Choosing the Appropriate Modulation Technique in the Multilevel Converters with Flying Capacitors (PDPWM PODPWM APODPWM)

Dr. Carlo Y Makdisie*
Manhal Saleh**

(Received 12 / 1 / 2023. Accepted 1 / 3 / 2023)

□ ABSTRACT □

The use of multilevel converters ML is an advanced step in securing high-quality power supply for loads, and these converters are of great importance when the required load power rate is high. The use of multilevel converters with flying capacitors FCMLI to feed high power loads and high voltages is vital and important that cannot be secured by other structures or topologies such as Cascaded or Diode Clamped Converters. Choosing the appropriate modulation technique plays a major role in determining the shape of the output curves for the voltages and currents feeding the loads, which must be free of distortions or higher harmonics (total harmonic distortion THD less than 5%). In this paper, the modulation techniques (PDPWM PODPWM APODPWM) used with multilevel inverter with flying capacitors is investigated, the best choice of the technology based on a comparison of the total harmonic distortion THD values for phase and linear voltages and currents without and with the use of filters are shown also in this paper, therefore the best modulation technology for the inverter according to the proposed number of levels will be suggested. That is, modeling the multilevel converter with five, seven, and nine levels and testing different modulation techniques at different levels (APODPWM, PDPWM, PODPWM).

Keywords: Flying capacitor multilevel inverter(FCMLI), PDPWM, PODPWM, APODPWM, Total Harmonic Distortion factor (THD %).

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
**Postgraduate student (Master), department of electric power engineering, faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakis, Syria, email: manhal.saleh.28@gmail.com

تحديد تقنية التعديل المناسبة في المبدلات متعددة المستويات ذات المكثفات الطائرة لتحسين جودة الطاقة الكهربائية (PDPWM- PODPWM -APODPWM)

د. كارلو مقدسي*

منهل صالح**

(تاريخ الإيداع 12 / 1 / 2023. قُبِل للنشر في 1/ 3 / 2023)

□ ملخّص □

يعتبر استخدام المبدلات متعددة المستويات ML خطوة متقدمة في تأمين تغذية الأحمال بالطاقة الكهربائية ذات الجودة العالية، ويكون لاختيار نوع المبدلة أهمية كبرى عندما تكون استطاعة الأحمال عالية.

يعتبر استخدام المبدلات متعددة المستويات ذات المكثفات الطائرة لتغذية الأحمال ذات الاستطاعة والجهود العالية أمراً حيوياً وهاماً لا يمكن تأمينه عن طريق بنى أو طبولوجيات أخرى مثل القالبات التعاقبية Cascaded أو القالبات ذات ديودات الربط.

إن اختيار وتحديد تقنية التعديل المناسبة يلعب دوراً كبيراً في تحديد شكل موجة خرج المبدلة للجهود والتيارات المغذية للأحمال، والتي يجب أن تكون خالية من التشوهات أو التوافقيات العليا (معامل التشوه التوافقي THD الكلي أقل أو يساوي 5%)، حيث معامل التشوه التوافقي المئوي THD يعتبر من أهم معايير جودة الطاقة الكهربائية.

في هذا الورقة البحثية سنقوم بدراسة تقنيات التعديل (PDPWM –PODPWM– APODPWM) المستخدمة مع القالبات متعددة المستويات ذات المكثفات الطائرة (FCMLI)، كما نبين الاختيار الأفضل للتقنية المستخدمة بناءً على مقارنة قيم معامل التشوه التوافقي THD للجهود والتيارات الطورية والخطية بدون ومع استخدام المرشحات للتقنيات المختلفة، ومن ثم اقتراح التقنية الأفضل للقالبة وفق عدد المستويات المقترح. أي نمذجة المبدلة متعددة المستويات بخمس وسبع وتسع مستويات واختبار تقنيات التعديل المختلفة عند عدة مستويات مختلفة مطلوبة (APODPWM، PODPWM،PDPWM).

الكلمات المفتاحية: قالبة متعددة المستويات ذات مكثفات طائرة(FCMLI) ، التعديل النبضي العرضاني بإزاحة المستوى (PDPWM– PODPWM– APODPWM)، معامل التشويه التوافقي الكلي (THD%) Total Harmonic Distortion.

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.**

yahoo.com@makdisiecarlo

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

ايميل manhal.saleh.28@gmail.com

مقدمة:

ظهرت تقنية المبدلات متعددة المستويات مؤخراً كبديل مهم جداً عن القالبات التقليدية في مجال التحكم بالطاقة الكهربائية وجودتها في نظام القدرة الكهربائي (توليد ونقل وتوزيع وتحويل) ذو الجهد المتوسط والعالي والاستطاعة العالية. تقدم هذه المبدلات مزايا متعددة وهامة مثل، إنتاج الاستطاعة العالية، الجودة، وضياعات التبديل المنخفضة، والتداخل الكهرومغناطيسي المنخفض ، كذلك يجعل سويات جهد الخرج العالية الناتجة للقالبة متعددة المستويات حلّاً فعالّا في دارات مبدلات القدرة، ومن الجدير ذكره أن المحركات التحريضية ثلاثية الطور هي أكثر أنواع المحركات الكهربائية استخداماً لأنها الأبسط والأكثر اقتصادية بالمقارنة مع بقية أنواع المحركات الأخرى، لذلك ارتكزت الأبحاث على تطوير أنظمة القيادة لهذه المحركات بالاعتماد على أنواع مختلفة من المبدلات متعددة المستويات الحاوية على أنواع مختلفة من المفاتيح الإلكترونية، ومنه تبرز الحاجة الملحة لتطوير أنظمة قيادة للتحكم بالأحمال المختلفة انطلاقاً من استخدام طرق مختلفة لتعديل النبضة ، كمثال (APODPWM, PDPWM, PODPWM).

