

تصميم وتنفيذ مبدل تسلسلي أحادي الطور ومقارنة أدائه عند استراتيجيات التعديل

PD-POD-APOD

* م. محمد حكيمات محمد

(الإيداع: 10 تشرين الأول 2024، القبول: 15 كانون الأول 2024)

الملخص:

تم في هذا البحث تحديد استراتيجية التعديل الأنسب لتشغيل الإنفرتير التسلسلي متعدد، وذلك من خلال توضيح نظام التحكم بالإنفرتير متعدد المستويات واختبار ثلاث استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات القدر لعناصر إلكترونيات القدرة وتحديد الاستراتيجية الأفضل بينها. حيث تمت محاكاة عمل الإنفرتير التسلسلي أحادي الطور وطريقة توليد نبضات القدر باستخدام برنامج Matlab/ Simulink، بالإضافة لتنفيذ دائرة الإنفرتير بشكل عملي وإجراء الاختبارات اللازمة لتحديد استراتيجية التعديل الأفضل حيث أظهرت النتائج تفوق استراتيجية Phase Opposition Disposition (POD- PWM) حيث كان معدل التشوه التوافقي لموجة الجهد أقل ما يمكن مقارنة مع الاستراتيجيات الأخرى، وذلك عند ترددات موجة حامل مختلفة بالإضافة إلى دراسة تأثير عدد مستويات الجهد على معدل التشوه التوافقي. بينت النتائج أن أقل معدل للتشوه التوافقي لموجة جهد الإنفرتير التسلسلي أحادي الطور ذو سبع مستويات كانت عند استراتيجية التعديل POD بتردد تعديل 3000 Hz حيث كانت قيمة معدل التشوه التوافقي تساوي 17.12%.

الكلمات المفتاحية: الإنفرتير متعدد المستويات أحادي الطور، المبدل الجسري التسلسلي ذو سبع مستويات، معدل التشوه التوافقي.

* حاصل على درجة الماجستير - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.

Design and implementation of a single-phase cascade inverter and compare its performance under modulation strategies

PD-POD-APOD

Eng.Muhammed Hikmat Muhammed*

(Received: 10 October 2024 , Accepted: 15 December 2024)

ABSTRACT:

In this research, the most suitable modulation strategy for operating the cascaded multilevel inverter was identified by explaining the control system of the multilevel inverter and testing three different strategies for generating gate pulses for the power electronics components. The best strategy among them was determined.

The operation of the single-phase cascaded inverter and the method of generating gate pulses were simulated using Matlab/Simulink. Additionally, the inverter circuit was practically implemented, and the necessary tests were conducted to identify the best modulation strategy. The results demonstrated the superiority of the Phase Opposition Disposition (POD-PWM) strategy, as it resulted in the lowest total harmonic distortion (THD) in the voltage waveform compared to the other strategies, especially at different carrier wave frequencies. Furthermore, the effect of the number of voltage levels on the THD rate was studied.

The results showed that the lowest total harmonic distortion rate for the single-phase seven-level cascaded inverter voltage waveform was achieved using the POD modulation strategy with a modulation frequency of 3000 Hz, where the total harmonic distortion value was 17.12%.

Keywords: single-phase Multilevel inverter, 7- Level Cascaded H-Bridge, Total harmonic distortion.

* Master's – Industrial Automation Engineering – Tartous University – Tartous – Syria.

1. المقدمة:

في الوقت الذي يتزايد فيه الطلب على الطاقة الكهربائية في جميع أنحاء العالم، يتزايد معه الاعتماد على المبدلات الإلكترونية نظراً لكونها تتحكم بالعديد من التطبيقات من ضمنها مزودات الطاقة المنظمة، أجهزة التغذية الاحتياطية (ups)، أنظمة تخزين الطاقة، قيادة المحركات وغيرها من التطبيقات [1].

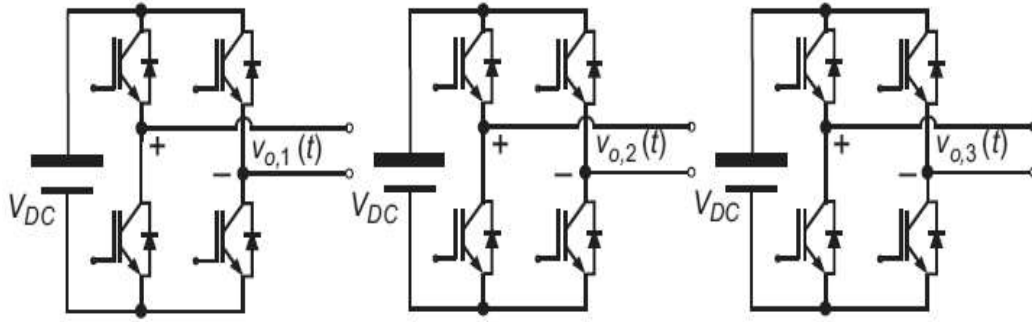
تُعد مبدلات التيار المستمر إلى تيار متناوب (الإنفرتات Inverters) أكثر أنواع المبدلات الإلكترونية انتشاراً نظراً لاستخدامها على نطاق واسع لتوليد الطاقة الكهربائية المتناوبة انطلاقاً من الطاقة المستمرة، والتحكم بعمليات نقلها وتوزيعها وحمايتها، حيث أدى التطور الكبير في مجال إلكترونيات القدرة الكهربائية إلى تحسن كبير في الأنظمة الإلكترونية للطاقة، حيث أصبحت الدارات المختلفة، وبالتحديد التي لم يكن من الممكن تطبيقها نظراً للتعقيد الكبير في التحكم بها محط اهتمام الكثير من الباحثين، ومنها تقنية الإنفرت متعدد المستويات عند ترددات تبديل منخفضة مع معدل تشوه توافقي (THD) منخفض، حيث برزت أهمية هذا النوع من الإنفرتات في التطبيقات التي تتطلب طاقة متوسطة وعالية لتحسين كفاءة تحويل هذه الطاقة من شكلها المستمر إلى المتناوب، وفيما يلي سنعمد إلى توضيح مبدأ عملها واستراتيجيات التحكم بها [2].

