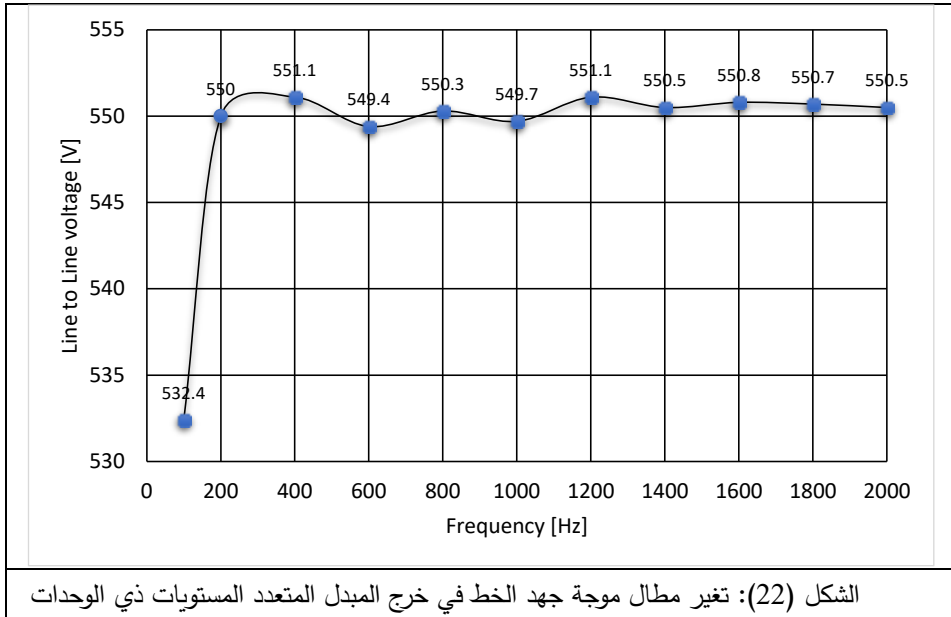
يتضح من الشكل (21) أن زيادة تردد الإشارات الحاملة إلى 2000 هرتز أدى إلى توازن جهود مكثفات الوحدات الفرعية لأطوار المبدل حيث نلاحظ حدوث انطباق موجات جهود مكثفات الوحدات الفرعية العلوية على بعضها البعض وكذلك الأمر بالنسبة لجهود مكثفات الوحدات الفرعية السفلية.

5. مناقشة النتائج

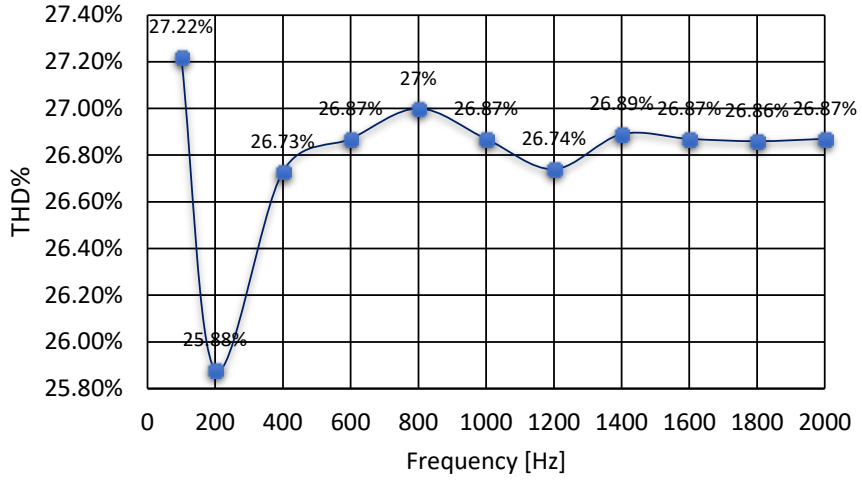
بينت نتائج المحاكاة لنموذج المبدل MMC ثلاثي الطور رباعي الوحدات الفرعية أن زيادة تردد الإشارات الحاملة يقود إلى تحسن في أداء المبدل من حيث الحصول على موجات خرج أكثر جودة ومن حيث تحقيق التوازن في جهود مكثفات الوحدات الفرعية وأيضاً الحصول على تيار دوار ذي محتوى توافقى مقبول.

