محاكاة ومقارنة قيم التشوه التوافقي للقالبات الجسرية متعددة المستويات المتعاقبة التي تقود محرك تحريضي ثلاثي الأطوار عند عدة مستويات منها باستخدام ماتلاب/سيمولينك

حنان مهجة*

(تاريخ الإيداع 22 / 9 / 2020. قُبِل للنشر في 9/ 3 / 2021)

□ ملخّص □

ظهرت تقنية القالبات متعددة المستويات مؤخراً كبديل مهم جدًا في مجال التحكم بالطاقة ذات الجهد المتوسط والاستطاعة العالية. إن ما تقدمه من مزايا مثل إنتاج الاستطاعة عالية الجودة، وضياعات التبديل المنخفضة، والتداخل الكهرومغناطيسي المنخفض، والجهد العالي الناتج تجعل القالبة متعددة المستويات حلاً قوياً في دارات مبدلات القدرة. يعرض هذا البحث عدداً من القالبات متعددة المستويات المتعاقبة وتحليل عملها وتأثير القالبات الجسرية H متعددة المستويات المتعاقبة في تنظيم الجهد على الحمل المتصل بها وتطبيقه على محرك تحريضي ثلاثي الطور ذي دائر مقصور من أجل عدة مستويات من هذه القالبات. تثبت هذه الدراسة أن هذه الأنواع من CHBMLI توفر شكل موجة جهد محسّن مع THD أقل عند زيادة مستويات القالبة. بالإضافة إلى ذلك، يتم التحكم في قيم جهد الخرج المفضلة عن طريق تعديل عرض النبضات بواسطة تقنية التعديل النبضي العرضاني (PWM). وأظهرت النتائج أن CHBMLI أكثر ملاءمة للمحرك التحريضي. حيث تمت محاكاة التشكيلات المقترحة باستخدام برنامج Matlab / simulink.

الكلمات المفتاحية: القالبات الجسرية متعددة المستويات المتعاقبة (CHBMLI)، التعديل النبضي العرضاني (PWM)، تحليل (FFT)، التشوه التوافقي الكلي (THD).

* قائم بالأعمال – قسم هندسة الميكاترونيك – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية –سورية.
E.mail: eng.hnan.mohja@gmail.com

Simulation and Comparison of THD for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters Fed Three Phase Induction Motor at Several Levels Using by Matlab/Simulink

Hanan Mohja*

(Received 22 / 9 / 2020. Accepted 9 / 3 / 2021)

□ ABSTRACT □

Multi-level inverter technology has emerged recently as a very important alternative in the area of high-power medium voltage energy control. Moreover the advantages like high quality power output, low switching losses, low electro-magnetic interference. This research presents some of cascaded multilevel inverters and analyzes its work and effect on the load voltage regulation when it is connected to three phase induction motor drive. The cascaded H-bridge, among those types CHBMLI offers enhanced output voltage waveform with lesser THD when increasing the levels of inverter. In addition to that the preferred output values are controlled by modulating the width of the pulses by Pulse Width Modulation (PWM) technique. The results reveal that the CHBMLI is more appropriate for induction motor drive. The proposed topology developed by using Matlab/simulink software.

Keywords: Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHBMLI), Pulse Width Modulation (PWM), Total Harmonic Distortion (THD), Fast Fourier Transforms **(**FFT) analysis.

***Academic Assistant, Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. E.mail: eng.hnan.mohja@gmail.com.**

مقدمة:

تصمم المبدلات عادةً للحصول على جودة عالية في جهد الخرج أو للحصول على الشكل الموجي للتيار بأقل تشوهات ممكنة. في تطبيقات الطاقة العالية والجهد العالي يكون للقالبات ثنائية المستوى التقليدية بعض القيود عند العمل على ترددات عالية ويرجع هذا أساساً إلى ضياعات الفصل والوصل والقيود المفروضة من تجهيزات القدرة المستخدمة. حيث يوجد تشكيلات تسلسلية وتفرعية لمفاتيح القدرة من أجل تحقيق معالجة الطاقة كجهود وتيارات. تنتج القالبات التقليدية ذات المستويين مستويات من THD حوالي ستين بالمائة حتى في ظل ظروف التشغيل العادية والتي تكون غير مرغوب فيها وتتسبب في المزيد من الضياعات و مشاكل أخرى في جودة الطاقة أيضاً على آلات التيار المتناوب.

في القالبات ثنائية المستوى التقليدية، يتم تحويل التيار المستمر DC في الدخل إلى خرج متناوب AC عند التردد والجهد المطلوبين بمساعدة المفاتيح الالكترونية. اعتمادًا على هذه الدارة، يتم استخدام أربعة أو ستة مفاتيح. توفر مجموعة من المفاتيح نصف النبضة الموجبة في الخرج التي يطلق عليها مفاتيح المجموعة الموجبة والمجموعة الأخرى التي تؤمن نصف الموجة السالبة تسمى بالمجموعة السالبة [1]،[2]. 1

تقوم القالبات متعددة المستويات بتحويل الطاقة خلال خطوات إلى مستويات متعددة للجهد للحصول على جودة أفضل للطاقة المحسنة، وانخفاض ضياعات التبديل، على نحو أفضل للتوافق الكهرومغناطيسي وقدرة أعلى للجهد. مع مراعاة هذه المزايا، فقد اكتسبت القالبات متعددة المستويات شعبية كبيرة خلال السنوات الأخيرة.

يمكن للقالبة متعددة المستويات زيادة القدرة عدة مرات مما هي عليه في القالبة ذات المستويين من خلال التوصيل التسلسلي والمتوازي لمفاتيح الطاقة المطلوبة لتحقيق تيارات وجهود الطاقة المعالجة. بمقارنة هذا مع نظامي قالبتين ثنائيتي المستوى سينتجان نفس القدرة، تمتلك القالبة متعددة المستويات ميزة التخلص أقل مايمكن من المكونات التوافقية على جهد الخرج [2]،[3].

من أهم المشاكل في التحكم بالقالبة متعددة المستويات ذات مصدر الجهد هو الحصول على مطال وتردد متغيرين في الخرج الجيبي عن طريق استخدام تقنيات التحكم البسيطة. في الواقع، في القالبات ذات مصدر الجهد، توافقيات التيار غير الأساسية تسبب فقدان الطاقة والتداخل الكهرومغناطيسي في محركات التيار المتناوب. يمكن أن يرتبط تخفيض التوافقيات ارتباطًا صارمًا بأداء القالبة مع أي استراتيجية تبديل مستخدمة، كما تبين أن بنية القالبة يمكن أن تلعب دوراً أساسياً في ذلك [3].

يعرض هذا البحث عدداً من القالبات متعددة المستويات المتعاقبة وتحليل عملها. تم مناقشة هذه التشكيلات المختلفة للقالبات متعددة المستويات ومحاكاتها باستخدام مكتبة Matlab\Simulink. ومقارنة أدائها من خلال إجراء اختبار THD لكل نوع باستخدام تحليل FFT في الماتلاب.

أهمية البحث وأهدافه:

في عصرنا الحالي، بات استخدام المحركات الكهربائية أمراً حتمياً مع ظهورها في عدد غير محدود من التطبيقات الصناعية. وبما أن أداء المحرك يعتمد بشكل أساسي على استراتيجية التحكم المستخدمة، تم تطوير نظريات جديدة للتحكم بهذه المحركات بالإضافة إلى تطوير بنية القالبات المستخدمة في تغذية هذه المحركات. تأتي أهمية هذا البحث من أنه يقدم للمستثمر وسيلة لتصميم القالبات للحصول على جهد خرج نوعي أو موجة تيار بأقل تشوهات ممكنة.

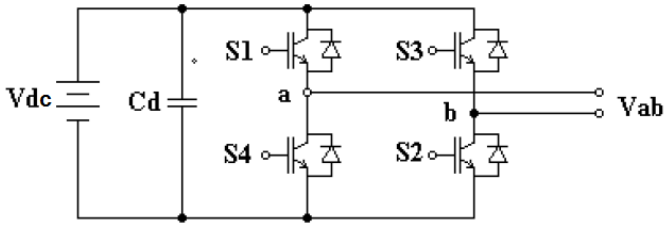
يهدف هذا البحث إلى وضع عدة نماذج للقالبة متعددة المستويات من المستوى السابع حتى المستوى الثالث عشر واستخدام محرك تحريضي ثلاثي الأطوار على خرج هذه القالبات، ومقارنة أدائها وإجراء اختبار THD لكل من جهدي الخط والطور، والذي يمكننا من معرفة توزع التوافقيات وبالتالي يعطي معلومات عن السلوك غير الخطي في كل مستوى.

