

## Harmonic Distortion in Three-Phase Networks Using a 24-Pulse STATCOM: Modeling, Simulation, and Performance Evaluation

Wajdi Mohamed Mremi<sup>1\*</sup>  , Ali Al-Mathnani<sup>1</sup>  , Sharaf Aldeen Alfathi<sup>1</sup>  

<sup>1</sup>Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Wadi Alshatti University, Brack – Libya

### ARTICLE HISTORY

Received 16 December 2025  
Revised 21 January 2026  
Accepted 27 January 2026  
Online 02 February 2026

### KEYWORDS

Harmonic distortion (THD);  
STATCOM;  
24-pulse converter;  
Power quality;  
Reactive power;  
Three-Phase Systems;  
PLL control;  
 $\alpha$ - $\beta$  transformation;

### ABSTRACT

Harmonic distortion is one of the most critical challenges affecting power quality in modern industrial networks, particularly under nonlinear loading and dynamic operating conditions. This paper presents the modelling and performance evaluation of a 24-pulse STATCOM designed to reduce total harmonic distortion (THD) in three-phase power systems. The proposed STATCOM structure is developed using four 6-pulse voltage source converters (VSCs) combined with Y-Y and Y- $\Delta$  phase-shifting transformers to achieve a 15° phase displacement, enabling natural cancellation of dominant harmonics such as the 5th and 7th orders. A detailed simulation model is implemented in MATLAB/Simulink, and system performance is evaluated under nonlinear loading conditions, including the starting of a 100-HP induction motor. The results demonstrate a significant improvement in power quality, with THD reduced to 1.52% compared to values ranging between 8–12% without compensation, alongside enhanced voltage stability at the point of common coupling (PCC) and minimized voltage sag during transient events. These findings confirm that the 24-pulse STATCOM provides an effective and economical solution for harmonic mitigation, representing a practical alternative to external filters and conventional 6- or 12-pulse compensation systems.

## التشويه التوافقي في الشبكات ثلاثية الطور باستخدام STATCOM ذي 24 نبضة ( النمذجة والمحاكاة وتقييم الأداء)

وجدي إمريبي<sup>1\*</sup>، علي المثناني<sup>1</sup>، شرف الدين الفتحي<sup>1</sup>

المخلص	الكلمات المفتاحية
يُعدّ التشويه التوافقي أحد أهم التحديات التي تؤثر على جودة الطاقة في الشبكات الصناعية الحديثة، وخاصةً في ظل ظروف التحميل غير الخطية والتشغيل الديناميكي، تُقدّم هذه الورقة نمذجة وتقييم أداء مُحوّل طاقة STATCOM ذي 24 نبضة، المُصمّم لتقليل التشويه التوافقي الكلي (THD) في أنظمة الطاقة ثلاثية الطور، طُوّر هيكل مُحوّل الطاقة STATCOM المُقترح باستخدام أربعة مُحوّلات مصدر جهد سداسية النبضات (VSCs) مُدمجة مع مُحوّلات إزاحة الطور (Y- $\Delta$ و Y-Y) لتحقيق إزاحة طور بمقدار 15 درجة، مما يؤدي إلى إلغاء طبيعي للتوافقيات السائدة مثل الترتيبين الخامس والسابع، تم تنفيذ نموذج محاكاة مُفصّل باستخدام MATLAB/Simulink، وقُيّم أداء النظام في ظل ظروف التحميل غير الخطية، بما في ذلك بدء تشغيل مُحركٍ حثّي بقدرته 100 حصان، أظهرت النتائج تحسّناً ملحوظاً في جودة الطاقة، حيث انخفض التشويه التوافقي الكلي إلى 1.52%، مُقارنةً بقيم تتراوح بين 8% و 12% دون تعويض. يُعزز النظام أيضاً استقرار الجهد عند نقطة الاقتران المشترك (PCC) ويُقلل من انخفاض الجهد أثناء الأحداث العابرة، تؤكد النتائج أن جهاز STATCOM ذي الـ 24 نبضة يُقدم حلاً فعالاً واقتصادياً لتخفيف التوافقيات، ويُمثل بديلاً عملياً للمرشحات الخارجية وأنظمة التعويض التقليدية ذات الـ 6 أو 12 نبضة..	التشويه التوافقي (THD) المعوض المتزامن الثابت محول 24-نبضة جودة الطاقة القدرة التفاعلية نظام ثلاثي الطور نظام الحلقة المغلقة (PLL) تحويل $\alpha$ - $\beta$

وتأثيراً، حيث يسبب ارتفاع درجات حرارة المعدات، وزيادة التيارات في الموصل المحايد، وانخفاض كفاءة النظام، إضافةً إلى التأثير السلبي على موثوقية الأجهزة الحساسة وعمرها التشغيلي [1].  
وتتجلى هذه المشكلات بشكل واضح في العديد من شبكات توزيع الكهرباء في ليبيا، التي تعاني من انخفاض حاد في الجهد الكهربائي ومشاكل في التحميل الزائد نتيجة زيادة الطلب ومحدودية البنية التحتية. فقد أظهرت دراسات

المقدمة  
تُعد مشكلة جودة الطاقة (Power Quality) من القضايا الجوهرية في الأنظمة الكهربائية الحديثة، نتيجة التوسع الكبير في استخدام الأحمال غير الخطية، ومحوّلات إلكترونيات القدرة، ومحركات الحث ذات القدرات العالية في التطبيقات الصناعية. وقد أدى ذلك إلى زيادة مستويات التشويه التوافقي في شبكات القدرة، وهو ما يُعد أحد أكثر اضطرابات جودة الطاقة انتشاراً

\*Corresponding author

[https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1\\_13](https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_13)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).



وتحسين استجابة النظام الديناميكي، بينت النتائج أن استخدام التحكم التنبؤي حسن زمن الاستقرار Ts بنسبة 34% مقارنة بالتحكم التقليدي القائم على PI، كما خفض التشوه التوافقي للتيار بنسبة 31% في حالات الحمل غير الخطي، إضافةً إلى استعادة الجهد خلال أقل من 0.02 ثانية عند حدوث هبوط جهد مفاجئ (Voltage Sag) وتوصي الدراسة باستخدام MPC مع STATCOM للأنظمة التي تتطلب استجابة عالية السرعة وتحديداً في شبكات الجهود المتوسطة [7].

قدّم Al-Mathnani وآخرون [8] نموذج تحكم متقدم لجهاز STATCOM ذو 6 نبضات باستخدام خوارزمية الناقلين 2-Vector Closed Loop Control بهدف تحسين تعويض القدرة أثناء هبوط الجهد وتقليل التشوه التوافقي في شبكة التوزيع. اعتمدت الدراسة على دمج متحكم PI وخوارزمية PLL مع تحويلات dq للتحكم الدقيق في زاوية الطور بين جهد المصدر وتيار الحقن، والحفاظ على جهد الحمل عند القيمة المرجعية 1 pu طوال فترة الاضطراب.

