

## التحكم في مقومات تعديل عرض النبضة ثلاثية الطور باستخدام تقنية الهستيريسيس

توفيق محمد التلوع<sup>1\*</sup>، فاضل علي غميص<sup>2</sup>

<sup>1</sup> كلية التقنية الهندسية، زوارة، ليبيا، [taufikTaluo@cetz.edu.ly](mailto:taufikTaluo@cetz.edu.ly)  
<sup>2</sup> كلية التقنية الهندسية، زوارة، ليبيا، [fadelGhmid@cetz.edu.ly](mailto:fadelGhmid@cetz.edu.ly)

\*Corresponding Author : [taufikTaluo@cetz.edu.ly](mailto:taufikTaluo@cetz.edu.ly)

Received: 10 Feb 2026

Accepted: 03 March 2026

Published: 15 March 2026

### المخلص

أدى التطور الكبير في إلكترونيات القدرة، واستعمالاتها الواسعة في المجالات الصناعية المختلفة إلى البحث عن تقنيات تحكم تساعد في تحسين كفاءة الطاقة لشبكات الكهرباء المختلفة. تعد مقومات التحكم في عرض النبضة (PWM) rectifier Pulse-width modulation من أكثر المقومات استعمالاً خصوصاً في مجالات الطاقات المتجددة نظراً للمزايا التي يوفرها هذا النوع من المقومات، متمثلة في إمكانية التحكم في الجهد المستمر الخارج من المقوم، وتقليل التوافقيات (Harmonics) في تيار المصدر، بالإضافة إلى تحسين كفاءة الطاقة بالرفع من معامل القدرة (PF) factor إلى ما يقارب الواحد. تقدم هذه الورقة المفاهيم الأساسية لعمل مقومات التحكم في عرض النبضة ثلاثية الطور ويتعرض البحث بشيء من التفصيل إلى إحدى تقنيات التحكم الشائعة والمعروفة بتقنية التحكم في تيار الهستيريسيس (Hysteresis current control). لغرض تصميم التحكم بشكل مناسب، تم التطرق إلى النموذج الرياضي للمقوم، والذي استُخدم فيما بعد لتصميم التحكم باستخدام تقنية الهستيريسيس. تم تنفيذ واختبار تقنية التحكم المقترحة باستخدام برنامج المحاكاة (Matlab/SIMULINK)، ومن ثم عرض النتائج لتقييم متانة التقنية المقترحة في الحصول على نتائج مميزة تحقق أهداف الورقة المتمثلة في: التحكم في الجهد الخارج-تقليل التوافقيات في تيار المصدر-الحصول على معامل قدرة عالي يقارب الواحد

الكلمات المفتاحية: مقومات عرض النبضة، تقنية الهستيريسيس، تحسين معامل القدرة، إلكترونيات القدرة، تقليل التوافقيات

### 1. المقدمة

تحويل الطاقة من التيار المتردد (AC) إلى التيار المستمر (DC) أمر بالغ الأهمية في معظم تطبيقات إلكترونيات القدرة مثل أنظمة القيادة ذات السرعات المتغيرة Variable speed drives (VSDs)، ومصادر الطاقة غير المنقطعة Uninterruptible power supply (UPS)، وشواحن البطاريات، وغيرها.

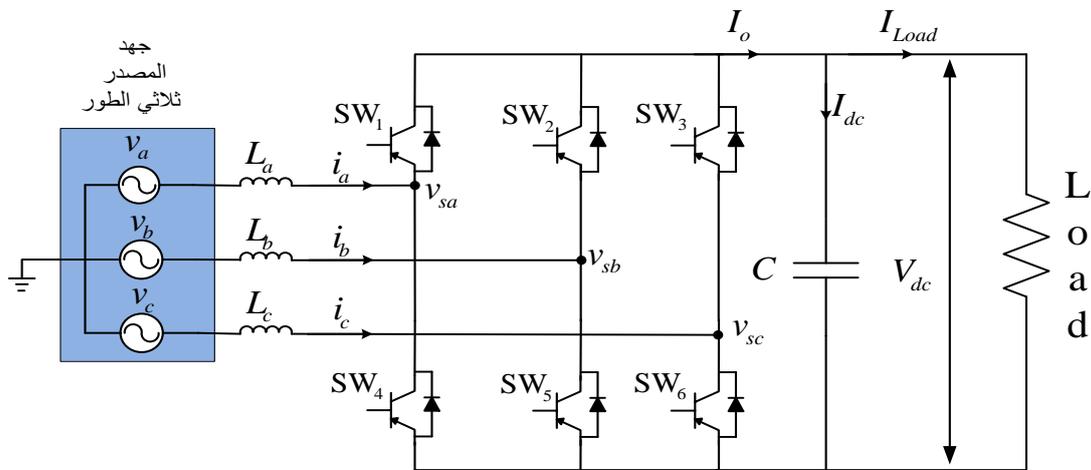
تعاني مقومات التيار التقليدية غير المتحكم فيها أو تلك التي تستخدم الثايرستورات من عيب رئيسي يتمثل في التوافقيات العالية في التيار [1] ومعامل القدرة المنخفض في تيار الشبكة. لذا، من الضروري تركيب أجهزة إضافية للامتثال لمعايير الطاقة الخاصة بالشبكة. لتحسين جودة الطاقة من جهة الشبكة، تقترح المراجع [2-5] بعض دوائر تصحيح معامل القدرة Power factor control (PFC) التي يمكن استخدامها مع المقومات. كما أن من الحلول الأخرى استخدام المرشحات النشطة.

عند استخدام محولات تعديل عرض النبضة PWM converter لغرض التقويم، فإن طاقة الشبكة يمكن تحسينها، حيث يمكن التحكم في مقدار تيار الدخل وزاوية الطور (تقديمًا أو تأخيرًا) بما يتوافق مع متطلبات جودة الطاقة. ومن المزايا الأخرى لهذا النوع من المقومات إمكانية تدفق الطاقة في الاتجاهين، مما يوفر كفاءة تشغيل عالية لشواحن البطاريات وكذلك لأنظمة القيادة ذات السرعة المتغيرة، علاوة على ذلك، يمكن التحكم وتنظيم الجهد المستمر الخارج من المقوم باستخدام تقنيات تحكم مناسبة

مقوم تعديل عرض النبضة PWM rectifier هو محول طاقة من التيار المتردد إلى التيار المستمر، باستخدام مفاتيح أشباه الموصلات الإلكترونية وتستخدم محولات PWM converter التقليدية (مقومات وعواكس) على نطاق واسع في تطبيقات توربينات الرياح التي تحتوي على مولد تيار متردد.