طرائق البحث ومواده:

مفهوم القالبات متعددة المستويات المتعاقبة:

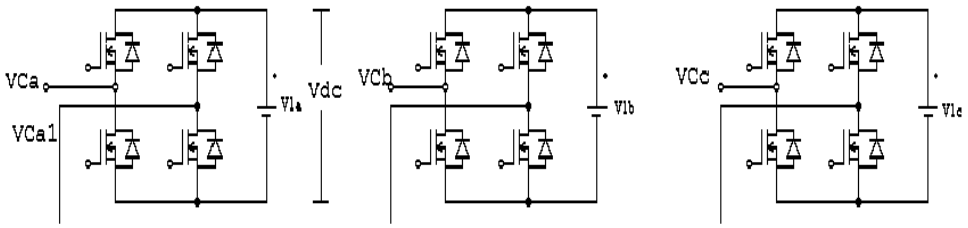
هناك اهتمام متزايد بالقالبات متعددة المستويات لأنها تستطيع تزويد تطبيقات أنظمة الطاقة الإلكترونية بنسب الجهد ذات المجال المتوسط والعالي، والتي تتضمن قيادة المحركات وتطبيقات توزيع وتحسين وتكييف الطاقة. تتكون القالبة متعددة المستويات المتعاقبة من سلسلة من القالبات الجسرية H–Bridge. الوظيفة العامة لهذه القالبة هي تجميع الجهد المطلوب من عدة مصادر تغذية DC منفصلة، والتي يمكن الحصول عليها من البطاريات أو خلايا الوقود أو الخلايا الشمسية. الميزة الخاصة بهذا النوع من القالبات هو أن متطلبات التشكيل والتحكم والحماية لكل جسر تكون معيارية. وقد تم دراسة القالبة المتعاقبة واستخدمت في مختلف المجالات مثل محركات الأقراص ونظام الإرسال وتكييف الطاقة [4]، [5].

يتكون كل مستوى من المحولة الجسرية الكاملة الموضحة في الشكل (1) من أربعة مفاتيح. كمثال، عن طريق توصيل المفتاحين S1 و S2، ينتج V1 = + Vdc . من خلال توصيل المفتاحين S3 و S4، ينتج V1 = – Vdc. بإيقاف تشغيل كل المفاتيح ينتج Vdc = 0. وبالمثل، يمكن أن يكون جهد الخرج المتناوب عند كل مستوى تم الحصول عليه بنفس الطريقة. يمكن الحصول على الحد الأدنى من التشوه التوافقي عن طريق التحكم بزوايا مفاتيح التبديل عند مستويات القالبة المختلفة.



الشكل (1) قالبة جسرية كاملة أحادية الطور H–Bridge [6]

يوضح الشكل (2) البنية الأساسية للقالبات المتعاقبة ثلاثية الطور لتكوين ثلاثة مستويات. يرتبط كل طور بقالبة جسر كامل أحادي الطور. الجهود الطرفية المتناوبة لكل مستوى مختلف من القالبات ترتبط على التسلسل. ينتج جهد خرج الطور من خرج القالبة الجسرية وينتج جهد الخط من تجميع مخارج القالبات الجسرية المتعاقبة لكل طور. كل قالبة كاملة الجسر أحادية الطور يمكن أن تولد ثلاثة مستويات للخرج، Vdc+، 0 ، و Vdc–. وقد أصبح ذلك ممكناً عن طريق توصيل مصادر التيار المستمر بالتتابع مع الطرف المتناوب عبر مفاتيح التوصيل الأربعة[6]،[7].



الشكل (2) قالبة ثلاثية الطور متعاقبة ذات ثلاثة مستويات [7]

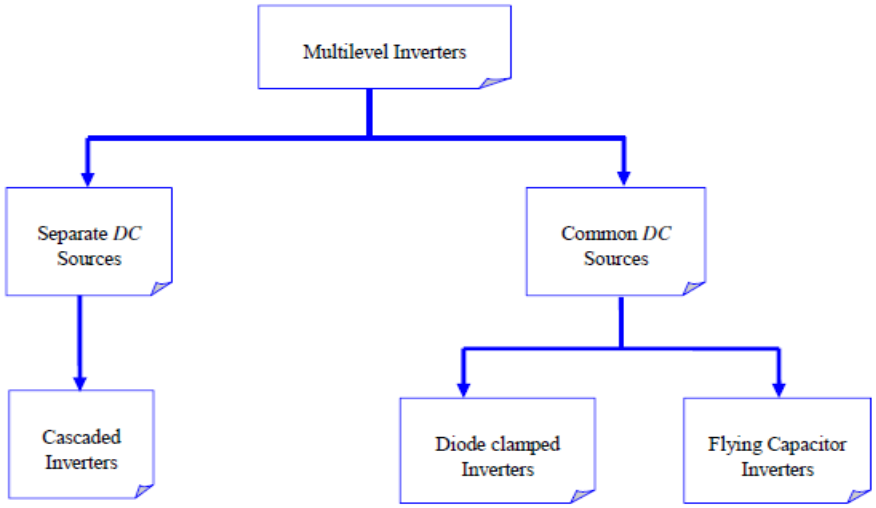
أنواع القالبات متعددة المستويات:

يوضح الشكل (3) تصنيف تشكيلات القالبة متعددة المستويات كماهي في مجال تحويلات الطاقة. بالرغم من ذلك فإن هذا العمل يقترح مخطط تحكم مختلف، وهو متعلق بالكامل بالقالبات متعددة المستويات المتعاقبة. يمكن تصنيف تشكيلات القالبة متعددة المستويات إلى ثلاث فئات وهي:

1- القالبات ذات الديود Diode Clamped Inverters.

2- القالبات ذات المكثف العائم Flying Capacitor Inverters.

3- القالبات المتعاقبة Cascaded Inverters.



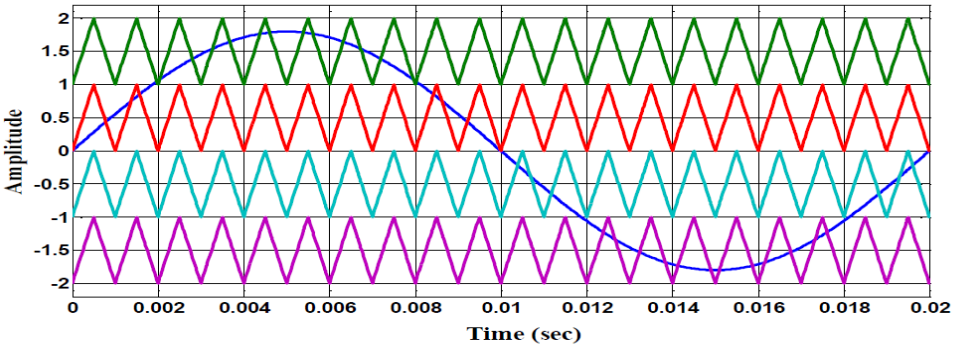
الشكل (3) تصنيف القالبات متعددة المستويات [7].

القالبات ذات الديود، ولا سيما القالبة ثلاثية المستويات، فقد لاقت اهتماماً كبيراً في تطبيقات القيادة للمحركات لأنها تحتاج فقط إلى مصدر جهد مشترك واحد والعديد من خوارزميات PWM البسيطة والكفوءة التي تم تطويرها في هذا المجال، حتى بوجود مشكلة جهد المكثف غير المتوازن في التوصيل المستمر DC. ومع ذلك، سيكون هناك قيود على التطبيقات التي تحتوي القالبات ذات الديود رباعي المستوى بسبب الموثوقية والتعقيد وذلك بسبب توازن التوصيل المستمر DC ووجود عدد أكبر من الديودات [7]،[8]. من ناحية أخرى فإن القالبات ذات المكثف العائم تحتاج إلى عدد أكبر من المكثفات وكذلك المكثفات تكون أكثر ضخامة عند نسب الجهد العالية والتي تسبب مشكلة حرجة تؤدي إلى تحجيم القالبة [4]،[7].

القالبات المتعاقبة المطروحة مؤخراً لايوجد فيها أية مشكلة في البنية كعدم توازن الجهد في التوصيل المستمر DC أو ضرورة وجود مكثفات أكبر. لكنها تتطلب العديد من مصادر التيار المستمر المنفصلة والتي تعتبر بمثابة ميزة رئيسية مع البطاريات القابلة للشحن في الوقت الحاضر. تصنف البطاريات عادة ل 12 فولت و 24 فولت، من أجل بناء نظام قالبة يستخدم في تطبيقات القيادة لمحرك ذو جهد عالي عند الأحمال الحرجة التي يتم توصيلها على التسلسل للحصول على نسب عالية للجهد. وتجدر الإشارة إلى أنه بسبب مزايا أخرى كمخطط وحزمة الدارات النمطية، يمكن اختيار القالبة المتعاقبة كخيار جيد في تطبيقات قيادة المحرك ذو الجهد العالي. في حالة حدوث أي قصر في الجهاز، يمكن استبدال وحدة القصر في هذه الأجهزة دون أية صعوبات [9]،[10].