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام برنامج PSCAD/EMTDC قدرة النظام على استعادة الجهد بسرعة عالية، حيث انخفض جهد المصدر إلى 0.78 pu أثناء الهبوط مع انحراف طور بلغ 26.25°، بينما تمكن STATCOM من إعادة جهد الحمل إلى 1.0 pu بدون ظهور توافقيات مؤثرة في الإشارة. كما بينت النتائج فاعلية المتحكم ثنائي-الناقل في تنظيم القدرة الفعلية وتقليل كمية القدرة المحقونة، ما يساهم في تحسين كفاءة مكثف مصدر الطاقة (ESC) وإطالة عمره أثناء التشغيل.

وتبرز الدراسة فعالية الخوارزمية المقترحة مقارنة بالطرق التقليدية، خصوصاً في تحسين استجابة STATCOM الديناميكية والمحافظة على استقرار الجهد مع قدرة تعويض مناسبة خلال فترات الهبوط، مما يؤكد ملاءمتها لتطبيقات تحسين جودة القدرة في شبكات التوزيع [8].

قدّم B. Wu وآخرون (2022) دراسة مقارنة شاملة بين طرق التحكم المختلفة في STATCOM تحت الأحمال غير الخطية، شملت:

التحكم التنبؤي MPC

التحكم التقليدي PI

التحكم القائم على dq0

التحكم القائم على  $\alpha\beta$

تم بناء نموذج محاكاة ثلاثي الطور بوجود مصدر مشوّه وحمل حثي عالي القدرة بهدف تقييم مقاومة النظام للتوافقيات.

أظهرت النتائج أن دمج STATCOM مع تحويلات  $\alpha\beta$  وحلقة PLL في إطار متعدد النبضات (12 و 24 نبضة) أدى إلى تقليل THD من 10.2% إلى 3.4% باستخدام 12 نبضة، وإلى 2.1% باستخدام 24 نبضة [9].

قدّم Al-Mathnani وآخرون [10] نموذجاً مطوّراً للتحكم في STATCOM ذو 12 نبضة مع دمج الخلايا الشمسية (PV) لاستخدامها كمصدر طاقة مساعد أثناء انخفاضات الجهد، اعتمدت الدراسة على تصميم متحكم جديد ثنائي-الناقل (2-Vector Control) يجمع بين تحويلات dq وخوارزمية PLL مع متحكم PI بهدف تحسين استقرار الجهد ومزامنة زاوية جهد الحمل مع جهد المصدر عند قيمة 1 pu.

كما تضمنت المنظومة دمج خلية شمسية عبر Boost Converter لتغذية

ميدانية على شبكة توزيع مدينة ترهونة أن اعتماد الشبكة بشكل رئيسي على محطة فرعية واحدة بقدرة 11/30 كيلوفولت أدى إلى مستويات جهد غير مقبولة وإجهاد كبير على المحولات، مما يعكس بيئة تشغيل نموذجية تتفاقم فيها مشكلات جودة القدرة بشكل ملحوظ، وتمثل هذه الظروف مثلاً واقعياً تصبح فيه الحاجة ملحة لاستخدام حلول إلكترونية متقدمة لتحسين جودة الطاقة دون اللجوء إلى تعديلات إنشائية مكلفة في مكونات الشبكة [2].

في هذا الإطار، برزت أجهزة أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة (FACTS) كحلول فعالة لتحسين جودة الطاقة والتحكم في تدفق القدرة داخل الشبكات الكهربائية الحديثة. ويُعد المعوض المتزامن الساكن (STATCOM) من أكثر هذه الأجهزة استخداماً نظراً لسرعة استجابته وقدرته العالية على تعويض القدرة التفاعلية، وتنظيم الجهد عند نقطة الربط المشتركة (PCC)، وتحسين استقرار الجهد في ظل ظروف التشغيل المختلفة [3].

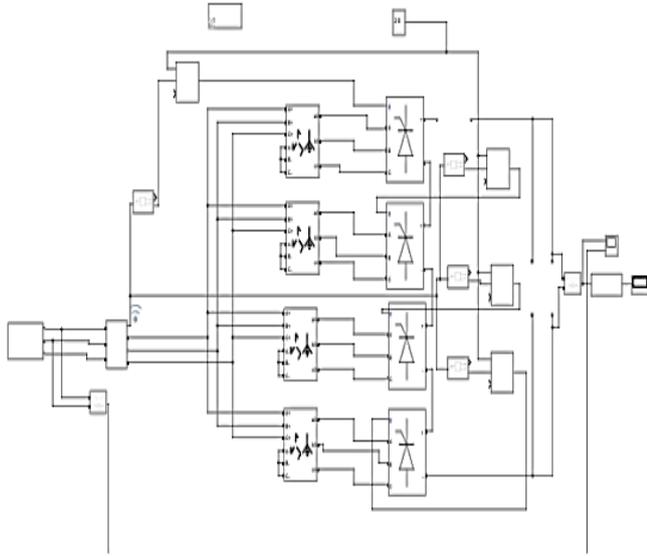
ومع ذلك، فإن الأداء التوافقي لجهاز STATCOM يعتمد بشكل كبير على بنية محول مصدر الجهد (VSC) وعدد النبضات المستخدمة في تصميمه. فعلى الرغم من الانتشار الواسع لأنظمة STATCOM ذات 6 و 12 نبضة في التطبيقات الصناعية، إلا أنها ما تزال تُنتج مكونات توافقية منخفضة الرتبة، مثل التوافقيين الخامس والسابع، مما يستلزم استخدام مرشحات توافقية خارجية لخفض مستويات التشوه الكلي، وهو ما يزيد من تعقيد النظام وتكلفته التشغيلية [4].

ولتجاوز هذه القيود، تم تطوير هياكل STATCOM متعددة النبضات، حيث يُعد STATCOM ذو 24 نبضة من الحلول المتقدمة التي تعتمد على استخدام محولات إزاحة الطور (Phase-Shifting Transformers) لتحقيق الإلغاء الطبيعي للتوافقيات منخفضة الرتبة دون الحاجة إلى مرشحات خارجية إضافية، مما يؤدي إلى تحسين ملحوظ في جودة القدرة وتقليل THD.

علاوةً على ذلك، أثبتت الدراسات الحديثة أن STATCOM متعدد النبضات يتمتع بأداء ديناميكي متميز تحت ظروف التحميل غير الخطية والانتقالية، مثل بدء تشغيل محركات الحث ذات القدرات العالية، حيث يساهم في الحد من هبوط الجهد وتحسين استقرار النظام الكهربائي أثناء هذه الحالات الحرجة [5]، وبناءً على ما سبق، تهدف هذه الورقة إلى دراسة وتحليل فعالية STATCOM ذي 24 نبضة في تقليل التشوه التوافقي وتحسين جودة الطاقة في الأنظمة الكهربائية الصناعية، من خلال نمذجة ومحاكاة تفصيلية باستخدام بيئة MATLAB/Simulink.