بهدف توضيح تأثير زيادة تردد الإشارات الحاملة قمنا برسم تغيرات مطالات موجات جهود الخطوط والتيارات والتشوه التوافقي لها ونسبة التموج في جهود مكثفات الوحدات الفرعية وذلك عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 و2000 هرتز.

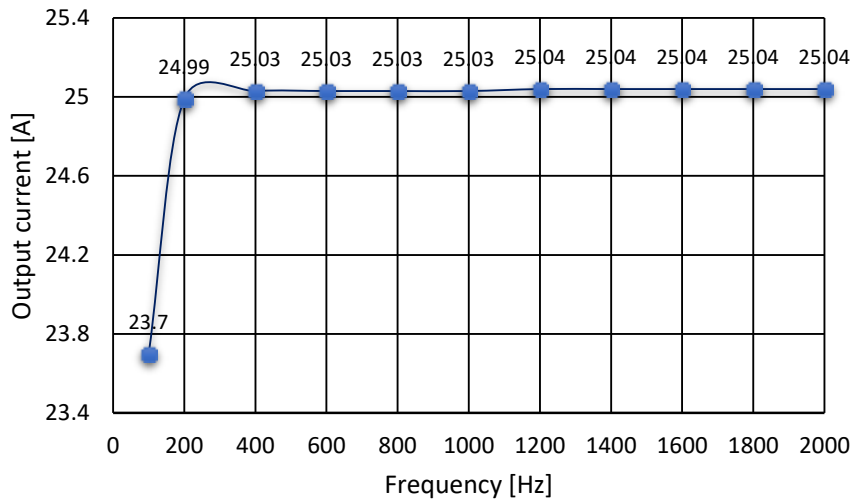
يبين الشكلان (22 و23) تغير مطال موجة جهد الخط وتغير التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخط مع تغير تردد الإشارات الحاملة. يوضح الشكلان (24 و25) تغير مطال موجة تيار خرج المبدل والتشوه التوافقي الكلي لها بدلالة تغير تردد الإشارات الحاملة، ويبين الشكلان (26 و27) تغير مطال موجة التيار الدوار والتشوه التوافقي الكلي لها كما يبين الشكل (28) تغير نسبة تموج جهود مكثفات الوحدات الفرعية بدلالة تغير تردد الإشارات الحاملة.



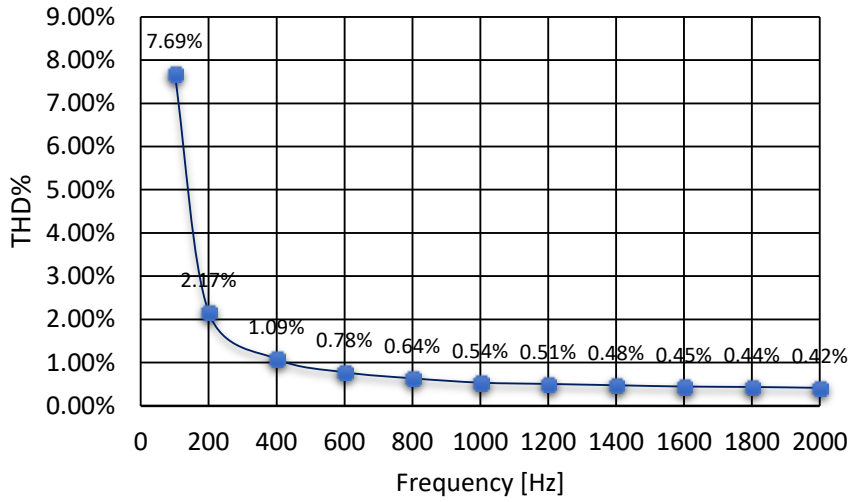
الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