2. الدراسات المرجعية:

شهد مجال المبدلات متعددة المستويات (MLIs) تطورات كبيرة، كما يتضح من عدة دراسات حديثة. حيث تم تقديم نموذج مبدل متعدد المستويات مع تصميم عام يضم تكوينات متناظرة ذات 13 مستوى وغير متناظرة ذات 31 مستوى، وأظهر هذا النموذج أداءً متميزاً يتمثل في انخفاض التشوه التوافقي الكلي (THD) وارتفاع قيم الجهد والتيار الأساسية، وتم التحقق من صحته باستخدام محاكاة MATLAB/SIMULINK [3]. تناولت دراسة أخرى مبدل متعدد المستويات غير متناظر بسبعة مستويات، محللة تصميمه ووظائفه وإمكانياته في تطبيقات القيادة الكهربائية ذات الجهد المتوسط والقوة المتوسطة [4]. كما قدمت دراسة تصميمياً مبتكراً لمبدل متعدد المستويات يستخدم وحدة H-bridge أحادية الطور وتقنية المفاتيح الفرعية، محققاً 29 مستوى جهد مع تقليل التشوه التوافقي الكلي، وتم التحقق منه تجريبياً باستخدام المتحكم DSPIC30F4011 [5]. إضافة إلى ذلك، أظهرت محاكاة مقارنة لمبدلات متعددة المستويات ذات 45 و 39 مستوى باستخدام تقنية تعديل عرض النبضات الجيبية (SPWM) انخفاضاً ملحوظاً في قيم التشوه التوافقي الكلي بنسبة 2.59% و 2.98% على التوالي [6]. علاوة على ذلك، تم تطوير منصة محاكاة لمبدل متعدد المستويات ذي 11 مستوى باستخدام وحدات IGBT مرتبة في تكوين من خمسة H-bridges لكل طور، مع إجراء تحليل فورييه لتقييم التشوه التوافقي للموجة الناتجة [7]. تؤكد هذه الدراسات التقدم في تقنيات المبدلات متعددة المستويات من خلال تسليط الضوء على تصميمات مبتكرة ومحاكاة تهدف إلى تحقيق كفاءة عالية وتقليل التشوه التوافقي. وفي هذا البحث تمت دراسة تأثير تقنية التعديل المتبعة في توليد نبضات القدر وتطبيقها بشكل عملي باستخدام الإنفرت التسلسلي متعدد المستويات.

3. الإنفرتات متعددة المستويات:

إذا كان لدينا ثلاثة إنفرتات H-bridge منفصلة، مع وجود جهد دخل DC لكل منها يساوي VDC، كما هو موضح في الشكل (1)، جهود الخرج لهذه الإنفرتات هي $V_{o,1}(t)$, $V_{o,2}(t)$, $V_{o,3}(t)$ حيث يمكن اعتبار كل منها كإنفرت ثلاثي المستويات.

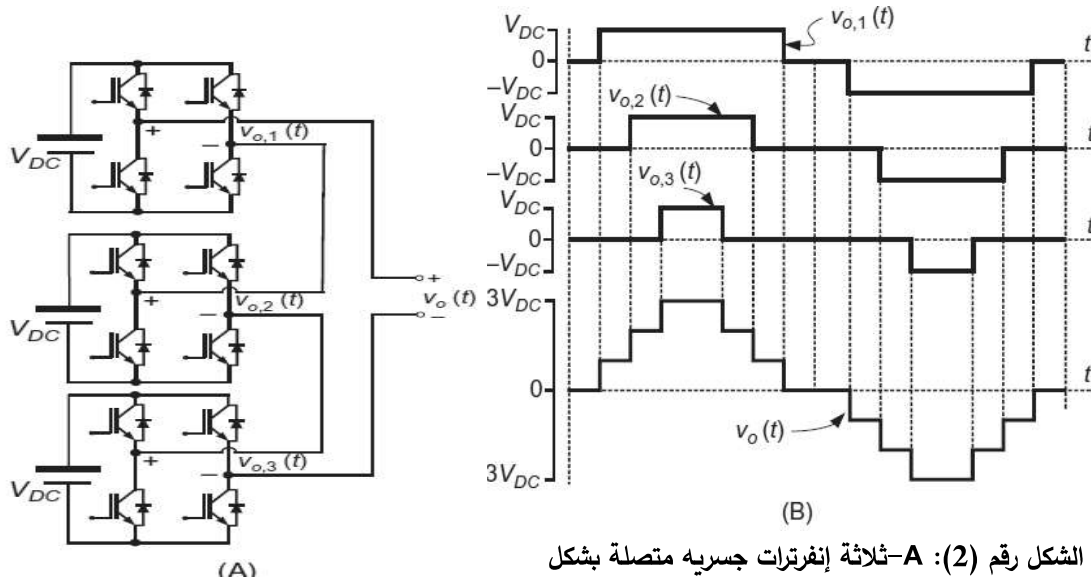


الشكل رقم (1): ثلاثة إنفترتات H-bridge منفصلة.

يتم تشغيل هذه الإنفترتات بطريقة محسوبة بحيث تعطي موجة جهد متناوبة مختلفة فيما بينها، فإذا قمنا بتوصيل الإنفترتات الثلاثة مع بعضها بشكل متسلسل، كما هو موضح بالشكل (A-2)، فسيكون الجهد الكهربائي للحمل $V_o(t)$ هو مجموع $V_{o,1}(t)$, $V_{o,2}(t)$, $V_{o,3}(t)$ كما هو موضح في الشكل (B-2)، وبالتالي جهد الحمل سيتكون من سبع مستويات وهي $0, \pm V_{DC}, \pm 2V_{DC}, \pm 3V_{DC}$ [8,9].

نلاحظ أن شكل الموجة ذو السبع مستويات هو الأقرب لموجة جيبية بالمقارنة مع شكل الموجة المربعة أو حتى شكل الموجة ذات ثلاث مستويات.

ومن الأهمية أن نلاحظ أيضاً في هذه الحالة، أن جهد الحجز (المساوي لـ V_{DC}) هو ثلث جهد التشغيل (المساوي لـ $3V_{DC}$) وبالتالي يمكن استخدام مفاتيح الطاقة ذات معدل الجهد الأقل لتوليف شكل موجة جهد أعلى بكثير، على عكس الإنفترت الجسري فإن جهد الحجز المطبق على المفاتيح الإلكترونية يساوي جهد التشغيل [10].



الشكل رقم (2): A-ثلاثة إنفترتات جسيه متصلة بشكل

تسلسلي، B- شكل موجة الخرج.

فمثلاً بالنسبة لجهد التشغيل البالغ 300 فولت، فإن المبدل الجسري التقليدي سوف يحتاج إلى مفاتيح إلكترونية تتحمل جهد بمقدار 300 فولت، في حين أن المبدل ذي المستويات السبع الذي يعتمد على H-bridge سيتطلب مفاتيح إلكترونية تتحمل جهد بمقدار 100 فولت، بالإضافة إلى ذلك، فإن الإجهاد dv/dt على الحمل يعطى بالعلاقة (1):

$$\frac{dv}{dt} \text{ stress in p.u. for a seven - level waveform} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{3\Delta t} \quad (1)$$

وبالتالي، فإن الإجهاد dv/dt على الحمل من أجل شكل موجة من سبع مستويات هو سدس الإجهاد من شكل موجة ذات مستويين.