قام الكثير من الباحثين بدراسة وتحليل أهمية المبدلات متعددة المستويات ذات المكثفات الطائرة Flying (FCMLI) Capacitor Multilevel Inverter في تنظيم جهد الحمل المتصل بها. في حين قام بعض الباحثين بدراسة أثر تقنيات التعديل المختلفة على عمل هذه المبدلات، ركز آخرون على عدد المستويات أو عدد المفاتيح في المبدلة المستخدمة أو على مقارنة تقنيات التعديل المذكورة مع التقنيات الأخرى مثل (DCMI) و(CMI).

حلل الباحث في البحث [1] أداء المبدلة ذات المكثفات الطائرة (FCMI) وخصائصها بناءً على معايير مثل، الشكل الموجي لجهد الطور الناتج ومعامل التشوه التوافقي (THD). تم الوصول إلى النتائج باستخدام برنامج MATLAB/Simulink. تظهر النتيجة التي تم الحصول عليها أنه مع وجود عدد أكبر من المستويات للمبدلة كان ناتج معامل التشوه أفضل وأقرب للشكل الموجي الجيبي.

ارتكزَ البحث [2] على تقديم دراسة مرجعية لمبدلات مصدر الجهد متعددة المستويات والتي يتم استخدامها على نطاق واسع في التطبيقات الهندسية، يظهر البحث تقرير عن التقدم التكنولوجي في طبولوجيات المبدلات ذات المكثفات الطائرة (FC) Flying Capacitor، ذات ديودات التثبيت أو الربط Diode Clamped، والمبدلة المتعاقبة (CHB) Cascaded H Bridge مع مناقشة مزايا وعيوب كل طريقة على حدة. يظهر البحث أيضاً تقنيات التعديل المختلفة للمبدلات متعددة المستويات المرتكزة بشكل أساسي على تقنية تعديل عرض النبضة PWM، تقنية تعديل فضاء الأشعة، (SVM) Space Vector Modulation، وطريقة التخلص الانتقائي للتوافقيات Selective Harmonic Elimination (SHE_PWM).

بينما قدم البحث [3] مبدلة أحادية الطور متعددة المستويات ذات المكثفات الطائرة بمساعدة تقنية تعديل عرض النبضة الجيبية SPWM ، كما تمت المقارنة بين الدارة أحادية الطور ذات ثلاثة مستويات وخمسة مستويات وكذلك تنفيذ مبدلات متعددة المستويات ذات مكثفات طائرة من سبعة مستويات من حيث النمط الموجي والخرج للتيار والجهد الناتج والاستطاعة الفعالة والأشكال الموجية للاستطاعة الردية، ومن ثم إجراء عمليات المحاكاة باستخدام بيئة MATLAB/Simulink.

لقد أبرز المرجع [4] دراسة متطورة للمبدلة ذات المكثفات الطائرة متعددة المستويات (FCLMI) والتطورات والفوائد واستخداماتها في الواقع، وتم فيه نمذجة دارات القالبة ثلاثية وخماسية المستوى FCMLI وتمت مناقشة النتائج وتبيان

الأفضل في الأداء أثناء تقديم مخططات الدوائر الممكنة ونوقشت نتائج المحاكاة على MATLAB/Simulink واعتماد الصيغة العامة لشكل الدارة وتطبيقها على دارة ذات سبعة عشر مستوى FCMLI−17.

تقدم الورقة [5] دراسة عن هياكل مختلفة من المبدلات متعددة المستويات مع المقارنة بين هذه الهياكل في تكوين الدارة من حيث جهد الخرج ومعامل التموج للتيار، وتمت مناقشة مزايا وعيوب وتطبيقات هذه الهياكل من حيث بنية كل دارة وسلوك خرجها. وفي النهاية تم استخلاص الشكل الأنسب لدارة القالبة لإبراز أفضلية طريقة المكثفات الطائرة في التطبيقات العملية.

وصف البحث [6] شكلاً جديداً للدارة التقليدية الجسرية في ظل شروط متوازنة وباستخدام ترانزستورين نوع (IGBT) ذات صمامات ثنائية متصلة بنقاط مجزىء لفات الملف الثانوي للمحولة. تتيح هذه الطريقة نطاقاً واسعاً من التحكم في الجهد مع تقليل التوافقيات المتولدة واستهلاك الاستطاعة الردية، كما تم تحليل أداء المبدلة المعدلة DC/AC بشكل كامل باستخدام نموذج رياضي عام وتحديد مبادئ التشغيل للمبدلة المعدلة.

إن المرجع [7] يقدم مرشحاً فعالاً مع مبدلة بتسعة مستويات، حيث تم الاعتماد على البنية المتعاقبة للقالبة (H−Bridge cascaded inverters) مع متحكم صناعي لتعويض اضطرابات الجهد إضافة إلى تقديم نموذج مخبري باستطاعة 1KVA يعتمد على تحويلات بارك (d-q) لتوليد الإشارات المرجعية.

لم يتم اعتماد تقنية تعديل تؤدي إلى قيم منخفضة بشكل ملحوظ لـ THD% عند مجمل مستويات القالبة المدروسة، لذلك في هذا البحث، سنقوم بدراسة تأثير عدد مستويات المبدلة ونوع تقنية التعديل بمقارنة قيم معامل التشوه التوافقي المئوي THD%. كما سنقدم دراسة للمبدلات ذات المكثفات الطائرة بخمس وسبع وتسع مستويات باستخدام تقنيات التعديل المختلفة على المستويات المختلفة.