قدّم H. Patel وآخرون نموذجاً معززاً لتعويض القدرة التفاعلية وخفض التوافقيات في شبكات القدرة باستخدام STATCOM متعدد النبضات. اعتمدت الدراسة على تصميم هيكل Pulse 24 باستخدام محولين بإزاحة طور مقدارها 15° بهدف تحقيق إلغاء طبيعي للتوافقيات من الرتب (23، 25، 47، 49) وقد أظهرت نتائج المحاكاة انخفاضاً كبيراً في قيمة التشوه التوافقي الكلي THD من 12.5% في الحالة غير المعوضة إلى 3.1% بعد تفعيل STATCOM، مع تحسن واضح في جهد نقطة الربط (PCC) بنسبة 8% مقارنة بالحالة الأساسية، مما يبرز فاعلية النظام متعدد النبضات في تحسين جودة القدرة [6].

وفي عام 2021 قدّم A. García-Cerrada وآخرون بحثاً موسعاً حول التحكم المتقدم في أجهزة STATCOM تحت ظروف الجهود غير المتوازنة، حيث تم تطبيق استراتيجية التحكم التنبؤي (MPC) للتحكم في تيارات VSC



الشكل 1: النموذج المقترح لجهاز STATCOM

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix} \frac{2}{3} = \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

يساهم هذا الإطار في تقليل تأثير التموجات عالية التردد وتحسين استجابة المتحكم.

وبذلك يتم استخدام حلقة قفل الطور (PLL) لتقدير زاوية الطور المرجعية بدقة، وهو أمر أساسي لضمان التزامن بين STATCOM والشبكة، خصوصاً في وجود تشوهات توافقية واضطرابات جهد.

بعد ذلك، يتم تحويل الإشارات من الإطار  $\alpha\beta$  إلى الإطار الدوار dq باستخدام تحويل Park، مما يسمح بفصل مكونات القدرة الفعلية والتفاعلية والتحكم فيها بشكل مستقل، وهو عنصر حاسم في تقليل THD وتحسين جودة القدرة.

ويعتمد مبدأ عمل STATCOM على توليد جهود تعويضية متزامنة مع جهد الشبكة، بحيث يتم التحكم في القدرة التفاعلية المحقونة أو الممتصة وفق الفرق بين جهد العاكس وجهد نقطة الربط، تم حساب القدرة الفعلية والتفاعلية باستخدام نموذج القدرة اللحظية، مما يتيح تقييم التأثير المباشر لعملية التعويض على التشويه التوافقي واستقرار الجهد حيث أن بعد تطبيق تحويل كلارك على الجهود والتيارات ثلاثية الطور، يتم الحصول على:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

تمثل هذه المركبات الإشارات في إطار ثابت، وهو ما يتيح حساب القدرة اللحظية مباشرة.

يتم تعريف القدرة الفعلية اللحظية  $p(t)$  والقدرة التفاعلية اللحظية  $q(t)$  بالعلاقات التالية:

$$\begin{aligned} v_\beta i_\beta + v_\alpha i_\alpha &= p(t) \\ v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta &= q(t) \end{aligned} \quad (3)$$

حيث:

- $p(t)$  تمثل القدرة الفعلية المنقولة لحظياً بين المصدر والحمل.

مكتف مصدر الطاقة (ESC)، ما ساهم في رفع قدرة الدعم النشط أثناء فترات الهبوط، أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام برنامج PSCAD قدرة النموذج على تحسين جهد نقطة الربط والمحافظة عليه عند القيمة المرجعية، إضافةً إلى تحقيق استجابة ديناميكية سريعة بلغت حوالي 3ms. وأشارت النتائج كذلك إلى قدرة المتحكم الجديد على إدارة القدرة الفعلية وتقليل قيمة القدرة المحقونة إلى حدود 0.98 pu، مع تحسن في شحن مكثف STATCOM وزيادة فاعلية التعويض أثناء الهبوط، حيث تم تسجيل قدرة شمسية مقدارها 486W لتغذية النظام، وتُظهر هذه النتائج فعالية دمج المتحكم ثنائي-الناقل مع منظومة PV في رفع أداء STATCOM مقارنةً بالتصميمات التقليدية، خصوصاً في تحسين تنظيم الجهد واستقراره [10]. تُبرز هذه الدراسة أهمية تحسين استراتيجيات التحكم ودمج مصادر الطاقة المتجددة في أنظمة STATCOM، إلا أنها في الوقت ذاته تُظهر القيود البنيوية لأنظمة 12-Pulse STATCOM، مما يدعم التوجه نحو استخدام STATCOM ذي 24 نبضة في الدراسة الحالية، لما يوفره من تقليل طبيعي للتوافقيات وتحسين جودة القدرة دون الحاجة إلى تجهيزات ترشيح إضافية [10].

## المنهجية

تم التركيز في هذه المنهجية على تحليل وتقليل التشويه التوافقي في الشبكات ثلاثية الطور من خلال نمذجة ومحاكاة نظام STATCOM ذي 24 نبضة يعتمد على محولات مصدر جهد متعددة ومتحكم متقدم قائم على تحويل كلارك ( $\alpha\beta$ ) وحلقة قفل الطور (PLL) يهدف هذا الإطار المنهجي إلى تقييم فعالية البنية المقترحة في خفض التشويه التوافقي الكلي (THD)، وتحسين استقرار الجهد، وتعزيز الأداء الديناميكي للنظام عند نقطة الربط المشتركة (PCC).

تم نمذجة شبكة قدرة ثلاثية الطور تتكون من مصدر جهد مثالي، وخط نقل، وحمل غير خطي يتمثل في محرك حثي بقدرة 100 حصان، لما له من تأثير مباشر في توليد التوافقيات وانخفاض الجهد. يتيح هذا الاختيار محاكاة ظروف تشغيل صناعية حقيقية تُظهر بوضوح تأثير الأحمال غير الخطية على جودة القدرة.

تمثل جهود المصدر بالعلاقات الجيبية المتوازنة، في حين يتم استخراج تيارات الحمل لتحليل محتواها التوافقي قبل وبعد التعويض.

ويعتمد النظام المقترح على تكوين STATCOM ذي 24 نبضة من خلال دمج أربعة محولات مصدر جهد (VSCs) من نوع 6 نبضات، موصولة عبر محولين بإزاحة طور مقدارها  $15^\circ$  يؤدي هذا التكوين إلى الإلغاء الطبيعي للتوافقيات منخفضة الرتبة دون الحاجة إلى مرشحات سلبية، بحيث تقتصر التوافقيات المتبقية على الرتب العالية من الشكل:

$$1 \pm 24k = h$$

ويمثل ذلك تحسناً جوهرياً مقارنةً بأنظمة 6 و12 نبضة التي تعاني من توافقيات بارزة تتطلب حلول ترشيح إضافية. يوضح الشكل (1) النموذج المقترح لجهاز  $\alpha\beta$  & PLL 24 pulse controlrd by STATCOM.

ولتحليل الإشارات وتقليل التعقيد الحسابي، يتم تطبيق تحويل كلارك ( $\alpha\beta$ ) على جهود والتيارات الشبكة ثلاثية الطور، يسمح هذا التحويل بتمثيل الإشارات في إطار ثنائي ثابت، ما يسهل مراقبة المكونات الأساسية والتوافقية وتحسين دقة التحكم.