مؤخرًا، شاع استعمال الترانزستورات ثنائية القطب ذات البوابة المعزولة (IGBT) Insulated gate bipolar transistors كمفاتيح تبديل نموذجية بدلًا من الدايمودات، وعلى النقيض من مقومات الدايمودات، تحقق مقومات PWM تدفق طاقة ثنائي الاتجاه [6].

الميزة الرئيسية لاستخدام تقنية تعديل عرض النبضة هي تقليل التوافقيات، كما تجعل من الممكن التحكم في قيمة جهد الخرج، وتحسين معامل القدرة وبالتالي يمكننا تقليل التشوه التوافقي الكلي (THD) Total harmonic distortion [7]. يستخدم هذا النظام عادةً تكوينًا يسمى "مقوم جسر ثلاثي الطور". ويتكون من عدد ستة IGBTs مرتبة على هيئة جسر ليتناسب مع جهد الإدخال المتردد ثلاثي الطور، حيث يحتوي كل طور على اثنين من IGBTs متصلين على التوالي، ويشكلان طرفي الجسر الموجبة والسالبة كما موضح بالشكل 1.



الشكل 1. مقوم تعديل عرض النبضة ثلاثي الطور باستخدام IGBTs

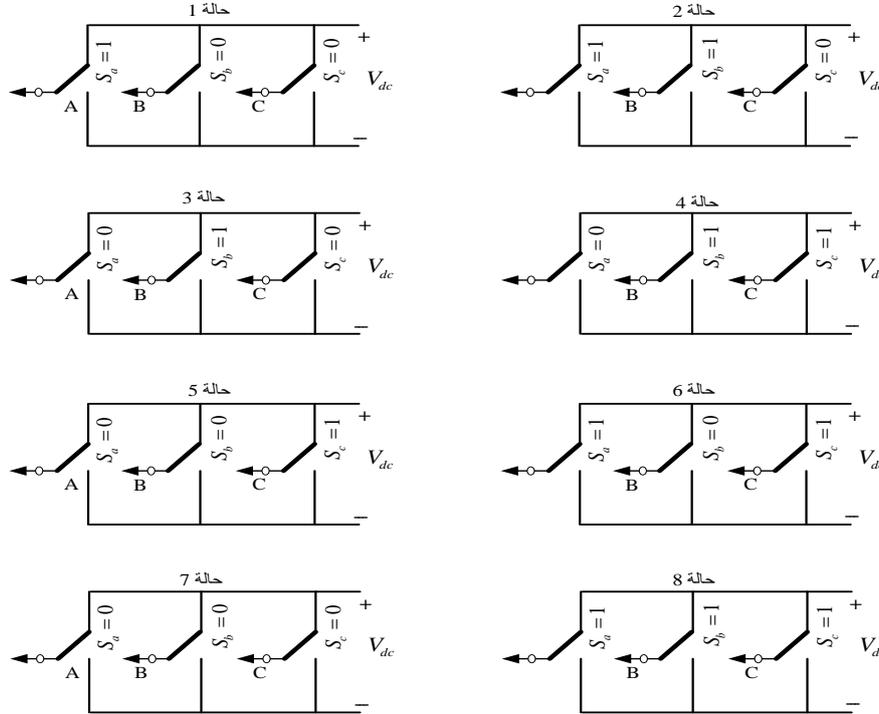
هناك عدة أنواع من تقنيات التحكم المستخدمة في مقومات تعديل عرض النبضة PWM، وذلك حسب التطبيق ومتطلبات الأداء وتعقيد النظام، من أهمها [7-9]:

- التحكم الموجه بالجهد (VOC) Voltage-Oriented Control (VOC) تتميز هذه التقنية بأداء عالٍ حيث توفر التحكم الدقيق في الجهد المستمر الخارج من المقوم وتحقق معامل قدرة عالي Unity power factor (UPF)، غير أنها معقدة نسبياً ويتطلب محاكاة متزامنة مع الشبكة باستخدام حلقة Phase-locked loop (PLL).
- التحكم في تيار الهيستريسيس Hysteresis current control يحافظ هذا النوع من التحكم على التيار ضمن نطاق تباطؤ محدد حول تيار المرجع، ويتميز هذا النوع من التحكم بأنه بسيط وسريع ويوفر استجابة ديناميكية عالية، ولكنه يُؤدّد تردد تحويل متغير.

في هذه الورقة تم اقتراح تقنية (Hysteresis Current Control) لدراستها وتنفيذها باستخدام برنامج المحاكاة Matlab/SIMULINK. تم تقسيم هذه الورقة إلى خمسة أقسام رئيسية، فبعد المقدمة، يتناول الجزء الثاني نبذة عن أساس عمل محولات القدرة PWM converters، بينما يستعرض الجزء الثالث من الورقة النموذج الرياضي لمقومات تعديل عرض النبضة PWM rectifiers، تتناول هذه الورقة في جزئها الرابع تصميم تقنية التحكم المقترحة. في الجزء الخامس تم تنفيذ التقنية المقترحة باستخدام برنامج المحاكاة وعرض النتائج، وفي الختام خلاصة الدراسة.

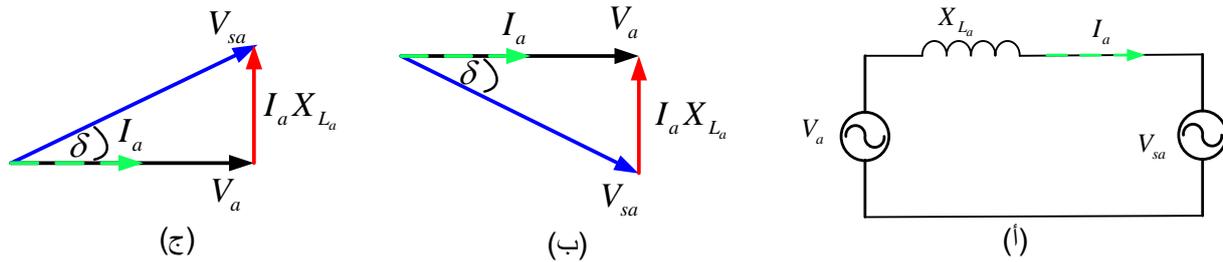
## 2. أساس عمل محولات القدرة التي تعتمد على تعديل النبضة