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 المبدلات المستخدمة في تغذية المحركات، تأتي أهمية هذا البحث من أنه يقدم للمستثمر وسيلة لتصميم المبدلات للحصول على جهد خرج نوعي وموجة تيار بأقل معامل تشوه ممكن. يهدف هذا البحث إلى:

- وضع عدة نماذج للمبدلة متعددة المستويات ذات المكثفات الطائرة (خمسة مستويات، سبعة مستويات، تسعة مستويات)
- مقارنة أداء هذه النماذج وإجراء اختبار لقيم THD% من أجل الطبولوجيات المختلفة للمبدلات MLI لكل من جهدي الخط والطور.

طرائق البحث ومواده:

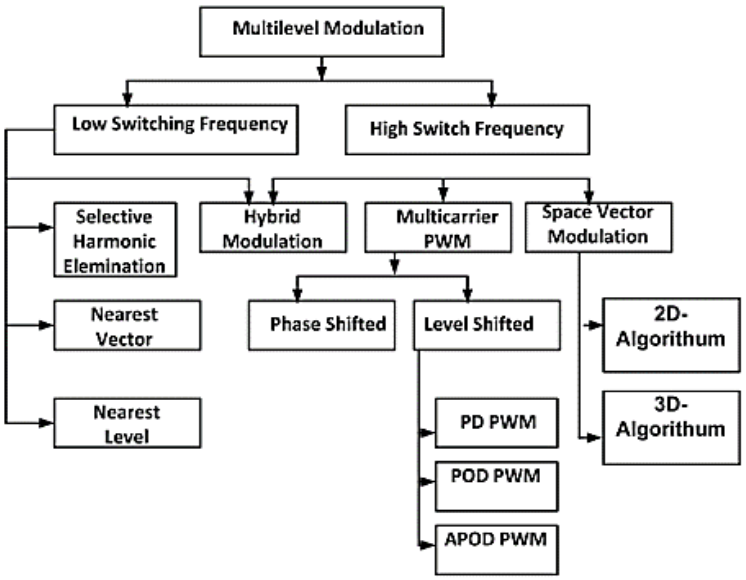
تمت نمذجة المبدلة متعددة المستويات بخمسة وسبعة وتسعة مستويات واختبار تقنيات التعديل المختلفة على المستويات المختلفة (APODPWM، PDPWM، PODPWM) باستخدام برنامج Matlab/Simulink 2008.

1. منهجية البحث:

تم الاعتماد على المنهجين التجريبي والوصفي، حيث تم في البداية نمذجة موديل القالبة بخمسة مستويات ثم سبعة ثم تسعة بطرق تعديل مختلفة تعتمد بشكل أساسي على إزاحة المستوى، ثم استخدام طريقة مختلطة هجينة بين الإزاحة الطورية وإزاحة المستوى. تمت المقارنة فيما بينها من حيث معامل التشوه التوافقي ومقارنتها مع الطريقة المختلطة.

1.1. تحديد طرق تعديل النبضة المرجعية

تم اختبار النموذج المقترح باستخدام تقنيات التعديل النبضي العرضاني المعتمدة على الموجة الحاملة، التي تصنف بشكل رئيسي إلى: التعديل بإزاحة الطور Phase Shifted والتعديل بإزاحة المستوى Level Shifted. في كلتا التقنيتين من أجل مبدلة ذات m مستوى يكون مطلوباً وجود (m−1) موجة حاملة، وكل الموجات الحاملة يجب أن يكون لها نفس التردد والمطال [8].



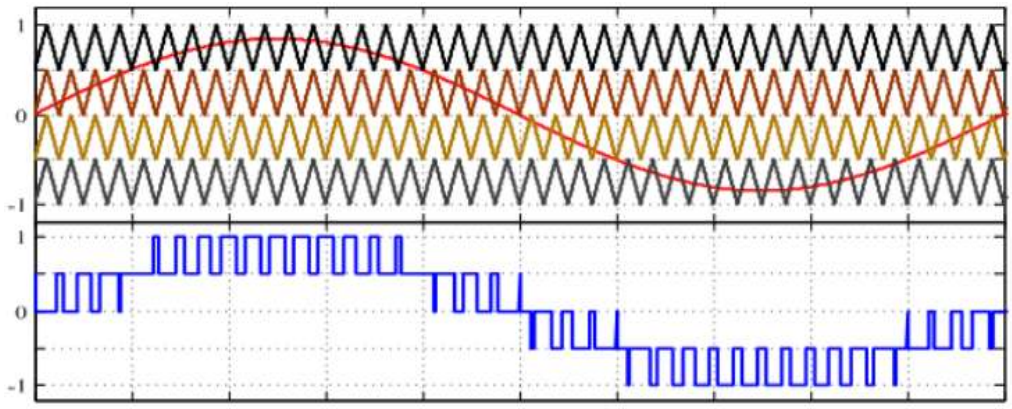
الشكل 1 تصنيف تقنيات تعديل عرض النبضة من حيث تردد التبديل

1.1.1. وفقاً للشكل 1 التعديل النبضي العرضاني بإزاحة المستوى(LS−PWM) Level Shifted PWM

إن إشارات الموجة الحاملة تقوم باستخدام الانزياح التلقائي العمودي من مستوى لآخر يمكن تصنيف طرق التعديل بإزاحة المستوى لثلاث أنواع [9]:

1. طريقة Phase Disposition (PD-PWM):