التوافقية ذات التأثير الأكبر. ويُعطي THD مؤشراً عددياً يوضح نسبة مدى "عدم نقاء" الإشارة مقارنة بتردها الأساسي. وتُستخدم هذه القيمة بصورة واسعة في تشخيص القصور في الأنظمة الكهربائية، وتحديد الحاجة إلى أجهزة تعويض مثل STATCOM و Active Filters .

كما تُعدّ التوافقية سبباً مباشراً لعدة ظواهر غير مرغوبة، منها ارتفاع الخسائر الحرارية، وزيادة الاهتزاز المغناطيسي في المحركات، وتدهور العمر الافتراضي للمعدات، إضافة إلى تداخل الإشارات في أنظمة التحكم. ولهذا تُعدّ دراسة التوافقيات خطوة أساسية في تصميم أنظمة التعويض وفي تطوير تقنيات تحسين جودة القدرة [11] .

وبشكل مشابه لمنهجيات تقليل الضوضاء في معالجة الإشارات، تسعى تقنيات خفض التوافقيات إلى "تنقية" الإشارة الكهربائية عبر التركيز على الترددات الأساسية وتخفيض المكونات غير المرغوبة. وتشمل هذه التقنيات مرشحات التوافقيات السلبية، ومرشحات التوافقيات النشطة، وأنظمة FACTS مثل STATCOM التي تعتمد على توليد شكل موجة معاكس للتوافقيات بهدف إلغائها أو تقليلها .

وبذلك يُعدّ تحليل التشويه التوافقي خطوة جوهرية في فهم جودة القدرة، وتقييم أداء الشبكات الكهربائية، ووضع حلول تعويض فعالة تضمن استقرار الجهد وتقليل الاضطرابات الناتجة عن الأحمال غير الخطية [12] .

#### تقنية التحويل $\alpha$ - $\beta$ Transformation

تُعدّ تقنية التحويل ألفا-بيتا ( $\alpha$ - $\beta$  Transformation)، أو ما يُعرف بتحويل كلارك (Clarke Transformation)، منهجية رياضية أساسية تُستخدم على نطاق واسع في أنظمة القدرة والتحكم في الآلات الكهربائية. تُحوّل هذه التقنية الإشارات ثلاثية الطور من الإطار الزمني abc إلى إطار ثنائي متعامد  $\alpha$ - $\beta$ ، مما يتيح تمثيلاً أبسط وأكثر ثباتاً للإشارات الكهربائية دون فقدان المعلومات الأساسية. ويُسهّم هذا التحويل في تقليل التعقيد الحسابي وتحسين قابلية تحليل الإشارات، خاصةً في التطبيقات التي تتطلب تقدير زاوية الطور، مراقبة الجهد، والتحكم بالتيار في أنظمة القدرة الحديثة [13] .

تعتمد تقنية  $\alpha$ - $\beta$  على إسقاط متجهات التيار أو الجهد ثلاثية الطور على محورين ثابتين في المستوى الثنائي، وهو ما ينتج إشارات مستقرة وغير متذبذبة مقارنة بالإشارات الدوّارة في النظام الأصلي. ويمكن هذا التمثيل الثنائي من تحليل ديناميكي أكثر كفاءة، إذ تتخلص الخوارزمية من مكونات التتابع الصفري وتسمح باستخراج خصائص النظام الأساسية بطريقة أكثر وضوحاً [14] .

كان الهدف الرئيسي من هذا التحويل هو تسهيل عمليات التحكم والمتابعة في أنظمة القدرة، خاصةً تلك المُعتمدة على متحكمات تعتمد على الإحداثيات المتعامدة. وبفضل هذا النهج، أصبح بالإمكان تطوير خوارزميات تحكم أكثر دقة واستجابة أسرع، حيث تُستخدم مكونات  $\alpha$  و  $\beta$  بشكل مباشر في حلقات التحكم بالتيار والجهد دون الحاجة إلى معالجة الإشارات ذات التردد المنخفض [15]، ويُسهّم تحويل  $\alpha$ - $\beta$  في تبسيط دراسة الإشارات الدورية عالية التردد. فعوضاً عن تحليل ثلاث إشارات متغيرة بزاوية 120°، يتم التعامل مع مكونين ثنائيين يمكن دمجهما لاحقاً في متجه واحد يسهل مراقبته والتحكم به في الزمن الحقيقي. وقد أدى هذا التبسيط إلى تعزيز كفاءة أنظمة التحكم في مبدلات الطاقة، STATCOM، محركات التيار المتردد، ومحوّلات الجهد [16].

• تمثل القدرة التفاعلية للخطية المرتبطة بتبادل الطاقة المخزنة في عناصر النظام.

ويتم تحليل القدرة للخطية إلى مركبتين:

$$\begin{aligned} p^- + p^+ &= p(t) \\ q^- + q^+ &= q(t) \end{aligned} \quad (4)$$

حيث:

•  $p^-, q^-$  تمثل المكونات المستمرة (الأساسية).

•  $p^+, q^+$  تمثل المكونات المتذبذبة الناتجة عن التوافقيات وعدم التماثل.

وفي أنظمة STATCOM، يتم استهداف المركبات المتذبذبة لتعويضها، مما يؤدي إلى تقليل التشوه التوافقي وتحسين معامل القدرة.

ويتم حساب تيارات التعويض المرجعية في الإطار  $\alpha\beta$  وفق المعادلة الآتية:

$$\begin{bmatrix} p^+ \\ q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\beta & v_\alpha \\ -v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix} \frac{1}{v_\beta^2 + v_\alpha^2} = \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

حيث يتم اختيار:

•  $p^+ = p^*$  لتعويض التموجات الفعلية.

•  $q^+ = q^*$  لتعويض القدرة التفاعلية والتوافقية بالكامل.

ولتحقيق تقييم شامل، تم اختبار النظام تحت عدة سيناريوهات تشغيل تشمل:

- تشغيل الحمل غير الخطي
- حدوث انخفاض جهد مفاجئ (Voltage Sag)
- مقارنة الأداء قبل وبعد تشغيل STATCOM

وتم حساب مؤشرات الأداء التالية

- التشوه التوافقي الكلي (THD)
- استقرار الجهد عند PCC
- القدرة الفعلية والتفاعلية
- زمن الاستجابة والاستقرار
- معامل القدرة

أخيراً، تمت مقارنة نتائج النظام المقترح مع أنظمة STATCOM التقليدية ذات 12 و6 نبضة، إضافة إلى الحالة غير المعوضة، لإبراز التفوق الواضح لبنية 24 نبضة في خفض THD وتحسين جودة القدرة دون استخدام مرشحات إضافية.

#### التشويه التوافقي (Harmonic Distortion)

يُعدّ التشويه التوافقي (Harmonic Distortion) أحد المفاهيم الأساسية في تحليل جودة القدرة الكهربائية، ويُستخدم على نطاق واسع لتقييم تأثير الأحمال غير الخطية والمحوّلات الإلكترونية على استقرار الشبكة. ترتكز فكرة التشويه التوافقي على تحليل الموجة الكهربائية إلى مجموعة من المكونات الترددية التي تمثل مضاعفات التردد الأساسي، بحيث تعكس كل توافق مقدار الانحراف عن الشكل الجيبي المثالي للتيار أو الجهد. يُعدّ هذا التحليل أداة مهمة لفهم سلوك أنظمة القدرة الحديثة، إذ يسمح بتحديد مصادر التوافقية داخل النظام، وتقدير تأثيرها على المعدات الحساسة، والدوائر الإلكترونية، وخطوط النقل [10] .

