

Performance Evaluation of IM Fed by Developed Hybrid Multilevel Inverter (DHMLI)

Dr. Carlo Y Makdisie*

Dr. Ghassan A Hayek**

Jafar E Qureiosh***

(Received 3 / 2 / 2024. Accepted 21 / 5 / 2024)

□ ABSTRACT □

This paper presents the performance of a three-phase induction motor fed by a multilevel hybrid Inverter. This motor operates in a driving system of a port crane for small transporting containers /Electric elevator. This DHMLI provides the generation of several levels with different values to feed huge, high-power/medium loads with different medium or high voltages depending on the load to be fed. This DHMLI can be supplied from batteries, solar cells, or any other direct current source. This proposed DHMLI provides nearly sinusoidal voltages to feed the motor with a very low distortion coefficient ($THD \leq 4\%$), while significantly reducing the number of switches and other components. In addition, the hybrid multilevel inverter can generate high value output voltage at fixed frequency with lower switching losses, due to the high switching frequency and the proposed switch modulation (PDPWM) technique considering using (IGBT) as switches in internal design of the HMLI. Therefore, high performance and efficiency are obtained. High torque and flux control of the driven induction motor, which allows the stable operation of the crane / elevator and increase productivity when feeding the motor of the port crane from the proposed DHMLI. Achieving what are mentioned above will allow to change the value of the output voltage according to the varying of motor load and adjusting the motor speed within a specific and required range. This research paper will demonstrate the high performance, stable speed, and smooth control of the crane, since the motor is operated in a variable operating system mode within which the motor is exposed to multiple and constantly changing (starting, braking, and stopping). Performance evaluation will be achieved through the simulation of the components of the drive system independently and also for the entire system, then extracting the required curves which are analyzed in the Matlab/Simulink environment to confirm high performance characteristics and robust, considering the induction motor is the most widely used in industrial application.

Keywords: Modified hybrid multilevel inverter (MHMLI), Total harmonics distortion (THD%), Performance evaluation(PE), Phase Disposition Modulation technology(PD), Induction motor(IM).

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor, department of electric power engineering, faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. makdisiecarlo@yahoo.com

** Professor, department of electric power engineering, faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. Prof.g.hayek@gmail.com

***Postgraduate student (master), department of electric power engineering, faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, email: jafar.qureiosh@tishreen.edu.sy

تقييم أداء قيادة محرك تحريضي مغذى من قالبية متعددة المستويات هجينة ذات بنية مطوّرة

د. كارلو يوسف مقدسي *

د. غسان علي حايك **

جعفر عماد قريعوش ***

(تاريخ الإيداع 3 / 2 / 2024. قُبِلَ للنشر في 21 / 5 / 2024)

□ ملخص □

تعرض هذه الورقة الأداء العالي لمحرك تحريضي ثلاثي الطور مغذى عن طريق قالبية هجينة متعددة المستويات. يعمل هذا المحرك في نظام قيادة رافعة مرفئية لنقل الحاويات الصغيرة وكذلك لقيادة محركات المصاعد التي تعمل في نظامي العمل (S_6) و (S_3) على التوالي، حيث تؤمن القالبية توليد عدة مستويات بقيم مختلفة لتغذية الأحمال الضخمة ذات الاستطاعة العالية / المتوسطة بجهود مختلفة متوسطة أو عالية تبعاً للحمل المراد تغذيته. يمكن لهذه القالبية أن تتلقى تغذيتها من بطاريات أو خلايا شمسية أو أي مصدر آخر للتيار المستمر. توفر القالبية المقترحة تغذية المحرك المذكور بجهود جيبية تقريباً بمعامل تشويبه منخفض جداً ($THD \leq 4\%$)، مع تخفيض ملحوظ لعدد المفاتيح والمكونات الأخرى. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للقالبية المتعددة المستويات الهجينة توليد جهد خرج ذي قيمة عالية بتردد ثابت مع ضياعات تبديل أقل، نظراً لتردد التبديل العالي وتقنية التعديل المقترحة (PDPWM) المستخدمان مع المفاتيح المستخدمة (IGBT) في القالبية (HMLI). لذلك سيعمل المحرك بأداء وكفاءة عاليين، مع إمكانية التحكم بعزم الدوران والتدفق للمحرك التحريضي المقاد بواسطة القالبية، مما يسمح بالعمل المستقر للروافع / المصاعد وزيادة إنتاجيتها عند تغذية محركات هذه الروافع عن طريق القالبية المتعددة المستويات. يتم تحقيق هذا الأمر الذي يسمح بتغيير قيمة جهد الخرج عند تغيير حمولة المحرك وضبط سرعة المحرك ضمن مجال محدد ومطلوب. ستبين هذه الورقة البحثية الأداء العالي والسرعة المستقرة والتحكم السلس بمحرك الرافعة / المصعد باعتباره نظام عمل متغير، يتعرض فيه المحرك ل (إقلاعات، كبح، وتوقفات) متعددة ومتغيرة باستمرار، وتقييم الأداء سيكون من خلال نمذجة مكونات نظام القيادة بشكل مستقل، ومن ثم إجراء النمذجة للنظام بأكمله واستخراج المنحنيات المطلوبة وتحليلها في بيئة (Matlab/Simulink) لتأكيد خصائص الأداء العالية والمتانة، باعتبار المحرك التحريضي هو الأكثر استخداماً في التطبيقات الصناعية.

الكلمات المفتاحية: قالبية متعددة المستويات هجينة معدلة (MHMLI) - معامل التشوه التوافقي الكلي (% THD) - تقييم الأداء (PE) - تقنية تعديل التوضع الطوري (PD) - رافعة مرفأ (HC) - محرك تحريضي (IM).



حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

*أستاذ- قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية-سورية.

Contact Number: +963999487626 makdisiecarlo@yahoo.com

** أستاذ- قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية-سورية

Contact Number: +963944513900 .Prof.g.hayek@gmail.com

**طالب دراسات عليا(ماجستير)-قسم هندسة الطاقة الكهربائية-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

موبايل: 963996422097 + اميل jafar.gureiosh@tishreen.edu.sy

مقدمة:

نقدم في هذه الورقة البحثية نظام قيادة لمحرك رافعة مغذى عن طريق قالبية متعددة المستويات هجينة بحيث يتم إنقاص عدد المفاتيح والمكونات الأخرى بهدف تبسيط دائرة التحكم وتخفيض الضياعات الأمر الذي يسمح بتغيير قيمة جهد الخرج عند تغيير حمولة المحرك وضبط سرعة المحرك ضمن مجال محدد ومطلوب. إن تقنية التعديل (PD) تعتبر من أهم استراتيجيات أو تقنيات التعديل المستخدمة لتخفيض قيمة معامل التشوه التوافقي (THD%).

لذلك يتم استخدام هذه التقنية مع قالبية متعددة المستويات هجينة تولد عدة مستويات من نفس البنية (دون أي تغيير في مكونات البنية)، بهدف تحقيق المتطلبات المرتبطة بتخفيض عزم الإقلاع العالي والمجال الواسع لتنظيم السرعة. يجب أن تحقق بارامترات التغذية الناتجة على خرج هذه القالبية متطلبات جودة التغذية العالية للمحرك التحريضي، أي بمعنى أن يكون معامل التشوه التوافقي $THD \leq 4\%$.

قدم البحث المعنون [1] ملخصاً موجزاً لطوبولوجيات القالبات المتعددة المستويات واستراتيجيات التحكم الخاصة بها. كما تمت مناقشة التطبيقات المختلفة للقالبات المتعددة المستويات، يمكن إرجاع براءة الاختراع المبكرة للقالبية المتعاقبة المتعدد المستويات إلى عام 1975. ومع ذلك، فإن المنتجات التجارية التي تستخدم هذه الطوبولوجيا لم تكن متوفرة حتى منتصف التسعينيات. لقد بينت الدراسات السابقة استراتيجيات تعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation-PWM) لضبط ترددات الموجة الحاملة وضمان تبديل القالبية بشكل ثابت ضمن كل دور رئيسي [2]. يمكن العثور على مقترحات موسعة لطوبولوجيا MLI وتقنيات التحكم الشائعة فيها [1]، [3]. يتم استخدام MLIs بشكل متزايد في التطبيقات ذات الاستطاعات المتوسطة والعالية نظراً لفوائدها العديدة، المتمثلة في تقليل ضياعات القدرة في المفاتيح، وانخفاض المحتوى التوافقي، وانخفاض التداخل الكهرومغناطيسي [3]، [4].

يقدم [5] طوبولوجيا هجينة لقالبية متعددة المستويات ذات حلقة للتيار المستمر (MLDCLI) تستخدم تقنيات تعديل (PWM) وتتطلب عدداً أقل من المفاتيح والديودات ومصادر الجهد المستمر. يُظهر (MLDCLI) المقترح أداءً فائقاً من حيث (THD%) مقارنة بطوبولوجيا القالبية الجسرية المتعاقبة المتعددة المستويات (CHBMLI).