تقنية التعديل المستخدمة في قيادة مفاتيح القالبة:

إن تقنيات التعديل النبضي العرضاني المعتمدة على الموجة الحاملة تصنف بشكل رئيسي إلى: التعديل بإزاحة الطور والتعديل بإزاحة المستوى. في كل من التقنيتين من أجل قالبة ذات m مستوى، تتطلب وجود $(m-1)$ موجة حاملة، وكل الموجات الحاملة يجب أن يكون لها نفس التردد والطويلة. تم في هذا البحث استخدام طريقة التعديل النبضي العرضاني بإزاحة المستوى Level Shifted PWM(LS-PWM) كما هو موضح في الشكل (4) الذي يمثل التعديل النبضي العرضاني بإزاحة المستوى لقالبة ذات خمسة مستويات يتم إزاحة الموجات الحاملة المثلثية رأسياً بحيث تكون النطاقات التي تحتلها متجاورة. يتم مقارنة موجة التعديل الجيبية ذات التردد 50 Hz مع موجة حاملة مثلثية ذات تردد 1KHz لنحصل على النبضات التي تقود مفاتيح القالبة [7]، [11].



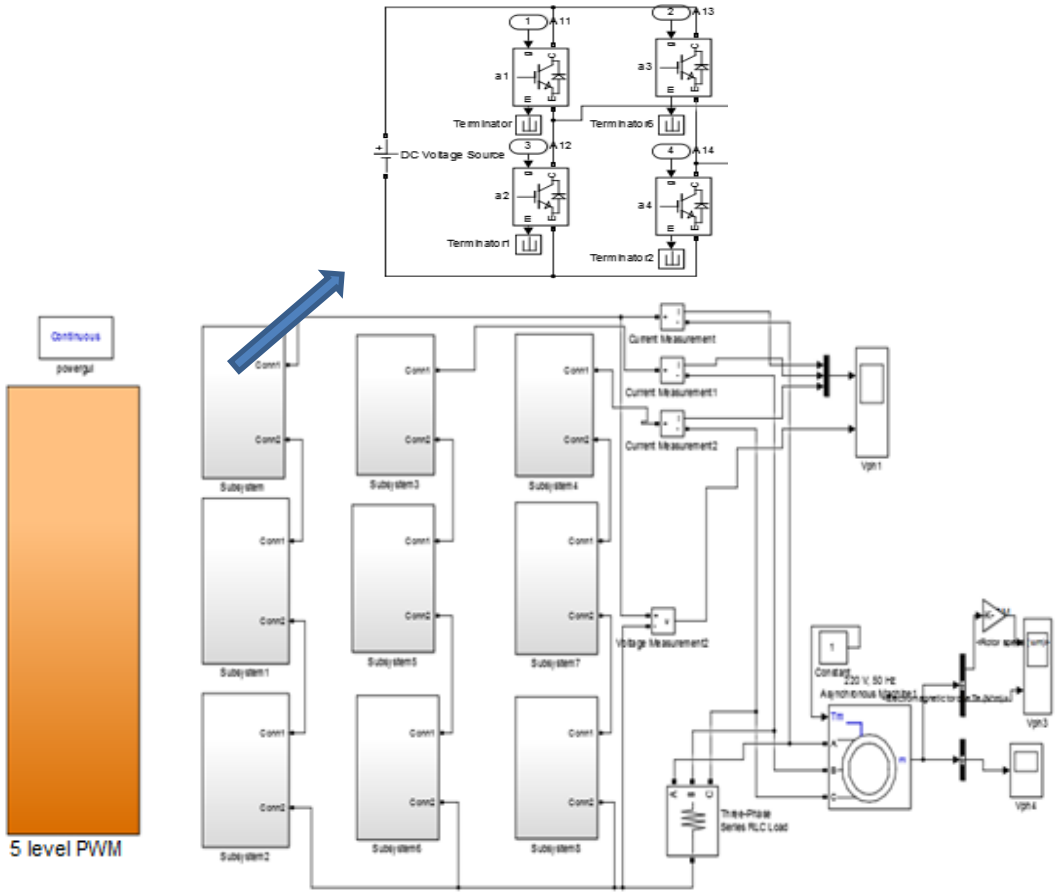
الشكل (4) التعديل النبضي العرضاني بإزاحة المستوى لقالبة ذات خمسة مستويات.

النتائج والمناقشة:

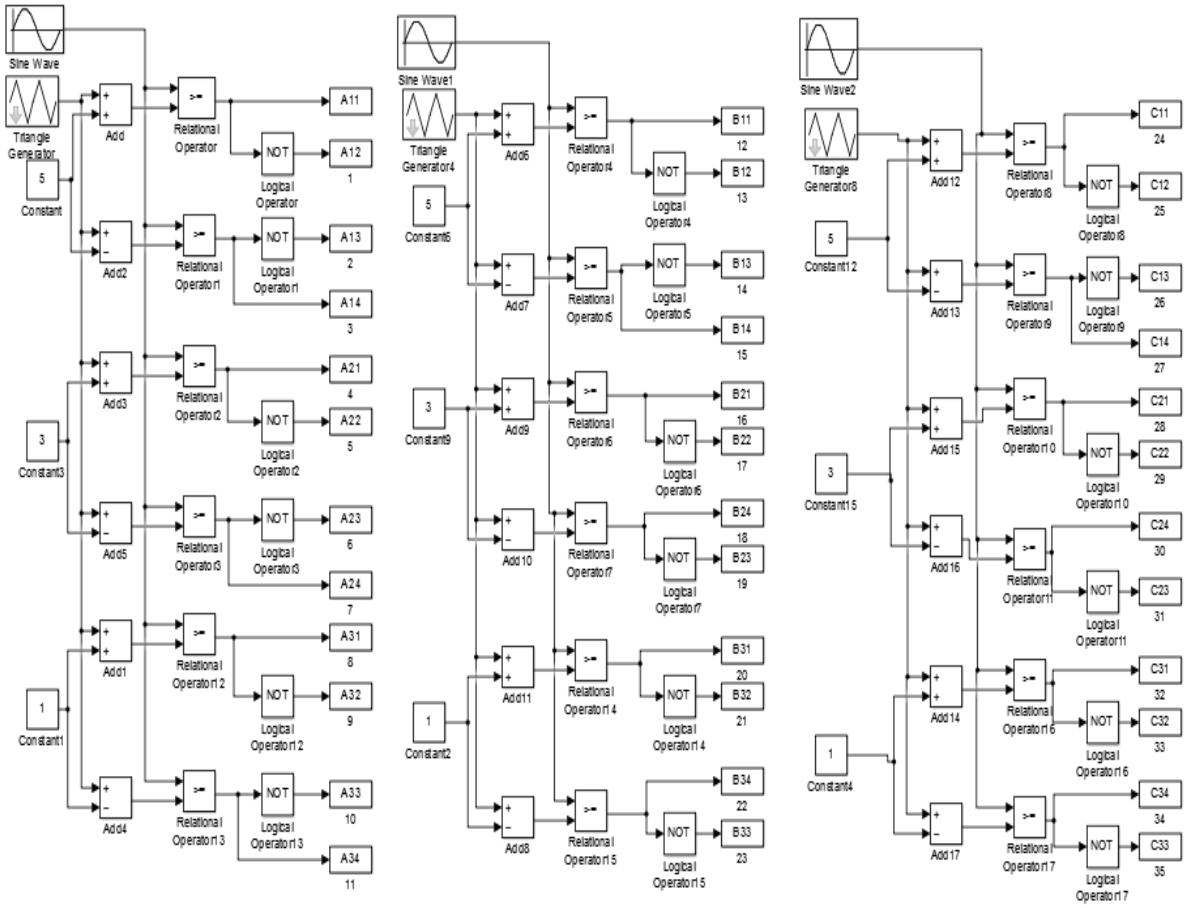
يركز عمل المحاكاة بشكل أساسي على المقارنة بين مستويات مختلفة من القالبات متعددة المستويات المتعاقبة ثلاثية الأطوار بالاعتماد على تقنية PWM بتعديل المستوى. حيث تتم المقارنة على أساس الناتج الإجمالي للتشوه التوافقي. لم يتم تقديم محاكاة للقالبة أحادية الطور حيث أن العمل المقترح يركز بشكل أساسي على القالبة ثلاثية الأطوار لتطبيقات القيادة الصناعية عالية القدرة.

في الشكل (5) قالبة متعددة المستويات تقود محرك تحرضي ثلاثي الأطور. تم استخدام مكتبة Simulink في الماتلاب للمحاكاة، حيث تتألف هذه القالبة من ثلاثة دارات جسر H في كل طور، لتعطي على خرجها إشارة جهد

ذات سبعة مستويات. تحصل القالبة على إعداداتها من دارة توليد النبضات المبينة في الشكل (5-أ)، التي تستخدم طريقة التعديل النبضي العرضاني بإزاحة المستوى.