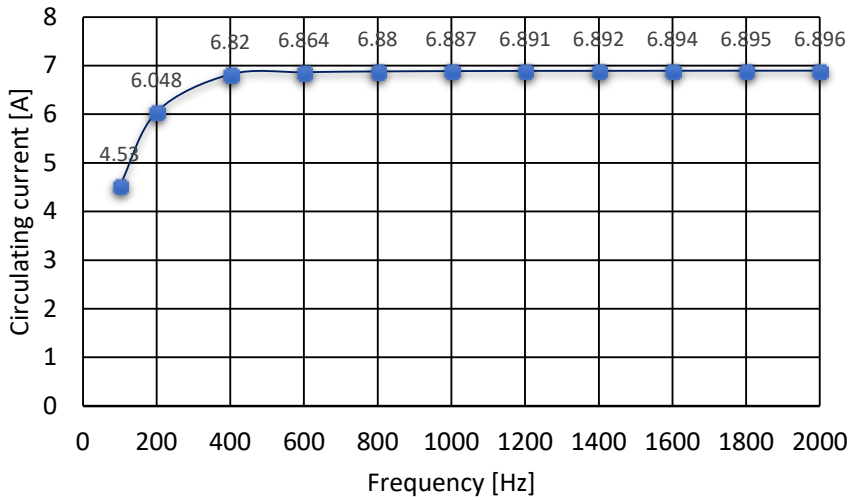
الشكل (23): تغير التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



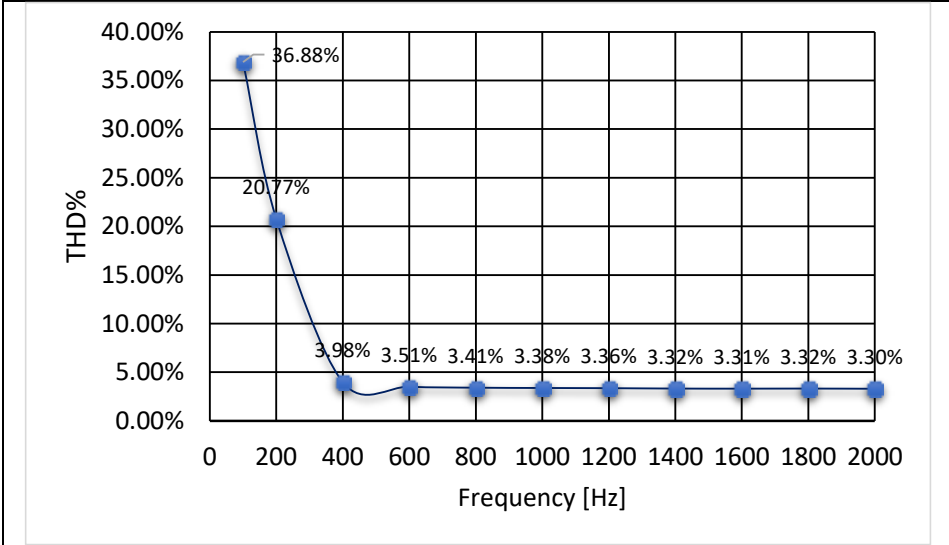
الشكل (24): تغير مطال موجة تيار خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



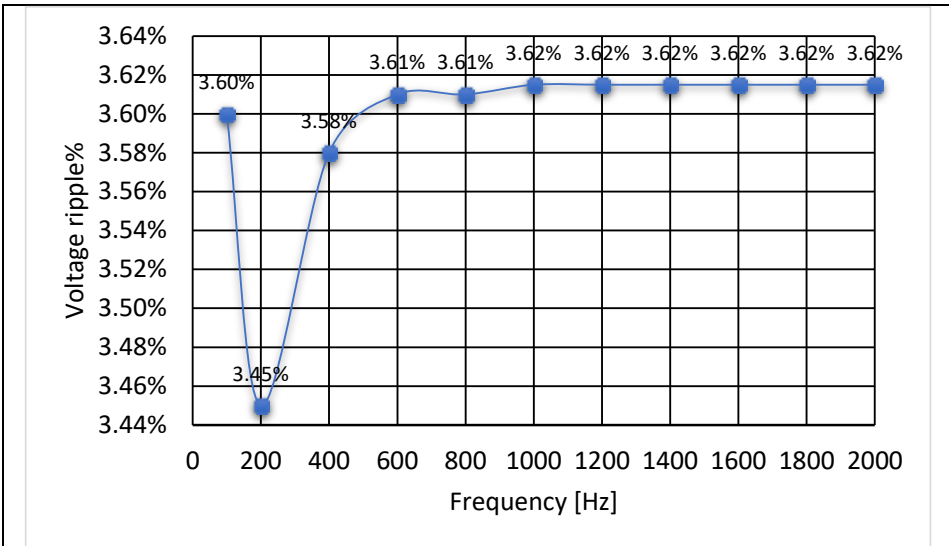
الشكل (25): تغير التشوه التوافقي الكلي لموجة تيار خرج المبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



