

# العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة من مستمر إلى متناوب

م. داني ابراهيم\* م. كلودا ابراهيم\*\*\*

م. أحمد اسكندر\*

## ملخص

تم في هذا البحث تحديد استراتيجية التعديل الأنسب لقيادة العاكس التسلسلي متعدد المستويات Cascaded H-Bridge-MLI لتحسين كفاءة تحويل القدرة من شكلها المستمر إلى المتناوب، وذلك من خلال توضيح نظام التحكم العام بالعاكس متعددة المستويات واختبار ثلاث استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات القدر لعناصر إلكترونيات القدرة لتحديد الاستراتيجية الأفضل بينها، ومن ثم مقارنتها مع دائرة العاكس التقليدية LEVEL-2.

تمت محاكاة النظام باستخدام برنامج Matlab/ Simulink، حيث أظهرت النتائج تفوق استراتيجية (Phase Disposition (PD- Pwm حيث كان معدل التشوه التوافقي THD لموجة الجهد والتيار أقل ما يمكن مقارنةً مع الاستراتيجيات الأخرى، وذلك عند ترددات موجة حامل مختلفة بالإضافة إلى دراسة تأثير عدد مستويات الجهد على معدل التشوه التوافقي THD، فعند محاكاة دائرة العاكس التسلسلي ثلاثي الطور ذو سبع مستويات يعتمد على استراتيجية (PD- PWM) عند تردد موجة حامل 3000 Hz لم يتجاوز معدل التشوه التوافقي THD لموجة الجهد قيمة 11%، في حين أنه في العاكس التقليدي LEVEL-2 كان معدل التشوه التوافقي THD لموجة الجهد حوالي 66%، وهذا يوضح أهمية MLI لتحسين كفاءة التحويل.

**الكلمات الرئيسية** – العاكس متعدد المستويات، العاكس الجسري التسلسلي، Multicarrier

PWM، معدل التشوه التوافقي THD.

العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

---

\*ماجستير هندسة الأتمتة الصناعية. كلية الهندسة التقنية. جامعة طرطوس. سوريا

[.danyibrahim2@gmail.com](mailto:danyibrahim2@gmail.com)

\*\*ماجستير هندسة الطاقة الشمسية والطاقات المتجددة. كلية الهندسة التقنية. جامعة طرطوس. سوريا.

\*\*\*ماجستير هندسة تكنولوجيا المعلومات. كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات. جامعة

طرطوس. سوريا.

# Three phase Cascaded H-Bridge multilevel inverter to improve energy conversion efficiency from DC to AC

Eng. Danny Ibrahim\*

Eng. Ahmad Iskandar\*\*

Eng. Kloda Ibrahim\*\*\*

## Abstract

In this research, we identified the best modulation strategy for driving Cascaded H-Bridge multilevel inverter to improve the efficiency of converting power from its continuous to alternating form, by explaining the Universal control scheme of multi-level inverters and testing three different strategies to generate pulses for Power electronics elements and determining the best strategy between them, then compare it with the traditional 2-LEVEL inverter circuit .

We simulated the system using Matlab / Simulink. The results showed the superiority of Phase Disposition (PD-PWM) strategy, where the THD ratio of the voltage and current wave was minimal compared to the other strategies at different carrier wave frequencies in addition to studying the effect of the number of voltage levels on THD ratio, and when we simulated a three phase (Cascaded H-Bridge 7 level) inverter circuit based on PD-PWM strategy at 3000 Hz carrier wave frequency, the THD ratio of voltage wave has not exceed 11%, While in the traditional 2-LEVEL inverter, the THD ratio of voltage wave is about 66%, which shows the importance of MLI to improve conversion efficiency.

**Keywords** — Multilevel inverters, Cascaded H-Bridge, Multicarrier PWM, Total harmonic distortion.

العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

---

---

*\*Master of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria, [danyibrahim2@gmail.com](mailto:danyibrahim2@gmail.com).*

*\*\*Master of Engineering Solar Energy and Renewable energies, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria.*

*\*\*\*Master of Information Technology, Faculty of Information and Communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.*

## 1. المقدمة:

أدى التطور الكبير في مجال إلكترونيات القدرة الكهربائية، إلى تحسين كبير في الأنظمة الإلكترونية للطاقة، حيث أصبحت الدارات المختلفة وبالتحديد التي لم يكن من الممكن تطبيقها نظراً للتعقيد الكبير في التحكم بها، محطاً اهتمام الكثير من الباحثين ومنها تقنية العاكس متعدد المستويات عند ترددات تبديل منخفضة مع معدل تشوه توافقي (THD) منخفض، حيث برزت أهمية هذا النوع من المحولات في التطبيقات التي تتطلب طاقة متوسطة وعالية لتحسين كفاءة تحويل هذه الطاقة من شكلها المستمر إلى المتناوب [1].

تم إدخال مفهوم العاكس متعدد المستويات منذ عام 1975، من خلال وضع مجموعة من خلايا DC بشكل متسلسل لتوليد جهد متناوب AC ومعه بدأ مصطلح Multilevel [6]، ومنذ ذلك الوقت تم تطوير العديد من طوبولوجيا العاكس المتعدد المستويات، فعلى الرغم من ظهور هذه التكنولوجيا باكراً، إلا أن التعقيد الكبير في قيادتها جعل من غير الممكن استخدامها دون الاعتماد على تقنيات التحكم الرقمية.

### 1.1 مميزات العاكس متعدد المستويات

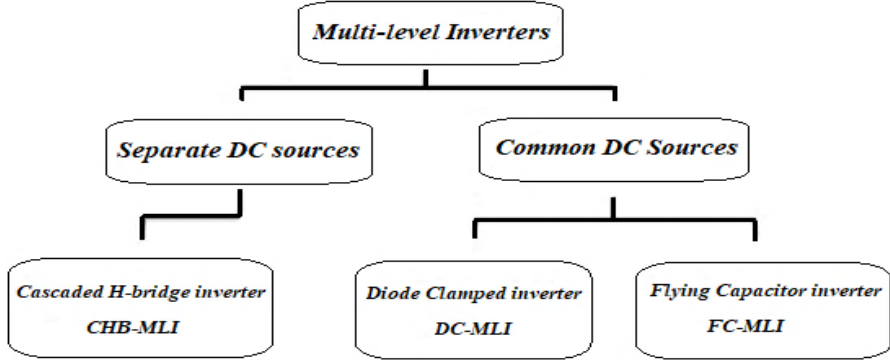
تشمل المزايا الأساسية للعاكس متعددة المستويات على قدرة تحمل للجهود العالية مع ضياعات تبديل منخفضة جداً، انخفاض معدل  $dv/dt$ ، ومعدل التشوه التوافقي THD المنخفض، والتداخل الكهرومغناطيسي المنخفض. وعليه نستنتج من المميزات السابقة أن هذا النوع من العواكس يتمتع بكفاءة تحويل عالية جداً مقارنة مع العاكس التقليدي كما أنه مناسب لتطبيقات توليد الطاقة انطلاقاً من المنظومات الكهروضوئية [1,7,11].

### 1.2 أشهر أنواع العواكس متعدد المستويات

يوضح الشكل (1) أشهر أنواع العواكس متعددة المستويات، وفيما يلي ميزات وسيئات كل

منها [10]:

العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب



الشكل 1: أشهر أنواع العواكس متعددة المستويات

1-Diode Clamped Multilevel Inverter (DC-MLI)-1

المميزات:

- تقنية التحكم أقل تعقيد.
- كلما ازداد عدد مستويات الجهد قل معدل التشوه التوافقي مع تجنب وجود دائرة مرشح.

المساوي:

- كلما ازداد عدد مستويات الجهد، يزداد عدد الديوتات المستخدمة في الدارة.
- جهد الخرج له مطال يساوي نصف قيمة منبع DC.

2-Flying Capacitor Multilevel Inverter (FC-MLI)-2

المميزات:

- كلما ازداد عدد مستويات الجهد يتم تقليل معدل التشوه مع تجنب دارات المرشحات.
- كمية كبيرة من القدرة المخزنة ضمن المكثفات.