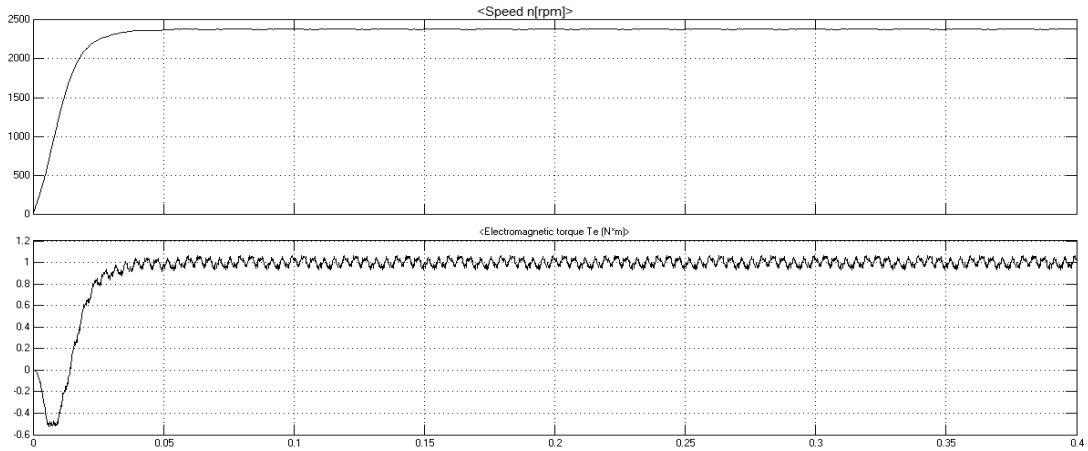


الشكل (5) قالبة ذات سبعة مستويات مع دارة توليد النبضات.

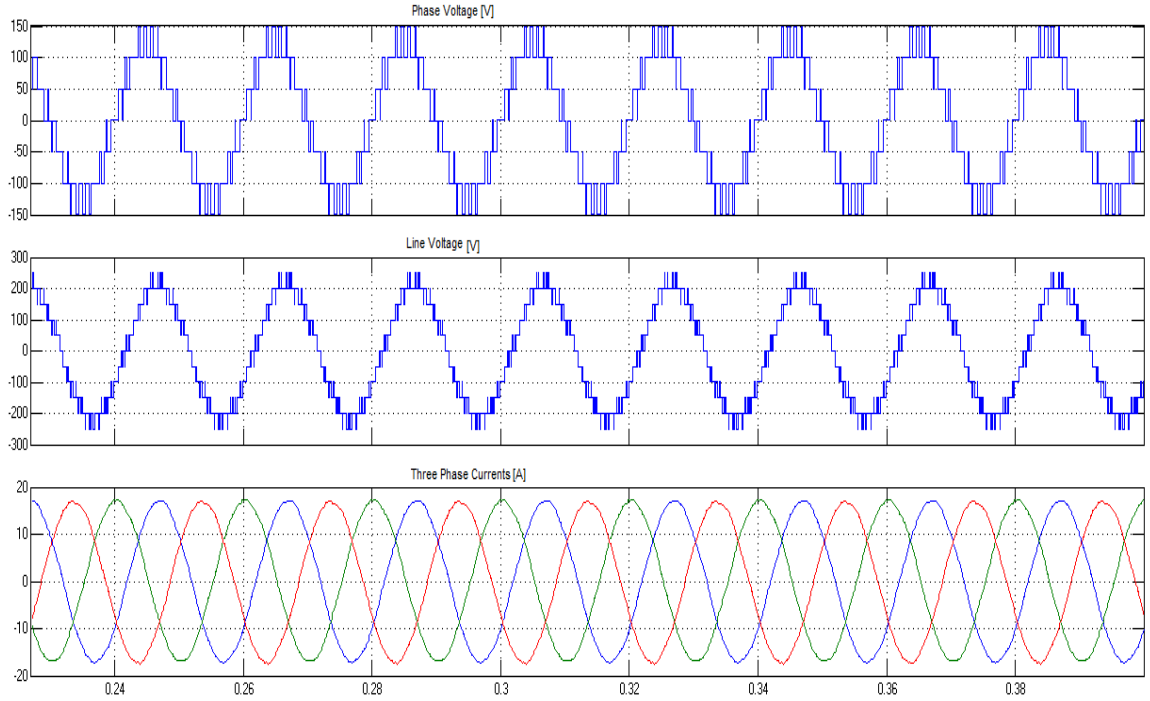


الشكل (5–أ) دارة توليد النبضات للقالبة ذات السبعة مستويات.

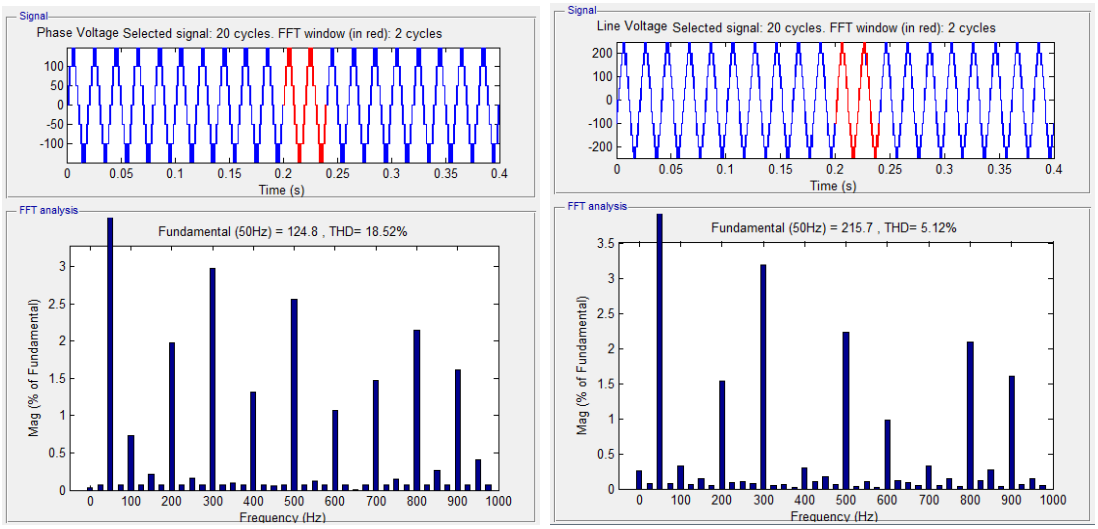
يظهر الشكل(6) مخططات السرعة والعزم على خرج المحرك وجهد الطور وجهد الخط وتيارات الأطوار الثلاثة المطبقة على دخل المحرك والناتجة عن محاكاة القالبة ذات السبعة مستويات، بالإضافة إلى تحليل FFT الذي يظهر مستويات THD لهذه القالبة.



الشكل (6–أ) مخطط السرعة والعزم

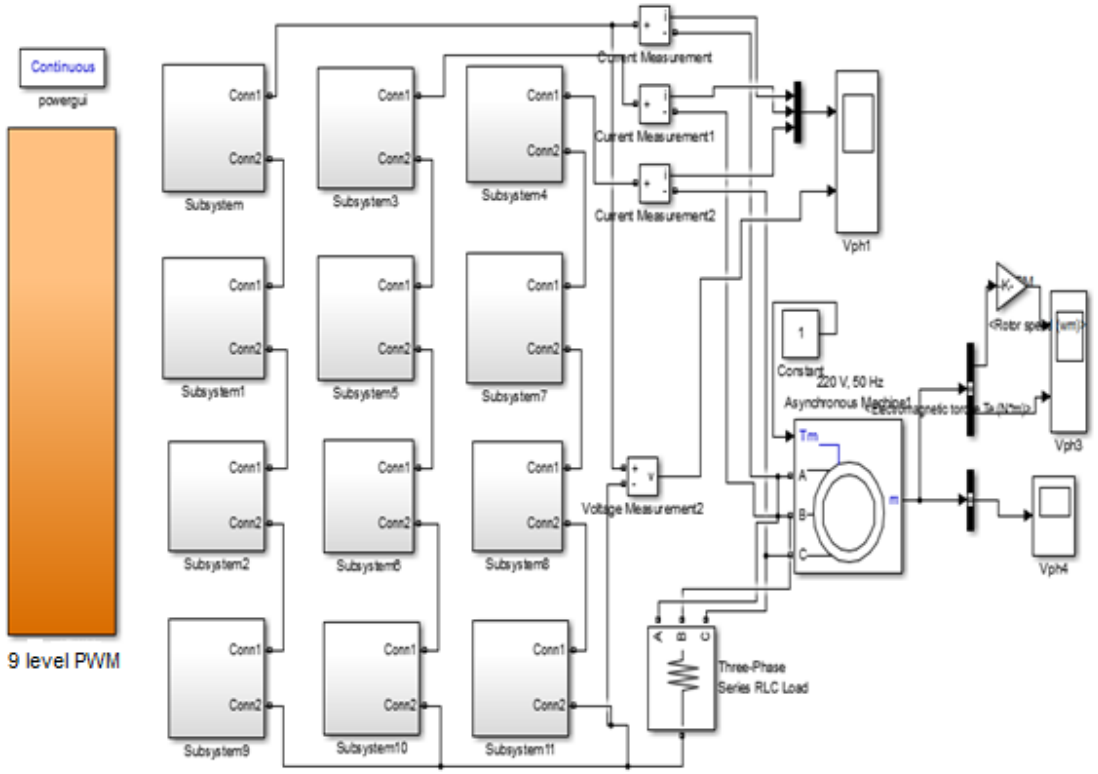


الشكل (6-ب) جهد الطور وجهد الخط وتيارات الأطوار الثلاثة.