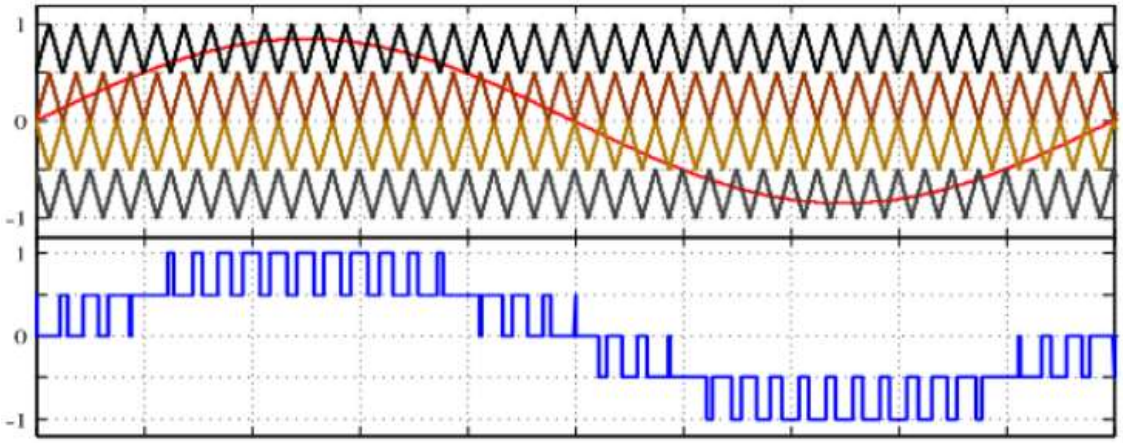
في طريقة (PD-PWM) جميع الموجات الحاملة تكون في نفس الطور لتخفيض معامل التشوه التوافقي، حيث تعمل بشكل أفضل عند المستويات العالية وتعتبر أفضل طرق التعديل من حيث معامل التشوه. كما يبين الشكل 2



الشكل 2 الشكل الموجي PD-PWM

2. طريقة Phase Opposition Disposition (POD-PWM)

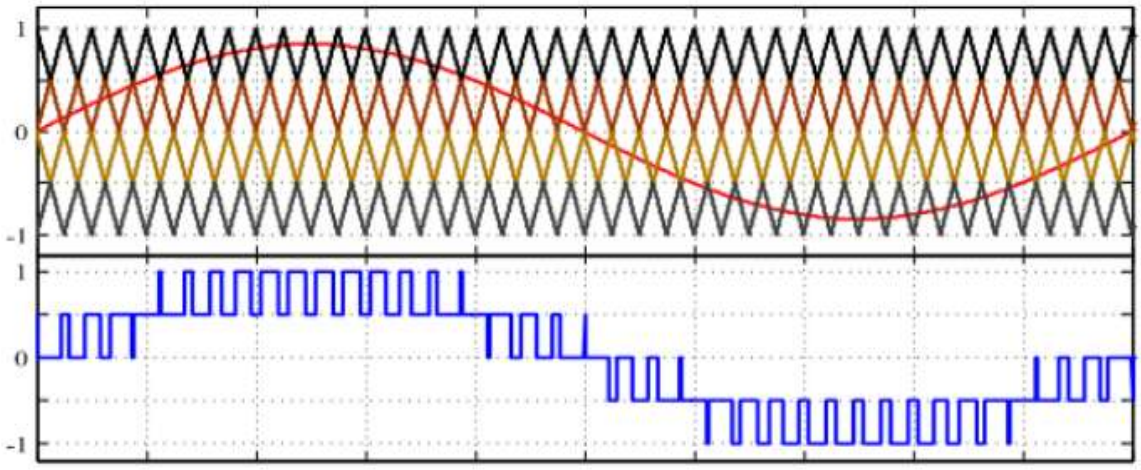
تكون في هذه الطريقة (POD-PWM) جميع إشارات الموجات الحاملة التي فوق الصفر مزاحة بالطور عن تلك الموجودة تحت الصفر بمقدار 180°، وهي ليست الأفضل من حيث معامل التشوه التوافقي لكن تطبيقها سهل نسبياً. كما يبين الشكل 3



الشكل 3 يبين الشكل الموجي POD–PWM

3. طريقة Alternative Phase opposition Disposition (APOD-PWM)

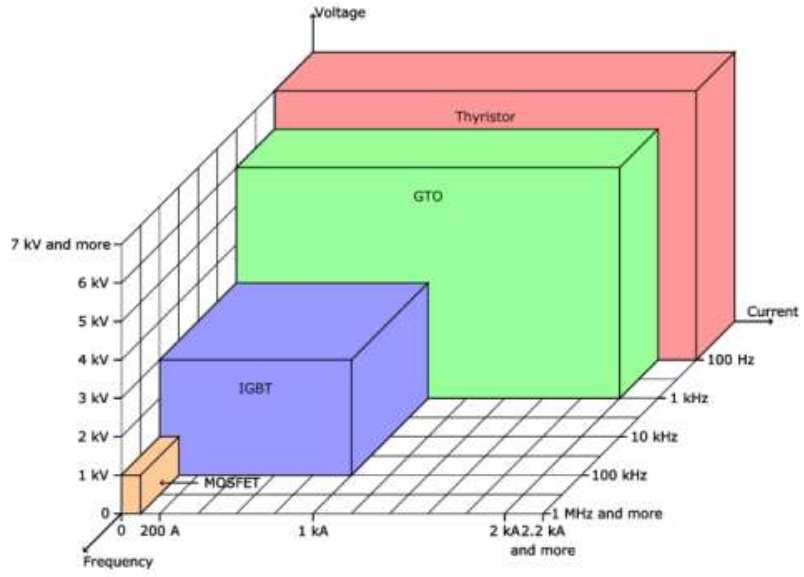
تكون في هذه الطريقة (APOD-PWM) جميع إشارات الموجات الحاملة مزاحة بالطور بمقدار 180°، من حيث نسبة معامل التشوه التوافقي، لا تتميز هذه الطريقة بمعامل تشوه أقل ولكن تطبيقها يعتبر سهلاً نسبياً أيضاً. كما يبين الشكل 4