أما في [6] فقد تم اقتراح خوارزمية جديدة بالاعتماد على المتغيرات الثنائية والمعاملات المنطقية لإنتاج سلسلة النبضات المطلوبة للتحكم بعمل مفاتيح القالبات متعددة المستويات (التمائلية / غير التماثلية) ذات عدد المفاتيح المخفّض (RSMLI) باستخدام تقنيات (PWM) متعددة الموجات الحاملة. وقد قام الباحثون بوضع المعادلة المنطقية الموافقة لعمل كل مفتاح لمختلف (RSMLIs) من خلال تطبيق الخوارزمية المقترحة.

قُدمت في [7] مراجعة عامة لطوبولوجيات القالبات المتعددة المستويات التقليدية بدايةً، وتم تحديد عيوب هذه القالبات فيما يتعلق بزيادة عدد المكونات المشكّلة لطوبولوجيا القالبية مع زيادة عدد مستويات خرج القالبية. ثم تم التركيز على القالبات المتعددة المستويات ذات عدد المكونات المخفّض (RDCMLI)، والقيام بإجراء مقارنة بين عدد كبير من القالبات من النوع (RDC MLI) موجودة ضمن أكثر من (120) مرجع منشور حتى عام 2022 ضمن مجال القالبات من نوع (RDC)، وذلك من حيث عدد مستويات الخرج وعدد المفاتيح ومنابع الجهد (DC) المطلوبة.

تبين من دراسات المقارنة، أن الطوبولوجيا المقترحة قادرة على توليد عدد كبير من المستويات مع عدد أقل من المفاتيح، وتقليل ضياعات القدرة وتقليل جهد الحجز العكسي للمفاتيح وبالتالي تحسين كفاءة القالبية، يمكن تغذية الدارة

المقترحة من مصادر الطاقات المتجددة (pv-system) لتغذية أحمال ذات استطاعة منخفضة ومتوسطة باستخدام دائرة مقطع رافع (DC-DC Boost converter).

إن إجراء المحاكاة لطوبولوجيا قالبة جسرية متعددة المستويات (CHB-MLI) أحادية الطور مع عدد أقل من المفاتيح ومع أنظمة تحكم مختلفة بالاعتماد على تقنيات تعديل عرض النبضة الجيبي (SPWM) قام به Kavali وآخرون في [8] وتم تقديم مقارنة تفصيلية لأنظمة التحكم المختلفة، ولوحظ أنه من بين جميع مخططات التحكم، تكون قيمة %THD أدنى ما يمكن عند استخدام تقنية (SPWM-PD).

تم في [9] استخدام تقنية التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) لمحرك تحريضي بالاعتماد على تقنية تعديل الفضاء الشعاعي (SVM). حيث يتم تغذية (IM) من القالبة الكهروضوئية متعددة المستويات (PV-MLI). يتكون النظام من جزأين رئيسيين هما، مزود الطاقة (PVDC) والقالبة المتعددة المستويات (MLI). يتم استخدام (PVDC) لتوليد مصادر معزولة للتيار المستمر بنسب معينة مناسبة لـ (MLI) المستخدمة.

لقد حققت تقنية (DTC) مع المحرك IM الذي تم استخدامه، قيم السرعة المرجعية وعزم الدوران المطلوبين بشكل دقيق. وأظهرت نتائج المحاكاة المقدمة انخفاض ضياعات التبديل لـ MLI الهجينة وبالتالي تحسين جودة الأداء العام للنظام.

أما [10] فقد قدّم نظام كهربائي لتغذية محرك تحريضي مقاد، بالاعتماد على الخلايا الكهروضوئية والمدخرات المستقلة مما أعطى استقلالية التغذية للنظام. وتم إجراء المقارنة بين حالتين إحداهما يتم فيها استخدام قالبة متعددة المستويات جسرية المتعاقبة (CHB) والأخرى تستخدم فيها قالبة متعددة المستويات ذات ديودات التثبيث (NPC) مع استخدام تقنيات تعديل (SPWM)، ونظراً لأن مستوى الطاقة يظل كما هو بالنسبة للطوبولوجيات المذكورة أعلاه، فإن التركيز كان بشكل رئيسي على المحتوى التوافقي (%THD). تعطي نتائج المحاكاة في بيئة (Matlab/Simulink) جودة أفضل لتيار الجزء الثابت من حيث التوافقيات المنخفضة، وبالتالي تقليل التأثيرات الضارة على العمر الفني للمحرك ومثانته، وتقليل عدد المفاتيح وإنقاص ضياعات التبديل.

قام الباحثون في [11] بالتحكم بسرعة المحرك التحريضي ثلاثي الطور باستخدام قالبة تعاقبية معدلة خماسية المستويات، ثم عمدوا لمقارنة معامل التشوه التوافقي الكلي (%THD) للقالبة المقترحة مع القالبة التقليدية ثلاثية المستويات. تم تطبيق نظام الحلقة المفتوحة للتحكم بالسرعة باستخدام طريقة (V/f)، وبينت نتائج المحاكاة أن القالبة المتعاقبة المعدلة ذات المستويات الخمسة تتحكم بشكل فعال في سرعة المحرك وتعزز أداء المحرك من خلال تقليل التشوه التوافقي الكلي (%THD) إجمالياً في جهد الطور وجهد الخط، فضلاً عن مرونة التحكم في سرعة المحرك التحريضي وتحقيق استجابة للوصول للحالة المستقرة خلال 3 ثواني في حالة القالبة ثلاثية المستويات وخلال 25 ثانية في حالة القالبة المعدلة خماسية المستويات.

يقدم البحث [12] وحدة تحكم جديدة تعتمد على استراتيجية التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) حيث تم تصميم وحدة التحكم هذه ليتم تطبيقها في التحكم بالمحركات التحريضية (IM) التي يتم تغذيتها باستخدام قالبة منبع الجهد (VSI) ثلاثية المستويات، مما أكسب النظام العديد من المزايا مقارنة بقالبة (VSI) القياسية ذات المستويين، كالعدد الأكبر من المستويات في أشكال موجة الجهد الخرج، وانخفاض (dv/dt)، وتحقيق تشوه توافقي أقل في أشكال موجة الجهد والتيار، وترددات تبديل أقل.

يتناول المرجع [13] مبدأ التشغيل ومحاكاة عملية التحكم ذات الحلقة المغلقة لمحرك تحريضي ثلاثي الطور (IM) مغذى من قالبية متعدد المستويات ذات ديودات التثبيث (DCMLI) بخمسة مستويات مع استخدام مرشح (LC) عبر حلقة جهد مستمر وسيطة باستخدام تقنية التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC). يتم استخدام تقنية التحكم (PWM) متعددة الموجات لتوليد نبضات البوابة في (DCMLI) لتوفير جهد خرج جيبي عالي الجودة مع انخفاض التوافقيات وللتحكم في السرعة وعزم الدوران. بينت نتيجة المحاكاة للدائرة المقترحة استجابة ديناميكية سريعة، وتشويه أقل بكثير في التدفق وعزم الدوران. أي أن الدائرة المقترحة نجحت في تنظيم سرعة المحرك مع تحسين أداء المحرك، وتقليل التشوه التوافقي الكلي (%THD) بحيث يمكن تطبيق هذا النظام المقترح على السيارات الكهربائية (EVs) والمركبات الكهربائية الهجينة (HEVs). في البحثين [15] [14]، تمت الإشارة إلى البارامترات الرئيسية للتحكم بعمل المحرك التحريضي مع اقتراح خوارزمية للتحكم التكيفي في السرعة والتدفق للمحركات التحريضية باستخدام مقاومة دوارة غير معلومة متغيرة بمرور الزمن وعزم دوران الحمل والتحقق من صحتها من خلال النتائج التجريبية. يوفر المعوض غير الخطي المقدم مدخلات جهد على أساس سرعة العضو الدوار وقياسات تيار الجزء الثابت، ويولد تقديرات لكل من البارامترات غير المعروفة ومتغيرات الحالة غير القابلة للقياس (تدفق العضو الدوار ومشتقات تيار وجهد الجزء الثابت) التي تتقارب مع القيم الحقيقية المقابلة. الطريقة المقترحة حققت أداءً تتبع جيد جداً ضمن نطاق واسع من تشغيل المحرك التحريضي مع تباين مباشر لمقاومة الدوار، يصل إلى (87%)، وأثبتت أن التحكم التكيفي المقترح يرفع من كفاءة المحرك حيث أنه يفصل بين السرعة وتتبع التدفق، بينما لا يفعل ذلك التحكم الحظلي القياسي الموجه، مع بساطة وقابلية تنفيذ بسهولة. في دراسة حديثة في العام 2023 [16]، تم فيها اقتراح بنية هجينة مطورة لقالبية متعددة المستويات ثلاثية الطور (DHMLI) تغذي أحمالاً مختلفة (RL-R). تم فيها التوصل لقيم معامل تشوه منخفضة أقل من 2% لجهد الخرج وأقل من 1% لتيار الخرج المغذي للحمل، الأمر الذي يستدعي اهتماماً كبيراً لهذا النوع من القالبات الهجينة لتغذية المحركات التحريضية. ضمن دراستنا في هذه الورقة البحثية المقدمة سيتم اقتراح استخدام التصميم المطور لنظام قيادة (قالبية متعددة المستويات هجينة- محرك تحريضي) مع محتوى توافقي قليل بحيث يتم إنقاص الضياعات وزيادة المردود وتخفيض الكلفة الناجمة عن إنقاص عدد المفاتيح وتبسيط دائرة التحكم. وسنقدم المنحنيات المميزة لهذا المحرك المقاد بواسطة القالبية المتعددة المستويات الهجينة المقترحة (منحني السرعة n - منحني العزم الكهرومغناطيسي T_{em} - منحني تيار الثابت I_s - منحني التدفق المغناطيسي ϕ_s). إن جميع المنحنيات الناتجة عن إجراء المحاكاة في بيئة MATLAB/SIMULINK سيتم تحليلها لتقييم الأداء العالي لنظام قيادة للمحرك المذكور.