يعمل كل IGBT من الموضح بالشكل 1. كمفتاح تحكم، حيث تتحكم إشارة النبضة (Pulse) عند طرف البوابة لكل IGBT في حالة التشغيل والإيقاف (ON and OFF). عند تشغيل IGBT، فإنه يوصل التيار، وعند إيقاف تشغيله، فإنه يمنع مرور التيار. يمكن تمثيل جهد المقوم بثمانية حالات فتح وغلق ممكنة ( ستة حالات نشطة وحالتان صفيريتان) كما موضح بالشكل 2 [6, 9]. تعمل هذه المفاتيح بالتناوب، ففي كل فترة زمنية يعمل أحد المفاتيح العلوية مع أحد المفاتيح السفلية للأذرع هالأخرى، فعلى سبيل المثال يعمل المفتاح (SW<sub>1</sub>) مع أحد المفتاحين (SW<sub>5</sub>) أو (SW<sub>6</sub>) ولا يمكن أن يعمل مع (SW<sub>4</sub>)، وهكذا مع باقي المفاتيح؛ فلا يمكن أن يعمل مفتاحان من نفس الذراع في نفس الوقت لأن ذلك سيسبب دائرة قصر على المصدر. يمكن المحافظة على النمط بإعطاء نبضات متعاكسة لمفاتيح كل ذراع، فعلى سبيل المثال إذا كانت نبضة المفتاح (أي وضع توصيل)، تكون نبضة المفتاح SW<sub>4</sub> = 0 (أي وضع إطفاء).



الشكل 2. حالات الفتح والغلق الممكنة لترانزستورات محول القدرة ( الحالة 7 و 8 حالات غير نشطة)

كما أشرنا في السابق، فإن محولات القدرة ذات تعديل عرض النبضة IGBT PWM converters بإمكانها العمل في الاتجاهين، ويمكن للطاقة أن تتدفق من المصدر إلى المحول أو العكس، حيث يتم التحكم في اتجاه انسياب الطاقة ( من المصدر إلى المحول والعكس ) من خلال التحكم في الزاوية ( $\delta$ ) بين جهد المصدر ( $V_a$ ) وما يقابله من الجهد عند طرف المحول ( $V_{sa}$ ) كما موضح بالشكل 3.



الشكل 3. (أ) الدائرة المكافئة لطور واحد؛ (ب) المخطط الطوري في حالة المقوم؛ (ج) المخطط الطوري في حالة العاكس

يمكن حساب القدرة للطور ( $P$ ) من المعادلة التالية:

$$P = \frac{V_a \times V_{sa}}{X_{L_a}} \sin(\delta) \quad (1)$$

كما موضح بالشكل 3(ب)، فإن معامل القدرة يمكن التحكم فيه من خلال التحكم في مقدار الجهد ( $V_{sa}$ )، وبالتالي لتحقيق معامل قدرة يساوي الوحدة، يجب أن يكون الجهد عند مدخل المقوم ( $V_{sa}$ ) يساوي:

$$V_{sa} = \sqrt{V_a^2 + (I_a X_{L_a})^2} \quad (2)$$

### 3. النمذجة الرياضي

يمكن تمثيل الجهد عند مدخل المحول من خلال حالات الفتح والغلق الممكنة الموضحة بالشكل 1، والتي تم تمثيلها بثمانية حالات فتح وقفل ممكنة؛ ستة حالات نشطة وحالتان صفريةتان. يمكن كتابة معادلات الجهد بين الأطوار عند مدخل المحول بمعلومية حالة النبضة ( $S$ ) وجهد المخرج ( $V_{dc}$ ) كما يلي [6]:

$$v_{s_{ab}} = (S_a - S_b)V_{dc} \quad (3)$$

$$v_{s_{bc}} = (S_b - S_c)V_{dc} \quad (4)$$

$$v_{s_{ca}} = (S_c - S_a)V_{dc} \quad (5)$$

حيث:  $v_{s_{ab}}$  الجهد بين الطور ( $a$ ) والطور ( $b$ ) عند مدخل المقوم،  $v_{s_{bc}}$  الجهد بين الطور ( $b$ ) والطور ( $c$ ) عند مدخل المقوم،  $v_{s_{ca}}$  الجهد بين الطور ( $c$ ) والطور ( $a$ ) عند مدخل المقوم، ( $S_a, S_b, S_c$ ) حالات المفاتيح (0 أو 1).  
بينما يمكن حساب جهد الطور لكل من الأطوار ( $a, b, c$ ) من خلال المعادلات التالية:

$$v_{sa} = f_a V_{dc} \quad (6)$$

$$v_{sb} = f_b V_{dc} \quad (7)$$

$$v_{sc} = f_c V_{dc} \quad (8)$$

حيث :

$$f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3} \quad (9)$$

$$f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \quad (10)$$

$$f_c = \frac{2S_c - (S_a + S_b)}{3} \quad (11)$$

بناء على حالات المفاتيح ( $S_c, S_b, S_a$ ) فإن ( $f_{a,b,c}$ ) لها خمسة احتمالات وهي:  $f_{a,b,c} = 0, \pm \frac{1}{3}, \pm \frac{2}{3}$ .

من خلال دائرة المقوم الموضح بالشكل 1 ، يمكن إيجاد العلاقة بين جهد المصدر والجهد عند مدخل المقوم للأطوار الثلاثة، وذلك من خلال تطبيق قانون كيرشوف للجهد كما موضح بالمعادلة (12)

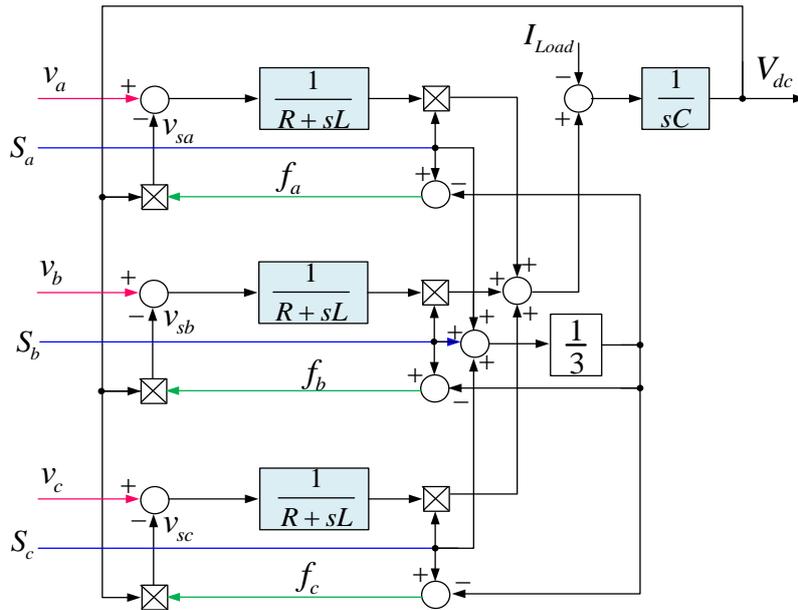
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