المساوي:

- تكنولوجيا التحكم يمكن أن تكون معقدة.
- ضياعات التبديل كبيرة جداً.

3-Cascaded H-bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI)-3

المميزات:

- معدل التشوه منخفض جداً.

• يحتاج إلى عناصر أقل لكل مستوى مقارنة بالأنواع الأخرى.

المساوي:

• يحتاج لمصدر جهد مستمر DC منفصل لكل مستوى.

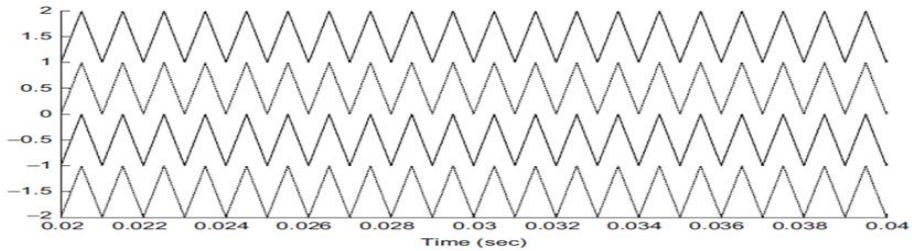
### 1.3 استراتيجية التعديل لتوليد نبضات القذح لـ MLI

العواكس متعددة المستويات (MLIs) عبارة عن دوائر تقوم بتحويل مصادر التيار المستمر DC المتعددة إلى شكل موجي AC متدرج، لذلك فإن مفاتيح القدرة هي مفاتيح مقادة لا يتم تشغيلها إلا في وضعين إما ON (تشغيل) أو OFF (إطفاء).

يُطلق على العملية التي يتم التحكم فيها بقذح عناصر إلكترونيات القدرة للحصول على موجة الجهد المطلوبة بالتعديل، فهناك عدد كبير من استراتيجيات التعديل التي هي موضوع بحث مكثف لسنوات عديدة من أجل التحكم بالعواكس متعددة المستويات (MLIs)، فلكل بنية معينة هناك استراتيجيات تعديل مفضلة مرتبطة بها [8, 9].

تم اقتراح العديد من طرق التعديل الخاصة بالعواكس متعددة المستويات، ومن بينها تقنيات Multicarrier PWM وفقاً لإشارات الموجة الحاملة، حيث تعتمد على موضع إشارات الموجة الحاملة ومطالها وترددتها ومدة تداخلها مع بعضها البعض، ومن أشهر هذه التقنيات:

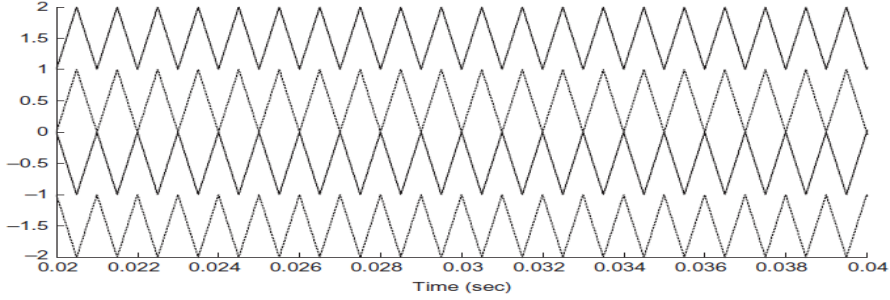
1- Phase Opposition Disposition (POD-PWM): في هذه التقنية، تكون كل إشارات الموجة الحاملة لها طور ثابت ومطالها مزاح بقيمة ثابتة عن بعضها البعض، ويكون الصفر المرجعي في منتصف الإشارات الحاملة كما هو موضح بالشكل (2).



الشكل 2: استراتيجية (PD-PWM)

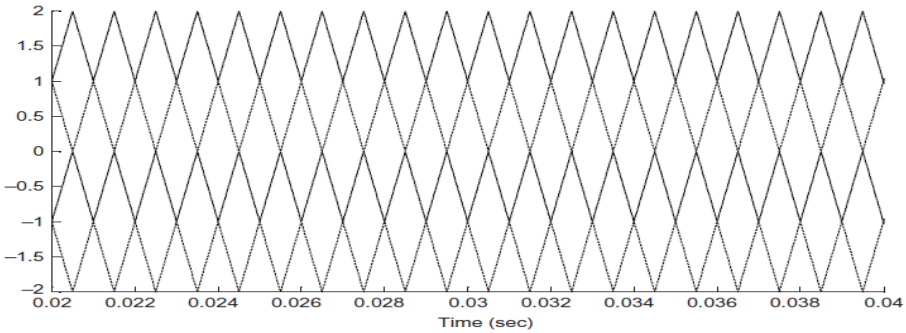
العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

2- Phase Opposition Disposition (POD-PWM): في هذه التقنية، تكون إشارات الموجة الحاملة الأعلى من الصفر المرجعي بنفس الطور، وكذلك إشارات الموجة الحاملة الأدنى من الصفر المرجعي تكون بنفس الطور، ولكن طور إشارات الموجة الحاملة العلوية يكون بفارق 180 درجة عن إشارات الموجة الحاملة السفلية، كما هو موضح بالشكل (3).



الشكل 3: استراتيجية (POD-PWM)

3- Alternative Phase opposition Disposition (APOD-PWM): تكون إشارات الموجة الحاملة مزاحة بالطور بالتناوب عن بعضها البعض بمقدار 180 درجة، كما هو موضح بالشكل (4).



الشكل 4: استراتيجية (APOD-PWM)



## 2. أهداف البحث

يهدف هذا البحث لتحديد الاستراتيجية الأنسب لتصميم دارة عاكس تسلسلي متعدد المستويات ثلاثي الطور Cascaded H-Bridge-MLI يحقق أقل معدل تشوه توافقي لموجة جهد الخرج، وذلك من خلال محاكاة مبدأ عمله واختبار ثلاث استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات القذح لعناصر إلكترونيات القدرة لتحديد الاستراتيجية الأفضل بينها، ومن ثم مقارنتها مع دارة العاكس التقليدي 2-level.

## 3. منهجية البحث

في البداية سنعتمد إلى توضيح نظام التحكم العام (UCS) بالعواكس متعددة المستويات، ومن ثم استخدام برنامج Matlab Simulink لمحاكاة دارة العاكس متعدد المستويات (CHB-MLI) الأحادي والثلاثي الطور ذو 5 و 7 و 9 مستويات عند استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات القذح، ومن ثم إجراء تحليل فورييه باستخدام الأداة FFT Analysis للحصول على معدل التشوه التوافقي THD لكل من موجة الجهد والتيار الناتج عند ترددات مختلفة، ومن ثم مقارنة النتائج مع دارة العاكس التقليدي 2-Level.

### 3.1 نظام التحكم العام (UCS) Universal control scheme:

تم تطوير نظام تحكم عام بالعواكس متعددة المستويات، بطريقة يمكن من خلالها تطبيقها على جميع بنى العواكس متعددة المستويات كما هو موضح بالشكل (5)، بالنسبة للإنفرتر المطلوب التحكم به، نرسم لعدد مستويات موجة جهد الخرج بـ  $n_{levels}$  [2, 3].