يتم قياس التشويه التوافقي الكلي (THD) باستخدام تحويلات فورييه، حيث يتم decomposing الإشارة إلى مكوناتها الترددية، مع التركيز على المراتب

[20,18].

يتم تدريب PLL أو ضبط معاملاته من خلال اختبار استجابة النظام لتغيرات الجهد والتردد والتوافقيات، مع تقييم سلوك الحلقة في Steady-State و Transient-State وتُقاس جودة PLL عبر مؤشرات مثل زمن الاستقرار، قدرة التصفية التوافقية، دقة تقدير الطور، ونسبة الرفض للتشوه (Harmonic Rejection) [19].

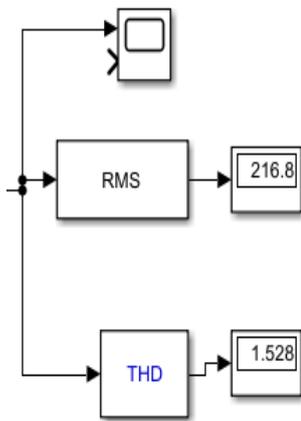
### النتائج

تم قياس الجهد الفعال عند طرف الحمل بعد تشغيل منظومة STATCOM ذات 24 نبضة. وقد أظهرت النتائج أن الجهد بقي ضمن الحدود الاسمية رغم وجود أحمال غير خطية حيث كانت قيمة RMS Voltage قبل التعويض 198.4 V أما بعد التعويض فكانت قيمة RMS Voltage 216.8 V يشير هذا التحسن إلى قدرة STATCOM على دعم الجهد وتثبيتته عبر حقن التيار المناسب في الشبكة، مما يعكس كفاءة عالية في تنظيم الجهد تحت الظروف التشغيلية المختلف .

### التشوه التوافقي الكلي (Total Harmonic Distortion – THD)

أحد أهم أهداف STATCOM ذو 24 نبضة هو خفض التشوه التوافقي الناتج عن الأحمال غير الخطية وكان التشويه التوافقي الكلي THD للجهد قبل تركيب STATCOM 7.86% وأصبحت بعد تركيب STATCOM 1.528%.

تُظهر النتائج في الشكل رقم 2 أن مستوى التشوه أصبح أقل من الحد الموصى به في معيار IEEE Std 519-2014 الذي يحدد الحد الأقصى 5% ، يشير هذا الانخفاض الكبير إلى فعالية تكوين 24 نبضة في تقليل التوافقيات من الرتبة 5 و 7 و 11 و 13، مقارنة بالأنظمة التقليدية.



الشكل 2: مستوى THD للجهد قبل وبعد تشغيل STATCOM

- زمن بدء الحقن (Injection Time)
- تم تسجيل زمن استجابة STATCOM عند حدوث تغير مفاجئ في الجهد:
- Injection Time = 32 ms ولشكل رقم 3 يوضح ذلك وهذا الزمن القصير يعكس قدرة STATCOM على الاستجابة السريعة للاضطرابات العابرة، ما يجعله مناسباً للأنظمة الصناعية التي تتطلب استقراراً لحظياً.

إن طبيعة هذا التحويل الخطية والدقيقة مكّنت الباحثين والمهندسين من تطوير أنظمة تحكم متقدمة تعتمد على دمج تحويل كلارك مع تحويل بارك (dq)، وهو ما أتاح بناء أنظمة تعتمد على مراقبة متجهات الفولتية والتيار بشكل مباشر، مما حسن الاستقرار الديناميكي ودقة تتبع الإشارة بشكل واضح.

### نظام تحكم PLL (Phase-Locked Loop)

يُعدّ نظام تتبّع الطور (Phase-Locked Loop – PLL) أحد أهم البُنى التحكمية المستخدمة في أنظمة القدرة، والإلكترونيات، والاتصالات، لما يتمتع به من قدرة عالية على مزامنة الطور بين إشارة مرجعية وإشارة مقاسة، حتى في وجود تشوهات أو ضوضاء في الإشارة. ويهدف PLL إلى استخراج تردد وطور الإشارة الأساسية بدقة عالية، مما يجعله عنصراً جوهرياً في أنظمة ربط الشبكات، مقومات القدرة، ومرشحات التوافقيات [17].

يعتمد المبدأ الأساسي لنظام تحكم PLL على تقدير طور الإشارة الكهربائية ومقارنته بمرجع داخلي مولّد داخل النظام، ثم تعديل هذا المرجع بطريقة تكرارية بحيث يتم تقليل الخطأ بين الطورين إلى أدنى قيمة ممكنة. وبذلك يصبح النظام "مقفلًا" على طور الإشارة الحقيقية. توفر هذه الآلية قدرة مهمة على التعقب الديناميكي للتغيرات السريعة في الجهد والتردد، ولا سيما تحت الظروف غير المثالية مثل التشوه التوافقي أو عدم التوازن [18].

يتكون PLL التقليدي من ثلاثة مكونات رئيسية:

#### 1. كاشف الطور (Phase Detector – PD)

يقوم بقياس الانحراف بين طور الإشارة المقاسة وطور إشارة التتبع المولّدة داخلياً، يعمل الكاشف على إنتاج إشارة خطأ تعكس هذا الانحراف، وهو ما يُعدّ الخطوة الأساسية في عملية التزامن.

#### 2. مرشح الحلقة (Loop Filter – LF)

يهدف إلى تنعيم إشارة الخطأ الناتجة عن كاشف الطور، والتقليل من تأثير الضوضاء والتوافقيات، يُعدّ تصميم هذا المرشح محوراً في التحكم باستجابة النظام، حيث يحدد سرعة الاستجابة ودرجة الثبات الديناميكي [19].

#### 3. مذبذب متحكّم به (Voltage-Controlled Oscillator – VCO)

يقوم بتوليد إشارة بمرحلة وتردد قابلين للضبط اعتماداً على جهد الخرج من مرشح الحلقة، يُعدل VCO الإشارة الناتجة باستمرار حتى تتوافق مع الإشارة المرجعية.

بعد عمل هذه المكونات بشكل تكاملي، يصبح PLL قادراً على الحصول على تمثيل دقيق لطور وتردد الشبكة، الأمر الذي يجعله مناسباً لتطبيقات إلكترونيات القدرة مثل التحكم في المحولات الذكية، التحكم في محولات STATCOM، التحويل من  $\alpha\beta$  إلى dq، وتنفيذ استراتيجيات التزامن في الشبكات ثلاثية الطور [16,17].