وبالنسبة للتيارات فإنه يمكن تطبيق قانون كيرشوف للتيار:

$$I_{dc} = I_o - I_{Load}$$

$$C \frac{dv}{dt} = \underbrace{S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c}_{I_o} - I_{Load} \quad (13)$$

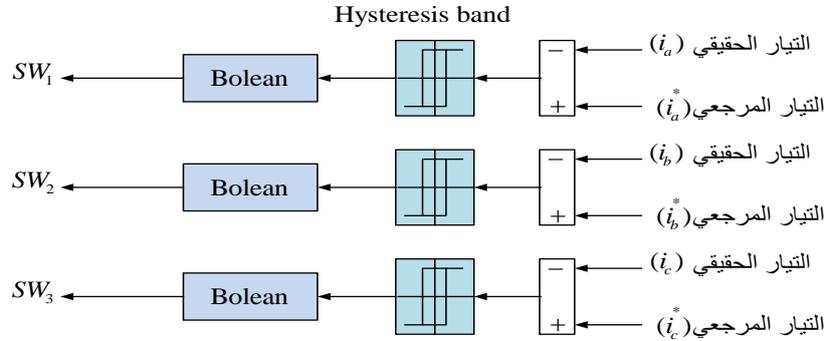
من المعادلات (3) إلى (13) يمكن تكوين المخطط الصندوقي للنموذج الرياضي للمقوم كما موضح بالشكل 4.



الشكل 4. النموذج الرياضي لمقوم (PWM) ثلاثي الطور

#### 4. تصميم التحكم باستخدام تقنية Hysteresis Current Control

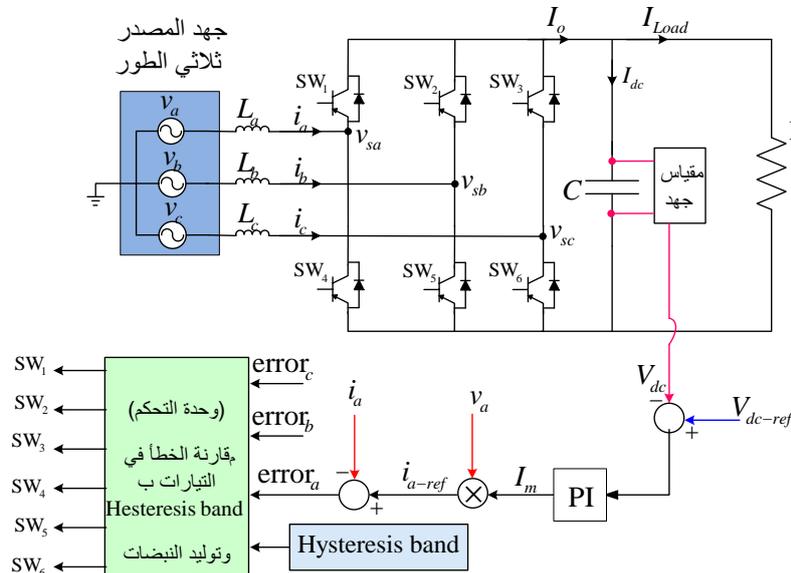
وفيها يتم التحكم في تيار المصدر عن طريق مقارنته بالقيمة المرجعية للتيار و ضبطها بالقيمة العليا والقيمة السفلى المسموح للخطأ [10-12] (Upper and lower hysteresis band limits)، ومن ثم يتم توليد النبضات التي تتحكم في عمل المقوم كما موضح بالشكل 5.



الشكل 5. التحكم في التيار باستخدام تقنية Hysteresis current control

من أجل التحكم في الجهد الخارج من المقوم ( $V_{dc}$ )، يجب ضبط تيار المصدر الداخل إلى المقوم. هذه العملية تتم بقياس الجهد الخارج من المقوم ( $V_{dc}$ ) ومقارنته بالجهد المرجعي المراد الحصول عليه ( $V_{dc-ref}$ )، الفرق بين القيمتين تستخدم لتوليد قيمة التيار المرجعي ( $I_m$ ). للحصول على عامل قدرة يساوي الوحدة (الزاوية بين موجة الجهد وموجة التيار تساوي صفر)، يتم ضرب قيمة التيار المرجعي ( $I_m$ ) بموجة الوحدة لجهد الإدخال، وبالتالي يتم الحصول على التيارات المرجعية للأطوار

الثلاثة ( $i_{a-ref}$ ,  $i_{b-ref}$ ,  $i_{c-ref}$ ) كما موضح بالشكل 6

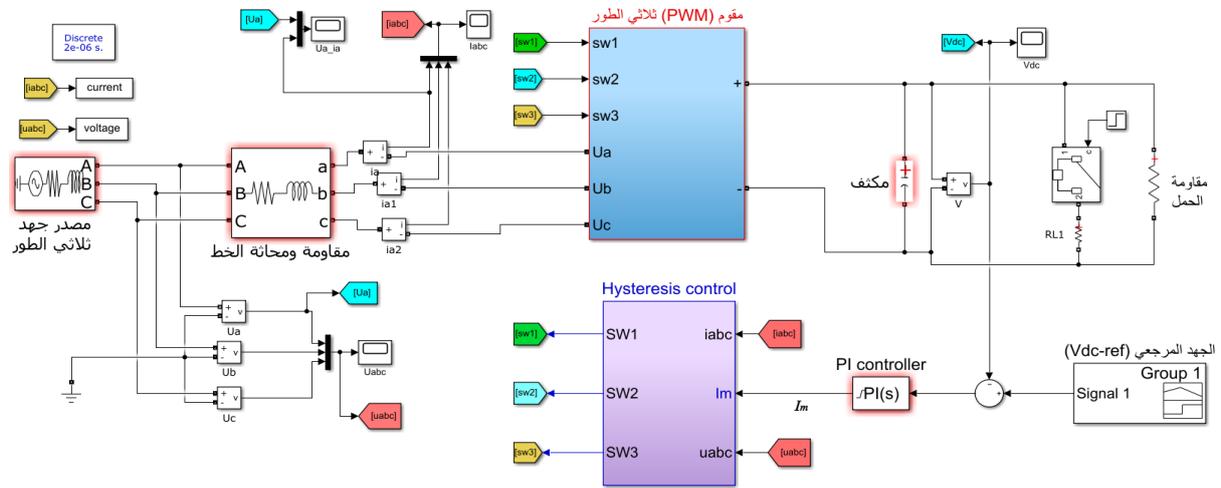


الشكل 6. مخطط التحكم المقترح باستخدام التحكم في التيارات (فقط تيار الطور a موضح)

يتم قياس تيارات الإدخال ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) ومقارنتها بالتيارات المرجعية، الفرق بين هذه القيم ( $error$ ) يتم تغذيته إلى مقارن ذو نطاق محدد ( $hysteresis\ band$ ) لتوليد النبضات المناسبة لتشغيل المقوم [13].