الشكل 4 يبين الشكل الموجي APOD-PWM

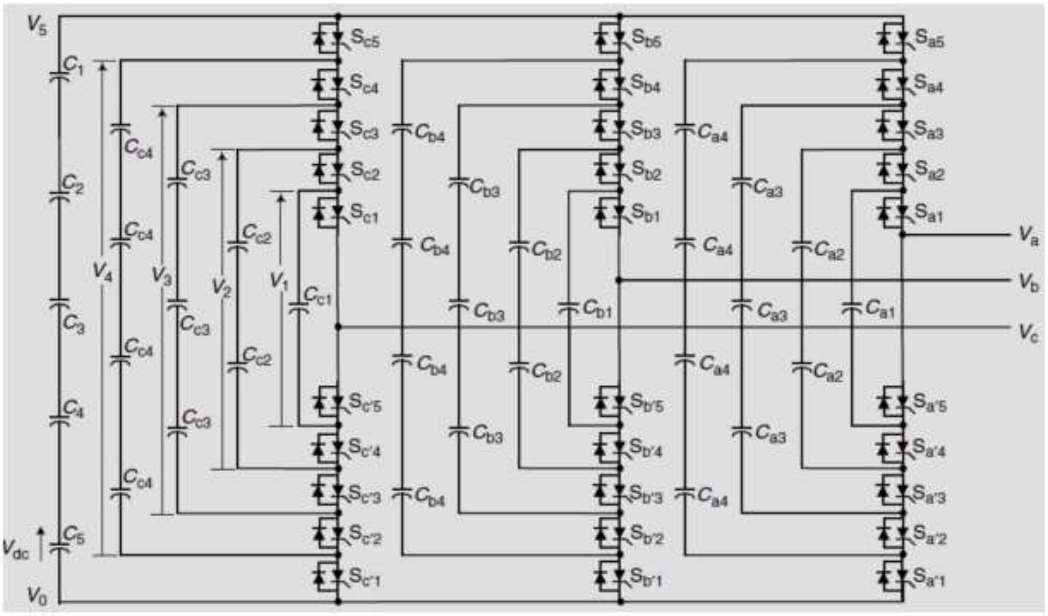
1.2. تحديد بنية المبدلات

تم في دراستنا اختيار مبدلة ذات مكثفات طائرة ثلاثية الطور تعمل في هذا النمط باستخدام أحد أنواع المفاتيح الالكترونية (IGBT or MOSFET) باعتبار وجود معيار علمي عالمي لتحديد نوع المفاتيح الالكترونية التي تؤمن أداء أفضل في تطبيق معين ويعتمد على الجهد والتردد والاستطاعة المحتملة كما هو موضح في الشكل (5).



الشكل 5 المعيار العلمي المستخدم لاختيار نوع المفاتيح الالكترونية وفق الجهد والتردد

تعتمد دراستنا على استخدام طبولوجيا المكثفات الطائرة Flying Capacitors، في هذه الطبولوجيا، تكون تركيبة هذا النوع من المبدلات شبيهة بتركيبة المبدلات ذات ديودات الربط مع استثناء وحيد هو أنه بدلاً من استخدام ديودات الربط، يتم استخدام المكثفات. تملك هذه الطوبولوجيا تركيبة سلمية لمكثفات وصلة الجهد المستمر إذ أن الجهد على كل مكثف يختلف عنه على المكثف اللاحق [10] كما يبين الشكل (6).



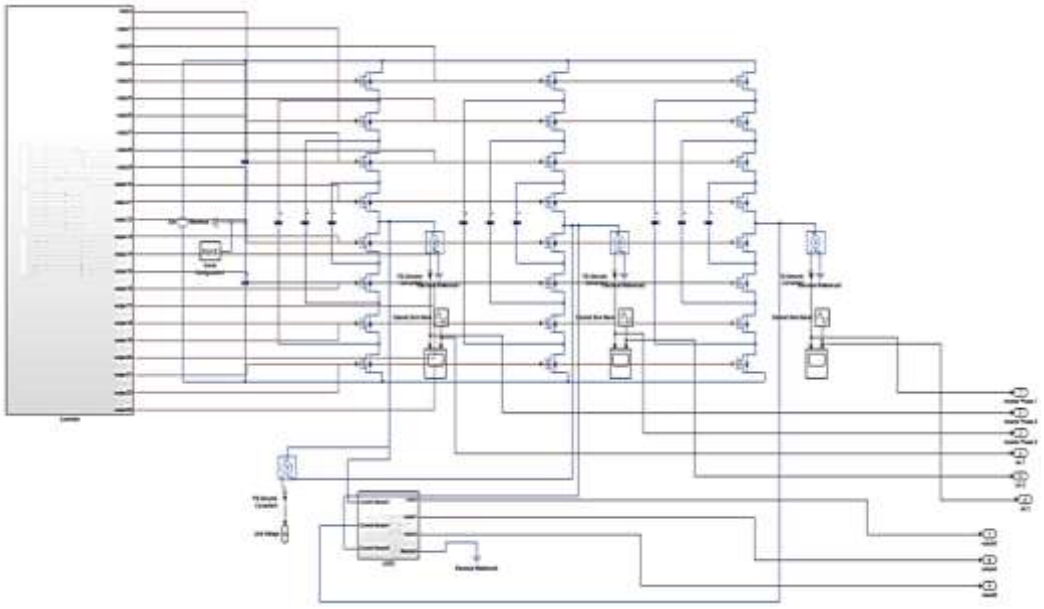
الشكل 6 الدارة المكافئة للمبدلة ذات المكثفات الطائرة ثلاثية الطور سداسية المستويات

تعطي زيادة الجهد بين مكثفين متجاورين عدد خطوات الجهد في موجة الخرج، إحدى إيجابيات القالبة ذات المكثفات الطائرة هي امتلاكها لوفرة في مستويات جهود الدخل، بمعنى أنه يمكن الحصول على نفس جهد الخرج من عمل المفاتيح بتشكيلتين مختلفتين أو أكثر.