في العاكس متعدد المستويات دائماً ما يكون  $n_{levels} \geq 3$ ، وبما أن المستوى 0 مهم جداً فهو يعتبر من ضمن مستويات موجة الجهد، لذلك فإن عدد مستويات موجة الجهد دائماً ما يكون فردياً، وبالتالي عدد المستويات الموجبة لموجة جهد الخرج التي تتكون من  $n_{levels}$  تعطى بالعلاقة التالية:

$$n = (n_{levels} - 1)/2$$

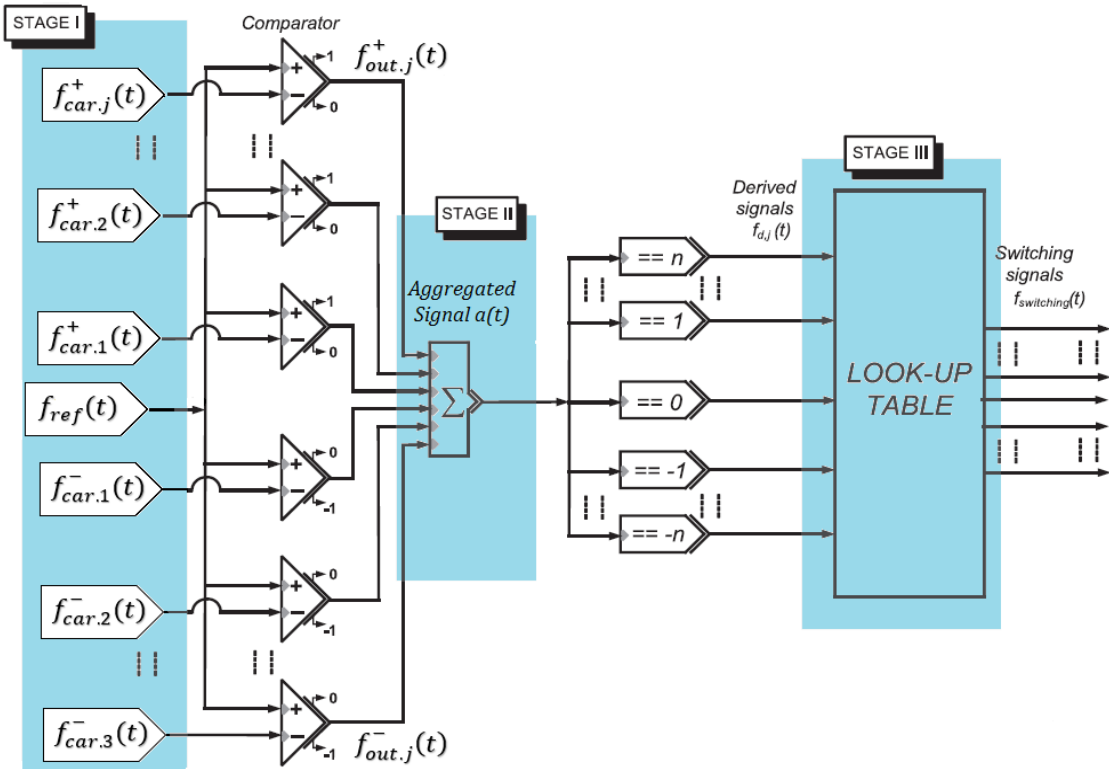
العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

في البداية يجب اختيار كل من الإشارة المرجعية (إشارة التعديل) وإشارة الموجة الحاملة، وذلك بعد تحديد الاستراتيجية المتبعة لتوليد نبضات القدح.

نرمز للإشارة المرجعية بـ  $f_{ref}(t)$ ، وتكون ذات مطال وتردد معين.

لكل  $n_{levels}$  من عدد مستويات موجة الخرج لدينا  $2n$  إشارة موجة حاملة  $f_{car}(t)$ ، لكل منها مطال وتردد معين.

نرمز لإشارات الموجة الحاملة الموجبة التي تقع وفق مستوى الصفر بالرمز  $f_{car.j}^+(t)$ ، وكذلك لإشارات الموجة الحاملة السالبة بالرمز  $f_{car.j}^-(t)$ ، حيث أن  $\{j = 1 \text{ to } n\}$ .



الشكل (5): نظام التحكم العام USC

بالنسبة إلى جميع إشارات الموجة الحاملة الأعلى من الإشارة الصفرية، يعطي كل مقارن "1" إذا كانت إشارة التعديل (الإشارة المرجعية) أكبر من إشارة الموجة الحاملة و "0" على خلاف ذلك [4].

بالنسبة إلى جميع إشارات الموجة الحاملة الأقل من الإشارة الصفرية، يعطي كل مقارن "0" إذا كانت إشارة التعديل أكبر من إشارة الموجة الحاملة و "-1" على خلاف ذلك. كما في العلاقة

$$\left. \begin{aligned} f_{out,j}^+(t) &= 1, \text{ for } f_{ref}(t) \geq f_{car,j}^+(t) \\ &= 0, \text{ otherwise} \\ f_{out,j}^-(t) &= 0, \text{ for } f_{ref}(t) \geq f_{car,j}^-(t) \\ &= -1, \text{ otherwise} \end{aligned} \right\} \text{لية:} \quad (8-2)$$

عند جمع نتائج المقارنة نحصل على إشارة تدعى بالإشارة المجمعة  $a(t)$  وتعطى بالعلاقة التالية:

$$a(t) = \sum_{j=1}^n \{f_{out,j}^+(t) + f_{out,j}^-(t)\}$$

من المهم جداً ملاحظة أن  $a(t)$  لها نفس الشكل الموجي لموجة جهد الخرج المتوقع.

تحتاج نبضات القيادة الفعلية لمفاتيح القدرة الإلكترونية وفق البنية المعتمدة للإنفرتير متعدد المستويات إلى الاشتقاق من الإشارة المجمعة  $a(t)$  باستخدام دوائر منطقية وجدول توجيه خاص لكل بنية من بنى العاكس متعدد المستويات لتجنب حدوث قصر في الدارة الإلكترونية.

تستمد التوابع المنطقية  $f_{d,j}(t)$  من الإشارة المجمعة  $a(t)$  وفق المعايير التالية:

$$\begin{aligned} f_{d,j}(t) &= 1, \text{ if } a(t) == j \\ &= 0, \text{ otherwise;} \end{aligned}$$

where,  $j = -n \text{ to } +n$

وبالتالي، سيتم الحصول على ما مجموعه  $n_{levels}$  من الإشارات المستمدة من الإشارة المجمع  $a(t)$  يستخدم كل منها لفتح المفاتيح الإلكترونية للحصول على المستوى المطلوب لموجة جهد الخرج [4].

يتميز المخطط العام للتحكم بثلاث مراحل كما هو مبين في الشكل (5):

1. المرحلة الأولى: في هذه المرحلة يتم تحديد كل من الإشارة المرجعية (إشارة التعديل) وإشارات الموجة الحاملة وذلك تبعاً لاستراتيجية التعديل المختارة، مع مراعاة بنية العاكس متعدد المستويات التي سيتم العمل من خلالها.

2. المرحلة الثانية: في هذه المرحلة يتم تشكيل الإشارة المجمع  $a(t)$  والتي تمثل بدورها الشكل المتوقع لإشارة موجة جهد الخرج للإنفرتير متعدد المستويات، وكذلك يتم استنتاج إشارات القيادة لعناصر القدرة الإلكترونية التي توافق كل مستوى من مستويات موجة الخرج.

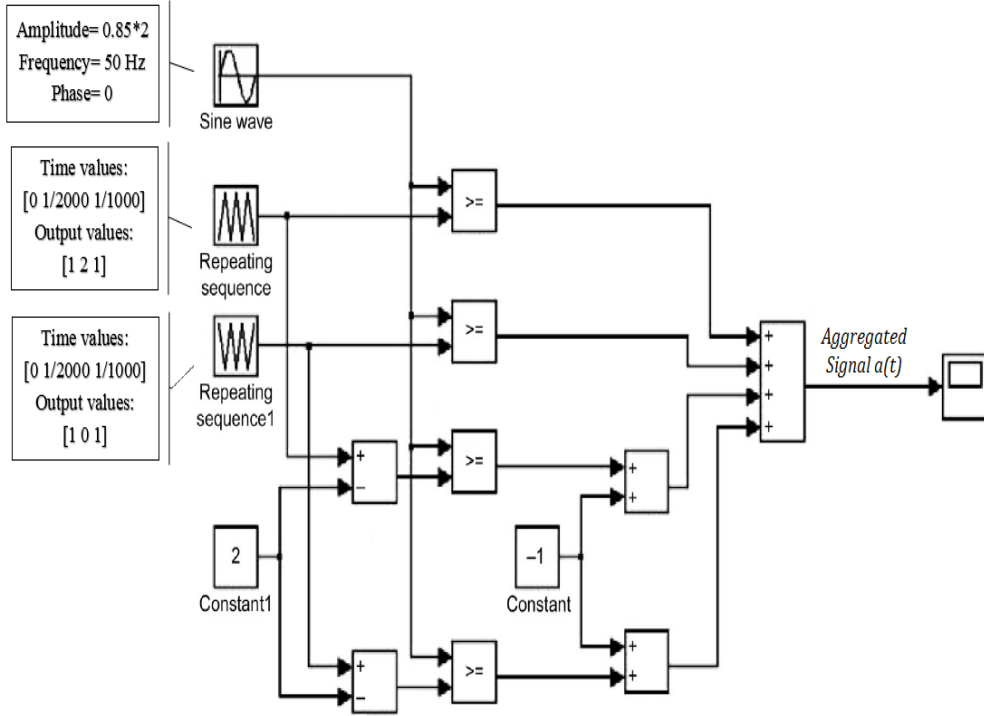
3. المرحلة الثالثة: في هذه المرحلة يتم صياغة جدول توجيه خاص ببنية العاكس متعدد المستويات المتبعة، وذلك لتوجه نبضات القيادة إلى عناصر القدرة الإلكترونية لتحديد العناصر التي ستعمل معاً، لضمان الحصول على شكل الموجة المطلوب وفقاً لبنية العاكس المتبعة.