أهمية البحث وأهدافه:

يمكن تلخيص المساهمة والتطوير في هذا البحث بالنقاط التالية:

- يتم تقديم بنية هجينة ثلاثية الطور مطورة قادرة على توليد مستويات متعددة من نفس الطوبولوجيا (البنية)، حيث يمكن للبنية المطورة المقترحة تحقيق البارامترات المناسبة للجهد والتيار وتأمين جودة تغذية عالية [16].
- تحسين جودة الطاقة الكهربائية المغذية للأحمال خلال العمل المستقر وخلال حدوث الاضطرابات، أي تأمين تغذية جيبيية بمعامل تشوه توافقي (%THD_≤4%).

- تأكيد فعالية وأفضلية تقنية التعديل (PDPWM) مع هذه الطوبولوجيا وتخفيض السخونة الزائدة والضياعات [13] [16] [8].
- تحقيق نظام تغذية داعم للشبكة خلال أوقات النهار منظومة شمسية تمنع الانقطاعات والأعطال الناجمة في الشبكة العامة [10] [9].
- تحقيق الأداء العالي للمحرك المقاد بواسطة القالب الهجينة من حيث استقرار السرعة وسرعة الاستجابة.

طرائق البحث ومواده:

تمت نمذجة المبدلة المطورة المقترحة الثلاثية الطور الهجينة المتعددة المستويات للحصول على عدد مستويات مختلف من نفس البنية دون أي تعديل عليها (7,9,11) مع ربط مرشح خرج غير فعال (RC) بالنسبة للبنية الأحادية الطور، بينما استخدم مرشح غير فعال (LC) مع البنية الثلاثية الطور بهدف الحفاظ على معامل التشوه الهرموني الكلي أصغر ما يمكن ($THD \leq 3\%$) مع استخدام تقنية التعديل (PDPWM) وتقييم أداء القالب عند تغذية محرك رافعة تحريضي من خلال تحليل المنحنيات الأداء المختلفة الكهرومغناطيسية والكهروميكانيكية الموافقة لعمل المحرك باستخدام برنامج (Matlab/Simulink 2016) وتقييم أدائه عند تغيير الحمولة على محوره.

1 - منهجية البحث

تم الاعتماد على المنهجين التجريبي والوصفي، حيث تمت نمذجة موديل القالب الهجينة الثلاثية الطور مع مرشح LC لتغذية محرك تحريضي مقاد- ثم تمت نمذجة نظام القيادة (قالب- محرك رافعة IM) .

تم تنسيق هذه الورقة البحثية بالشكل التالي:

يقدم القسم الأول مراجعة للبنى التقليدية للقالبات المتعددة المستويات MLIS. أما في القسم الثاني فيتم اقتراح البنية الهجينة الأحادية الطور وتوضيح برنامج عمل المفاتيح لتوليد 11 مستوى، مع تبيان أفضلية تقنية التعديل (PDPWM). بينما القسم الثالث فيكتسب أهميته من خلال تقديم البنية المقترحة المطورة للقالبات المتعددة المستويات الثلاثية الطور (MHMLI) ذات (7-9-11) مستوى والمغذية لمحرك تحريضي مقاد بواسطة القالب المقترحة. في القسم الرابع نبين الموديل الرياضي للمحرك التحريضي، أما في القسم الخامس فنقدم نتائج النمذجة/ المحاكاة لنظام القيادة (قالب ثلاثية الطور- محرك IM) المشار إليه في القسم الثالث وتقييم أدائه، مع اعتبار المحرك يعمل في نظام العمل (S3&S6)، وفي الختام الاستنتاجات والتوصيات.

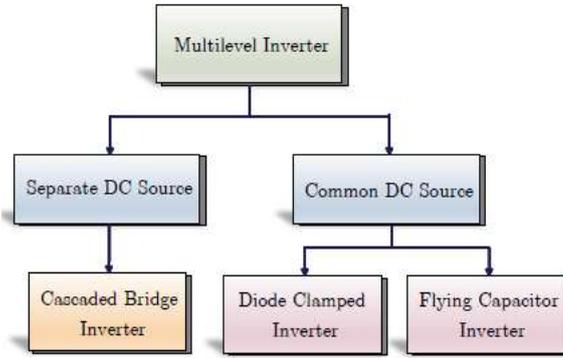
أولاً - مراجعة عامة للقالبات المتعددة المستويات التقليدية

تلعب هذه القالبات دوراً هاماً في مجالات مختلفة مثل تطبيقات القيادة الآلية للروافع والمساعد الكهربائية وتوزيع الطاقة وتطبيقات الأمثلة والتكييف [1].

يوضح الشكل (1) تصنيف بنى MLI التقليدية المستخدمة في أنظمة تحويل الطاقة. ويمكن تصنيف هذه البنى إلى ثلاثة أنواع متميزة، هي [1]:

- القالبات الجسرية المتعاقبة.
- القالبات ذات ديودات التثبيت.

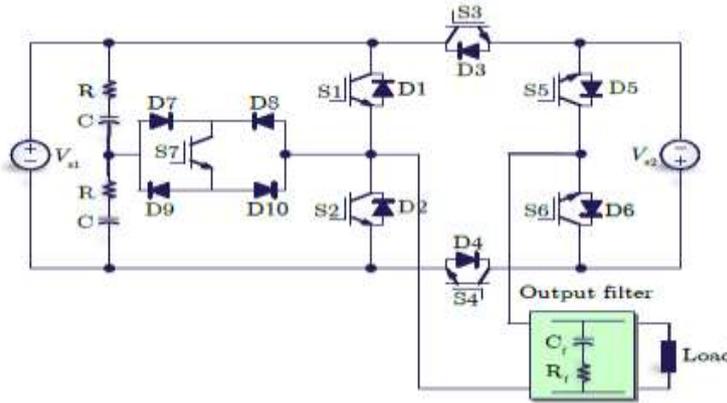
• القالبات ذات المكثفات الطائرة.



الشكل (1) : تصنيف القالبات التقليدية MLIs

ثانياً - الطوبولوجيا المعدلة المقترحة

أ. الطوبولوجيا المعدلة المقترحة مع الدراسة التحليلية وبرنامج تشغيل المفاتيح



الشكل (2): طوبولوجيا القالبة المقترحة الهجينة الأحادية الطور ذات مستويات (7-9-11) المغذاة من مصدري جهد مستمر.

يوضح الشكل (2) البنية المقترحة الموجودة أساساً كبنية أحادية الطور، والتي تتميز بعدد مفاتيح مخفض تتم تغذيتها من مصدري جهد مستمر (منابع جهد أو مدخرات أو خلايا كهروضوئية). وقد تم محاكاتها لعدة مستويات 7 و 9 و 11 باستخدام تقنية التعديل (PD-PWM). التي تعطي أفضل قيمة لمعامل التشوه التوافقي THD% عند قيم مختلفة لمعامل التعديل ($Ma = 0.82-0.9-1$). تتكون البنية المقترحة من مصدرين للجهد المستمر (V_{s1} و V_{s2})، بالإضافة إلى دائرة مقسم الجهد التي تتكون من مكثفات داخلية $C1$ و $C2$ حيث ($C1=C2=C$). يتم تشكيل دائرة مساعدة بواسطة مفتاح التحكم (IGBT-S7) وأربعة ديودات ($D7, D8, D9, D10$)، متصلة بمكونات MLI عبر ستة مفاتيح ($S1 \div S6$). عندما يكون $VDC1 = VDC2$ ، يشار إليها باسم MLI المتماثلة؛ وإلا ستكون غير متماثلة [16]. الجدول (1) يوضح المجموعات المختلفة لقيم منابع الجهد المستمر من أجل الحصول على قيم مختلفة لجهد الخرج، وذلك بناءً على تسلسل تبديل تشغيل المفاتيح وعدد المستويات المطلوب. علاوةً على ذلك، يقدم الجدول (2) مقارنة بين أعداد المكونات للطوبولوجيا المقترحة والقالبات التقليدية لأجل 11 مستوى لجهد وتيار الخرج والمقارنة بينهما ومقدار التوفير الحاصل في عدد المكونات.