تم تصميم الدارات المختلفة باستخدام MATLAB/Simulink باستخدام مكتبة فرعية منه Simscape Electrical.

1.2.1. المبدلة ذات المكثفات الطائرة (خمسة مستويات):

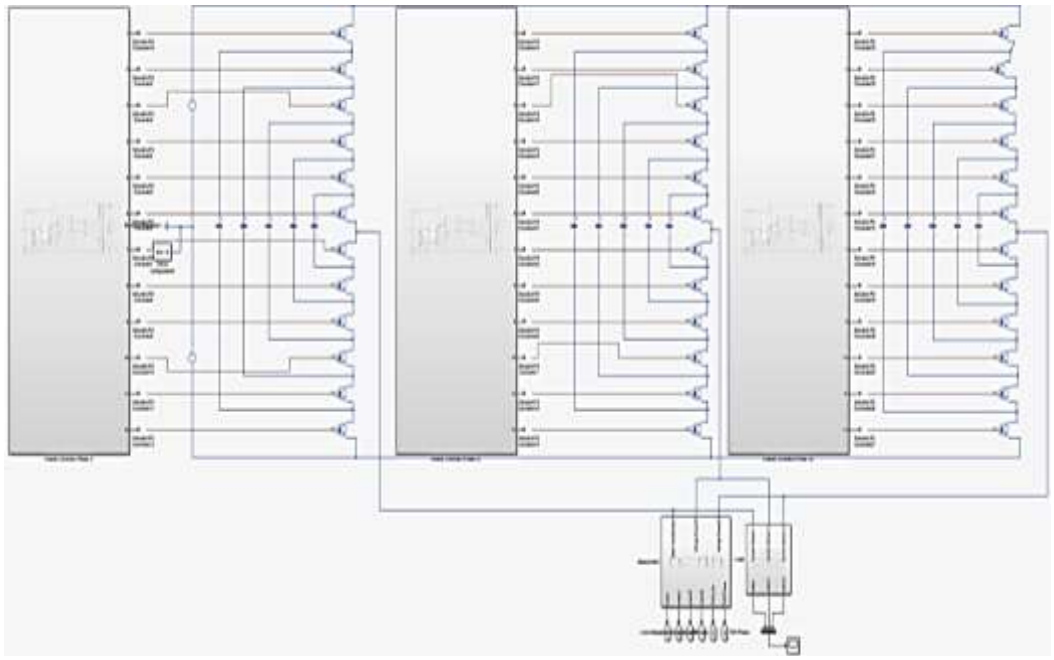
يوضح الشكل (7) نموذج النظام المدروس. تمثل الدارة ما يكافىء منبع جهد ثلاثي الطور موصولاً وصلاً نجمياً بنقطة حيادية، وكل طور يتكون من 8 ترانزستورات من نوع MOSFET تم اختيارها بسبب الاستطاعات الصغيرة المتعامل معها في هذه المبدلة وجهد المنبع الاعظمي المكافئ لـ$48V$ وثلاث مكثفات موصولة فيما بينها . يؤمن هذا الوصل الحصول على خمسة مستويات لجهد الخرج $(V, \frac{V}{2}, 0, -\frac{V}{2}, -V)$ يمكن التغيير فيما بينها عن طريق اختيار الترانزستورات الملائمة لتمرير التيار (برنامج عمل المفاتيح).



الشكل 7 محاكاة الدارة الكهربائية للمبدلة ذات المكثفات الطائرة بخمسة مستويات

1.2.2. المبدلة ذات المكثفات الطائرة (سبعة مستويات):

يوضح الشكل (8) نموذج النظام المدروس.



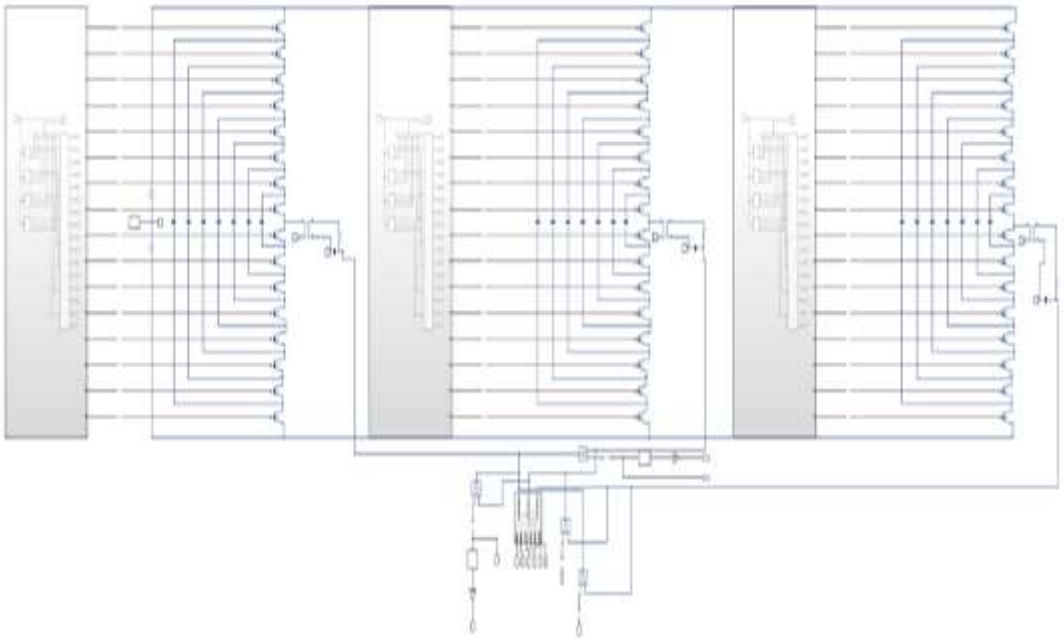
الشكل 8 محاكاة الدارة الكهربائية للمبدلة ذات المكثفات الطائرة بسبعة مستويات