وبالتالي فإن نظام التحكم العام قابل للتطبيق على جميع بنى العاكس متعدد المستويات [4].

### 3.2 نموذج توليد إشارة مجمع $a(t)$ ذات خمس مستويات:

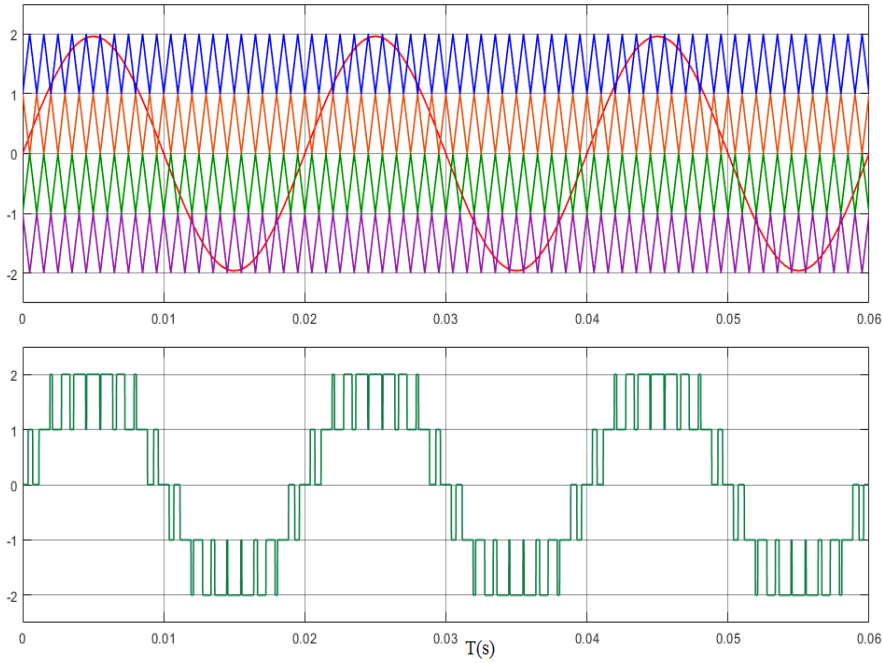
في البداية قمنا بتوليد إشارة  $a(t)$  وفق استراتيجية التعديل (APOD-PWM)، وبما أن الإشارة المجمع مكونة من خمس مستويات سنحتاج إلى إشارة جيبيية نقية كإشارة مرجعية وأربع إشارات حامل مثلثية، يوضح الشكل (6) نموذج Matlab / Simulink للحصول على الإشارة المجمع  $a(t)$ ، الشكل (7) يوضح الإشارة المرجعية وإشارات الحامل المثلثية مع الإشارة المجمع الناتجة [3,5].

تمثل الإشارة المجمعة  $a(t)$  شكل موجة جهد الخرج المتوقع عند أطراف العاكس حيث تُستمد إشارات القيادة الفعلية من هذه الإشارة وفق بنية العاكس متعدد المستويات المتبعة.



الشكل (6): نموذج للحصول على الإشارة المجمعة  $a(t)$  ذات خمس مستويات وفق استراتيجية APOD





الشكل (7): شكل الإشارة المرجعية مع إشارات الحامل المثبتة والإشارة المجمعة الناتجة

### 3.3 نموذج توليد نبضات القيادة الفعلية لإنفرتير تسلسلي (CHB-MLI) ذو خمس

مستويات:

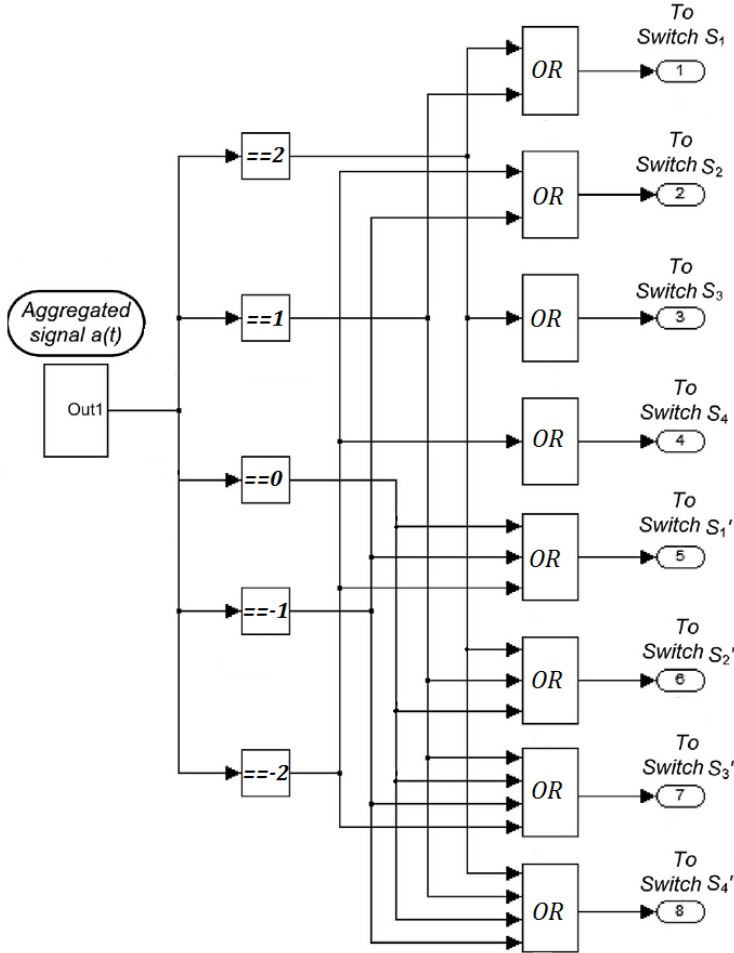
يتم الحصول على إشارات القيادة الفعلية لعناصر إلكترونيات القدرة انطلاقاً من الإشارة المجمعة  $a(t)$ ، نموذج Matlab / Simulink المقابل له موضح بالشكل (8). عدد الإشارات المشتقة من الإشارة المجمعة هو نفس عدد المستويات في شكل موجة جهد الخرج المرغوبة.

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

فعلى سبيل المثال، لدينا العاكس (CHB-MLI) الموضح بالشكل (9) مكون من جسرين (H-bridge) متصلين على التسلسل، لكل منهما مصدر جهد  $V_{DC}$ ، شكل موجة جهد الخرج

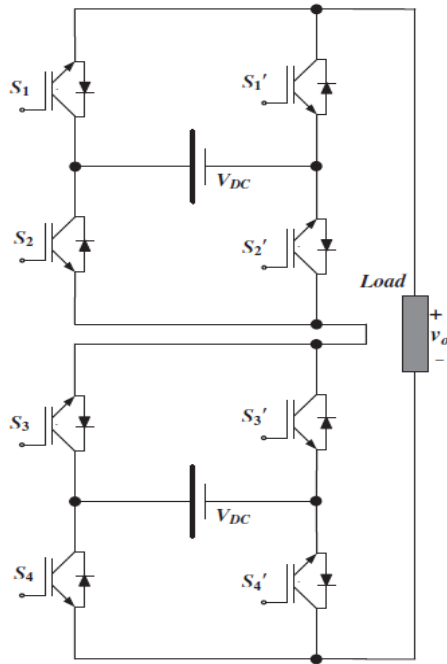
العكاس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

الناتج مكون من خمس مستويات  $\pm 2V_{DC}, \pm V_{DC}, 0$  بشكل يتوافق مع الإشارة المجمعة  $a(t)$ ، إشارات القيادة الفعلية في هذه الحالة تحتاج إلى اعتبارات تبديل محددة لعناصر القدرة، يتم تحديد هذه الاعتبارات وفق جدول توجيه يحدد العناصر التي ستعمل معاً لتوليد مستوى الجهد المطلوب وفق بنية العكاس المتبعة، كما هو موضح بالجدول (1) [4].