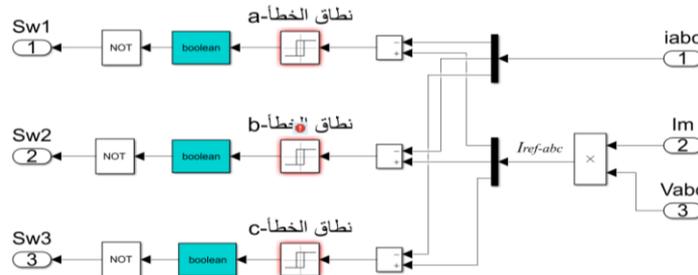
## 5. تنفيذ تقنية التحكم المقترحة ونتائج المحاكاة

تم تصميم النموذج في برنامج Matlab/SIMULINK وفقا للأساس النظري المعروض في الجزء 3 والمخططات الموضحة في الشكل 5 و الشكل 6، حيث تم استخدام مصدر جهد متردد ثلاثي الطور بجهد طور مقداره 400 V وتردد 50 Hz. كل خط له مقاومة مقدارها (0.05  $\Omega$ ) ومحاثة ملف مقدارها (3.36 mH)، بينما تم ضبط الجهد المرجعي الخارج من المقوم (Vdc-ref) عند القيمة (600 V). يوضح الشكل 7 نموذج المحاكاة الكامل لتقنية التحكم المقترحة.



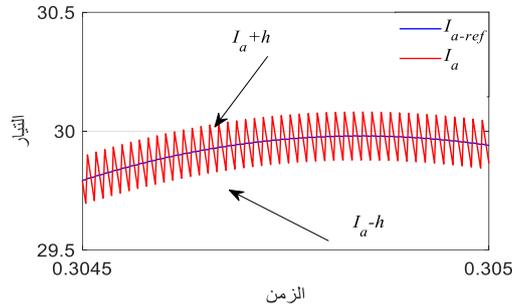
الشكل 7. النموذج الكامل لمحاكاة تقنية التحكم (Hysteresis current control) باستخدام برنامج Matlab/SIMULINK

كما موضح بالشكل 7، فإن الجهد الخارج من المقوم يشحن مكثف لتقليل التذبذب في الجهد المستمر، والذي بدوره يغذي حمل أومي (مقاومة فقط). في الصندوق الفرعي (Hysteresis control)، يتم مقارنة تيار المصدر المقاس مع التيار المرجعي المولد، بناء على هذه المقارنة يتم توليد الإشارات التي تشغيل المقوم كما موضح بالشكل 8.



الشكل 8. توليد نبضات المفاتيح لتشغيل المقوم

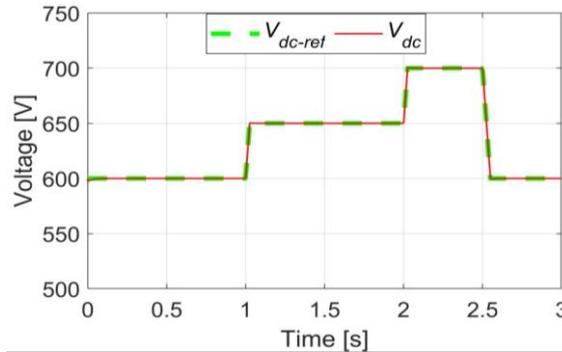
يوضح الشكل 9 موجة تيار المصدر المقاسة ( $I_a$ ) والتيار المرجعي المولد ( $I_{a-ref}$ )، يمكن ملاحظة أن تيار المصدر يتم التحكم فيه باستخدام نطاق الخطأ ( $h$ )، بمعنى أن تيار المصدر يتذبذب بين القيمتين ( $I_a+h$ ) كقيمة عظمى و ( $I_a-h$ ) كقيمة صغرى. وبالتالي كلما كانت قيمة نطاق الخطأ ( $h$ ) صغيرة، كلما كان تيار المصدر متطابق مع التيار المرجعي، لكن عمليا لا يمكن ضبط قيمة نطاق الخطأ ( $h$ ) إلى قيمة صغيرة جدا، لأن ذلك سيولد معدل تذبذب عالي (معدل فتح وغلق عالي للترانزستورات) وهو ما يولد حرارة داخل المقوم تؤدي إلى تلفه.



الشكل 9. التحكم في تيار المصدر عند القيمة المرجعية: ضمن نطاق الخطأ

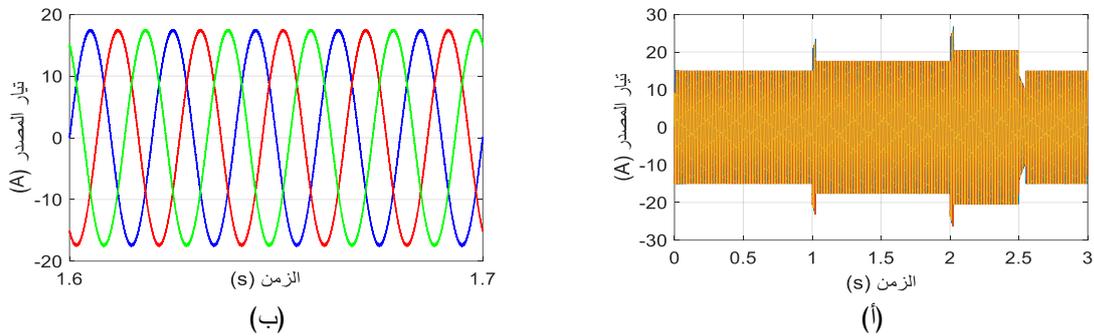
### 1.5 نتائج المحاكاة تحت جهود مرجعية متغيرة وأحمال ثابتة

في هذا الاختبار تم تثبيت الحمل الذي يغذيه المقوم (مقاومة) عند قيمة 50 أوم، بينما كان الجهد المرجعي الخارج من المقوم متغيرا ( $V_{dc-ref} \neq \text{constant}$ ). في البداية تم وضع جهد مرجعي قيمته 600 V، حتى زمن 1 sec حيث تم تغيير الجهد المرجعي إلى قيمة 650 V، ليستمر هذا الجهد حتى زمن 2 sec، حيث تم رفع الجهد المرجعي إلى 700 V، وعند زمن 2.5 sec تم خفض الجهد المرجعي مرة أخرى إلى قيمة 600 V. في هذه الحالة تم قياس الجهد الحقيقي الخارج من المقوم ( $V_{dc}$ ) ومقارنته بالجهد المرجعي، وكانت النتائج المتحصل عليها لهذا الاختبار كما موضح بالشكل 10.