3-1 استراتيجية تعديل نبضات القذح للإنفترت متعدد المستويات:

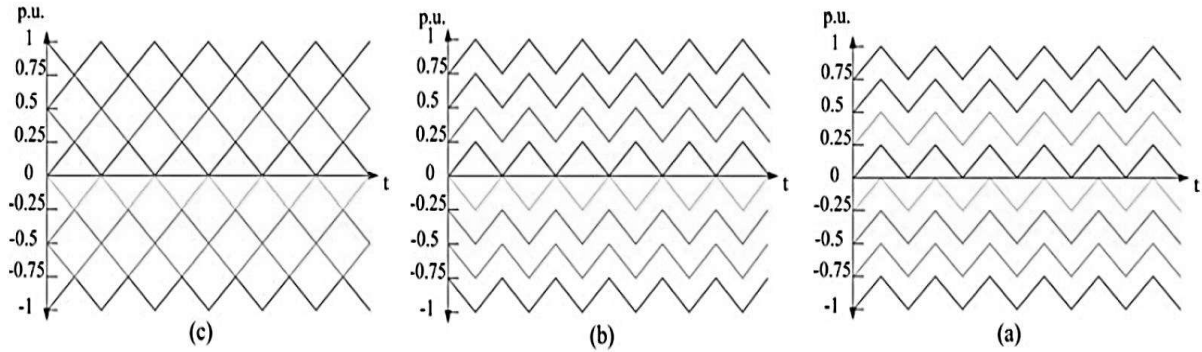
تعرف عملية التحكم في إشعال عناصر إلكترونيات القدرة بهدف توليد موجة الجهد المطلوبة باسم التعديل. وهناك العديد من استراتيجيات التعديل التي حظيت باهتمام واسع على مدى سنوات عديدة، وذلك بهدف التحكم في الإنفترتات متعددة المستويات (MLIs) [11,12].

تم اقتراح العديد من أساليب التعديل المخصصة لهذا النوع من الإنفترتات، ومن بين هذه الأساليب تقنية Multicarrier PWM التي تعتمد على خصائص إشارات الموجة الحاملة مثل موقعها، سعتها، ترددتها، ومدة تداخلها مع بعضها البعض. من أشهر هذه التقنيات ما يلي:

A. Phase Disposition (PD-PWM): في هذه التقنية، تكون جميع إشارات الموجة الحاملة متزامنة بالطور، حيث يتم إزاحة سعتها بقيمة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض، مع وجود الصفر المرجعي في منتصف الإشارات الحاملة كما هو موضح في الشكل (a-3).

B. Phase Opposition Disposition (POD-PWM): في هذه الطريقة، تكون إشارات الموجة الحاملة الموجودة أعلى الصفر المرجعي متزامنة بنفس الطور، بينما تكون إشارات الموجة الحاملة الأدنى من الصفر المرجعي متزامنة بنفس الطور ولكن مع فارق 180 درجة عن الطور العلوي، كما هو موضح في الشكل (b-3).

C. Alternative Phase Opposition Disposition (APOD-PWM): يتم في هذه التقنية إزاحة إشارات الموجة الحاملة بالتناوب عن بعضها البعض بفارق 180 درجة، كما هو موضح في الشكل (c-3).



الشكل رقم (3): استراتيجيات التعديل a. PD b. POD c. APOD

4. أهداف البحث

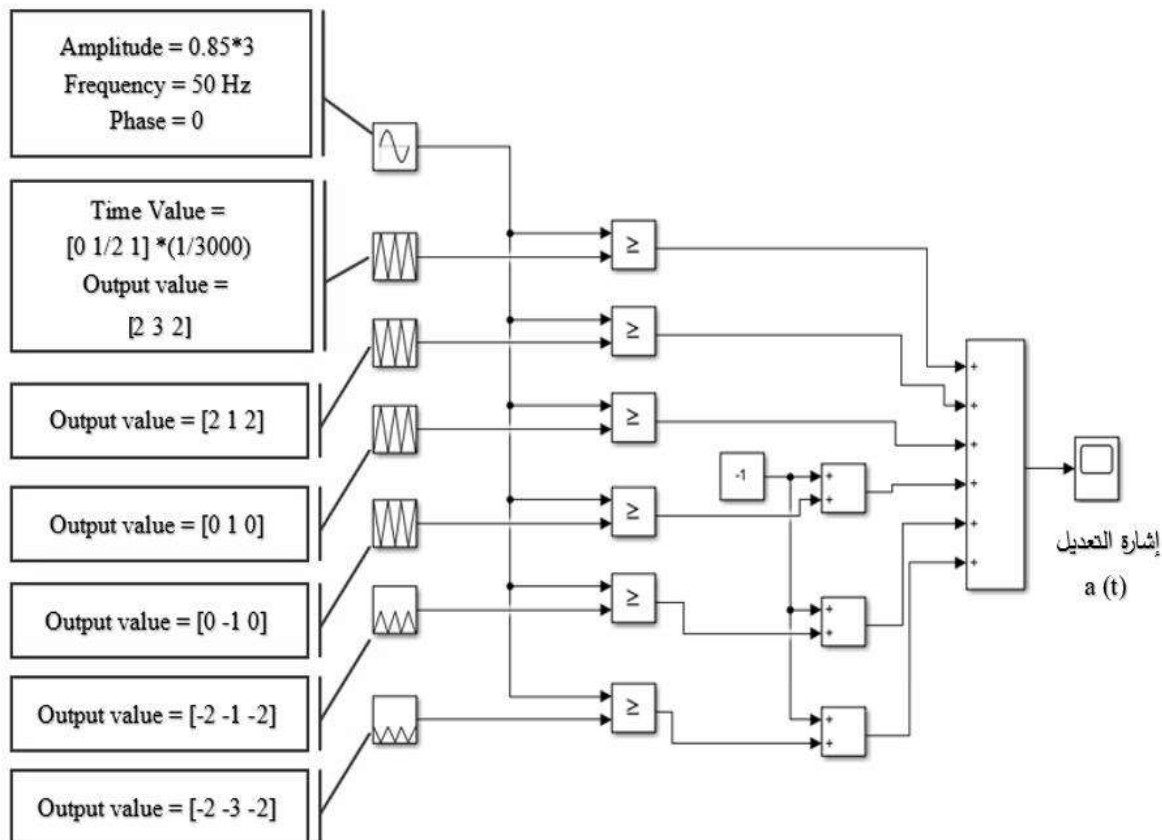
يهدف هذا البحث إلى تحديد الاستراتيجية المثلى لتصميم وتنفيذ دائرة إنفترت تسلسلي متعدد المستويات أحادي الطور من نوع Cascaded H-Bridge MLI، وذلك بهدف تحقيق أقل معدل تشوه توافقي في موجة جهد الخرج. يتم ذلك من خلال محاكاة مبدأ عمل الدارة واختبار ثلاث استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات القذح لعناصر إلكترونيات القدرة، بهدف اختيار أفضل استراتيجية بينها، ومن ثم مقارنة النتائج مع الدارة العملية.