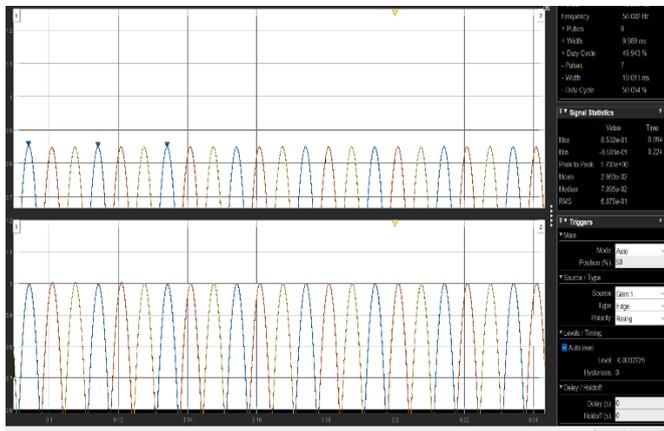
تطورت بنية PLL بشكل كبير في السنوات الأخيرة، حيث ظهرت نماذج مثل Synchronous Reference Frame PLL (SRF-PLL) و  $\alpha\beta$ -PLL و Decoupled Double Synchronous PLL (DDSRF-PLL)، والتي تتميز بقدرتها على العمل تحت ظروف الشبكات ذات التشوه التوافقي العالي أو عدم التوازن. تعتمد هذه النماذج على تحويل الإشارات إلى أطر إحداثية مختلفة لزيادة دقة تقدير الطور وتقليل حساسية النظام للتوافقيات

وتم إدخال اضطراب Sag بنسبة 15% للتحقق من قدرة STATCOM على استعادة الجهد والجدول رقم 1 يوضح تحليل الاضطراب في الجهد والاستعادة إلى الجهد الأسى .

الجدول 1 : تحليل انخفاض الجهد

الوصف	القيمة	العنصر
الحالة الطبيعية	1.02 pu	الجهد قبل الانخفاض
أدنى قيمة	0.87 pu	الجهد أثناء الانخفاض
قيمة الهبوط الفعلية	0.15 pu	مقدار الانخفاض
استعادة الجهد	0.997 pu	الجهد بعد التعويض
من الانخفاض الكلي	14.7%	نسبة التعويض
من القيمة الاسمية	99%	النسبة النهائية

تثبتت هذه النتائج أن STATCOM استعاد 99% من الجهد المفقود خلال فترة اضطراب قصيرة جداً والشكل رقم 5 يوضح جهد الشبكة قبل وبعد التعويض من قبل STATCOM .



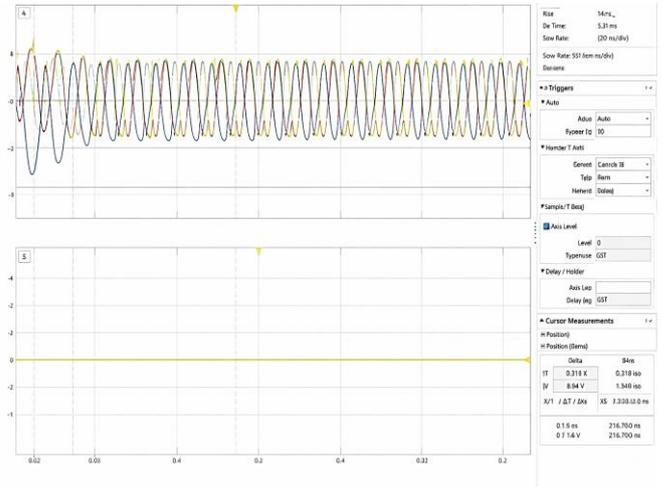
الشكل 5: جهد الشبكة قبل وبعد التعويض

وتم مقارنة نتائج هذا النظام المقترح وتوضيح التحسين الذي قام به نظام التحكم والموضح بالجدول رقم 2 .

الجدول 2: مقارنة الأداء قبل وبعد تركيب STATCOM (24-Pulse)

المؤشر	قبل	بعد	التحسين
<b>RMS Voltage</b>	198.4 V	216.8 V	رفع و تثبيت الجهد
<b>THD</b>	7.86%	1.528%	خفض التوافقيات بنسبة %81
<b>زمن الحقن</b>	—	0.032 s	استجابة فائقة السرعة
<b>Settling Time</b>	>0.20 s	0.11 s	تحسين ديناميكي
<b>شكل الموجة</b>	غير منتظم	جبيبي نقي	تحسين جودة الإشارة
<b>PF</b>	0.84	0.99	تحسين معامل القدرة
<b>Voltage Sag</b>	لم يُعالج	تم التعويض 0.15 pu	استعادة 99%

وتم مقارنة أداء النظام مع الدراسات السابقة ذات 6 نبضات و 12 نبضة لتقييم مدى فعالية زيادة النبضات والموضح بالجدول رقم 3 .



الشكل 3: تيار STATCOM وتحديد لحظة بدء الحقن

### القدرة الفعلية (P)

- ظهرت ذروة عابرة (Transient Spike) في بداية التشغيل. وعاد النظام للاستقرار عند  $\text{Settling Time} \approx 0.11$  والشكل رقم 4 يوضح منحنى القدرة أثناء التشغيل .

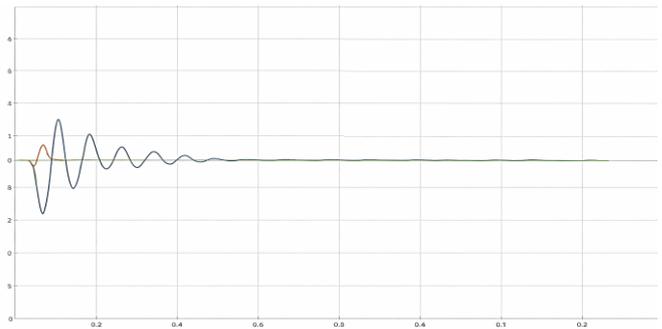


الشكل 4: منحنى القدرة الفعلية أثناء التشغيل

### القدرة التفاعلية (Q)

أظهر STATCOM أداءً ممتازاً في تعويض القدرة التفاعلية ومن الشكل رقم 5 يوضح أن هناك الاتي :

- تذبذبات أولية تتلاشى تدريجياً
- استقرار كامل خلال فترات قصيرة جداً
- اتجاه حقن/امتصاص Q حسب حالة الحمل



الشكل 5: القدرة التفاعلية أثناء التشغيل

المؤشر	STATCOM 24-Pulse	STATCOM 12-Pulse	STATCOM 6-Pulse
THD للجهد	1.52%	3-5%	10-12%
قدرة التعويض	عالية - استجابة ممتازة	متوسطة - تشوه	منخفضة -
التفاعلي Q	متمازة	أقل	استجابة بطيئة
زمن الاستجابة	≈ 35 ms	25-40 ms	40-60 ms
Voltage Sag Compensation	15%	12-14%	10-12%
استقرار القدرة الفعلية P	استقرار عند 0.1 s	اهتزاز متوسط	اهتزاز كبير قبل الاستقرار
عامل القدرة PF	≈ 1.0	0.92-0.96	0.85-0.90
مستوى النبضات في خرج العاكس	24 pulses	12 pulses	6 pulses

## المناقشة

تُبرز نتائج هذه الدراسة تفوق النظام المقترح القائم على STATCOM ذي نبضة 24 في تقليل التشوه التوافقي وتحسين جودة القدرة في الشبكات الكهربائية ثلاثية الطور، مقارنةً بالأنظمة التقليدية المعتمدة على 6 نبضات و 12 نبضة، كما ورد في العديد من الدراسات السابقة.