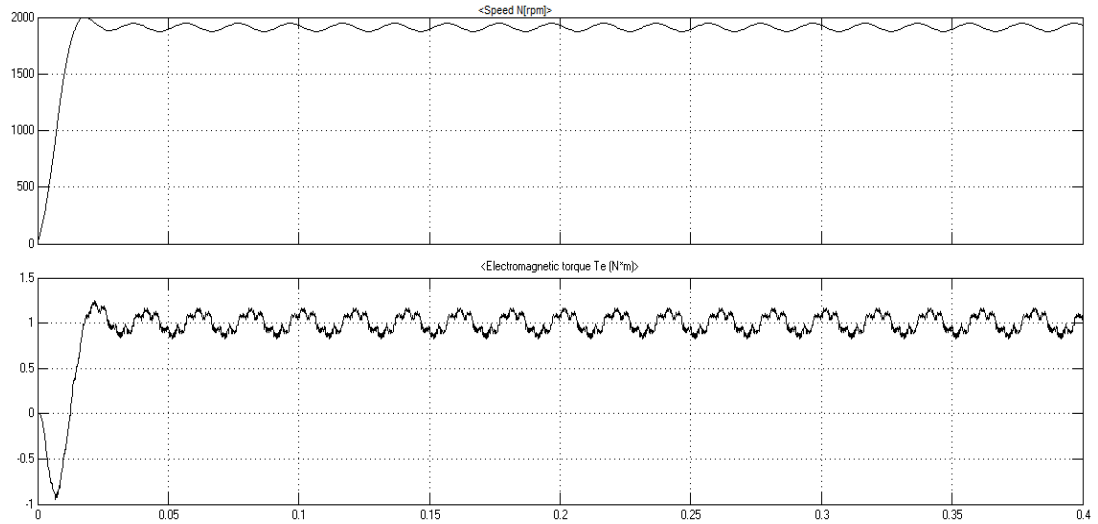
الشكل (6-ج) تحليل FFT و THD للقالبة ذات السبعة مستويات من أجل جهد الطور وجهد الخط.

يبين الشكل(7) قالبة ذات تسعة مستويات مع دارة توليد النبضات لهذه القالبة، حيث تم ضمن النظام الفرعي لدارة توليد النبضات من مراعاة إضافة مراحل بما يتناسب مع توليد نبضات القدح للعناصر المكونة للقالبة الحالية.

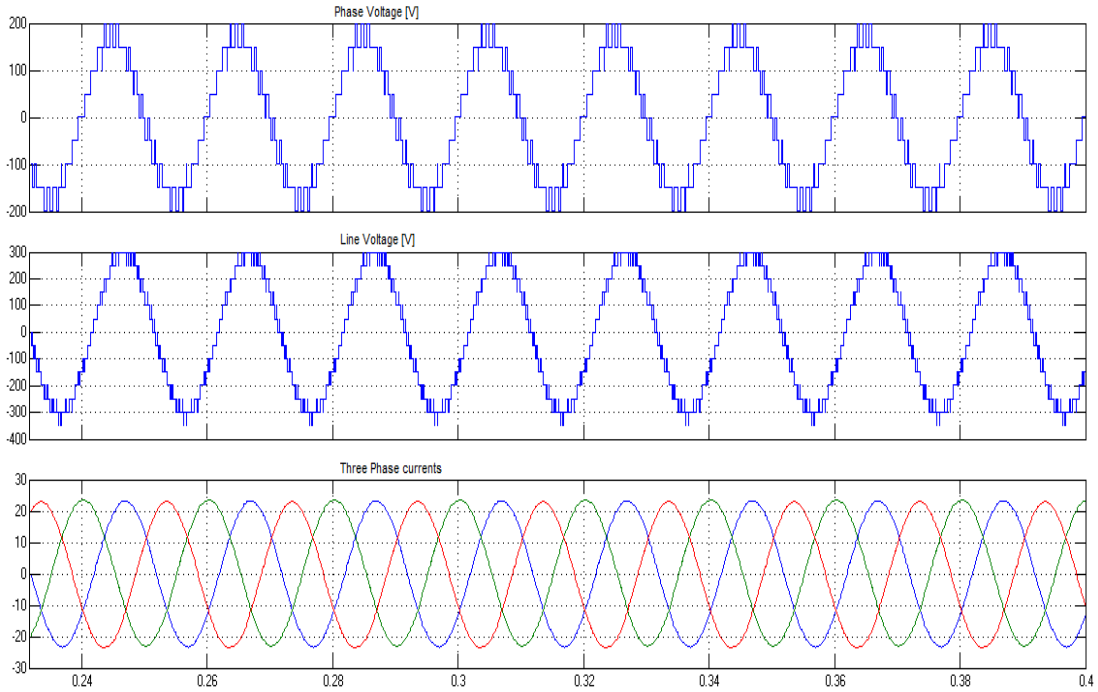


الشكل(7) قالبة ذات تسعة مستويات.

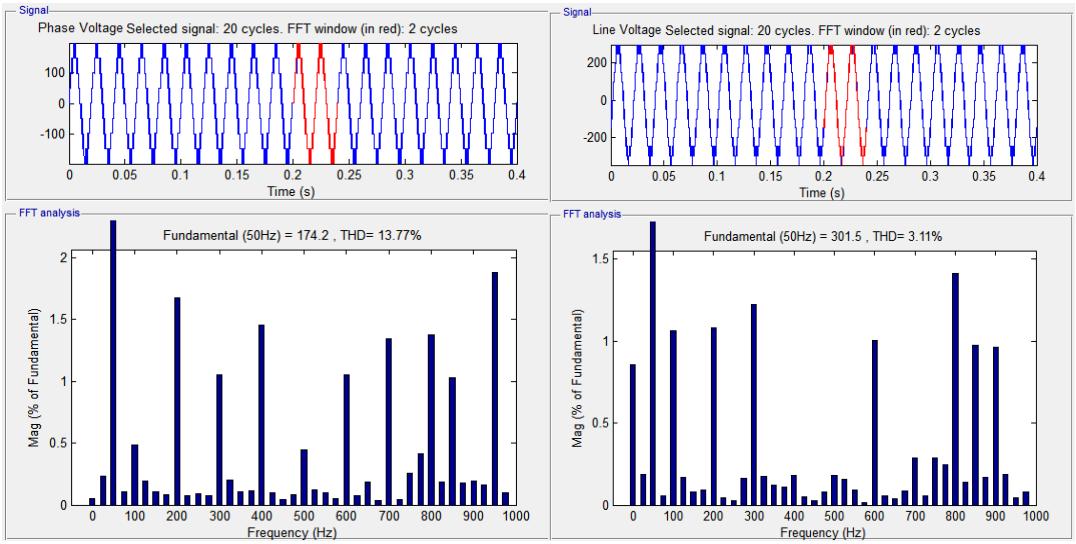
يظهر الشكل(8) مخططات السرعة والعزم على خرج المحرك وجهد الطور وجهد الخط وتيارات الأطوار الثلاثة المطبقة على دخل المحرك والناتجة عن محاكاة القالبة ذات التسعة مستويات بالإضافة إلى تحليل FFT لهذه القالبة.



الشكل (8-أ) مخطط السرعة والعزم.