5. منهجية البحث

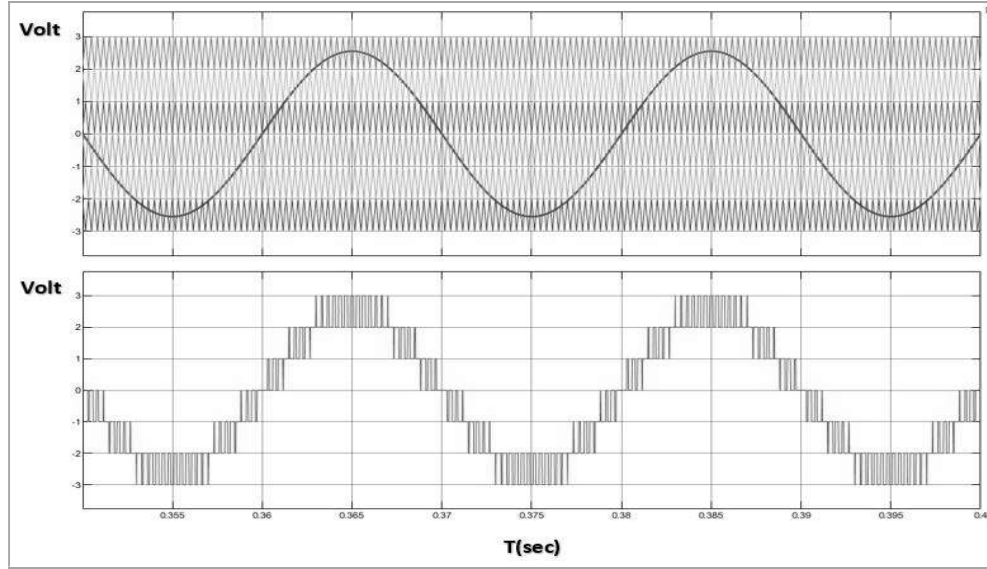
في البداية، سيتم توضيح نظام التحكم الخاص بالإنفرتير أحادي الطور متعدد المستويات. بعد ذلك، سنستخدم برنامج Matlab Simulink لمحاكاة دارة الإنفرتير أحادي الطور متعدد المستويات (CHB-MLI) بسبعة مستويات، وذلك عند تطبيق استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات القدح. ثم سيتم إجراء تحليل فورييه لاستخراج معدل التشوه التوافقي (THD) موجات الجهد والتيار الناتجة. بعد ذلك، سيتم تنفيذ الدارة العملية للإنفرتير أحادي الطور بسبعة مستويات واختبار أدائها تحت تأثير استراتيجيات التعديل المختلفة، وأخيراً سيتم مناقشة النتائج المستخلصة.

5-1 نموذج توليد إشارة تعديل ذات سبع مستويات:

في البداية، قمنا بتوليد إشارة التعديل $a(t)$ وفقاً لاستراتيجية التعديل (APOD-PWM). ونظراً لأن إشارة التعديل تتكون من سبعة مستويات، فإننا بحاجة إلى إشارة جيبية نقية كإشارة مرجعية بالإضافة إلى ست إشارات حامل مثلثية. يوضح الشكل (4) نموذج Matlab / Simulink المستخدم لتوليد إشارة التعديل $a(t)$ ويوضح الشكل (5) الإشارة المرجعية مع إشارات الحامل المثلثية وإشارة التعديل الناتجة [13]. تمثل إشارة التعديل $a(t)$ شكل موجة جهد الخرج المتوقع عند أطراف الإنفرتير حيث تُستمد إشارات القيادة الفعلية من هذه الإشارة وفقاً للبنية المتبعة في الإنفرتير متعدد المستويات.



الشكل رقم (4): نموذج للحصول على إشارة التعديل $a(t)$ ذات سبع مستويات وفق استراتيجية APOD.



الشكل رقم (5): شكل الإشارة المرجعية مع إشارات الحامل المثلثية وإشارة التعديل الناتجة.

5-2 نموذج توليد نبضات القيادة الفعلية لإنفترت تسلسلي ذو سبع مستويات:

يتم الحصول على إشارات القيادة الفعلية لعناصر إلكترونيات القدرة انطلاقاً من الإشارة المجمعة $a(t)$ ، نموذج / Matlab Simulink المقابل له موضح بالشكل (6) حيث يتم توليد نبضات القدر بناءً على الإشارة المجمعة المكونة من سبع مستويات وتحديد عناصر إلكترونيات القدرة المسؤولة عن كل مستوى من مستويات الإشارة المجمعة حيث يعتمد على مقارنة الإشارة المرجعية بمستويات جهد محددة مسبقاً لتحقيق الإخراج المطلوب. تبدأ العملية بمقارنة الإشارة المرجعية بقيم ثابتة (مثل 3، 2، 1، ... -3) باستخدام كتل المقارنة الظاهرة في الشكل، وتحدد كل مقارنة مستوى الجهد المطلوب. كما يتم تمرير الإشارات الناتجة من هذه المقارنات إلى بوابات "OR"، التي تقوم بدورها بدمج الإشارات لتوليد إشارات القيادة المناسبة لكل مفتاح تحكم. بعد ذلك، يتم إرسال إشارات القيادة النهائية، التي تظهر عند المخرجات (S1 إلى S6 و A1 إلى A6)، إلى مفاتيح الإنفترت (IGBT أو MOSFET) هذه الإشارات تتحكم في تشغيل المفاتيح لتوليد جهد خرج متدرج عبر 7 مستويات، مما يحقق تحويل التيار المستمر (DC) إلى تيار متناوب (AC) متعدد المستويات بكفاءة. حيث أن عدد الإشارات المشتقة من الإشارة المجمعة هو نفس عدد المستويات في شكل موجة جهد الخرج المرغوبة.