الشكل (26): تغير مطال موجة التيار الدوار للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



الشكل (27): تغير التشوه التوافقي الكلي لموجة التيار الدوار للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz



الشكل (28): تغير نسبة تموج جهود مكثفات الوحدات الفرعية للمبدل المتعدد المستويات ذي الوحدات الفرعية عند تغير تردد الإشارات الحاملة بين 100 Hz و 2000 Hz

توضح الأشكال (22 وحتى 28) أن تردد الإشارات الحاملة يؤثر بشكل أساسي في نوعية موجات تيارات المبدل حيث تؤدي زيادة هذا التردد إلى زيادة نقاوة الموجة

وانخفاض المحتوى التوافقي. بالنسبة لمطال جهد الخط فإن زيادة التردد من 100 وحتى 200 هرتز تؤدي إلى زيادة مطال الجهد من 532.4 V وحتى 550 V ل يبقى بعدها ثابتاً تقريباً على هذه القيمة، أما التشوه التوافقي الكلي لموجة جهد الخط فهو ضعيف التعلق بتردد الإشارات الحاملة والقيمة الوسطية له بلغت 26.8%. فيما يتعلق بتيار الخرج فيمكن ملاحظة زيادة مطاله من 23.7 A وحتى 25 A تقريباً عند تغير التردد من 100 وحتى 200 هرتز لتبقى هذه القيمة ثابتة تقريباً بعد ذلك (الشكل (24))، أما التشوه التوافقي الكلي في موجة تيار الخرج فهو ينخفض بشكل كبير من القيمة 7.69% عند التردد 100 هرتز إلى القيمة 1.09% عند التردد 400 هرتز ويتابع انخفاضه بعد ذلك ولكن بمعدل قليل (الشكل (25)). بالنسبة لمطال التيار الدوار فهو يزداد من 4.53 A إلى 6.82 A عند تغير التردد من 100 وحتى 400 هرتز ويبقى ثابتاً تقريباً بعد ذلك (الشكل (26))، أما التشوه التوافقي الكلي لموجة التيار الدوار فهو يتغير بشكل كبير حيث ينخفض من 36.88% عند التردد 100 هرتز إلى 3.98% عند التردد 400 هرتز ويتابع بعد ذلك انخفاضه بشكل طفيف (الشكل (27)). فيما يخص نسبة التموج في جهود مكثفات الوحدات الفرعية فيمكن القول إنها لا تتعلق عملياً بتردد الإشارات الحاملة أو إنها تتغير بشكل طفيف جداً والقيمة الوسطية لهذه النسبة تساوي 3.59% (الشكل (28))، أما تأثير التردد فيكون ملحوظاً على توازن جهود المكثفات كما تبين ذلك من مقارنة الشكلين (14 و 21) وقد بينت نتائج المحاكاة أنه انطلاقاً من قيمة 400 هرتز لتردد الإشارات الحاملة يكون هذا التوازن جيداً بشكل كافٍ.

6. الخاتمة

قمنا في هذا البحث بدراسة تأثير تغير قيمة تردد الإشارات الحاملة في أداء المبدلات الثلاثية الطور المتعددة المستويات ذات الوحدات الفرعية، وذلك انطلاقاً من نموذج المبدل المكون من أربع وحدات فرعية في كل ذراع للمبدل. بينت نتائج الدراسة أنه وباستخدام تقنية التعديل النبضي العرضاني للتحكم في عمل القواطع الإلكترونية فإن تردد الإشارات الحاملة يؤثر بشكل أساسي في نوعية موجات تيارات المبدل وأن زيادة هذا التردد تقود إلى تخفيض التشوه التوافقي والحصول على موجات جيبيّة نقيّة. كما تؤثر