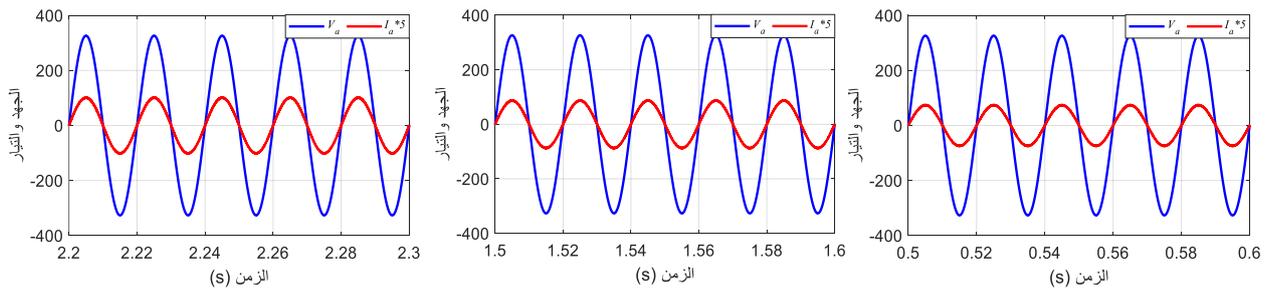
الشكل 10. نتيجة المحاكاة للجهد المرجعي و الجهد المتحصل عليه من المقوم عند حمل ثابت

يمكن من الشكل 10 ملاحظة أن تقنية التحكم المستخدمة تعمل بشكل متميز واستجابة سريعة للتغير في الجهد المرجعي، حيث أن الجهد الحقيقي المتحصل عليه من المقوم ( $V_{dc}$ ) يتطابق بشكل كبير مع الجهد المرجعي المتغير. تجدر الإشارة إلى أن دقة التحكم المستخدم تعتمد على نطاق الخطأ المحدد ( $h$ )، بالإضافة إلى معلمات المتحكم (PI controller). يوضح الشكل 11 موجة تيار المصدر للأطوار الثلاثة، والتي تظهر على شكل موجة جيبية، كما يلاحظ تغير التيار مع التغير في الجهد الخارج من المقوم؛ وهو أمر متوقع.



الشكل 11. تيار المصدر: (أ) الشكل العام لتيار المصدر؛ (ب) تكبير جزء من موجة التيار

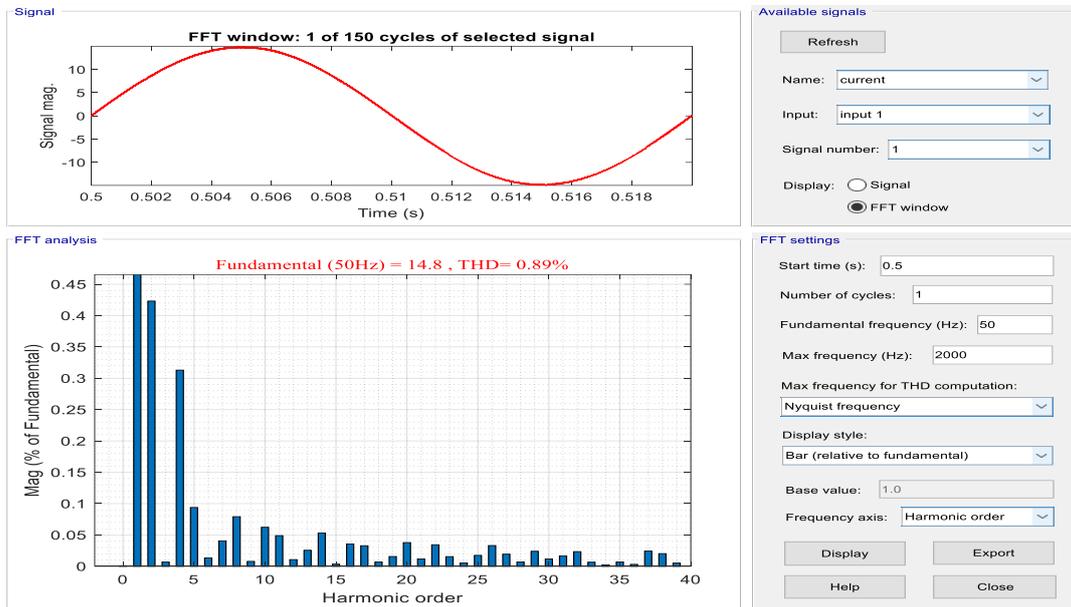
يتمثل الهدف الثاني من الدراسة في تحقيق معامل قدرة عالي ( $PF \approx 1$ )، يمكن قياس معامل القدرة بقياس الزاوية بين جهد وتيار المصدر ( $\phi$ )، حيث من المعلوم أن معامل القدرة  $PF = \cos \phi$ ، وبالتالي لتحقيق عامل قدرة يساوي الواحد؛ يجب أن تتطابق موجة الجهد والتيار في الطور. من خلال الشكل 12، يمكن ملاحظة تطابق زاوية الجهد والتيار لكل مراحل المحاكاة.



الشكل 12. تطابق موجة جهد وتيار المصدر لتحقيق معامل قدرة = 1 لكل مراحل المحاكاة

يتمثل المطلوب أو الهدف الثالث للدراسة في التغلب على التشوه أو التوافقيات (Harmonics) الناشئة في تيار المصدر وتقليلها إلى الحد المسموح به. وفقاً لمتطلبات الشبكات المعتمدة (IEEE 519- standards recommendation 2014) ينبغي أن لا يتجاوز معامل التشوه الكلي لموجة التيار (THD) قيمة 5% [14].