الشكل (8): نموذج توليد نبضات القيادة الفعلية لإنفرتير تسلسلي (CHB-MLI) ذو خمس مستويات





الشكل (9): دارة القدرة لإنفترت تسلسلي (CHB-MLI) ذو خمس مستويات

الجدول (1): جدول توجيه لإنفترت تسلسلي (CHB-MLI) ذو خمس مستويات

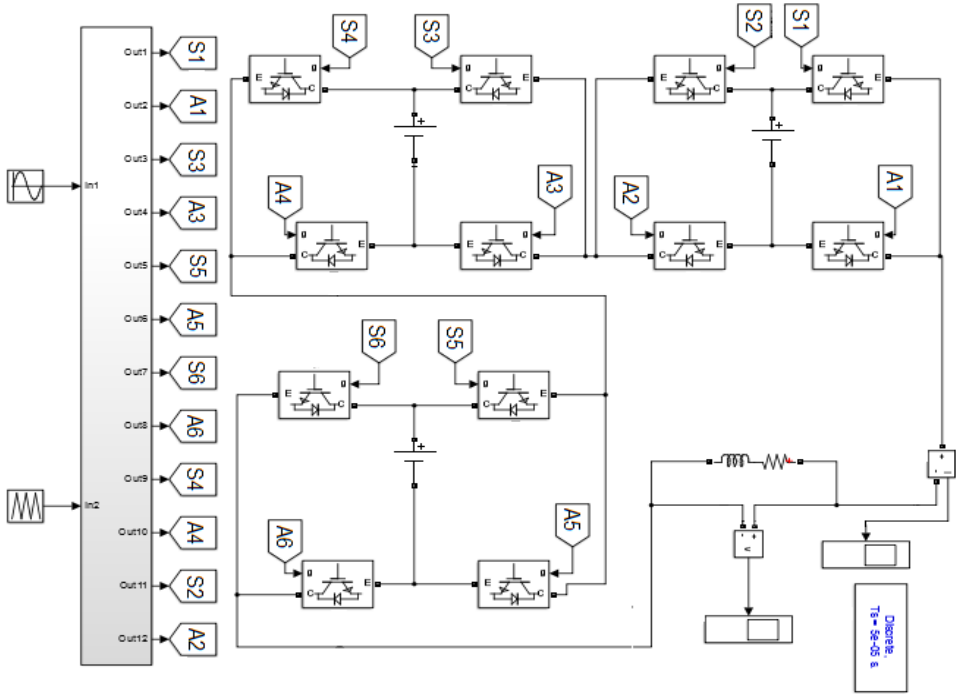
Level of Aggregated Signal $a(t)$	Output Voltage Level $V_o(t)$	Switches is ON State (Other Switches Remain OFF)
2	$+2 V_{DC}$	$S_1, S_2', S_3, S_4'$
1	$+V_{DC}$	$S_1, S_2', S_3', S_4'$
0	0	$S_1', S_2', S_3', S_4'$
-1	$-V_{DC}$	$S_1', S_2, S_3', S_4'$
-2	$-2 V_{DC}$	$S_1', S_2, S_3, S_4$

### 3.4 نمذجة العاكس التسلسلي (CHB-7 LEVEL) أحادي الطور:

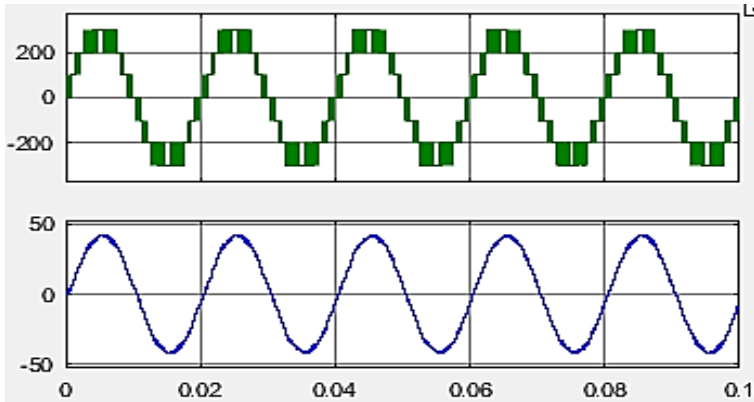
## العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة من مستمر إلى متناوب

يوضح الشكل (10) نموذج MATLAB / Simulink للعاكس التسلسلي (CHB) ذو سبع مستويات أحادي الطور، باستخدام استراتيجية التعديل (APOD-PWM) وعند تردد موجة حامل  $3000 \text{ Hz}$ ، خرج العاكس متصل بحمولة تحريضية قيمتها  $Z_L = 7 + 0.003j$ .

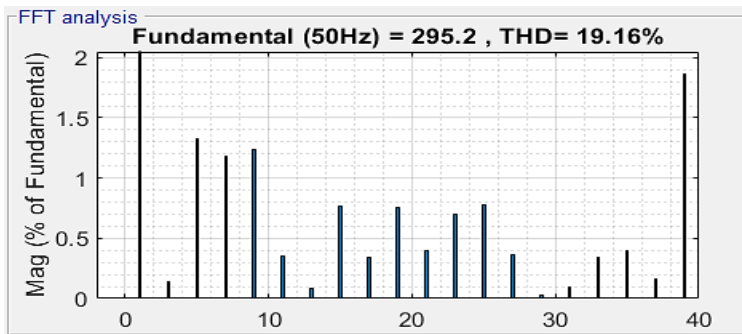
إشارة موجة جهد والتيار الحمل للعاكس موضحة بالشكل (11)، عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة الجهد كان بقيمة 19.16% كما هو موضح بالشكل (12)، في حين أن معدل التشوه التوافقي لموجة التيار الناتجة 2.69%، كما هو موضح بالشكل (13).



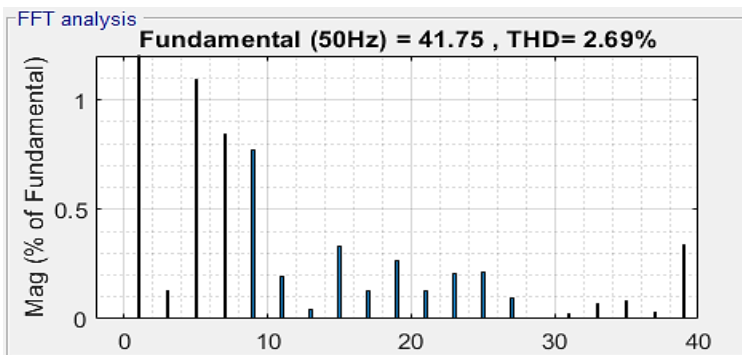
الشكل 10: نموذج MATLAB للعاكس (CHB-7 L)



الشكل 11: إشارة موجة جهد وتيار الحمل للعاكس (CHB-7 L)



الشكل 12: التحليل التوافقي لموجة جهد الخرج للعاكس (CHB-7 L)