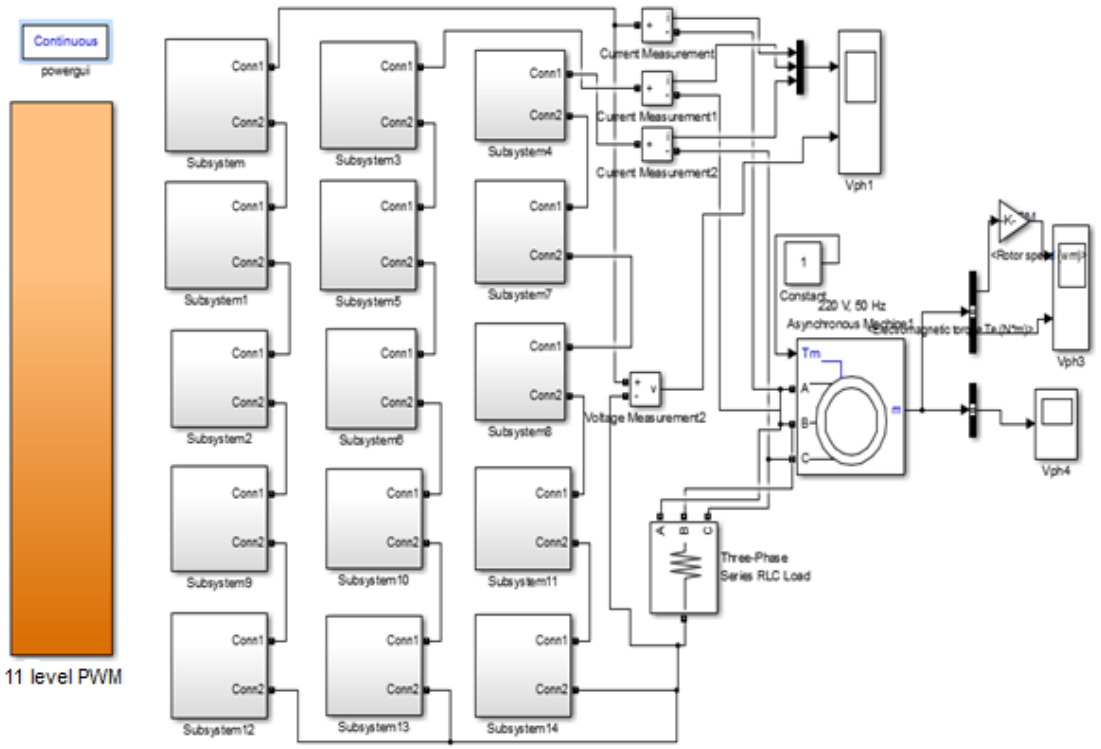


الشكل (8–ب) جهد الطور وجهد الخط وتيارات الأطوار الثلاثة.

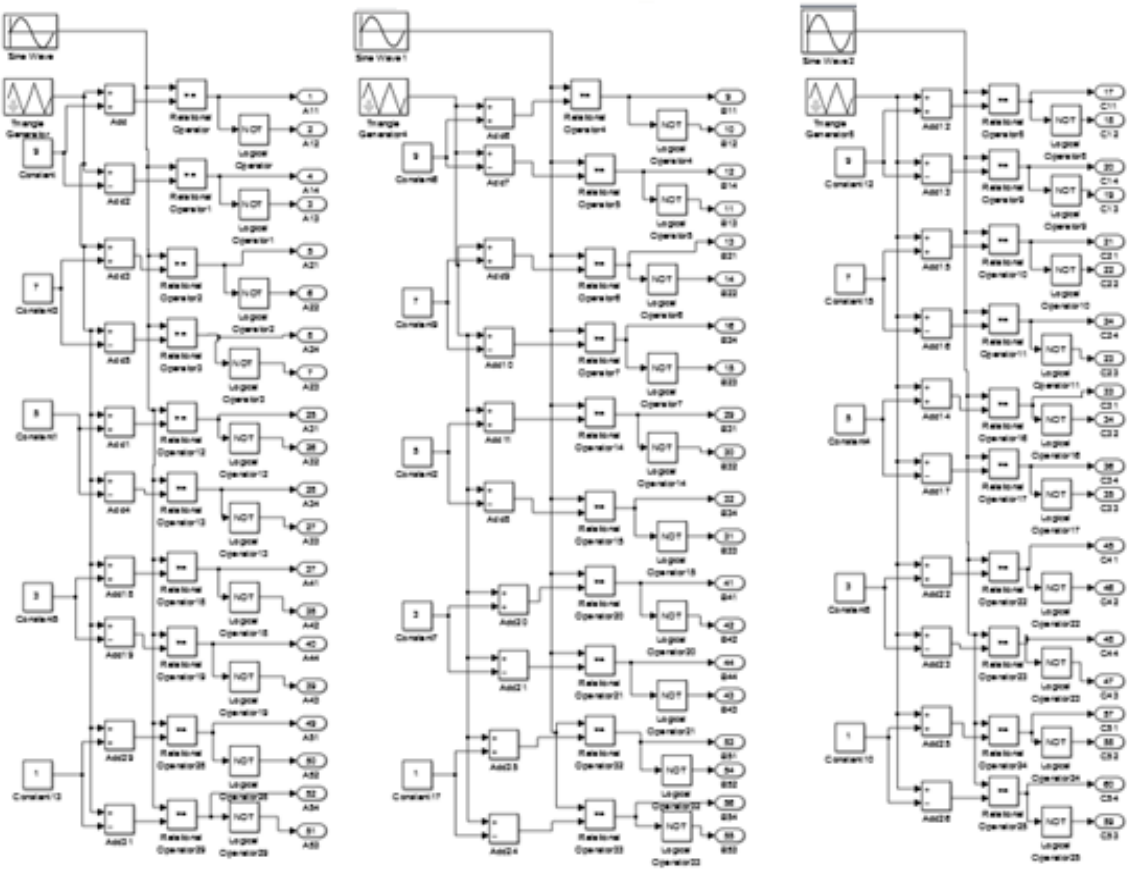


الشكل (8–ج) تحليل FFT و THD للقالبة ذات التسعة مستويات من أجل جهد الطور وجهد الخط.

يبين الشكل(9–أ) قالبة ذات أحد عشر مستوى. والشكل (9–ب) دارة توليد النبضات لهذه القالبة حيث تم ضمن النظام الفرعي لدارة توليد النبضات من مراعاة إضافة مراحل بما يتناسب مع توليد نبضات القدح للعناصر المكونة لهذه القالبة.

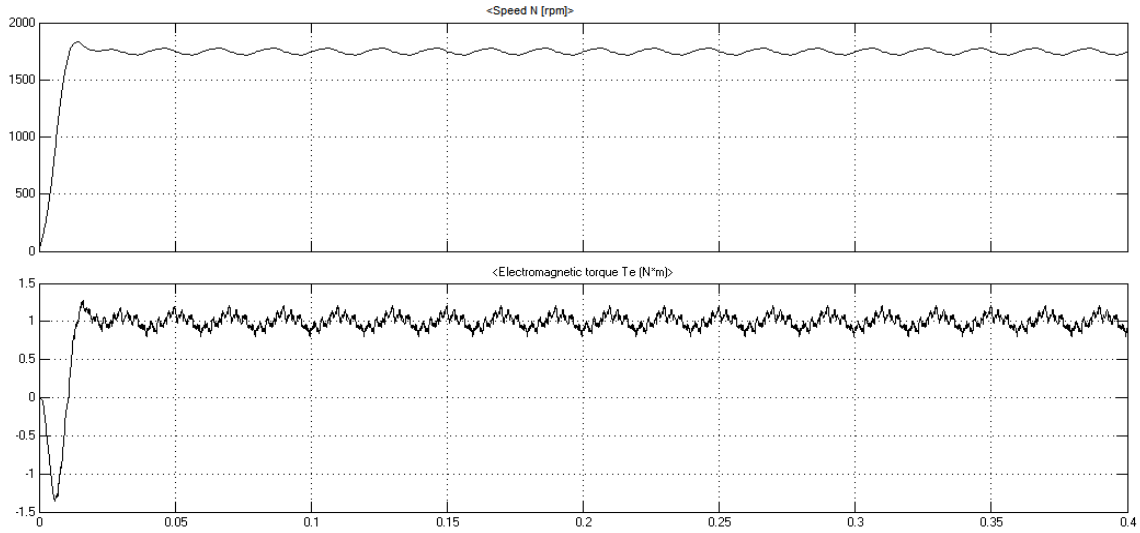


الشكل(9–أ) قالبة ذات أحد عشر مستوى.