قيمة تردد الإشارات الحاملة في توازن جهود مكثفات الوحدات الفرعية وبزيادة التردد يزداد تحسن توازن هذه الجهود. بينت هذه الدراسة بشكل واضح أنه ليس من الضروري تشغيل المبدل عند ترددات عالية للإشارات الحاملة كما يفرضه استخدام تقنية التعديل النبضي العرضاني، ففي الحالة المدروسة تبين لدينا ان استخدام تردد بقيمة 400 هرتز (أي ثمانية أضعاف تردد الإشارة المرجعية) يكون كافياً للحصول على أداء ممتاز للمبدل من حيث نوعية الموجات الناتجة وتوازن جهود المكثفات. إن زيادة تردد الإشارات الحاملة وعلى الرغم من كونها مفيدة في تحسين نوعية موجات المبدل وتخفيض المحتوى التوافقي وتبسيط عملية الترشيح، إلا أنها تؤدي في الوقت نفسه إلى زيادة الإجهادات التي تتعرض لها القواطع الإلكترونية لوحدات المبدل بسبب عمليات الفصل والوصل السريعة وتؤدي إلى زيادة مفايد الإبدال للمبدل التي تتأثر بشكل كبير بزيادة التردد. بهدف تعميم نتائجنا هذه من المفيد إجراء نفس الدراسة على نماذج مبدلات بوحدات فرعية أكثر عدداً.

7. المراجع العلمية

- [1] H. Stemmler, "High-power industrial drives," *Proc. IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1266–1286, Aug 1994.
- [2] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, and T. G. Habetler, "Multilevel converters for large electric drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 1, pp. 36–44, Jan 1999.
- [3] S. Kouro, J. Rodriguez, B. Wu, S. Bernet, and M. Perez, "Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 18, no. 4, pp. 26–39, Jul 2012.
- [4] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, Jun 2008.
- [5] M. Glinka and R. Marquardt, "A new ac/ac multilevel converter family," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 662–669, 2005.
- [6] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, vol. 3, Jun 2003, pp. 23–26.
- [7] H. J. Knaak, "Modular multilevel converters and hvdc/facts: A success story," in *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, Aug 2011, pp. 1–6.
- [8] J. Glasdam, J. Hjerrild, L. H. Kocewiak, and C. L. Bak, "Review on multi-level voltage source converter based hvdc technologies for grid connection of large offshore wind farms," in *Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference on*, Oct 2012, pp. 1–6.
- [9] V. Khadkikar, "Enhancing electric power quality using upqc: A comprehensive overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 2284–2297, May 2012.
- [10] Z. Liu, J. Lu, Z. Ou, M. Ma, C. Yuan, X. Xiao, and H. Wang, "The start control strategy design of united power quality conditioner based on modular multilevel converter," in *Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, May 2013, pp. 933–937.
- [11] Asif A. Solangi Rameez Shaikh Noman Khan Pathan. Effects of Modulation Index on Harmonics of SP-PWM Inverter Supplying

- Universal Motor. (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 9, No. 7, 2018.
- [12] R. Mousa and S. Rabih, "Study of the effect of amplitude modulation index value on the output waves of the three-phase modular multi-level converters,". *Al-Baath University journal*, 2020.
- [13] R. Mousa and S. Rabih, "Effect of modulation index on the performance of the three phase modular multi-level converters," *2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC)*, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IREC51415.2021.9427870.
- [14] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 37–53, Jan 2015.
- [15] A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen, and G. Demetriades, "Modular multilevel converters for hvdc applications: Review on converter cells and functionalities," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 18–36, Jan 2015.
- [16] A. Dekka, B. Wu, N. Zargari, and R. Fuentes, "Dynamic voltage balancing algorithm for modular multilevel converter: A unique solution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 952–963, Feb 2016.
- [17] E. Solas, G. Abad, J. Barrena, S. Aurtenetxea, A. Carcar, and L. Zajac, "Modular multilevel converter with different submodule concepts – part i: Capacitor voltage balancing method," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4525–4535, Oct 2013.