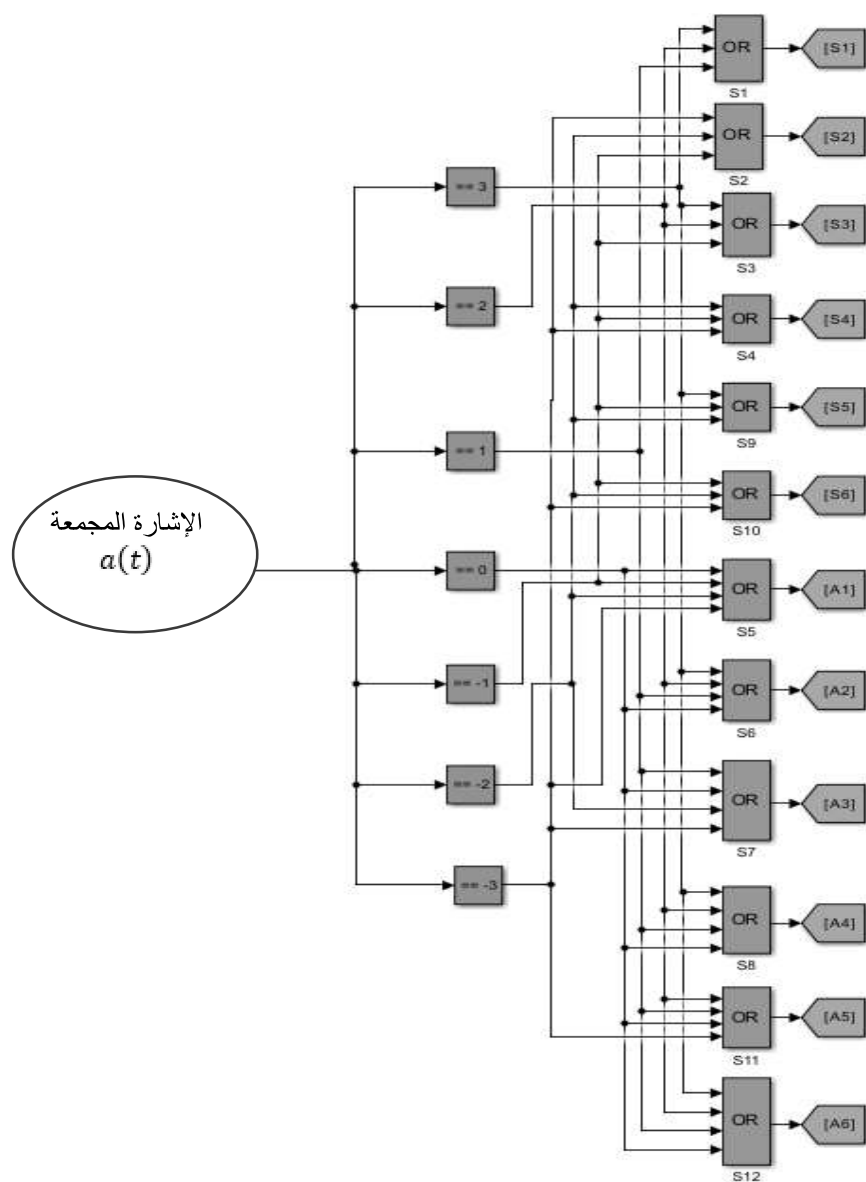
كل إشارة من الإشارات المشتقة لها وظائف تبديلية خاصة بها لتوليد مستوى الجهد المطلوب وفق بنية الإنفترت متعدد المستويات المتبعة، وبذلك نحصل على إشارات قيادة فعلية لعناصر إلكترونيات القدرة تأخذ بعين الاعتبار المفاتيح التي يجب أن تعمل معاً لضمان الحصول على شكل الموجة المطلوب بدون حدوث قصر [14].

فعلى سبيل المثال، لدينا المبدل الجسري التسلسلي الموضح بالشكل (7) مكون من ثلاث جسور (H-bridge) متصل على التسلسل، لكل منهما مصدر جهد V_{DC} ، شكل موجة جهد الخرج الناتج مكون من سبع مستويات:

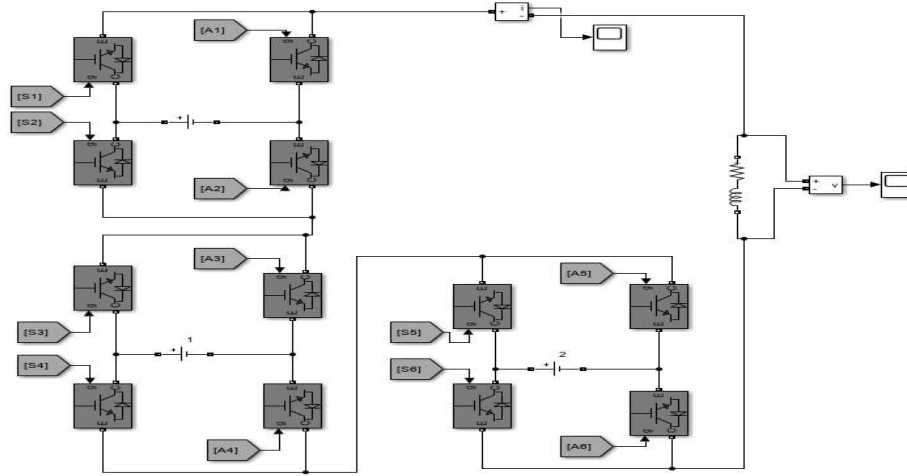
$$\bar{3}V_{DC}, \bar{2}V_{DC}, \bar{1}V_{DC}, 0 = V_{out} \quad (2)$$

بشكل يتوافق مع الإشارة المجمعة $a(t)$ في النموذج الموضح بالشكل (7) والذي يمثل دائرة القدرة لإنفترت تسلسلي ذو سبعة مستويات، حيث تم تصميمه لتوليد جهد خرج متعدد المستويات باستخدام تكوينات جسور H-Bridge مع مصادر جهد متعددة. تتكون الدارة من مفاتيح قدرة (IGBTs) منظمة في مجموعات من الجسور، حيث يحتوي كل جسر على أربعة مفاتيح قادرة على توليد جهد موجب، سالب، أو صفر، وذلك وفقاً لنمط تشغيل المفاتيح. ويتم تقسيم مصادر الجهد

إلى مستويات مختلفة (مثل 1 و 2) وتوصيلها بالجسور لتوليد تنوع في الإشارات الخارجة. تُرسل إشارات التحكم (Gate signals) إلى المفاتيح لتحديد تشغيل كل جسر وتوليد الإشارة النهائية. ويتم قدح عناصر الكترونيات القدرة (Mosfet) انطلاقاً من الإشارات المولدة في النموذج الموضح بالشكل (6) [15,16].



الشكل رقم (6): نموذج توليد نبضات القيادة الفعلية لإنفتر تسلسلي ذو سبع مستويات.



الشكل رقم (7): دائرة القدرة لإنفرتتر تسلسلي ذو سبع مستويات.

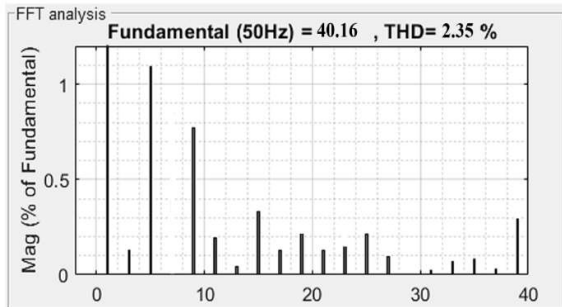
3-5 نمذجة الإنفرتتر التسلسلي ذو سبع مستويات أحادي الطور:

عند محاكاة عمل الإنفرتتر التسلسلي ذو سبع مستويات أحادي الطور الموضحة بالشكل (7) باستخدام برنامج Matlab/Simulink، باستخدام استراتيجية التعديل (APOD) وعند تردد موجة حامل $3000 H_z$ ، خرج الإنفرتتر متصل بحمولة قيمتها $Z_L = 10 + 0.004j$.

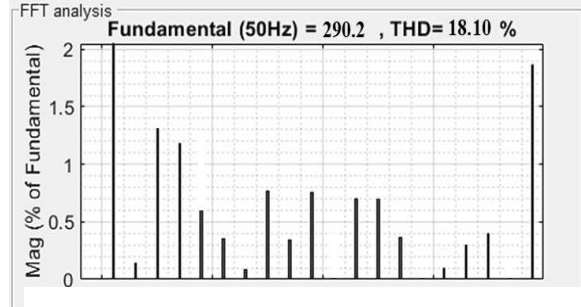
إشارة موجة جهد وتيار الحمل للإنفرتتر، عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة الجهد كان بقيمة 18.10% كما هو موضح بالشكل (8)، في حين أن معدل التشوه التوافقي لموجة التيار الناتجة 2.35% كما هو موضح بالشكل (9) وباستخدام العلاقة التالية:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} * 100\% \quad (3)$$

حيث: I_n : قيمة التيار لكل توافقي، I_1 : قيمة التيار للمكون الأساسي.