تمثل الدارة ما يكافئ منبع جهد ثلاثي الطور موصولاً وصلاً نجمياً بنقطة حيادية، وكل طور يتكون من 12 ترانزستور من نوع IGBT تم اختيارها بسبب الاستطاعات الكبيرة نسبياً المتعامل معها في هذه المبدلة وجهد المنبع الاعظمي المكافئ ل $380V$ ويرفع الى $6kV$ باستخدام محولة على خرج كل طور للمبدلة وخمسة مكثفات موصولة فيما بينها

يؤمن هذا الوصل الحصول على سبعة مستويات لجهد الخرج $(V, \frac{2V}{3}, \frac{V}{3}, 0, \frac{-V}{3}, \frac{-2V}{3}, -V)$. يمكن التغيير فيما بينها عن طريق اختيار الترانزستورات الملائمة لتمرير التيار(برنامج عمل المفاتيح).

1.2.3. المبدلة ذات المكثفات الطائرة (تسعة مستويات):

يوضح الشكل (9) نموذج النظام المدروس.



الشكل 9 الدارة الكهربائية للمبدلة ذات المكثفات الطائرة بتسعة مستويات

تمثل الدارة ما يكافئ منبع جهد ثلاثي الطور موصولاً وصلاً نجمياً بنقطة حيادية، وكل طور يتكون من 16 ترانزستور وثلاث مكثفات موصولة فيما بينها. يؤمن هذا الوصل الحصول على تسعة مستويات لجهد الخرج $(V, \frac{3V}{4}, \frac{V}{2}, \frac{V}{4}, 0, \frac{-V}{2}, \frac{-V}{4}, \frac{-3V}{4}, -V)$ يمكن التغيير فيما بينها عن طريق اختيار الترانزستورات الملائمة لتمرير التيار، يوصل على بوابات الترانزستورات دارات تحكم (تحدد برنامج عمل المفاتيح) أي الترانزستورات التي ستكون بحالة وصل ON والأخرى التي ستكون بحالة فصل OFF.

1.3. الترشيح

إن الترشيح غير الفعال للتوافقيات هو الحل الأبسط للتخلص من التشوه التوافقي، إلا أنه لا يستجيب دائما بشكل صحيح للتغيرات الديناميكية في أنظمة توزيع القدرة. لقد تم تطوير المرشحات غير الفعالة عبر سنوات عديدة حتى وصلت إلى مستوى عال من التطور، ويتم ضبط (توليف) المرشحات غير الفعالة عند تردد واحد أو حزمة ترددية للتخلص من التوافقيات. يتألف المرشح غير الفعال ذو حزمة التمرير المنخفض المستخدم في دراستنا من مقاومة R وسعة C يتم توصيلهما معا على التفرع وتوليفها (ضبطها على تردد معين) للتحكم بالتوافقيات.

إن أكثر أنواع المرشحات غير الفعالة شيوعاً هو المرشح أحادي التوليف (filter tuned–Single) أو مرشح نوتش (Notch). يعمل هذا المرشح كمقاومة منخفضة عند تردد التوليف حيث يبدي مقاومة منخفضة لتوافقيات تيار معينة، فتنحرف هذه التوافقيات عن مسارها الطبيعي عبر المرشح. تم وصل حمل أومي–تحريضي لقياس تشوه التيار في حال وجود ممانعات تزيد من التشوه.

النتائج والمناقشة:

بعد تصميم الدارة باستخدام MATLAB\Simulink باستخدام مكتبة فرعية منه Simscape Electrical وتطبيق عدة طرق تعديل نبضة مرجعية PWM مختلفة. تمت مقارنة النتائج من خلال عامل التشوه التوافقي الكلي (THD or Total Harmonic Distortion) للجهد. يوضح الجدول 1 قيم THD التي حصلنا عليها لكل من المبدلات المدروسة.

جدول 1 قيم THD التي تم الحصول عليها عند قياسه على كل من المبدلات المدروسة باستخدام طرق تعديل مختلفة

المبدلة ذات الخمس مستويات		
طريقة التعديل	THD Line	THD Single Phase
PDPWM	%16.97	%26.76
PODPWM	%21.37	%26.68
APODPWM	%25.44	%26.753
المبدلة ذات السبع مستويات		
طريقة التعديل	THD Line	THD Single Phase
PDPWM	%13.23	%24.23
PODPWM	%22.07	%24.09
APODPWM	%21.15	%24.05
المبدلة ذات التسع مستويات		
طريقة التعديل	THD Line	THD Single Phase
PDPWM	%8.258	%13.7
PODPWM	%11.69	%13.58
APODPWM	%12.22	%13.71

نلاحظ أن زيادة عدد المستويات يساهم في تقليل عامل التشوه التوافقي بشكل كبير، كما أن طريقة التعديل PDPWM حققت أقل قيمة لمعامل التشوه التوافقي في كل من المبدلات بشكل منفصل.