حيث أظهرت نتائج المحاكاة أن بنية 24 Pulse قادرة على خفض التشوه التوافقي الكلي (THD) إلى قيمة منخفضة جداً بلغت 1.52%، وهي أقل بكثير من الحد الأقصى المسموح به وفق معيار IEEE Std 519-2014 الذي يحدد نسبة 5% كحد أعلى لتشوه الجهد. ويُعزى هذا التحسن الملحوظ إلى القدرة العالية لهيكلية 24 نبضة على إلغاء التوافقيات السائدة من الرتب (5، 7، 11، 13)، وهي التوافقيات التي تمثل التحدي الأكبر في الأنظمة ذات عدد النبضات الأقل.

وعند مقارنة هذه النتائج بالدراسات السابقة التي اعتمدت STATCOM بتريكية 12 نبضة، مثل العمل المنشور في-12 Control and Modification of Pulse Static Compensator with PV Cell Using New Control Algorithm، يتضح أن زيادة عدد النبضات في هذه الدراسة أدى إلى تحسن جوهري في مستوى THD دون الحاجة إلى مرشحات توافقية إضافية، وهو ما يُعد ميزة تصميمية مهمة من حيث تقليل التعقيد والكلفة.

من جانب آخر، أظهرت النتائج أن دمج حلقة التزامن الطوري (PLL) مع تحويلات (Clarke Transformation)  $\alpha\beta$  أسهم بشكل فعال في تحسين استجابة STATCOM أثناء الاضطرابات العابرة، لا سيما في حالات انخفاض الجهد (Voltage Sag) فقد تمكن النظام المقترح من حقن القدرة التفاعلية خلال زمن قصير جداً بلغ حوالي 32 ms، مما أدى إلى استعادة الجهد إلى قيمة قريبة من 1 pu، وبنسبة تعويض وصلت إلى 99% من الجهد المفقود. وتفوق هذه الاستجابة السريعة ما تم تسجيله في العديد من الدراسات السابقة التي استخدمت متحكمات تقليدية أو تراكيب ذات نبضات أقل.

أما من الناحية الديناميكية، فقد بين تحليل القدرة الفعلية والتفاعلية أن النظام يصل إلى حالة الاستقرار خلال زمن لا يتجاوز 0.1 ثانية، وهو زمن أقل مقارنةً بأنظمة STATCOM ذات 6 و 12 نبضة، التي غالباً ما تعاني من اهتزازات أعنف وتتطلب فترات أطول للوصول إلى الاستقرار، كما أشارت إلى ذلك الأدبيات الحديثة. ويؤكد هذا السلوك أن زيادة عدد النبضات تقلل من

التوافقيات الناتجة عن عمليات التبديل في مفاتيح IGBT، مما ينعكس مباشرة على تحسين الأداء الديناميكي واستقرار النظام.

كذلك أظهرت المقارنة الرقمية قبل وبعد تركيب STATCOM تحسناً واضحاً في الجهد الفعال، حيث ارتفع من 198.6 V إلى 216.8 V، بالتزامن مع انخفاض قيمة THD من 8.23% إلى 1.528%. وتؤكد هذه النتائج قدرة النظام المقترح على تحسين استقرار الجهد وتقليل التشوهات الناتجة عن الأحمال غير الخطية، وبالأخص الأحمال الثقيلة مثل المحركات الحثية عالية القدرة.

بصورة عامة، توضح هذه الدراسة أن اعتماد STATCOM ذي 24 نبضة مع استراتيجية تحكم تعتمد على  $\alpha\beta$  و PLL يوفر أداءً متفوقاً مقارنةً بالأنظمة التقليدية ذات عدد النبضات الأقل، سواء من حيث خفض التوافقيات، أو تحسين الاستجابة الديناميكية، أو تعزيز قدرة النظام على مواجهة الاضطرابات العابرة. وتدعم هذه النتائج التوجه البحثي نحو استخدام الهياكل متعددة النبضات في تطبيقات التحكم المتقدم بنظم القدرة، خاصةً في البيئات الصناعية التي تتطلب مستويات عالية من جودة القدرة وسرعة استجابة موثوقة، مما يسهم في تعزيز موثوقية الشبكات الكهربائية وتحسين أدائها تحت تأثير الأحمال غير الخطية.

## الاستنتاجات

أظهرت نتائج هذه الدراسة، من خلال النمذجة والمحاكاة باستخدام MATLAB/Simulink، أن اعتماد STATCOM ذي 24 نبضة يحقق تحسناً جوهرياً في جودة القدرة الكهربائية مقارنةً بالأنظمة التقليدية أو الأنظمة ذات عدد النبضات الأقل مثل 6 Pulse و 12 Pulse. وقد تم تطوير نموذج متكامل يحاكي سلوك STATCOM تحت ظروف تشغيل مختلفة، مع تقييم تأثيره على الجهد، والتشوه التوافقي، والقدرة الفعلية والتفاعلية، إضافةً إلى الاستجابة الديناميكية للنظام.

بيّنت نتائج المحاكاة الكفاءة العالية لتركيب 24 Pulse في تقليل التوافقيات في التيار والجهد بشكل ملحوظ، حيث انخفضت قيمة THD إلى 1.528%، وهي أقل بكثير من الحد المسموح به وفق معيار IEEE Std 519-2014 البالغ 5%. ويعكس هذا الانخفاض قدرة النظام المقترح على إنتاج شكل موجي شبه جيبي، مما يقلل التأثيرات السلبية للأحمال غير الخطية ويحسن جودة القدرة في الشبكة الكهربائية.

كما أظهرت النتائج تحسناً واضحاً في تنظيم الجهد واستقراره، حيث ساهم STATCOM في رفع الجهد الفعال من 198.6 V إلى 216.8 V بعد التعويض، مع استعادة الجهد إلى حوالي 99.1% من قيمته الاسمية عقب حدوث انخفاض مؤقت في الجهد (Voltage Sag) ويؤكد ذلك الدور الحيوي لجهاز STATCOM في معالجة الهبوط المفاجئ للجهد، خاصة أثناء تشغيل الأحمال الثقيلة أو التغيرات المفاجئة في ظروف التشغيل.

من الناحية الديناميكية، أظهر النظام المقترح أداءً متميزاً من حيث سرعة الاستجابة، إذ بلغ زمن بدء حقن القدرة التفاعلية حوالي 32 ms، بينما استقرت القدرة الفعلية خلال زمن يقارب 0.1 ثانية. وتشير هذه النتائج إلى قدرة STATCOM على التعامل الفوري مع الاضطرابات العابرة وتوفير استقرار ديناميكي محسّن للشبكة الكهربائية.