الجدول (1): المجموعات المختلفة لقيم منابع الجهد المستمر تبعاً لمستويات جهد الخرج.

Algorithm	Values of DC sources	NO. of output levels	configurator
first	$V_{S1} = 2 V_{S2}$	7	asymmetrical
second	$V_{S1} = V_{S2}$	9	symmetrical
third	$V_{S1} = 2/3 V_{S2}$	11	asymmetrical

الجدول (2): مقارنة المكونات المستخدمة في طوبولوجيا القالبية (3Ph- 11- مستوى) المتماثلة التقايدية مع البنية المقترحة.

Components	NPC	FC	CHB	1-phase HMLI
Main power switches	60	60	60	18
Auxiliary switch	0	0	0	3
diodes	60	60	60	30
DC-bus capacitor	0	135	0	6

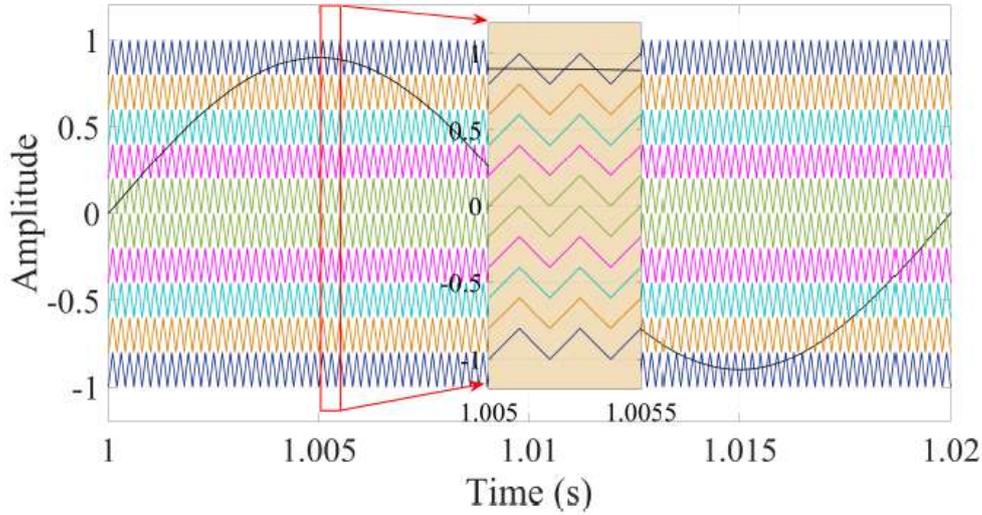
الجدول (3): برنامج عمل المفاتيح وحالات التبديل المختلفة لـ HMLI المطورة ذات 11 مستوى.

Output levels, V	"ON" state switches	Conducting diodes
1	S_4, S_7	D_6, D_7, D_{10}
2	S_1, S_4	D_6
3	S_4, S_5	D_2
4	S_4, S_5, S_7	D_7, D_{10}
5	S_1, S_4, S_7	-
0	-	-
-1	S_3, S_7	D_5, D_8, D_9
-2	S_2, S_3	D_5
-3	S_3, S_6	D_1
-4	S_3, S_6, S_7	D_8, D_9
-5	S_2, S_3, S_7	-

ب - تقنيات التعديل المستخدمة مع الطوبولوجيا المقترحة

تضمن أهمية اختيار تقنية التعديل المناسبة نظراً لدورها في تقليل التشوه التوافقي الكلي (THD%) لأشكال موجات الخرج، والتي تشمل كلاً من الجهد والتيار. لأن الهدف هو الحصول على موجة خرج بمعامل تشوه توافقي $(THD\% \leq 4\%)$.

اعتمدنا في دراستنا على تقنية (PDPWM) التي أعطت نتائج مميزة عند استخدامها سواءً مع الطوبولوجيا المقترحة الأحادية الطور والثلاثية الطور من خلال الحصول على منحنيات خرج جيبيية (جهود وتيارات) لأجل (7-9-11) مستوى وبمعامل تشوه توافقي أقل من (4%) عند تغذية حمل أومي - تحريضي (RL) [8]، [16].

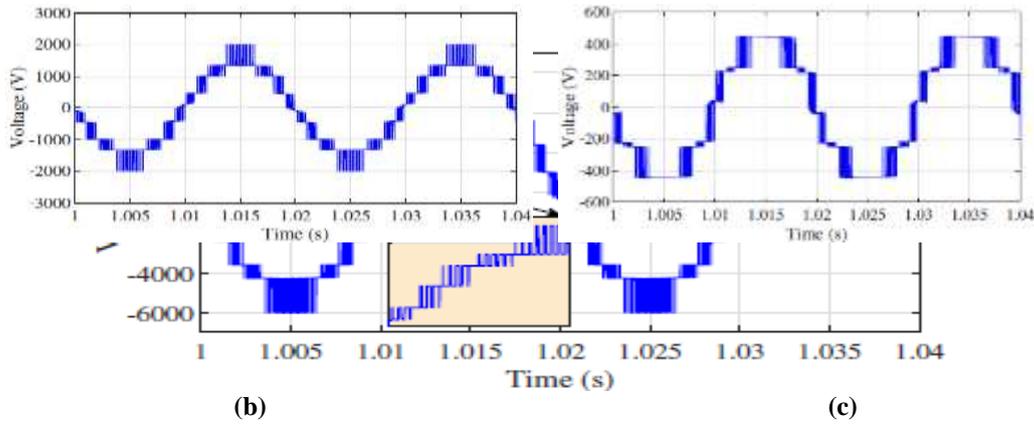


الشكل (3): المنحني الموجي لتقنية PD.

ج- نتائج تشغيل القالبة الأحادية الطور:

يعرض الشكل (4-a,b,c) نتائج المحاكاة لأشكال موجة جهد الخرج للتشغيل عند (7-9-11) مستوى على التوالي مع وجود مرشح على خرج القالبة لأجل تقنية (PD)، ولأجل قيمة معامل التعديل $M_a=0.9$. تبين الأشكال قدرة القالبة الهجينة المقترحة توليد عدد مختلف لمستويات الخرج من ذات البنية دون أي تعديل عليها [16].

(a)



(b)

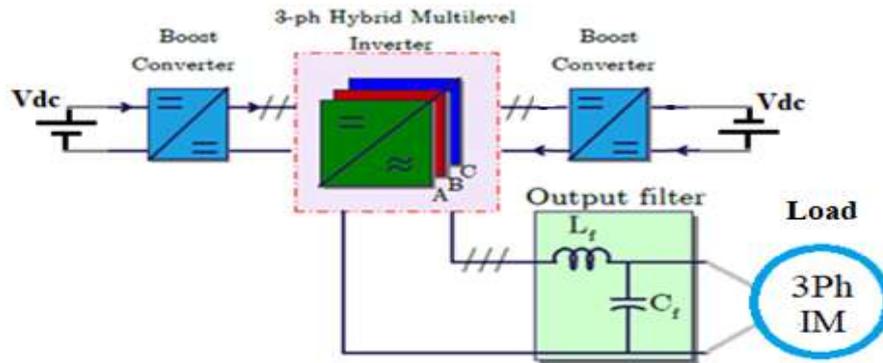
(c)

الشكل 4: المنحنيات الموجية لجهد الخرج لأجل (7-9-11) مستوى على التوالي عند استخدام تقنية التعديل (PDPWM) ومعامل تعديل ($M_a=0.9$).