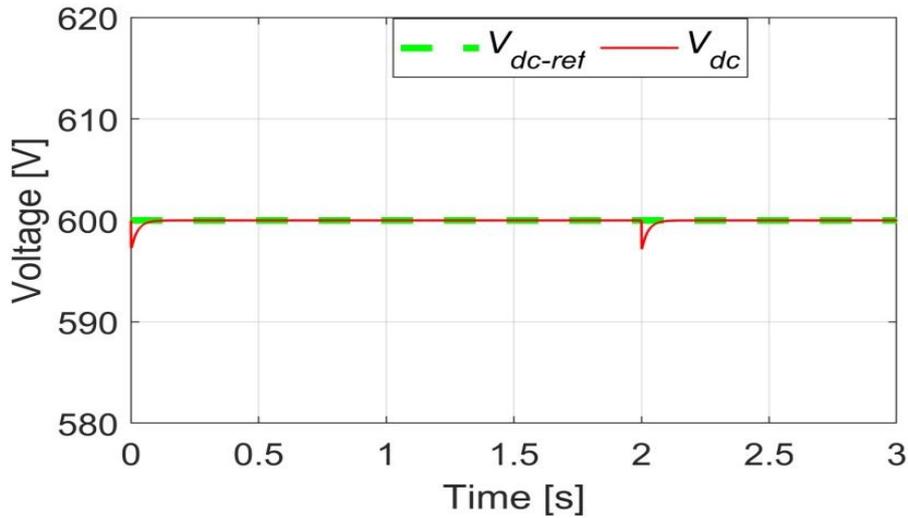
لتحليل التوافقيات وحساب معامل التشوه الكلي، تم استخدام الطريقة الشائعة المعروفة بتحليل فورييه السريع (Fast Fourier transform analysis)، هذا التحليل يقوم بتحويل الموجة من نطاق الزمن إلى نطاق التردد، ومن ثم يسهل حساب التوافقيات. يظهر الشكل 13 تحليل فورييه السريع لموجة تيار المصدر، حيث يظهر التحليل شكل الموجة ونسبة التوافقيات الموجودة في هذه الموجة. تبين نتيجة تحليل التوافقيات أنه تم تقليل التوافقيات بشكل كبير (THD=0.89%) وهو أقل بكثير من الحد المسموح به في متطلبات الشبكات العالمية.



الشكل 13. حساب نسبة التشوه الكلي (THD) لموجة التيار باستخدام برنامج Matlab/SIMULINK

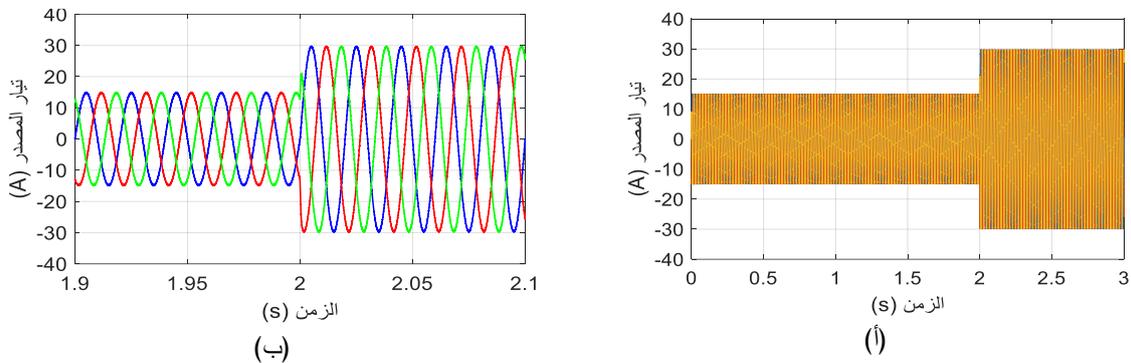
## 2.5 نتائج المحاكاة تحت جهد مرجعي ثابت وأحمال متغيرة

في هذا الاختبار سيتم تثبيت الجهد عند قيمة 600 فولت، بينما سيتم تغيير الحمل المتغذي من المقوم وذلك لتقييم كفاءة التحكم المستخدم. تم قياس نفس الكميات السابقة ( الجهد الخارج من المقوم - تيار المصدر - معامل القدرة)، وذلك لتقييم مدى فعالية التحكم المقترحة تحت ظروف تشغيل مختلفة. في البداية كان الحمل عبارة عن مقاومة مقدارها 50 أوم، وعند زمن 2 ثانية تم توصيل مقاومة أخرى على التوازي مقدارها 50 أوم أيضا (لتقليل الحمل)، في هذه الحالة سوف يتضاعف التيار. يوضح الشكل 14 استجابة النظام لهذا التغيير المفاجئ في الحمل، حيث يظهر الجهد الخارج من المقوم ( $V_{ac}$ ) محافظا على قيمته سريعا، مع هبوط لحظي قليل في الجهد لحظة تغيير الحمل، وهذا أمر متوقع في الحالة العابرة.



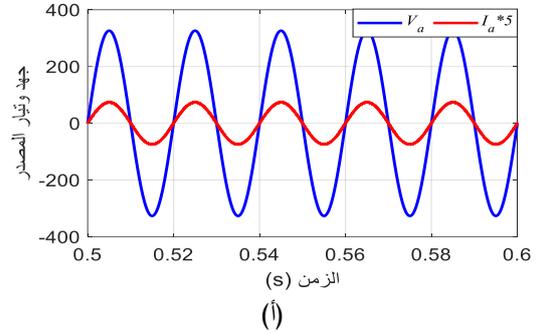
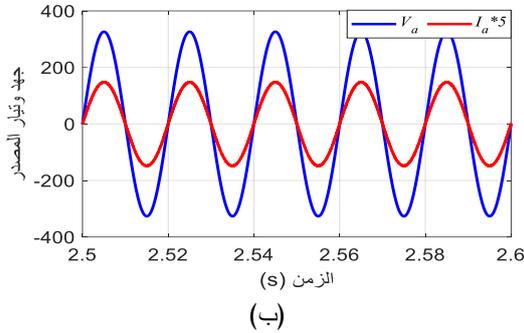
الشكل 14. نتيجة المحاكاة للجهد المرجعي و الجهد المتحصل عليه من المقوم عند حمل متغير

نتيجة تضاعف الحمل يتضاعف تيار المصدر مع بقاء شكل التيار على هيئة موجة جيبية بعد زيادة الحمل كما موضح الشكل 15.