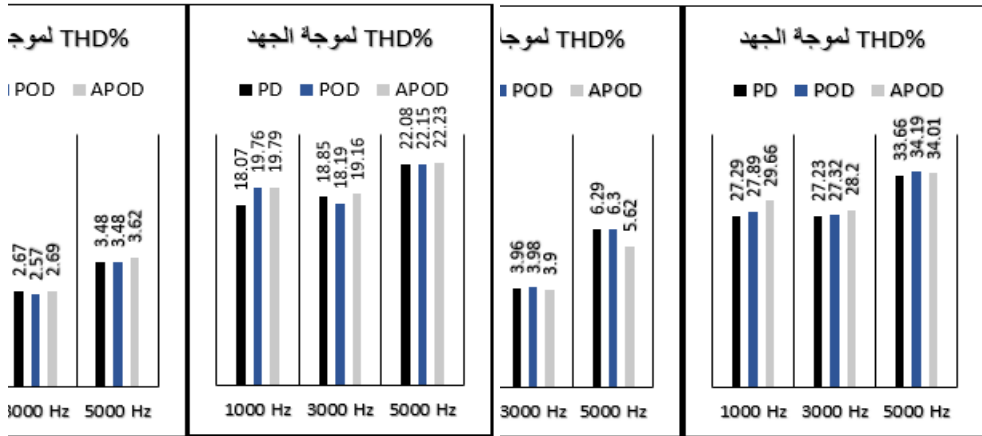


الشكل 13: التحليل التوافقي لموجة تيار الحمل للعاكس (CHB-7 L)

### 3.5 مقارنة بين أشهر استراتيجيات التعديل (PD-POD-APOD)

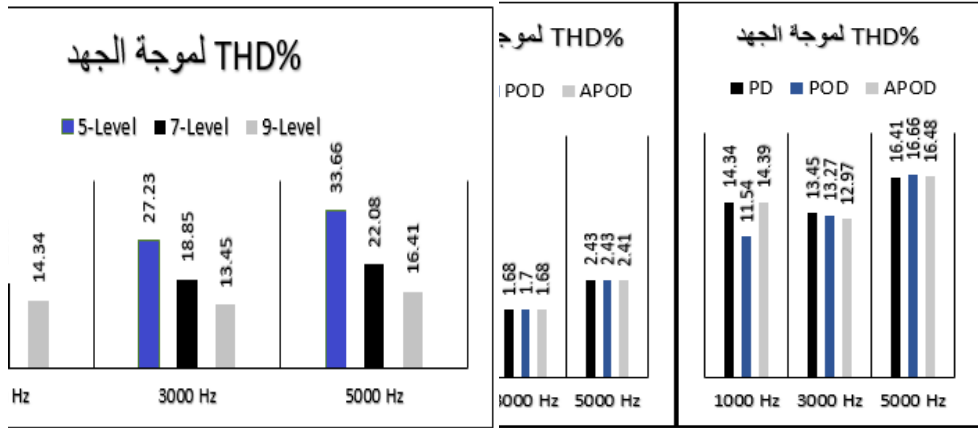
العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

تمت محاكاة أشهر استراتيجيات التعديل PD-POD-APOD لتوليد نبضات القرح لثلاث نماذج من العواكس متعددة المستويات التسلسلية (CHB-5, CHB-7, CHB-9) عند ترددات تبديل مختلفة (تردد إشارة الموجة الحاملة)، وبمحمولة تحريضية ثابتة لجميع النماذج  $Z_L = 7 + 0.003j$ ، 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 القرح لعناصر إلكترونيات القدرة، وكذلك تأثير زيادة عدد مستويات موجة الجهد على قيمة معدل التشوه التوافقي للموجة الناتجة، حيث أن:



الشكل 15: معدل التشوه التوافقي للعاكس التسلسلي CHB-7

الشكل 14: معدل التشوه التوافقي للعاكس التسلسلي CHB-5



الشكل 17: معدل التشوه التوافقي عند استراتيجية PD-PWM

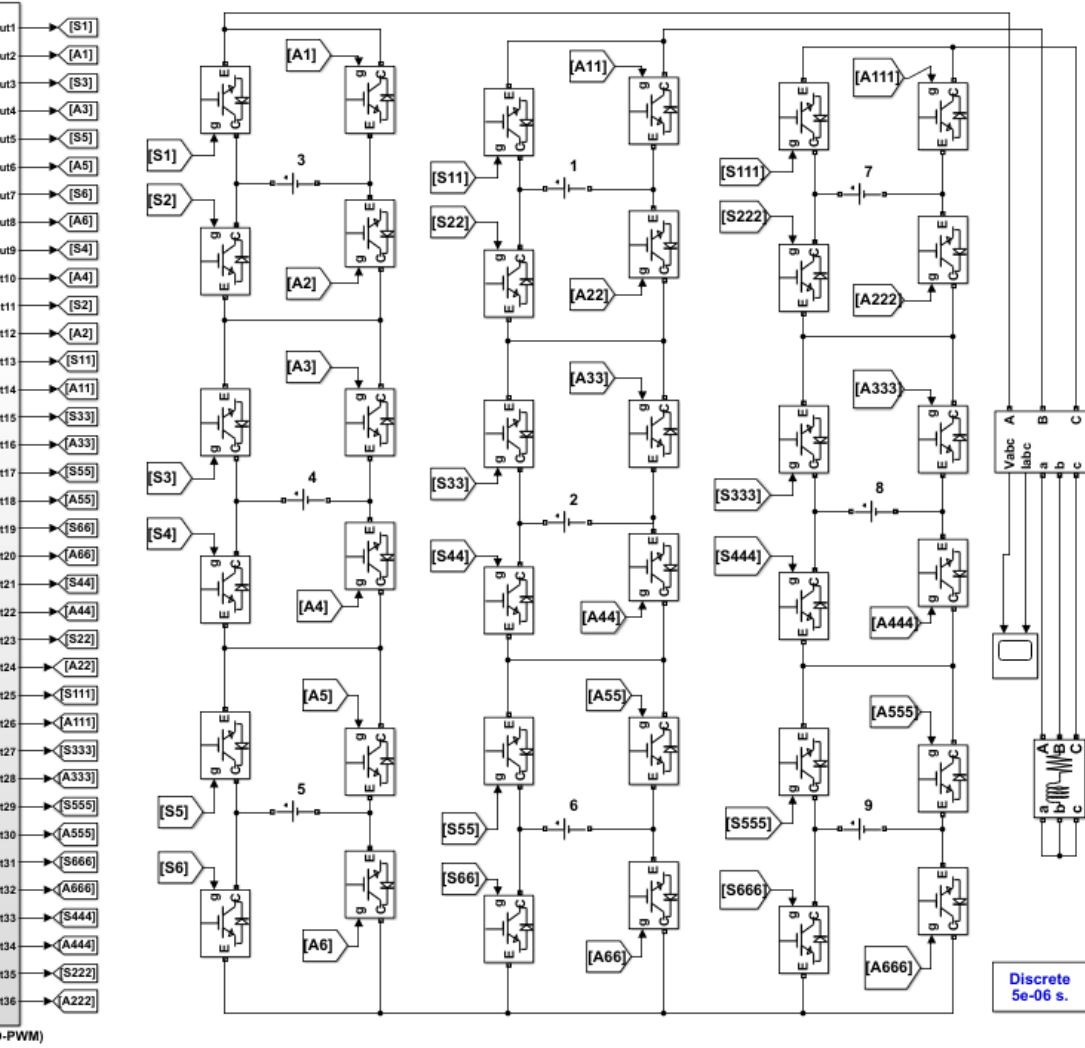
الشكل 16: معدل التشوه التوافقي للعاكس التسلسلي CHB-9

- أقل معدل تشوه توافقي عند تردد تبديل  $3000 H_z$ ، عند استراتيجيات التعديل المختلفة، وكذلك عند عدد مستويات جهد مختلفة، كما هو موضح بالشكل (14)، الشكل (15) والشكل (16).
- معدل التشوه التوافقي THD يتناسب عكساً مع عدد مستويات الجهد، كما هو موضح في الشكل (17)، حيث أنه عند استراتيجية تعديل PD-PWM كانت موجة الجهد ذات تسع مستويات تملك أقل معدل تشوه توافقي مقارنة بالمستويات الأخرى وعند ترددات تبديل مختلفة.
- عند تردد تبديل  $1000 H_z$  كان معدل التشوه التوافقي لموجة جهد وتيار الحمل الأعلى مقارنة بالترددات الأخرى.
- معدل التشوه التوافقي عند تردد  $5000 H_z$  أعلى منه عند تردد  $3000 H_z$ ، وعليه فإنه عند ترددات التبديل المرتفعة نسبياً يزداد معدل التشوه التوافقي طردياً مع ازدياد التردد.
- أفضل معدل تشوه توافقي كان عند استراتيجيتي التعديل (POD) و (PD) حيث تتقارب معدلات التشوه التوافقي بينهما في حالة العاكس أحادي الطور، ولتحديد الأفضل بينهما ندرس حالة العاكس ثلاثي الطور.