ثالثاً- الطوبولوجيا المعدلة المقترحة الثلاثية الأطوار

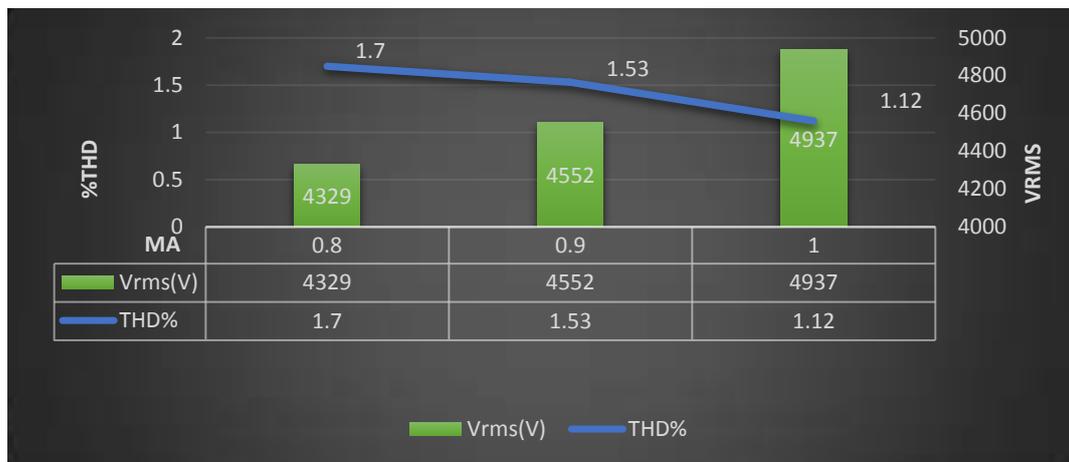
تم اقتراح بنية مطورة لقالبة هجينة ثلاثية الأطوار [16]، يوضح الشكل (5) طوبولوجيا HMLI المقترحة الثلاثية الطور. هذه البنية قادرة على توليد مستويات جهد خرج متعددة أيضاً، 7 و 9 و 11 مستوى أو أكثر عند تعديل بنيتها من جديد، بحيث تصبح مناسبة للتطبيقات ذات الاستطاعات المتوسطة والعالية والتي تتطلب مستويات جهد متوسط وعالية عند الرغبة.

بالإضافة لذلك، توفر هذه الطوبولوجيا المرنة لاسترجار الطاقة من البطاريات أو الألواح الشمسية. في الشكل (5)، يتم المحافظة على مكونات الدارة من مفاتيح وديودات لكل طور من الأطوار الثلاث (A و B و C) في HMLI ثلاثية الطور المقترحة ويكون مطابقاً للتكوين (HMLI) الأحادية الطور الموضحة في الشكل (2). يستخدم في عملية توليد نبضات التحكم بعمل المفاتيح تقنية التعديل (PD -PWM) لكل طور، حيث تتطابق مع النظام الأحادي الطور، باستثناء وجود إزاحة طورية كهربائية بمقدار 120° درجة بين الأطوار.



الشكل (5): بنية HMLI المقترحة ثلاثية الطور لتوليد مستويات جهد مختلفة (7 و 9 و 11 مستوى) والقابل للتكيف والتوصيل بالأنظمة الكهروضوئية أو المدخرات أو مصادر الجهد المستمر الهجينة.

تستخدم المرشحات غير الفعالة للتخفيف من المحتوى التوافقي في أشكال موجات الخرج بهدف إنقاص معامل التشوه التوافقي، حيث تتعلق خصائصها في المقام الأول بالسمات الحجمية - الوزنية. في طوبولوجيا (HMLI) ثلاثية الطور المقترحة، يتم استخدام مرشح LC على خرج القالبية، كما هو موضح في الشكل (5) بشكل مغاير للأنظمة الأحادية الطور التي يستخدم فيها مرشحات أبسط من نوع RC، بهدف تحقيق المزيد من تخفيض المحتوى التوافقي في موجة الخرج للقالبية، مما يضمن بقاء (THD%) منخفضاً للغاية، بحيث يكون أقل من 4%. يوضح الشكل (6) ما سبق ذكره حول تخفيض معامل التشوه التوافقي عند استخدام تقنية (PD) والمرشح (LC) على خرج القالبية الهجينة الثلاثية الطور [15] [13]، وذلك عند تغذية حمل (RL).



الشكل 6 : RMS و THD الأشكال الموجية لجهد الحمل لأجل قيم متنوعة لمعامل التعديل M_a مع استخدام تقنية التعديل PD.

رابعاً - الموديل الرياضي للمحرك التحريضي المقاد بواسطة القالبة

تعتبر المحركات التحريضية من أكثر أنواع المحركات انتشاراً واستخداماً في الصناعة بسبب مواصفات إقلاعها الجيدة وبنيتها البسيطة المتينة وتكلفتها المنخفضة بالإضافة إلى موثوقيتها. كما يمكن استخدامها في التطبيقات التي تحتاج إلى سرعات متغيرة مع المبدلات المختلفة بما فيها المبدلات الترددية، التي لا تتطلب استجابة ديناميكية سريعة [14] [12]. وقد ساعد مبدأ التحكم الشعاعي وغيره من الطرق المعروفة، في إعطاء إمكانية التحكم بالمحركات التحريضية للحصول على أداء ستاتيكي وديناميكي بنفس جودة الأداء الذي تقدمه محركات التيار المستمر من دون المسفرت (BLDC). إن النموذج الرياضي للمحرك التحريضي في نظام الإحداثيات الثنائية (d-q) والمعادلات التي تصف سلوك المحرك تعطى كما يلي [12] [11]:

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + P \Psi_{ds} \quad (1)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega \Psi_{qs} \quad (2)$$

$$0 = R_r I_{dr} + P \Psi_{dr} - \Psi_{qr} (\omega_s - P\omega_m) \quad (3)$$

$$0 = R_r I_{qr} + P \Psi_{qr} - \Psi_{dr} (\omega_s - P\omega_m) \quad (4)$$

$$\text{Where: } \omega_d A = (\omega_s - P\omega_m)$$

$$\Psi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (5)$$

$$\Psi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} = 0 \quad (6)$$

$$\Psi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \quad (7)$$

$$\Psi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \quad (8)$$

$$T_e = p \frac{3}{2} (\Psi_{ds} I_{qs} - \Psi_{qs} I_{ds}) \quad (9)$$

نظراً لأن المحور d ثابت على طول تدفق الجزء الثابت Ψ_s ، يصبح التدفق Ψ_{qs} صفراً. يمكن كتابة عزم الدوران كما هو مبين بالمعادلة (10):

$$T_e = p \frac{3}{2} \Psi_{ds} I_{qs} \quad (10)$$

حيث أن:

L_s : معامل التحريض الكلي لملفات الثابت [H].

L_r : معامل التحريض الكلي لملفات الدائر [H].

L_m : معامل التحريض المتبادل [H].

R_s : المقاومة الطورية في الثابت [ohm].

R_r : المقاومة الطورية في الدائر [ohm].

V_{ds} : مركبة جهد الثابت على المحور d [V].

V_{qs} : مركبة جهد الثابت على المحور q [V].

V_{dr} : مركبة جهد الدائر على المحور d [V].

V_{qr} : مركبة جهد الدائر على المحور q [V].

Ψ_{ds} : مركبة الفيض المغناطيسي للثابت على المحور d.

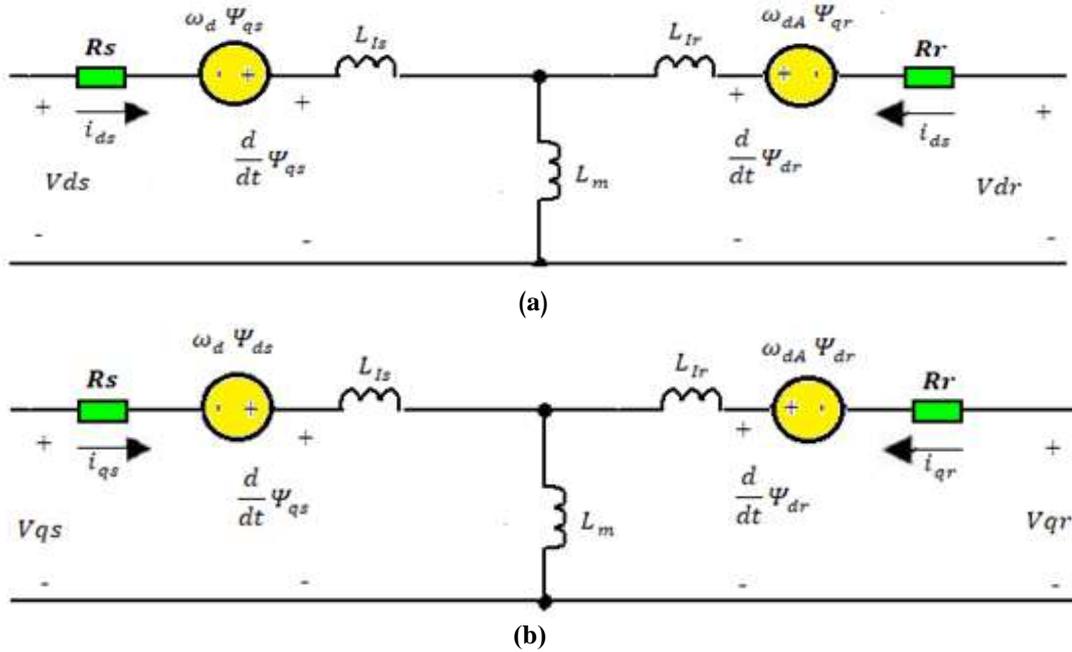
Ψ_{qs} : مركبة الفيض المغناطيسي للثابت على المحور q.