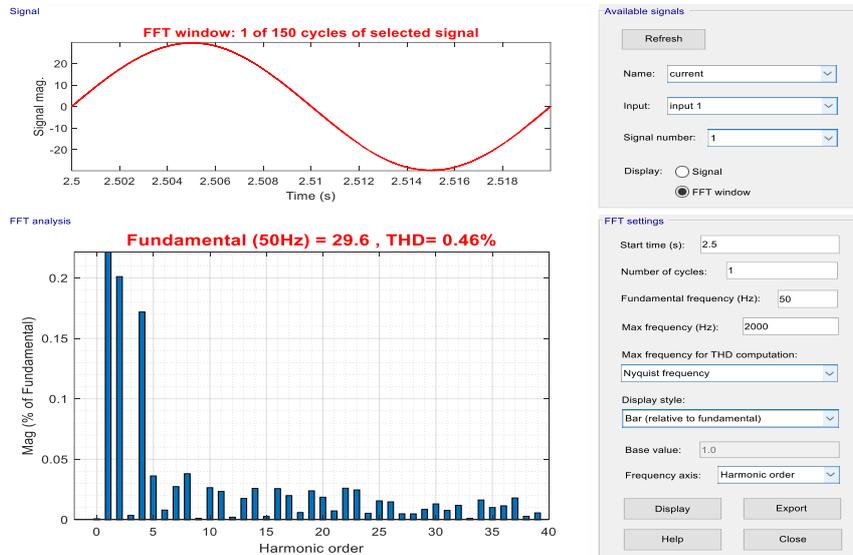
الشكل 15. تيار المصدر: (أ) الشكل العام لتيار المصدر؛ (ب) تكبير جزء موجة التيار

للتحقق من فعالية تقنية التحكم المستخدمة في المحافظة على معامل القدرة عاليا أثناء تغير الحمل، تم رسم موجة الجهد والتيار معا قبل و بعد تغير الحمل كما موضح بالشكل 16. يظهر جليا من الشكل السابق أن معامل القدرة تم المحافظة عليه عند القيمة العاليا ( $PF \cong 1$ ) في حالة تغير الحمل أيضا.



الشكل 16. تطابق موجة جهد وتيار المصدر لتحقيق معامل قدرة يساوي الواحد: (أ) قبل تغير الحمل؛ (ب) بعد زيادة الحمل

كما في الاختبار الأول، فإن الهدف الثالث الذي يراد تحقيقه هو تقليل التوافقيات في تيار المصدر إلى المستوى المسموح به لمتطلبات الشبكات العالمية المعتمدة. يوضح الشكل 17 تحليل فورييه السريع لموجة تيار المصدر (تيار الطور  $a$ ) بعد تغير الحمل، لغرض حساب معامل التشوه الكلي للتيار والذي كان مقداره 0.46% وهي قيمة صغيرة جدا وضمن النطاق المسموح به.



الشكل 17 حساب نسبة التشوه الكلي (THD) لموجة التيار باستخدام برنامج Matlab/SIMULINK

## 6. الخاتمة

قدمت هذه الورقة دراسة تحليلية لأحد الحلول المقترحة للتغلب على عيوب المقومات التقليدية المستخدمة في تحويل التيار المتردد إلى التيار المستمر، حيث تناولت الدراسة المفاهيم الأساسية لعمل مقومات PWM ثلاثية الطور؛ والتي تعتمد أساساً على التحكم في فتح وغلق (ON/OFF) الترانزستورات.

تم التطرق لإحدى الطرق الشائعة للتحكم في مقومات PWM؛ وهي التحكم بتقنية تيار الهستريسيس، حيث توفر هذه التقنية أداءً عاليًا وتركيبًا بسيطًا. لقد أظهرت نتائج المحاكاة التي تم تنفيذها باستخدام برنامج (Matlab/SIMULINK) أن تقنية التحكم في تيار الهستريسيس تقدم أداءً مميزًا للتحكم في الجهد الخارج من المقوم تحت ظروف تشغيل مختلفة، علاوة على ذلك تم تقليل التوافقيات في تيار المصدر إلى قيم صغيرة جدًا (0.46%–0.89%) وهي ضمن النطاق المسموح به لمتطلبات الشبكات المعتمدة (standards recommendation IEEE 519–2014) والتي تحدد أن لا يتجاوز معامل التشوه الكلي لموجة التيار (THD) قيمة 5%. بالإضافة لما سبق، وفرت تقنية التحكم المستخدمة معامل قدرة عالي ( $PF \cong 1$ ). هذه الميزات الثلاث التي تم تحقيقها كانت الهدف الأساس لهذه الورقة، والمشكلة التي رغب المؤلفون التغلب عليها. لقد أظهرت نتائج المحاكاة أداءً مميزًا لتقنية التحكم المقترحة، واستقرارًا في أداء النظام عموماً، وهو ما يمكن البناء عليه مستقبلاً لتطوير العمل ومحاولة تطبيقه عملياً.

## قائمة المراجع:

- [1] "Technical guide No. 6 Guide to harmonics with AC drives," 2017.
- [2] O. García, J. A. Cobos, R. Prieto, P. Alou, and J. Uceda, "Single phase power factor correction: A survey," IEEE Transactions on Power electronics, vol. 18, pp. 749-755, 2003.
- [3] A. Prasad, P. D. Ziogas, and S. Manias, "An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers," IEEE transactions on Power Electronics, vol. 6, pp. 83-92, 1991.
- [4] J. W. Kolar and F. C. Zach, "A novel three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, pp. 456-467, 2002.
- [5] J. W. Kolar, U. Drogenik, and F. C. Zach, "Space vector based analysis of the variation and control of the neutral point potential of hysteresis current controlled three-phase/switch/level PWM rectifier systems," in Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95, 1995, pp. 22-33.
- [6] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in power electronics: selected problems: Elsevier Science, 2002.
- [7] S. L. Sanjuan, Voltage Oriented Control of Three-phase Boost PWM Converters: Design, Simulation and Implementation of a 3-phase Boost Battery Charger. Chalmers tekniska högskola. Institutionen för energi och miljö Chalmers University of Technology, 2010.
- [8] A. Ahmane, D. Sakri, and N. Golea, "Comparison of control techniques for three-phase PWM rectifier based on VOC, DPC, and SMC," Solid State Technology, vol. 63, pp. 19346-19358, 2020.
- [9] M. Malinowski, "Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers," Citeseer, 2001.
- [10] E. Suhara and M. Nandakumar, "Analysis of hysteresis current control techniques for three phase PWM rectifiers," in 2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), 2015, pp. 1-5.
- [11] A. Dwivedi and A. Tiwari, "Analysis of three-phase PWM rectifiers using hysteresis current control techniques :a survey," International Journal of Power Electronics, vol. 8, pp. 349-377, 2017.
- [12] O. Lopez-Santos, D. S. Dantonio, F. Flores-Bahamonde, and C. A. Torres-Pinzón, "Hysteresis control methods," in Multilevel Inverters, ed: Elsevier, 2021, pp. 35-60.



**Gharyan University Journal of Engineering  
Science (GUJES)  
ISSN (3105-4560)**

Website: <http://journals.gu.edu.ly>  
email: [gujes@gu.edu.ly](mailto:gujes@gu.edu.ly)



- 
- [13] T. L. Skvarenina, The power electronics handbook: CRC press, 2018.  
[14] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,"  
IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), pp. 1-29, 2014.