### 3.6 نمذجة العاكس التسلسلي (CHB-7 LEVEL) ثلاثي الطور:

العكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

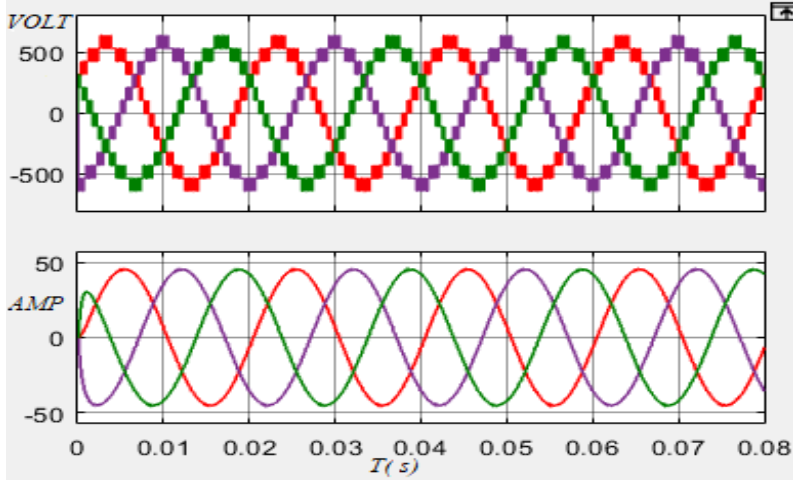
يوضح الشكل (18) نموذج MATLAB / Simulink للعكس التسلسلي (CHB) ذو سبع مستويات ثلاثي الطور، باستخدام استراتيجية التعديل (PD-PWM) وعند تردد موجة حامل  $3000 \text{ Hz}$ ، خرج العاكس متصل بحمولة تحريضية قيمتها  $Z_L = 7 + 0.003j$ .



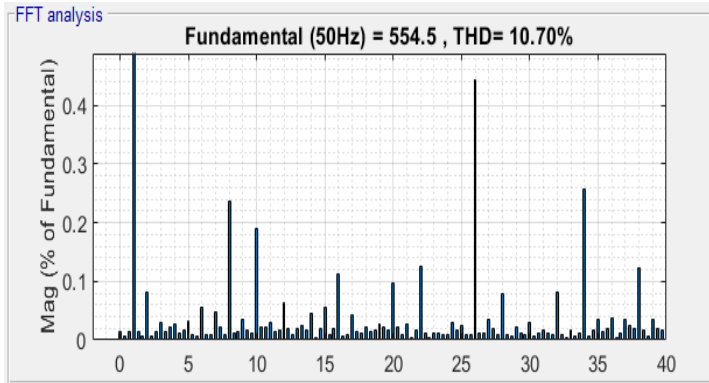
شكل 18: نموذج MATLAB للعكس (CHB-7) ثلاثي الطور

إشارة موجة جهد الخرج والتيار الحمل للعكس (CHB-7) ثلاثي الطور موضحة بالشكل (19)، عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة جهد الخط كانت بقيمة 10.70% كما هو

موضح بالشكل (20)، بينما معدل التشوه التوافقي لموجة تيار الخط الناتجة 0.85%، كما هو موضح بالشكل (21).

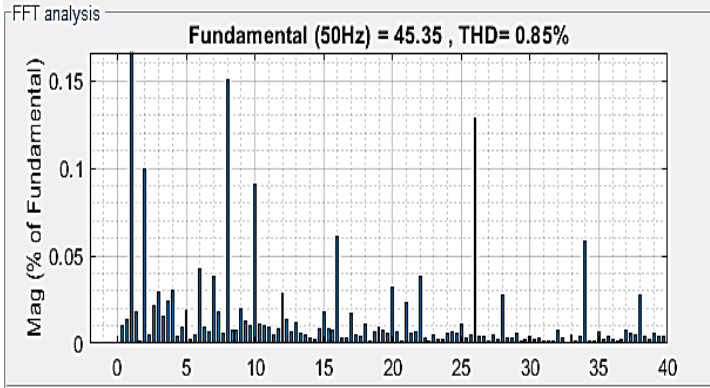


الشكل 19: موجة الجهد والتيار الحمل للعاكس (CHB-7) ثلاثي الطور



الشكل 20: THD لموجة جهد الخط للعاكس (CHB-7) ثلاثي الطور

العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب



الشكل 21: THD لموجة تيار الحمل للعاكس (CHB-7) ثلاثي الطور

تمت محاكاة استراتيجيات التعديل المختلفة لتوليد نبضات القدر على نموذج العاكس متعدد المستويات (CHB-7 LEVEL) ثلاثي الطور عند تردد تبديل 3000 Hz فكان معدل التشوه التوافقي THD الناتج لكل طريقة على حدى موضحاً بالجدول (2) التالي.

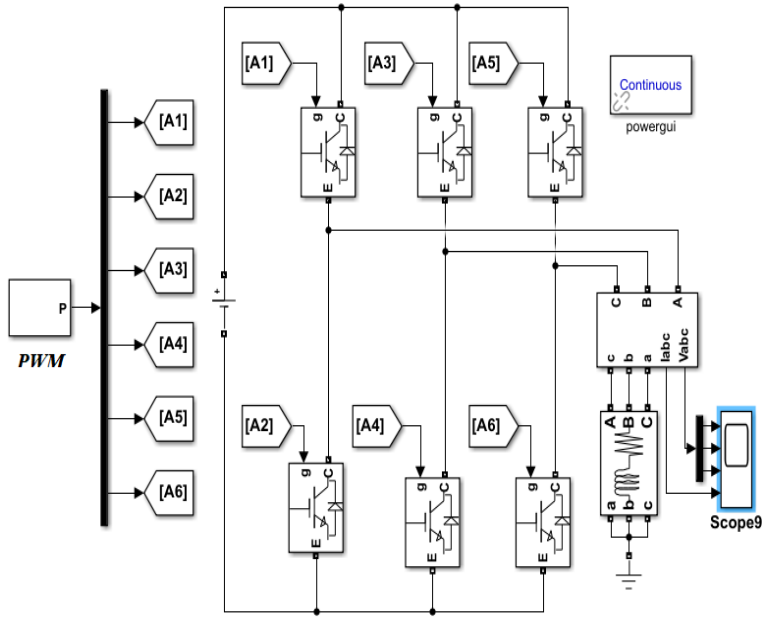
الجدول 2: معدل التشوه التوافقي للعاكس (CHB-7 L) ثلاثي الطور

تردد التبديل 3000 Hz					
PD-PWM		POD-PWM		APOD-PWM	
V line	I line	V line	I line	V line	I line
10.71%	0.86%	15.52%	1.58%	15.68%	<b>1.60%</b>

بناء عليه نلاحظ أن تقنية (PD-PWM) هي الأفضل من ناحية التشوه التوافقي THD مقارنة مع الطرق الأخرى، وعليه سنقوم بإجراء مقارنة مع دائرة العاكس التقليدية ثلاثية الطور.

يوضح الشكل (22) نموذج MATLAB / Simulink للعاكس ثلاثي الطور التقليدي ذو مستويين وعند تردد موجة حامل  $3000 \text{ Hz}$ ، خرج العاكس متصل بحمولة تحريضية قيمتها  $Z_L = 7 + 0.003j$ .