Ψ_{dr} : مركبة الفيض المغناطيسي للدائر على المحور d.

Ψ_{qr} : مركبة الفيض المغناطيسي للدائر على المحور q.

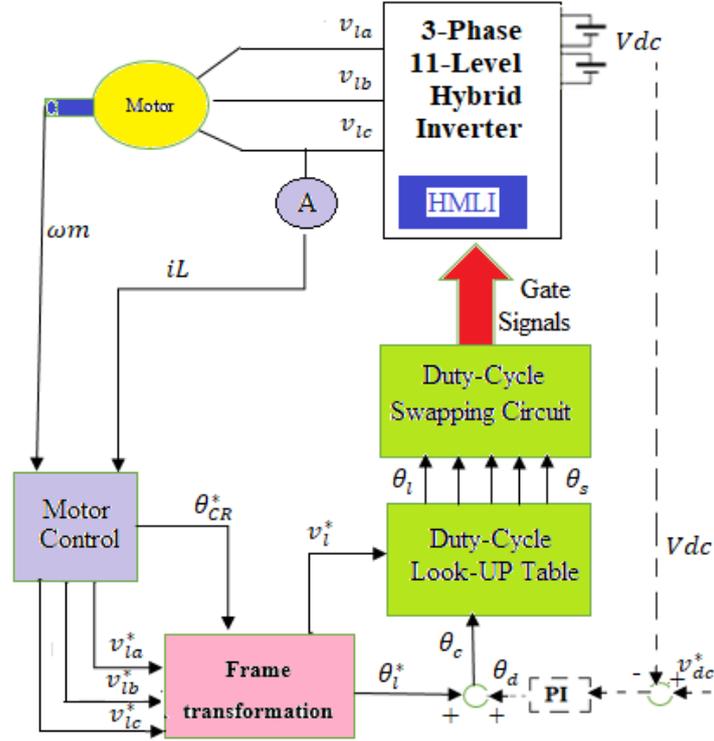
- . I_{ds} : مركبة تيار الثابت على المحور d [A].
- . I_{qs} : مركبة تيار الثابت على المحور q [A].
- . I_{dr} : مركبة تيار الدائر على المحور d [A].
- . I_{qr} : مركبة تيار الدائر على المحور q [A].
- . ω_s : السرعة التزامنية للساحة المغناطيسية [Rad/sec].
- . ω_r : سرعة دوران الدائر [Rad/sec].
- . P : عدد أقطاب المحرك.
- . T_e : العزم الكهرومغناطيسي [N · m].

علماً بأن الدارة المكافئة للمحرك التحريضي على المحورين ($d-q$) هي كما يبين الشكل التالي:



الشكل (7): الدارة المكافئة للمحرك التحريضي على المحورين d و q

إن تمثيل نظام القيادة مبدلة - محرك رافعة مبين على الشكل (8) مع حلقة التحكم (PI) لضبط سرعة المحرك عند قيمة محددة مرغوبة.



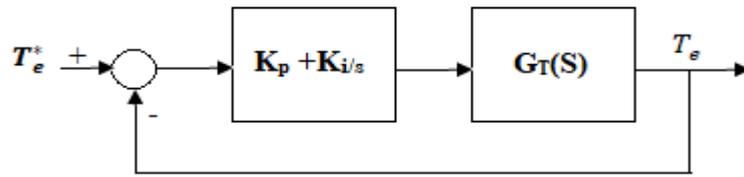
الشكل (8) : المخطط العام لنظام (HMLI-IM) المقترح للتحكم بأداء المحرك التحريضي.

أ- مخطط المتحكم التناسبي - التكاملي (PI)

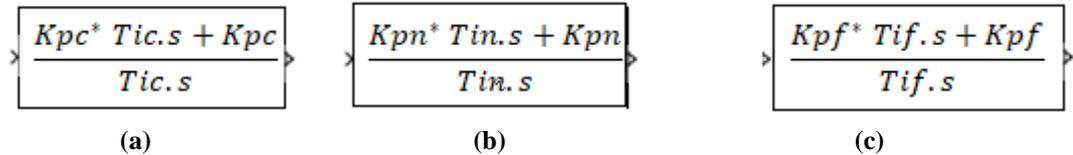
تعتبر وحدة التحكم (PI) العنصر الرئيس للتحكم في الأداء الديناميكي للآلة. مع الأخذ بعين الاعتبار ضرورة ضبط ثوابت وريح وحدات التحكم PI لكل من حلقات التحكم بعزم الدوران والتدفق بشكل صحيح لتقليل تموج عزم الدوران. في العمل المقترح، تم استخدام وحدات تحكم PI منفصلة للتحكم في عزم الدوران والتدفق وسرعة المحرك التحريضي [14] [15]. يكتسب حساب ثوابت التحكم للمتحكم (PI) أهمية كبرى مع الأخذ بالاعتبار أن زمن الاستقرار ($t_s \geq 0.0031 \text{ sec}$)، وكذلك الحد الأقصى لتجاوز الذروة ($M_p \geq 2\%$). يبين الشكل (9) مخطط الحلقة المغلقة لوحدة التحكم (PI) بعزم الدوران، حيث أن قيم الثوابت (K_p, K_i) التي تم الحصول عليها هي (1.5 و 100) على التوالي، بينما كانت قيمة الثابت K_p للتحكم في التدفق والسرعة هي 4441 و 187.56 على التوالي. أما قيمة الثابت K_i للتحكم في التدفق والسرعة فقد بلغت 107.38 و 132.38 على التوالي.

إن القالبة المستخدمة هنا، هي القالبة الهجينة المقترحة عند العمل في نظام العمل المتماثل ($V_{s1} = V_{s2}$)، وبالتالي الحصول على جهد خرج بتسعة مستويات. تم إجراء محاكاة HMLI التي تغذي (IM) مع وحدة التحكم في (عزم الدوران - سرعة الدوران) باستخدام برنامج (MATLAB).

إن تشغيل المحرك بدون حمل سيؤدي لدورانه بسرعة (735 rpm)، حيث يعمل بشكل مستقر بعد زمن أكبر قليلاً من (0.6 sec)، مع الأخذ بعين الاعتبار دوران المحرك بسرعة أقل في البداية بسبب حملته البالغة 5 N.m لفترة 0.2 ثانية تقريباً، حيث تعود السرعة لتستقر من جديد عند (735rpm) خلال 0.06 ثانية.



الشكل (9) : رسم تخطيطي لوحدة التحكم (PI) في عزم الدوران.



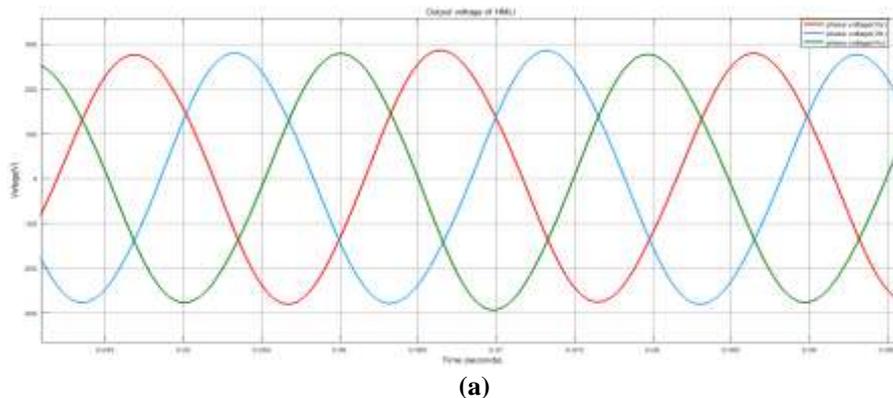
الشكل (10): (a) بلوك التحكم بالعزم، (b) بلوك التحكم بالسرعة، (c) بلوك التحكم بالتدفق.

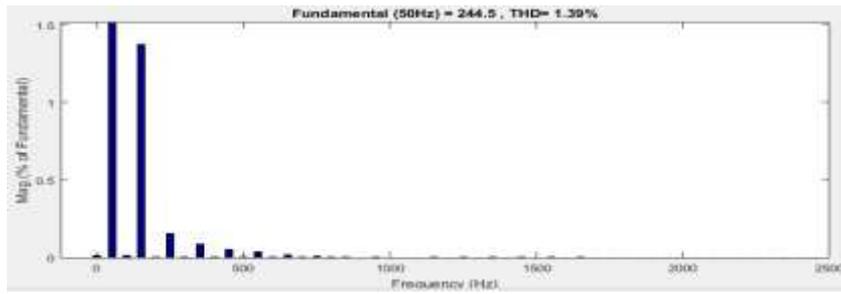
تعطى المواصفات الاسمية للمحرك المستخدم مع الرافعة كما هو موضح في الجدول (4).

الجدول (4): بارامترات المحرك المستخدم.