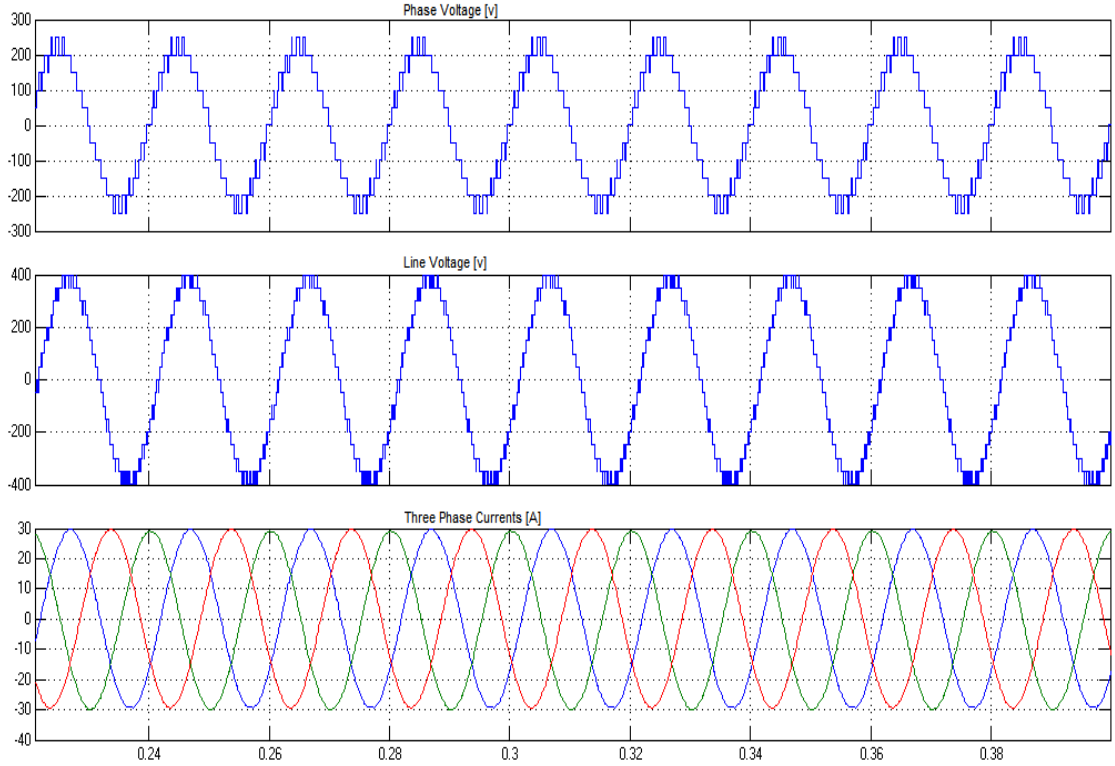


الشكل(9–ب) درة توليد النبضات للقالبة ذات أحد عشر مستوى.

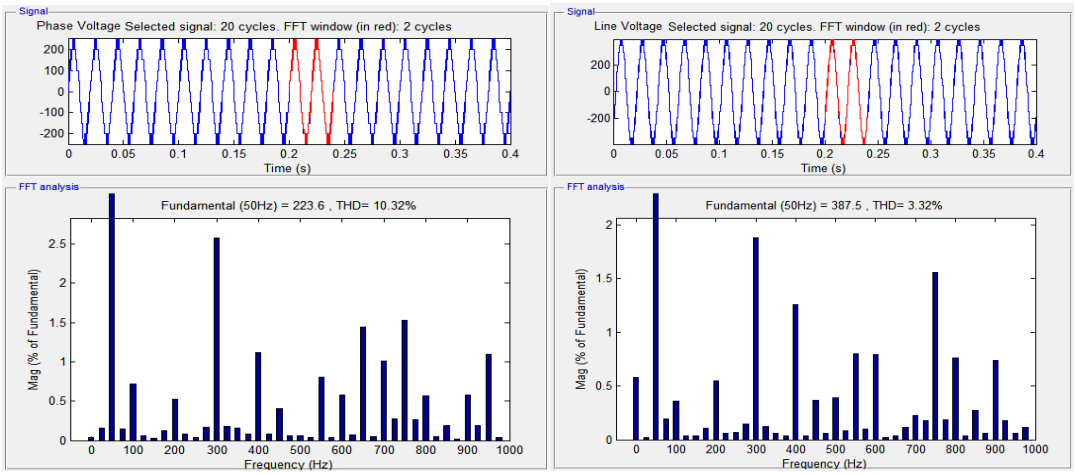
يظهر الشكل(10) نتائج محاكاة القالبة ذات الأحد عشر مستوى.



الشكل (10–أ) مخطط السرعة والعزم.

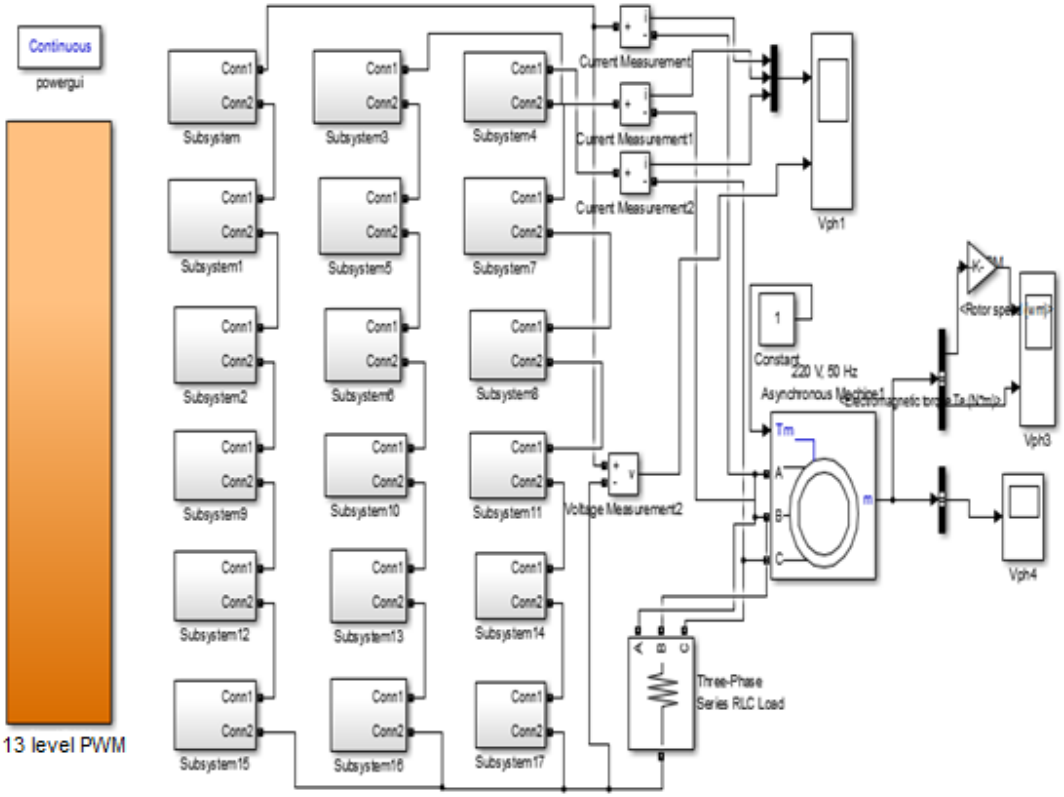


الشكل (10–ب) جهد الطور وجهد الخط وتيارات الأطوار الثلاثة.



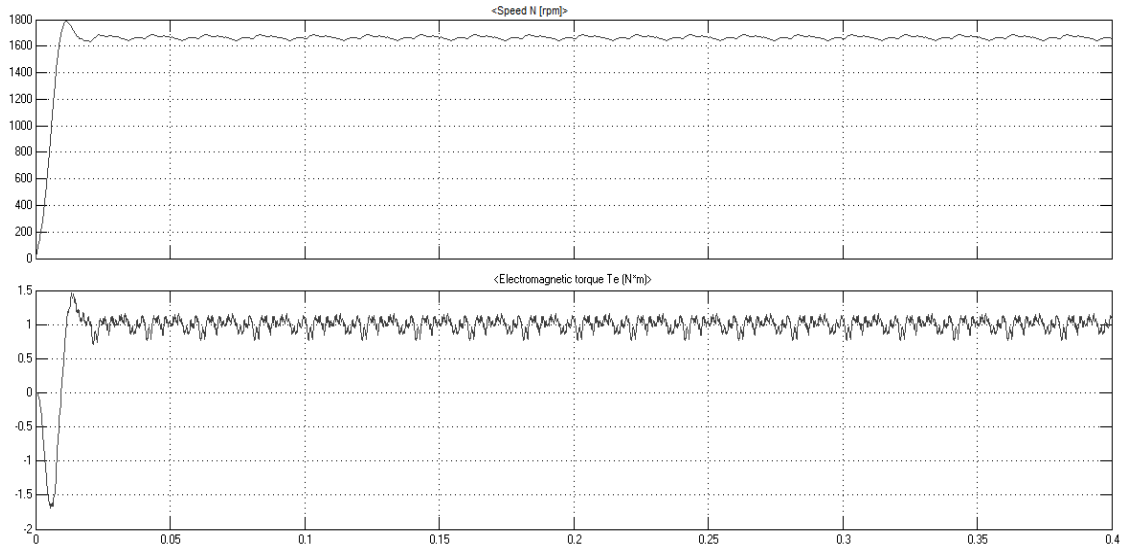
الشكل (10-ج) تحليل FFT و THD للقالبة ذات أحد عشر مستوى من أجل جهد الطور وجهد الخط.

يبين الشكل(11) قالبة ذات ثلاثة عشر مستوى ودارة توليد النبضات لهذه القالبة.