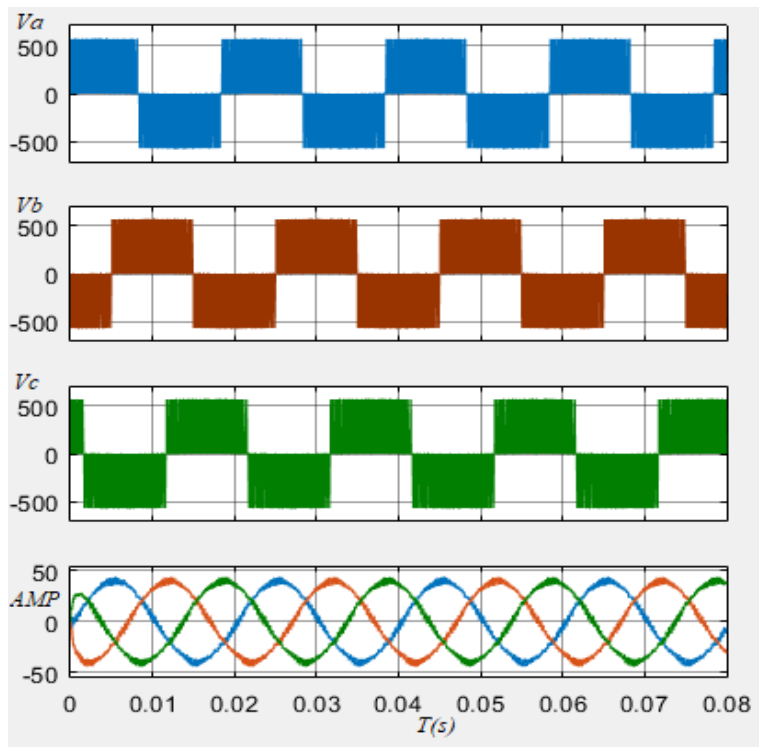




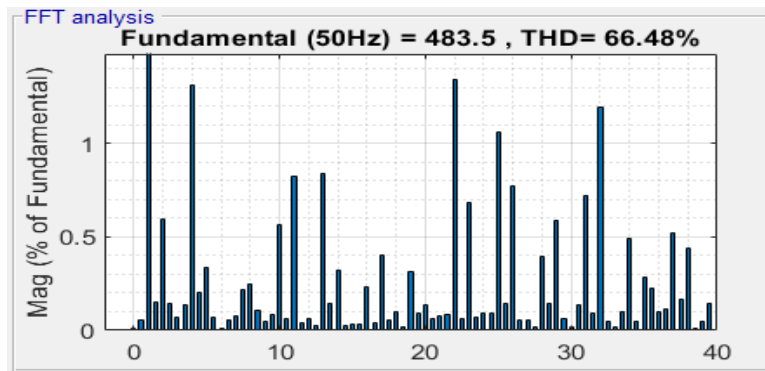
الشكل 22: نموذج MATLAB للعاكس التقليدي ثلاثي الطور

إشارة موجة جهد الخرج وتيار الحمل للعاكس التقليدي ثلاثي الطور بدون استخدام مرشحات موضحة بالشكل (23)، عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة جهد الخط كانت بقيمة 66.48% كما هو موضح بالشكل (24)، في حين أن معدل التشوه التوافقي لموجة تيار الخط الناتجة 6.41% كما هو موضح بالشكل (25).

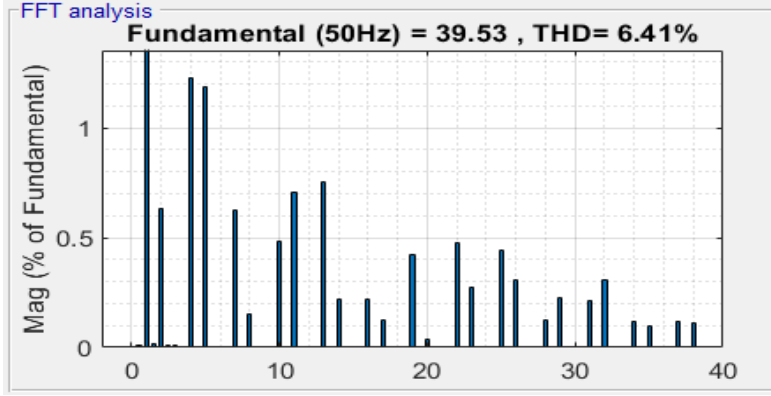
العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب



الشكل 23: إشارة موجة جهد وتيار الحمل للعاكس التقليدي ثلاثي الطور



الشكل 24: THD لموجة جهد الخط للعاكس التقليدي ثلاثي الطور



الشكل 25: THD لموجة تيار الحمل للعاكس التقليدي ثلاثي الطور

#### 4. الاستنتاجات والتوصيات

##### الاستنتاجات

- معدل التشوه THD يتناسب عكساً مع عدد مستويات موجة الجهد أي أنه كلما ازداد عدد مستويات موجة الجهد انخفض معدل التشوه التوافقي.
- معدل التشوه THD لموجة جهد العاكس (CHB-7 L) ثلاثي الطور عند استراتيجية التعديل (APOD-PWM) تساوي 15.68%.
- معدل التشوه THD لموجة جهد العاكس (CHB-7 L) ثلاثي الطور عند استراتيجية التعديل (POD-PWM) تساوي 15.52%.
- العاكس المتعدد المستويات التسلسلي CHB-7L ثلاثي الطور وفق استراتيجية التعديل PD-PWM يحقق أقل معدل تشوه توافقي لموجة الجهد بمقدار (10.70%) مقارنة بالعاكس التقليدي 2-level ثلاثي الطور ذو معدل تشوه توافقي (66.48%) بدون مرشح وبالتالي تحسين كفاءة تحويل القدرة من شكلها المستمر إلى المتناوب.

##### التوصيات

- دراسة استخدام العواكس متعددة المستويات في ربط المنظومات الكهروضوئية مع الشبكة العامة.

## العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة من مستمر إلى متناوب

- دراسة استخدام العواكس DC-MLI و FC-MLI المتعددة المستويات في قيادة مضخات المياه الكهروضوئية.
- دراسة استخدام العواكس متعددة المستويات في قيادة السيارات والقطارات الكهربائية.

### الرموز

Alternative Phase opposition Disposition	APOD
Cascaded H-bridge	CHB
Diode Clamped	DC
Flying Capacitor	FC
Multilevel Inverter	MLI
Universal control scheme	UCS
Phase Disposition	PD
Phase Opposition Disposition	POD
Pulse Width Modulation	PWM
Total harmonic distortion	THD

### المراجع

- [1] Debnath, S., Qin, J., Bahrani, B., Saedifard, M., & Barbosa, P. "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," IEEE transactions on power electronics, 30(1), 37-53. (2014).
- [2] Gonzalez, Sergio Alberto, Santiago Andres Verne, and Maria Ines Valla. "Multilevel converters for industrial applications." CRC Press, (2013).
- [3] 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.
- [4] Gupta, Krishna Kumar, and Pallavee Bhatnagar. "Multilevel inverters: conventional and emerging topologies and their control." Academic Press, 2017
- [5] 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).
- [6] Lai, J. S., & Peng, F. Z. "Multilevel converters-a new breed of power converters," IEEE Transactions on industry applications, 32(3), 509-517. (1996).

- [7] Luo, Fang Lin, and Hong Ye. "Advanced DC/AC inverters: applications in renewable energy." Crc Press, (2017).
- [8] Massoud, A. M., S. J. Finney, and B. W. Williams. "Control techniques for multilevel voltage source inverters." IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC'03. Vol. 1. IEEE, (2003).
- [9] McGrath, Brendan Peter, and Donald Grahame Holmes. "Multicarrier PWM strategies for multilevel inverters." IEEE Transactions on industrial electronics 49.4 (2002): 858-867
- [10] Rodriguez, J., Lai, J. S., & Peng, F. Z. "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," IEEE Transactions on industrial electronics, 49(4), 724-738. (2002).
- [11] Suresh, Y., Venkataramanaiah, J., Panda, A. K., Dhanamjayulu, C., & Venugopal, P. "Investigation on cascade multilevel inverter with symmetric, asymmetric, hybrid and multi-cell configurations," Ain Shams Engineering Journal, 8(2), 263-276. (2017)

العاكس الجسري التسلسلي ثلاثي الطور متعدد المستويات لتحسين كفاءة تحويل الطاقة  
من مستمر إلى متناوب

---