الشكل رقم (9): التحليل التوافقي لموجة تيار الحمل الإنفرتتر التسلسلي ذو سبع مستويات.

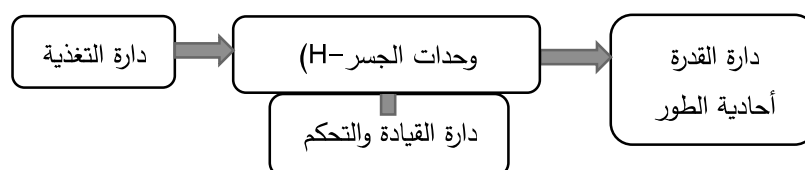


الشكل رقم (8): التحليل التوافقي لموجة جهد الإنفرتتر التسلسلي ذو سبع مستويات

6. النتائج:

1-6 تصميم وتنفيذ دائرة الإنفرتتر التسلسلي ذو سبع مستويات:

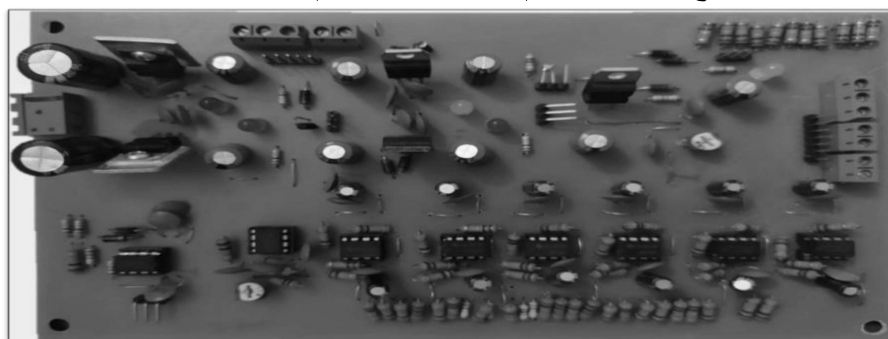
يوضح الشكل (10) المخطط العام للإنفرتير التسلسلي المنفذ.



الشكل رقم (10): المخطط العام للإنفرتير التسلسلي.

2-6 دائرة التغذية:

تقوم هذه الدارة بتأمين جهود التغذية الضرورية لعمل المعالج والدارات التكاملية المستخدمة، فهي تحتوي على مجموعة من منظمات الجهد المخصصة لتوليد الجهود اللازمة، الشكل (11) يوضح مخطط دائرة التغذية، كما تحتوي دائرة التغذية على مولد للموجة الحاملة المثلثية يعمل على توليد نبضة مثلثية بتردد 3000 Hz، بالإضافة إلى وجود مجموعة من دارات الإزاحة للحصول على ستة إشارات مثلثية مزاحة عن بعضها، لتتم مقارنتها لاحقاً في دائرة القيادة مع الموجة الجيبية أحادية الطور للحصول على نبضات القدح وفق استراتيجية (PD-POD-APOD).



الشكل رقم (11): دائرة التغذية العملية.

3-6 دائرة القيادة:

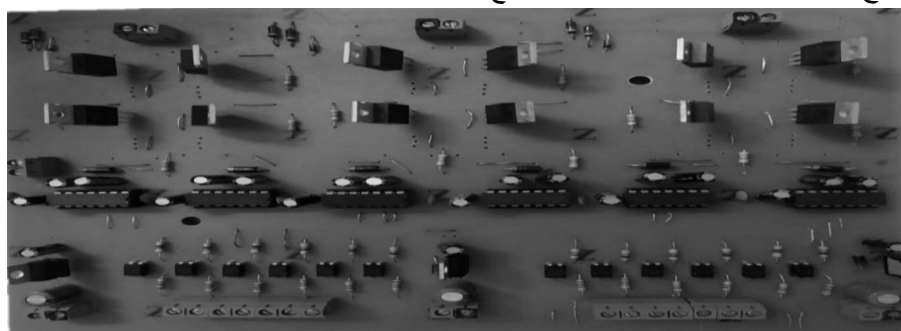
تقوم دائرة القيادة الموضحة بالشكل (12) بتوليد نبضات القيادة الفعلية لعناصر إلكترونيات القدرة وذلك وفق نظام التحكم العام بالإنفرتير متعددة المستويات، حيث تحتوي على معالج ذكي من نوع Arduino Nano يعمل على توليد إشارة مرجعية جيبية أحادية الطور بتردد 50 هرتز. لمقارنتها مع الإشارة الحاملة وفق استراتيجية (PD-POD-APOD)، كما تعمل دائرة القيادة على توجيه نبضات القدح لعناصر إلكترونيات القدرة بحيث يتم تحديد العناصر التي ستعمل معاً، وذلك لضمان الحصول على شكل الموجة المطلوب وفق بنية الإنفرتير التسلسلي CHB-7I أحادي الطور.



الشكل رقم (12): دائرة القيادة العملية.

4-6 دائرة القدرة الإلكترونية:

تتكون الدارة من ثلاث دارات إنفرتير جسيه H-bridge متصلة بشكل متسلسل مع بعضها البعض لتشكل دائرة القدرة للإنفرتير التسلسلي ذو السبع مستويات أحادي الطور كما هو موضح بالشكل (13). حيث تم الاعتماد على عنصر إلكترونيات القدرة من نوع (MOSFET IRF840)، كما تم استخدام دائرة قيادة خاصة (IR2110) لفتح عنصر إلكترونيات القدرة بما يتوافق مع النبضات الواردة من دائرة القيادة.



رقم (13):

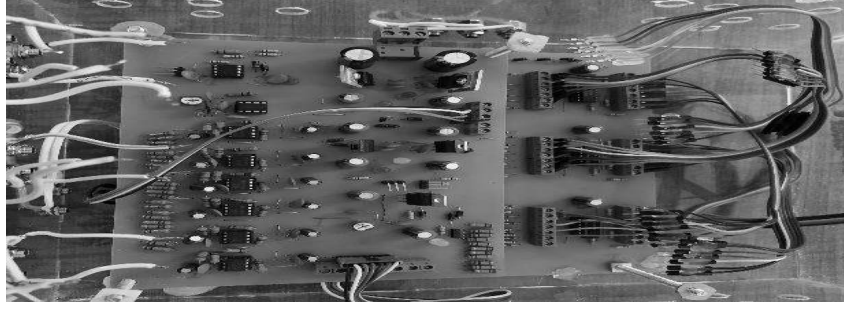
الشكل

دائرة القدرة العملية المنفذة.