Motor Parameters			
power	4 KW	Stator inductance	0.7154 mH
Voltage	400V	Rotor inductance	0.7154 mH
Speed	735 rpm	Mutual Inductance	0.4154 mH
Current	28 A	Pole pairs	2
Stator resistance	1.93 Ω	Moment of inertia	0.0051 Kg.m ²
Rotor resistance	1.43 Ω	Stator inductance	0.7154 mH

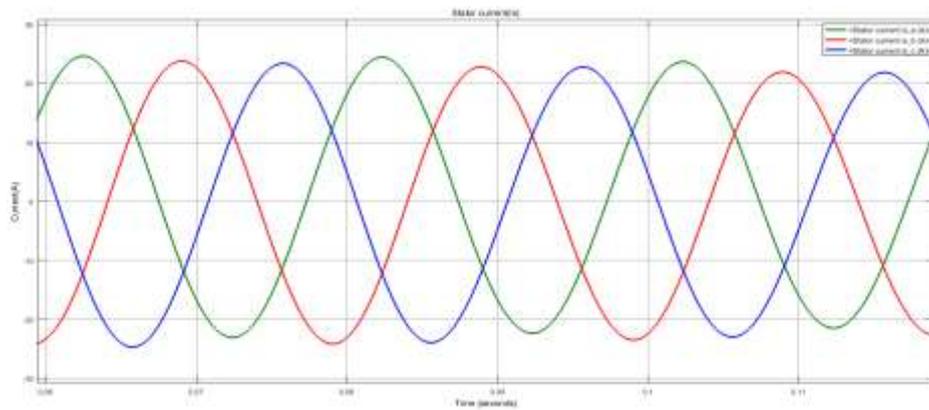
ب - نتائج المحاكاة للقلابية المقترحة عند تغذية المحرك التحريضي المقاد بواسطتها تظهر موجتي جهد التغذية وتيار ملف الثابت الجيبيتين للمحرك التحريضي في الشكلين (11) و (12) على التوالي والتحليل التوافقي لكل منهما (FFT) ونلاحظ القيم المنخفضة لمعامل التشوه التوافقي (THD%) حيث يبلغ (1.39%) بالنسبة لموجة الجهد و (0.08%) بالنسبة لموجة التيار مما يؤكد جودة التغذية الكهربائية وملائمتها لتغذية المحرك.



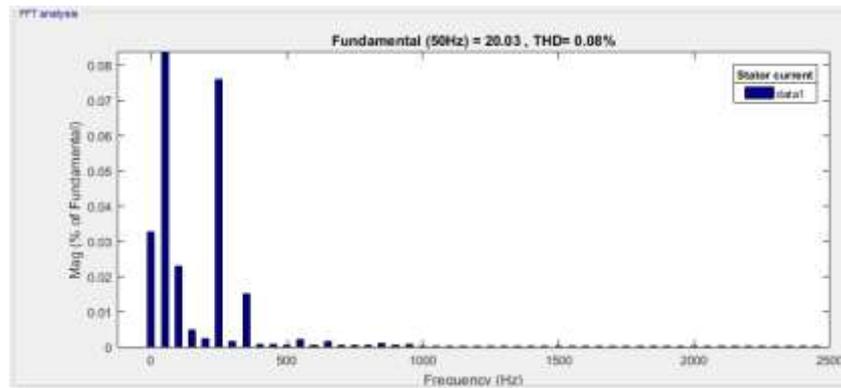


(b)

الشكل (11): جهد التغذية ثلاثي الطور المقدم من القالبة متعددة المستويات الهجينة المقترحة والتحليل التوافقي لها



(a)

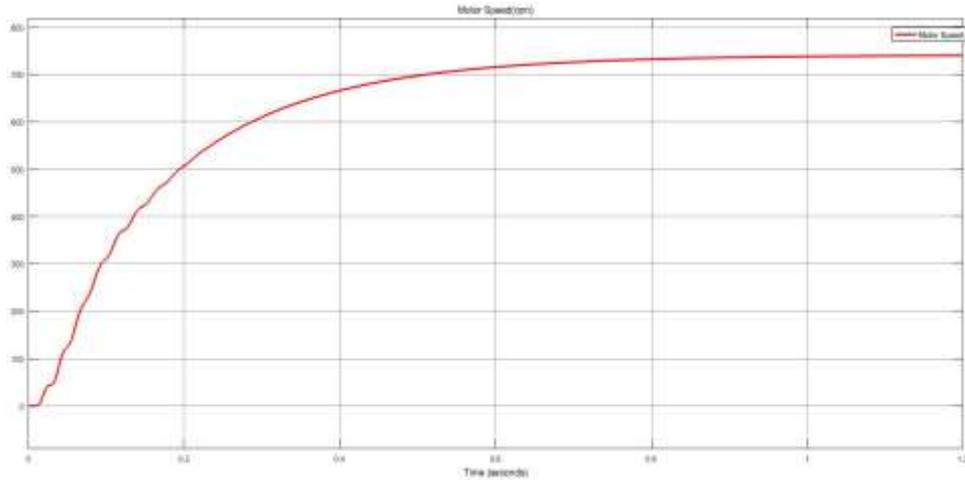


(b)

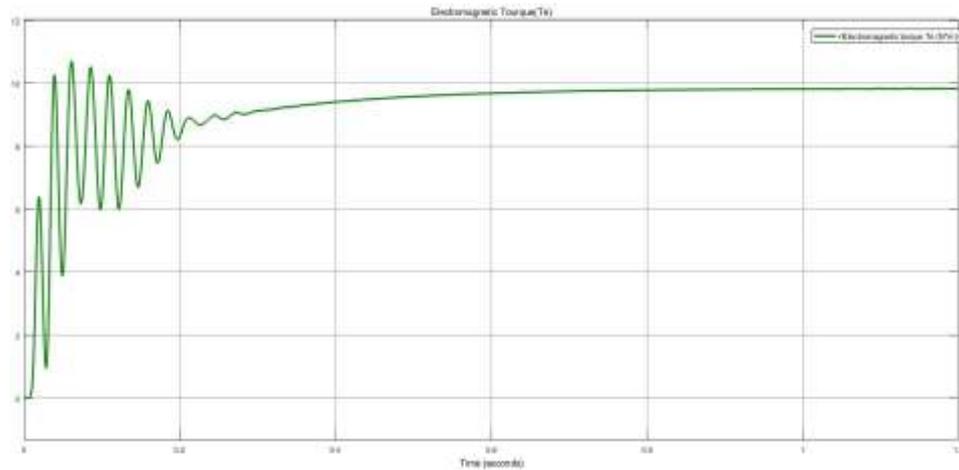
الشكل (12): تيار ملف الثابت للمحرك التحريضي للأطوار الثلاث والتحليل التوافقي الموافق لموجة التيار.

ج - تقييم الأداء لنظام القيادة

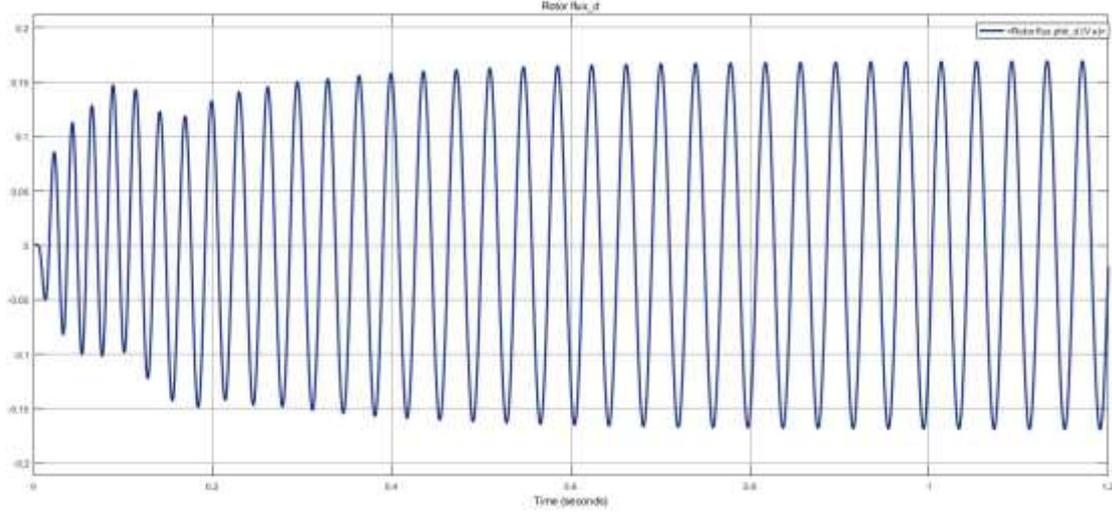
إن مميزات أداء المحرك الميكانيكية (الكهروميكانيكية) المختلفة المبينة في الشكلين (13) و(14) توضح العمل المستقر لهذا المحرك عند تغذيته من خرج القالب المقترحة المذكورة.