تم أيضاً تطبيق مرشح للترددات المنخفضة باستخدام مقاومة ومكثف RC Filter وقياس عامل التشوه التوافقي الجديد باستخدام طريقة التعديل PDPWM (تمتلك أفضل أداء) على المبدلات ذات السبعة مستويات وذات التسعة مستويات تواليا كما هو موضح في الجدول 2.

جدول 2 قيم THD قبل وبعد تطبيق الفلترة على المبدلات ذات سبع مستويات وذات تسع مستويات تواليا عند استخدام تقنية التعديل PDPWM

المبدلات	قبل الترشيح		بعد الترشيح	
	THD% Line	THD% Phase	THD% Line	THD% Phase
مبدلة ذات سبعة مستويات	%13.23	%24.23	%3.49	%5.218
مبدلة ذات تسعة مستويات	%8.258	%13.7	%1.424	%2.914

الاستنتاجات والتوصيات:

- ❖ تعتبر تقنية PDPWM الأفضل تبعاً لمعامل التشوه التوافقي.
- ❖ زيادة عدد المستويات ساهمت في إنقاص معامل التشوه التوافقي (THD).
- ❖ استخدام مرشح تمرير منخفض RC أدى إلى انخفاض معامل التشوه التوافقي THD بنسبة 10% تقريباً للمبدلة ذات السبعة مستويات و 7% تقريباً للمبدلة ذات التسعة مستويات.
- ❖ بعد الترشيح لم يكن هناك فارقاً كبيراً بين تقنيات التعديل المدروسة (APOD, PD, POD)، وبقي الأداء الأفضل لتقنية (PDPWM) بالمقارنة مع باقي التقنيات.

كما أنه يمكن التوصية بما يلي:

I. اقتراح وتصميم بنى أو طبولوجيات متطورة للمبدلات المتعددة المستويات تسمح للحصول على عدد مستويات مختلف من نفس البنية.

II. اقتراح أنظمة تحكم مناسبة بسيطة بعمل المبدلات تساهم في تخفيض المواصفات الحجمية–الوزنية وبالتالي التكلفة الإجمالية للنظام.

III. إيجاد طريقة مناسبة للتحكم الآلي بالحمل على اعتبار أنه محرك عن طريق إيجاد الخوارزمية الأمثل لتعديل النبضة المرجعية (PWM) بما يتناسب مع متطلبات ضبط السرعة والمحافظة على استقرار المحرك عند عمله بحمولات متغيرة.

References:

[1].Suresh Thanakodi1, Nazatul Shiema Moh Nazar & Bryon Sim Phin Tzen1; Comparison between Three Phase Three and Five Level of Flying Capacitor Multilevel Inverter; Cite as: AIP Conference Proceedings 1883, 020046 (2017).

[2].Ibrahim Haruna Shanono, Nor Rul Hasma Abdullah & Aisha Muhammad; A Survey of Multilevel Voltage Source Inverter Topologies Controls and Applications; International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS); ISSN: 2088-8694; Vol. 9, No. 3, September 2018, pp. 1186~1201

[3].Nitin Pawar, Vijay Kumar Tayal & Pallavi Choudekar; Design of Flying Capacitor Multilevel Inverter for Solar Energy Applications E3S Web of Conferences 184, 01035 (2020); ICMED 2020.

[4].Omar Bouamrane, Tajeddine Khalili, Ilham Tyass, Mohamed Rafik, Abdelhadi Raihani Lhoussain Bahati & Bachir Benhala; Flying capacitors multilevel inverter: architecture control and active balancing; E3S Web of Conferences 336, 00039 (2022) CEGC'2021.

[5].Rejoice Thomas Paul; Review of Different Topologies of Multilevel Inverters; GRD Journals | GRD Journal for Engineering | National Conference on Emerging Research Trend in Electrical and Electronics Engineering (ERTE'19) | May 2019e-ISSN: 2455-5703.

[6].Rasha G. Shahina& Hussien D. Al-Majali; Control of Multi-Level Converter Using By-Pass Switches; Jordan Journal of Electrical Engineering Volume 4, Number 1, 2018 Pages 1-14; ISSN (Print): 2409-9600, ISSN (Online): 2409-9619.

[7].Meenu D. Nair, Jayanta Biswas, G. Vivek & Mukti Barai; Optimum Hybrid SVPWM Technique for Three-level Inverter on the Basis of Minimum RMS Flux Ripple; Journal of Power Electronics, Vol. 19, No. 2, pp. 413-430, Published: March 2019; ISSN(Print): 1598-2092 / ISSN(Online): 2093-4718.

[8].Marif Daula Siddique, Saad Mekhilef, Noraisyah Mohamed Shah, Adil Sarwar Atif Iqbal & Mudasir Ahmed Memon; A New Multilevel Inverter Topology with Reduced Switch Count; April 2019: DOI 10.1109/ACCESS.2019.2914430, IEEE Access.

[9].CHARLES IKECHUKWU ODEH, ARKADIUSZ LEWICKI & MARCIN MORAWIEC; A Single-Carrier-Based Pulse-Width Modulation Template for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters; March 22, 2021; Digital Object Identifier 10.1109/IEEE ACCESS.2021.3065743.

[10].Kabalci, E. (2021). Multilevel Inverters: Introduction and Emergent Topologies (1st ed.). Academic Press.

[11].Kamani, P. L., & Mulla, M. A. (2020). Multilevel Inverters: New Reduced Device Count Topologies and Midpoint-Based Selective Harmonic Elimination Techniques. LAP LAMBERT Academic Publishing.