5-6 اختبار أداء الإنفرتير التسلسلي ذو السبع مستويات:

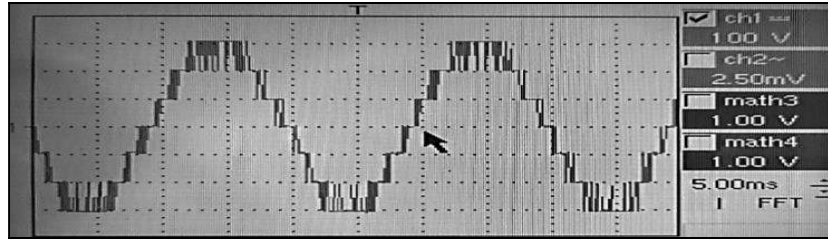
يوضح الشكل (14) الدارة العملية للإنفرتير التسلسلي ذو سبع مستويات، حيث تم اختبار أداء الإنفرتير لتحديد استراتيجية التعديل الأفضل بين استراتيجيات (PD-POD-APOD) للحصول على موجة جهد بأقل معدل تشوه توافقي بدون استخدام مرشحات مع تحديد تردد التعديل المناسب.

بالإضافة لتحديد تأثير زيادة عدد مستويات موجة الجهد على معدل التشوه التوافقي حيث تسمح الدارة المنفذة بتطبيق حالة الإنفرتير ذو الخمس مستويات وذو السبع المستويات، وقياس معدل التشوه التوافقي تم استخدام جهاز محلل الاستطاعة .Power Analyzer



الشكل رقم (14): دائرة الإنفترت التسلسلي ذو سبع مستويات.

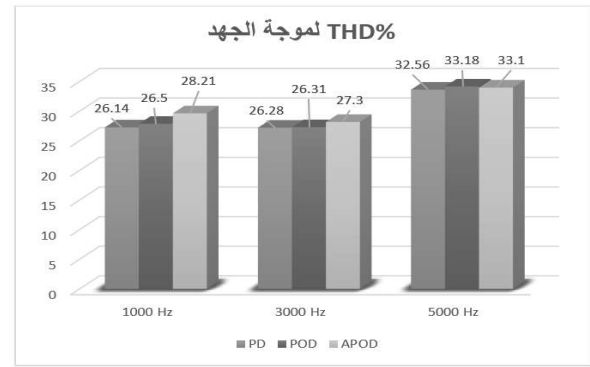
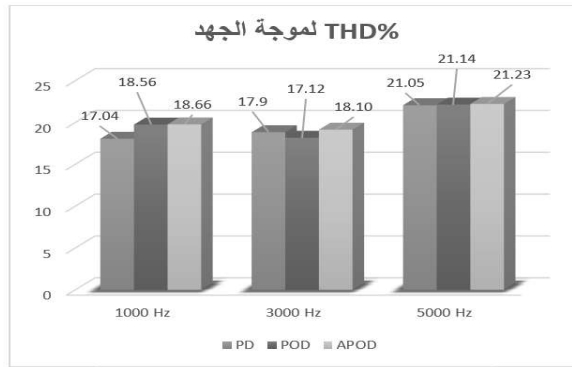
يوضح الشكل (15) شكل موجة الجهد ذات سبع مستويات باستخدام استراتيجية التعديل PD-PWM على راسم الإشارة، حيث نلاحظ مطال الإشارة (310 V) بقيم فعالة قدرها (220 V) والتردد (50 Hz).



الشكل رقم (15): إشارة جهد الخرج أحادية الطور ذات سبع مستويات.

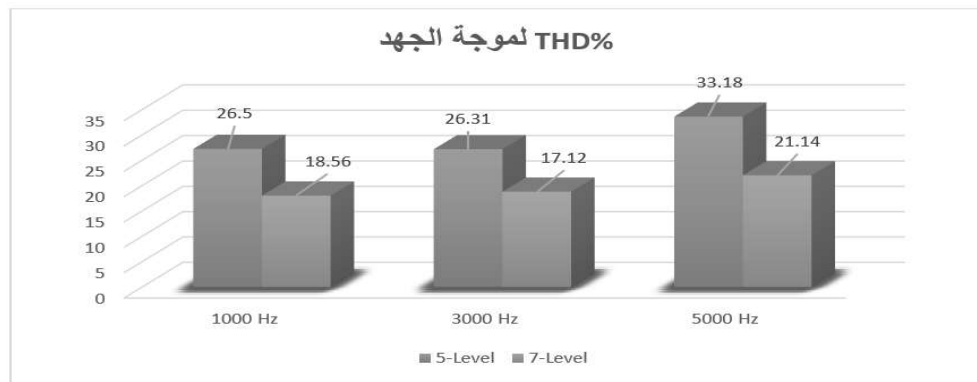
7. مناقشة النتائج:

- تم تطبيق استراتيجيات التعديل PD-POD-APOD لتوليد نبضات القدح لنموذجين من دائرة القدرة متعددة المستويات التسلسلية (CHB-5, CHB-7) عند ترددات تبديل مختلفة (تردد إشارة الموجة الحاملة)، فكان معدل التشوه التوافقي THD لكل طريقة على حدى موضحة بالمخططات البيانية التالية، حيث نلاحظ العلاقة بين ترددات التبديل المختلفة واستراتيجية التعديل المتبعة لتوليد نبضات القدح لعناصر إلكترونيات القدرة، وكذلك تأثير زيادة عدد مستويات موجة الجهد على قيمة معدل التشوه التوافقي للموجة الناتجة، حيث أن:
- يظهر أقل معدل تشوه توافقي عند تردد تبديل $3000 H_z$ ، وذلك عند استراتيجيات التعديل المختلفة، وعند عدد مستويات جهد مختلفة، كما هو موضح بالشكلين (16)، (17).
- يتناسب معدل التشوه التوافقي THD عكسياً مع عدد مستويات الجهد، كما هو موضح في الشكل (18)، حيث تُظهر استراتيجية تعديل POD أن موجة الجهد ذات سبع مستويات تملك أقل معدل تشوه توافقي مقارنة بالمستويات الأخرى وعند ترددات تبديل مختلفة.
- عند تردد تبديل $5000 H_z$ كان معدل التشوه التوافقي لموجة الجهد الأعلى مقارنة بالترددات الأخرى.
- معدل التشوه التوافقي عند تردد $1000 H_z$ يكون متقارب بالقيمة مع المعدل عند تردد $3000 H_z$ ، وعليه فإنه عند ترددات التبديل المرتفعة نسبياً يزداد معدل التشوه التوافقي مع ازدياد التردد.
- أفضل معدل تشوه توافقي كان عند استراتيجيتي التعديل (POD) و (PD) حيث تتقارب معدلات التشوه التوافقي بينهما في حالة الإنفترت أحادي الطور.



الشكل رقم (17): معدل التشوه للإنفرتر التسلسلي (سبع مستويات)

الشكل رقم (16): معدل التشوه للإنفرتر التسلسلي (خمس مستويات)



الشكل رقم (18): معدل التشوه التوافقي عند استراتيجية POD

ويبين الجدول (1) مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال عملية النمذجة والتطبيق العملي:

الجدول رقم (1): مقارنة نتائج النمذجة والتطبيق العملي.