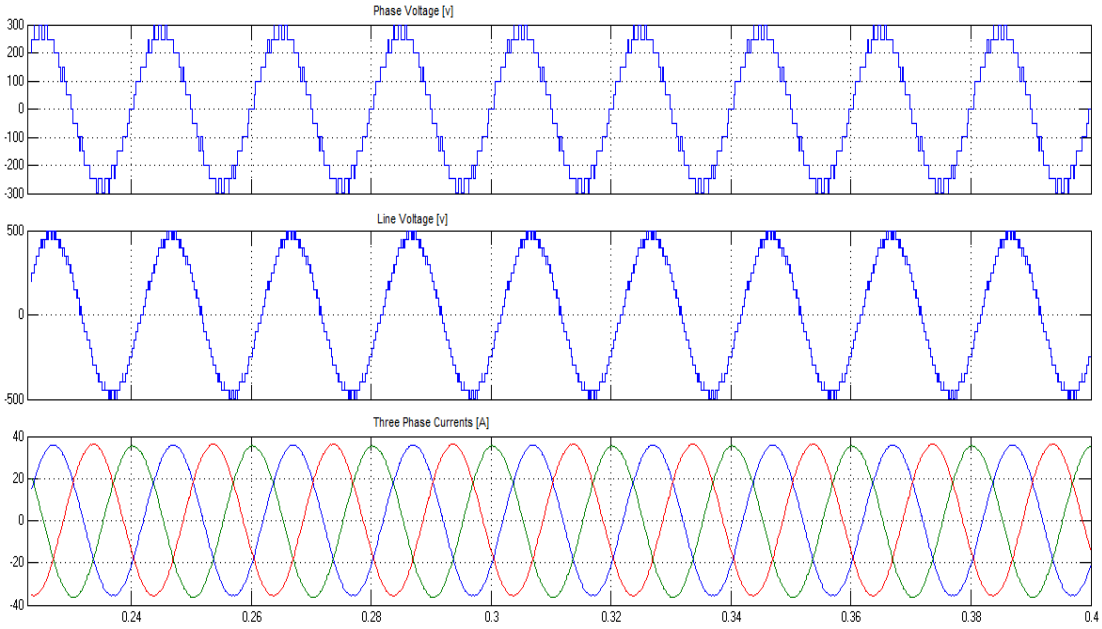


الشكل(11) قالبة ذات ثلاثة عشر مستوى ودارة توليد النبضات لهذه القالبة.

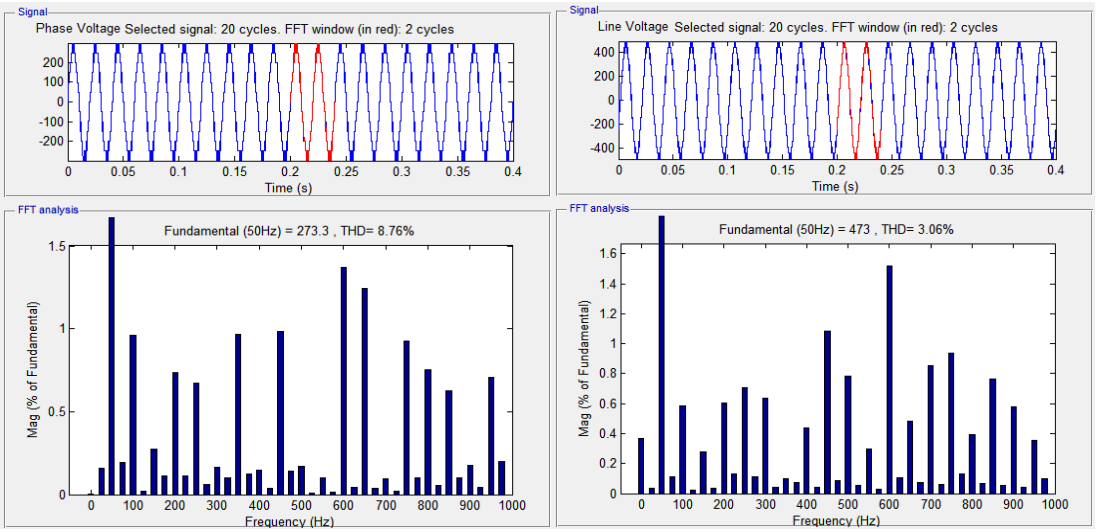
يظهر الشكل(12) نتائج محاكاة القالبة ذات ثلاثة عشر مستوى.



الشكل (12–أ) مخطط السرعة والعزم.



الشكل (12–ب) جهد الطور وجهد الخط وتيارات الأطوار الثلاثة.



الشكل (12-ج) تحليل FFT و THD للقالبة ذات ثلاثة عشر مستوى من أجل جهد الطور وجهد الخط.

نلاحظ أن القالبة متعدد المستويات المتعاقبة ذات كفاءة عالية، حيث أن زيادة عدد مستويات القالبة يعطي شكلاً موجياً أفضل للجهد وانخفاضاً في نسبة التشوه التوافقي الكلي في جهد الخرج كما هو موضح في الجدول [1] سواء لجهد الخط أم لجهد الطور. الجانب الأكثر أهمية الذي يميز جسر H المتعاقب عن القالبات الأخرى متعددة المستويات هو القدرة على استخدام قيم مختلفة للجهد المستمر على خلايا الجسر H الفردية، وانخفاض ضغوط التبديل على الأجهزة بسبب تخفيض الجهد بشكل خطوات بين المستويات.

الجدول [1]: قيم THD % عند مستويات مختلفة للقالبة.

رقم المستوى للقالبة	قيمة THD لجهد الخط %	قيمة THD لجهد الطور %
7	5.12	18.52
9	3.11	13.77
11	3.32	10.32
13	3.06	8.76

الاستنتاجات والتوصيات:

إن الوظيفة الأساسية للقالبة متعددة المستويات هي توليف أقرب جهد جيبي من عدة مستويات من الجهد المستمر. حيث تسمح البنية التسلسلية بتشكيل دارة قابلة للتحجيم والتخطيط والتغليف لأن كل جسر له نفس التركيب. ينخفض التشوه التوافقي لموجة الخرج ليقترب من الصفر مع زيادة عدد المستويات. تم في هذه الورقة دراسة عدة قالبات متعددة المستويات لقيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور ذي دائر مقصور حيث أظهرت النتائج خصائص السرعة والعزم وتيارات الثابت لهذا المحرك. تم استخدام مبدأ إزاحة المستوى لتعديل عرض النبضة الجيبية لقيادة مفاتيح القالبة، وهذه التقنية تستخدم عددًا أقل من الموجات الحاملة. تمت محاكاة هذه القالبات حيث تظهر الأشكال الموجية في الخرج كفاءتها العالية. يمكن توسيع الهيكل المقترح إلى أي عدد من المستويات من خلال التغييرات المناسبة في مخطط الدارة.

References:

1. KHOUCHA, F.; MAROUANI, K.; BENBOUZID, M.; KHELOUI, A.; MAMOUNE, A. *"A 7-Level Single DC Source Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with a Modified DTC Scheme for Induction Motor-Based Electric Vehicle Propulsion*". Vehicular Technology HAL France, 2013.
2. SUBHANI, SH. M.; KIRAN, A. *" Design, Matlab / Simulink Modeling of Novel 5-Level & 7-Level Multi-level Inverter Topologies*".ijSETR India, Vol.06,Issue.18, 2017, 3508-3513.
3. KRISHNAN, G. V.; RAJKUMAR, M. V.; HEMALATHA, C. " *Modeling and Simulation of 13-level Cascaded Hybrid Multilevel Inverter with less number of Switches".* IJISSET India, Vol.02,Issuse.11, 2016.
4. SARKAR, I.; FERNANDES, B. G. "*A nine-level hybrid symmetric cascaded multilevel converter for induction motor drive".* Indian Academy of Sciences, Vol.42, No.8, 2017, pp. 1389-1400.
5. ZULKEFLE, A. A.; RAHMAN, A. I. A.; ZAINON, M. "*Modeling and Simulation of Nine-Level Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter".* ijeecs Malaysia, Vol.11, i2, 2018, pp. 696-703.
6. VASQUES, L. C. G. "*Control of a Variable Speed Drive with a Multilevel Inverter for subsea applications".* NTNU Norweg, 2010, pp.29-54.
7. BEHERA, M.; PANDA, A. K. " *Cascaded Multilevel Inverter Based Transformerless Traction Drive for Railway Applications* ".ROURKELA Odisha, 2012.
8. KUMAR, M.; CHELLAMUTHU, C.; PRABHAKARAN, K. K. " *Simulation and Implementation of Diode Clamped Multilevel Inverter Fed Induction Motor* ". Research India Publications, 2014, pp. 11433-11452.
9. ZHANG, C.; GAO, Z. "*A Cascaded Multilevel Inverter Using Only One Battery with High-Frequency Link and Low-Rating-Voltage MOSFETs for Motor Drives in Electric Vehicles* ". energies China, 2018.
10. PRADHAN, A. K.; KAR, S. K.; MOHANTY, M. K.; BEHRA, N. "*Design and simulation of cascaded and hybrid multilevel inverter with reduced number of semiconductor switches* ". International Journal of Ambient Energy, 2019.
11. SAKTHIVEL, C.; PARIMALASUNDRAM, E.; KUMARESAN, V.; SAMJASPER, P.; MADHESWARI, J. "*Seven Level Cascaded Multilevel Inverter for Power Quality Improvement in Induction Motor* ". GRD Journals Andahra Pradesh India, 2018.