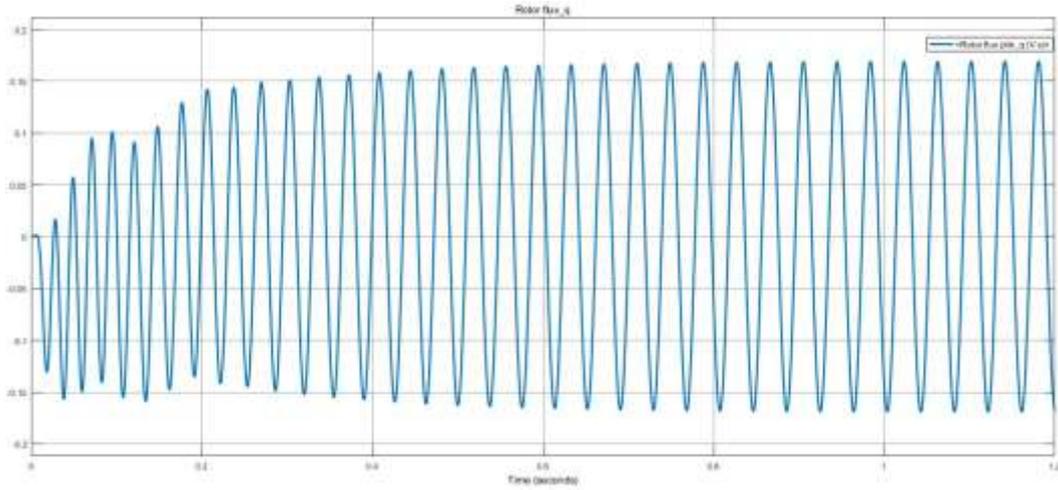
الشكل (13) : منحنى السرعة (n) للمحرك المقاد مقدراً بـ (rpm).



الشكل (14) : منحنى العزم الكهرومغناطيسي



(a)



(b)

الشكل (15) : منحنيات التدفق المغناطيسي للجزء الثابت على المحورين q, d .

الاستنتاجات والتوصيات:

بعد تنفيذ خطوات البحث وإجراء النمذجة والمحاكاة للطوبولوجيا المقترحة، يمكننا عرض نتائج البحث التي حصلنا عليها وفق ما يلي:

1. إن هذه الورقة البحثية تؤكد على أن الطوبولوجيا المقترحة للقالبة الهجينة تنتج جهود تغذية جيئية بمعامل تشوه منخفض ($THD\%=1.39\%$) عند تغذية حمل عبارة عن محرك تحريضي مما يؤكد أهمية وجودة أداء القالبة المقترحة.
2. تم تحقيق أداء ستاتيكي وديناميكي مقبول جداً باستخدام وحدة التحكم (PI) مما يسمح بدراسة مستقبلية لمقارنة تقنية التحكم المقترحة مع تقنيات أخرى لتحسين الأداء الديناميكي أيضاً.
3. تم التحقق من صحة الدراسة بإجراء المحاكاة على المحرك تحريضي ذي المواصفات المذكورة أعلاه.
4. أثبتت تقنية التعديل (PD) والعمل بمعامل التعديل ($M_a=0.9$) قابلية عالية في الحصول على منحنيات خرج بمعامل تشوه توافقي للجهد والتيار منخفض جداً، مما يؤكد استقرار عمل المحرك وتحقيق عزم دورانه الاسمي.

5. إن المنحني المعبر عن فيض الدوار يؤكد على سرعة الاستجابة لتحقيق استقرار عمل المحرك المغذى من القالبية المقترحة بعد زمن قدره (t=0.2s).

6. ان المنحني المعبر عن تيار الجزء الثابت (I_s) للمحرك المدروس يؤكد على جيبية منحنيات التيار وانخفاض قيمة (THD%) حيث يكون مساوياً (0.08%)، مما يعني إنقاص الضياعات وعدم سخونة المحرك والتخلص من العزوم الصدمية للمحركات والتي تسببها التوافقيات وبالتالي استقرار عمله.

7. إن منحنى العزم الكهرومغناطيسي يؤكد على عدم وجود تأرجح بعد اقلاع المحرك وخلال فترة (t= 0.2s) حيث يبدأ منحنى العزم الكهرومغناطيسي بالاستقرار ليصل إلى حد الاستقرار الكامل عند زمن قدرة (t=0.6 s) وبالتالي تخفيض تموج عزم الدوران للمحرك التحريضي المغذى من هذه القالبية.

8. إن الأداء العالي للمحرك الواضح من منحنى السرعة يؤكد على بدء استقرار المحرك بعد (t=0.2s) أيضاً ووصوله إلى حد الاستقرار التام بعد زمن قدره (t=0.6s).

كما أنه يمكن التوصية بما يلي:

- التوسع بالدراسة المقدمة لتحقيق أداء أفضل ما يمكن بحيث نحصل على العمل المستقر لنظام القيادة في الحالتين الستاتيكية والديناميكية.
- التوسع في الدراسة باستخدام تقنيات تحكم مختلفة لنظام قيادة (قالبية - محرك)، بحيث يعمل المحرك عند بارامترات أعلى من حيث الاستطاعة والجهد المغذي والأحمال الميكانيكية المطبقة على محور المحرك.
- دراسة استقرار المحرك في الحالتين الستاتيكية والديناميكية عند ربط أحمال ميكانيكية مختلفة على محور هذا المحرك.
- التعديل في بنية القالبية للوصول لعدد مستويات أكبر، الأمر الذي يسمح بالحصول على جهود أعلى لتغذية محركات ذات استطاعات عالية، بحيث يمكن العمل عند حمولات كبيرة.

References:

- [1] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, 2002.
- [2] Kavali, Janardhan, and Arvind Mittal. "Analysis of various control schemes for minimal Total Harmonic Distortion in cascaded H-bridge multilevel inverter." Journal of Electrical Systems and Information Technology 3.3 (2016): 428-441.
- [3] M. Khanfara, R. El Bachtiri, M. Boussetta, and K. El Hammoumi, "A multicarrier pwm technique for five level inverter connected to the grid," International Journal of Power Electronics and Drive Systems, vol. 9, no. 4, p. 1774, 2018.
- [4] N. Prabakaran and K. Palanisamy, "Comparative analysis of symmetric and asymmetric reduced switch mli topologies using unipolar pulse width modulation strategies," IET Power Electronics, vol. 9, no. 15, pp. 2808–2823, 2016.
- [5]- PRASAD, G. Durga; JEGATHESAN, V.; RAO, PVV Rama. Hybrid multilevel DC link inverter with reduced power electronic switches. *Energy procedia*, 2017, 117: 626-634.
- [6] V. K. Kanike and S. Raju, "Analysis of switching sequence operation for reduced switch multilevel inverter with various pulse width modulation methods," Frontiers in Energy Research, vol. 7, p. 164, 2020
- [7] A. J. Memon, M. A. Mahar, A. S. Larik, and M. M. Shaikh, "A comprehensive review of reduced device count multilevel inverters for pv systems," Energies, vol. 16, no. 15, p. 5638, 2023.

- [8] Kavali, Janardhan, and Arvind Mittal. "Analysis of various control schemes for minimal Total Harmonic Distortion in cascaded H-bridge multilevel inverter." *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 3.3 (2016): 428-441.
- [9] Ahmed, Mahrous, M. K. Metwally, and Tharwat Hanafy. "Direct Torque Control of Induction Motor Drive Fed from a Photovoltaic Multilevel Inverter."
- [10] Reddy, P. Deepak. "A novel review on modular multilevel converter for induction motor drive applications." *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)* 12.10 (2021): 6303-6309.
- [11] Singh, Smrati, et al. "Speed control of multilevel inverter-based induction motor using V/F method." *Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving: SocProS 2014, Volume 1*. Springer India, 2015.
- [12] del Toro Garcia, Xavier, et al. "New DTC control scheme for induction motors fed with a three-level inverter." *Automatika: časopis za automatiku, mjerenje, elektroniku, računarstvo i komunikacije* 46.1-2 (2005): 73-81.
- [13] Ahmed, S. M., K. S. Ahmed, and Y. M. Shuaib. "Closed loop Direct Torque Control Scheme for an Induction Motor Powered by Five Level Diode Clamped Multi-Level Inverter." *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering* 19.1 (2023).
- [14] Bocker, Joachim, and Shashidhar Mathapati. "State of the art of induction motor control." *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. Vol. 2. IEEE, 2007.
- [15] Kenne, Godpromesse, et al. "Real-time speed and flux adaptive control of induction motors using unknown time-varying rotor resistance and load torque." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 24.2 (2009): 375-387.
- [16] Qureiosh, Jafar, Carlo Makdisie, and Nabil Mohammed. "A Three-Phase Hybrid Multilevel Inverter for Medium Voltage Applications." *2023 3rd International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA)*. IEEE, 2023.