العامل	التطبيق العملي	النمذجة
تأثير عدد مستويات الجهد	معدل التشوه التوافقي (THD) يقل مع زيادة عدد مستويات الجهد.	أظهرت تقليلاً في (THD) مع زيادة عدد المستويات بسبب تقليل التوافقيات العالية.
تأثير تردد التبديل	عند تردد 3000 هرتز أظهرت أقل معدل تشوه توافقي بغض النظر عن استراتيجية التعديل.	كان تردد 3000 هرتز تردداً مثالياً لأن التردد المتوسط يقلل التوافقيات دون زيادة خسائر التبديل.

كما يوضح الجدول رقم (2) مقارنة النتائج العملية التي تم الحصول عليها مع نتائج الدراسات المرجعية.

الجدول رقم (2): مقارنة نتائج التطبيق العملي مع الدراسات المرجعية.

معدل التشوه التوافقي للدراسة المرجعية [17].	معدل التشوه التوافقي للمستويات	التقنية المستخدمة
(%)	(%)	
26.14%	26.69%	PD
26.28%	26.96%	POD
32.56%	37.13%	APOD
17.04%	18.05%	PD
17.90%	22.48%	POD
21.05%	25.20%	APOD

يوضح الجدول رقم (2) مقارنة دقيقة بين نتائج دراستنا العملية ونتائج الدراسة المرجعية [17] فيما يخص معدل التشوه التوافقي (THD) لنظام الإنفتر التسلسلي متعدد المستويات باستخدام استراتيجيات التعديل (PD، POD، APOD) وعند مستويين مختلفين من الجهد (5 و 7 مستويات). حيث أظهرت نتائجنا تفوقاً على نتائج الدراسة المرجعية، خاصة عند 7 مستويات، حيث سجلت استراتيجية POD أقل معدل تشوه توافقي بلغ 17.04% مقارنة بـ 18.05% في الدراسة المرجعية. أما عند 5 مستويات، فقد كانت النتائج أفضل في بحثنا لبعض الحالات. يُعزى هذا الأداء المتميز إلى التصميم المحكم للنظام، وجودة المكونات الإلكترونية المستخدمة، بالإضافة إلى الدقة في ضبط تردد التبديل وإشارات القيادة. تؤكد هذه النتائج فعالية النموذج المستخدم واستراتيجيات التعديل في تحسين جودة موجة الجهد الناتجة وتقليل معدل التشوه التوافقي، مما يعكس نجاح الدراسة في تحقيق أهدافها.

8. الاستنتاجات

- يتناسب معدل التشوه التوافقي عكسياً مع عدد مستويات موجة الجهد مما يعني أنه كلما ازداد عدد مستويات موجة الجهد انخفض معدل التشوه التوافقي.
- أقل معدل للتشوه التوافقي لموجة جهد الإنفتر التسلسلي ذو خمس مستويات أحادي الطور كان عند استراتيجية التعديل POD بتردد تعديل 3000 Hz حيث كانت قيمة معدل التشوه التوافقي تساوي 26.31%.
- أقل معدل للتشوه التوافقي لموجة جهد الإنفتر التسلسلي ذو سبع مستويات أحادي الطور كان عند استراتيجية التعديل POD بتردد تعديل 3000 Hz حيث كانت قيمة معدل التشوه التوافقي تساوي 17.12%.

9. التوصيات

- تصميم وتنفيذ دائرة المبدل التسلسلي ثلاثية الطور واختبار أدائها لتحديد أفضل استراتيجية تعديل تحقق أفضل معدل تشوه توافقي.

10. المراجع:

- [1] Ali, Abdelfatah, et al. "A comprehensive review on charging topologies and power electronic converter solutions for electric vehicles." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* (2023).
- [2] Debnath, Suman, et al. "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review." *IEEE transactions on power electronics* 30.1 (2014): 37–53.

- [3] Reddy, B. M., Chennaiah, P. B., & Chinnababu, J. (2024). Modelling of Symmetrical 13 Level and Asymmetrical 31 Level Generalized Cascaded Multilevel Inverters. In *Modern Approaches in Machine Learning and Cognitive Science: A Walkthrough: Volume 4* (pp. 169–191). Cham: Springer International Publishing.
- [4] T., Murali, Krishna., M., Soumya. (2023). 2. Simulation of Asymmetrical Seven Level Multi Level Inverter using MATLAB Simulink. *International Journal For Science Technology And Engineering*, doi: 10.22214/ijraset.2023.54733
- [5] Perarasi, M., Arunmozhi, R. V., Kumar, A., Whitin, P., & Sarala, B. (2024, October). Analysis of New Multilevel Inverter with Reduced Switched Components. In *2024 8th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)* (pp. 490–495). IEEE.
- [6] Juma'a, H., & Atyia, T. (2023). Design and Implementation of multi-level inverter for PV system with various DC Sources. *NTU Journal of Renewable Energy*, 5(1), 24–33.
- [7] Adrián, F., Peña-Delgado., C., A., Joers-Delgado., Amparo, González-Morales., Anette, Michel, Román-Rivera. (2023). 5. Eleven level multi-level inverter simulation platform. *Revista de simulación computacional*, doi: 10.35429/jcs.2023.17.7.17.23
- [8] Balal, Afshin, et al. "A review on multilevel inverter topologies." *Emerging Science Journal* 6.1 (2022): 185–200.
- [9] Gonzalez, Sergio Alberto, Santiago Andres Verne, and Maria Ines Valla. "Multilevel converters for industrial applications." CRC Press, 2013
- [10] Mehta, Shivinder, and Vinod Puri. "A review of different multi-level inverter topologies for grid integration of solar photovoltaic system." *Renewable energy focus* 43 (2022): 263–276.
- [11] Bano, Kalsoom, et al. "Phase Shift APOD and POD Control Technique in Multi-Level Inverters to Mitigate Total Harmonic Distortion." *Mathematics* 12.5 (2024): 656.
- [12] Gupta, Krishna Kumar, and Shailendra Jain. "Control of Multilevel Inverters With Reduced Device Count." *Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvements*. Academic Press, 2018. 121–149.

- [13] Khalili, T., Raihani, A., Bouattan, O., Ouajji, H., & Amri, F. "Analysis study of a cascaded h-bridge multilevel inverter dedicated to power bank usage," *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 88(3).2016).
- [14] Gupta, Krishna Kumar, and Pallavee Bhatnagar. "Multilevel inverters: conventional and emerging topologies and their control." Academic Press, 2017
- [15] Juma'a, Hameed, and Thamir Atyia. "Design and Implementation of multi-level inverter for PV system with various DC Sources." *NTU Journal of Renewable Energy* 5.1 (2023): 24–33.
- [16] Singh, Shubham, et al. "Matlab Simulation Study and Comparison of Different Multiple Carrier PWM Schemes For Multi Level CHB Inverter." *2020 IEEE first international conference on smart Technologies for Power, energy and control (STPEC)*. IEEE, 2020.
- [17] Rathore, S., Kirar, M. K., & Bhardwaj, S. K. (2015). Simulation of cascaded H-bridge multilevel inverter using PD, POD, APOD techniques. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ)*, 4(3), 27–41.