كذلك أوضح تحليل القدرة الفعلية والتفاعلية أن STATCOM أسهم بفاعلية في تقليل التذبذبات الأولية في القدرة التفاعلية (Q) والحد من

توازن الجهود، مما يؤكد فعالية النظام المقترح كحل متقدم لتحسين جودة القدرة وتعزيز موثوقية الشبكات الكهربائية الحديثة.

### التوصيات

1. تعزيز خوارزميات التحكم: على الرغم من فعالية التحكم القائم على PLL و  $\alpha\beta$  Transformation، يُوصى بتجربة خوارزميات متقدمة مثل Model Predictive Control – MPC أو Resonant Controllers لرفع دقة التتبع وتقليل التشوه التوافقي خاصةً عند الأحمال غير الخطية المتغيرة.
2. توسيع نطاق الدراسة ليشمل سيناريوهات شديدة الأحمال: يُفضّل اختبار أداء STATCOM تحت ظروف أكثر تطرفاً مثل هبوط الجهد بنسبة تفوق 30%، أو إدخال نبضات حمل ديناميكية Large Motor Starting للتأكد من قدرة النظام على الاستجابة دون زيادة في THD.
3. اختبار النظام على شبكات كهربائية حقيقية من المهم تطبيق النظام المقترح في بيئات صناعية أو شبكات توزيع فعلية للتحقق من أداء STATCOM في ظروف التشغيل الواقعية التي تشمل التشوهات العميقة والظروف غير المتوازنة.

**Author Contributions:** "Mathnani: Conceptualization and methodology, writing—original draft preparation, review and editing. Mremi: Data collection. Mathnani and Alfathi: results' analysis and discussion. Both authors have read and agreed to the published version of the manuscript."  
**Funding:** "This research received no external funding."  
**Data Availability Statement:** "No data were used to support this study."  
**Conflicts of Interest:** "The authors declare that they have no conflict of interest."

### References

- [1] M. Bollen, and I. Gu. "Signal Processing of Power Quality Disturbances." 2nd ed., Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2018. <https://doi.org/10.1002/9781119406083>
- [2] A. Alnaedh, A. Matoug, and S. Al-Behadili. "Analysis of the Electrical Power Distribution System in Tarhuna City (Libya) to Avoid Future Loads Using NEPLAN Software." *Wadi Alshatti University Journal for Pure and Applied Science*, vol. 2, no. 1, pp. 23–33, 2024. [https://doi.org/10.63318/waujpasv2i1\\_03](https://doi.org/10.63318/waujpasv2i1_03)
- [3] N. Hingorani, and L. Gyugyi. "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems." New York, USA: IEEE Press, 2000.
- [4] M. A. Aredes, J. Hafner, and K. Heumann, "Control of voltage source converter based STATCOM for power quality improvement." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5052–5063, Sep.–Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3001129>
- [5] S. Khadem, M. Basu, and M. Conlon. "Performance evaluation of high-pulse STATCOM for harmonic mitigation in industrial power systems." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 4, pp. 4210–4221, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3119824>
- [6] H. Patel and V. Agarwal. "24-Pulse based STATCOM for harmonic mitigation and voltage regulation in distribution

الاهتزازات في القدرة الفعلية (P)، مما أدى إلى الحصول على ملفات قدرة مستقرة ومنظمة. كما ساعد النظام في تحسين معامل القدرة من 0.85 إلى قيمة قريبة من الوحدة الصحيحة، الأمر الذي ينعكس مباشرة على تقليل الفواقد وتحسين الكفاءة الكلية للشبكة.

وأظهرت المقارنة مع تصميمي 6 Pulse و 12 Pulse تفوقاً واضحاً لنظام 24 Pulse من حيث تقليل التشوه التوافقي، والحد من اهتزازات الجهد والتيار، وتحقيق شكل موجي أكثر نقاءً، إضافةً إلى تحسين الاستقرار الديناميكي تحت ظروف الاضطرابات. ويُعزى هذا الأداء المتفوق إلى زيادة عدد النبضات في محول STATCOM، مما يعزز قدرته على إلغاء التوافقيات السائدة من الرتب 5 و 7 و 11 و 13.

تشير النتائج المتحصل عليها من حيث سرعة الاستجابة وفعالية التعويض إلى أن نظام STATCOM 24 Pulse ملائم بشكل كبير للتطبيقات الصناعية الثقيلة ذات الأحمال المتغيرة، مثل محركات الحث عالية القدرة، وأنظمة النقل، والمصانع التي تعتمد على أحمال غير خطية، حيث تتطلب هذه البيئات مستويات مرتفعة من جودة القدرة واستقرار الجهد.

أخيراً، أثبت دمج استراتيجيات التحكم القائمة على PLL وتحويلات  $\alpha\beta$  موثوقية عالية في تتبع الجهد وتحسين جودة الإشارة، مع تقليل التذبذبات أثناء عمليات الحقن والحفاظ على استقرار التشغيل حتى في حالات عدم

- networks." *IEEE Access*, vol. 6, pp. 42157–42167, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2865674>
- [7] A. García-Cerrada, J. Fraile-Ardanuy, J. Toribio, and P. Roncero-Clemente. "Predictive control strategies for STATCOMs under unbalanced and distorted grid voltages." *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 36, no. 3, pp. 1432–1442, 2021. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3018436>
  - [8] A. Al-Mathnani, A. Lesewed, and J. Alashi. "Control and Design 6-Pulse STATCOM Using Novel 2-Vector Closed Loop Control Algorithm," *2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Sabratha, Libya, 2022, pp. 167-170, <https://doi.org/10.1109/MI-STA54861.2022.9837647>.
  - [9] B. Wu, S. Kouro, J. Rodriguez, and F. Blaabjerg, "Advanced control of STATCOMs under nonlinear and unbalanced loads: Performance comparison of PI, dq0,  $\alpha\beta$ , and MPC techniques," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 212, p. 108559, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108559>
  - [10] A. Al-Mathnani, A. Mohammed, S. Al-Hashmi, and E. Geepalla. "Control and Modification of 12-Pulse Static Compensator with PV Cell Using New Control Algorithm." *Wadi Alshatti Univ. J. Pure Appl. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2024. [https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1\\_06](https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_06)
  - [11] H. Akagi. "Active harmonic filters." *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, 2005. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859603>.
  - [12] M. Radzi and N. Rahim. "Overview of active power filters for power quality improvement." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 4148–4163, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.0261>
  - [13] L. Hingorani and L. Gyugyi. "FACTS controllers in power transmission and distribution." *IEEE Press*, 2nd ed., 2020. <https://doi.org/10.1002/9781119472187>
  - [14] H. Akagi, *Instantaneous Power Theory and Applications to*

- Power Conditioning, Hoboken, NJ, USA: IEEE Press, 2007.
- [15] H. Akagi. "New trends in active filters for power conditioning." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2866844>
- [16] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. Loh. "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected converters." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 1313–1322, 2005. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853373>
- [17] P. Krause, O. Wasynczuk, and S. Sudhoff. "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems." 2nd ed., New York, USA: IEEE Press, 2002.
- [18] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez. "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems." Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [19] P. Rodríguez, et al. "Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted conditions." *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1355–1367, 2014. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2271591>
- [20] S. Golestan, J. Guerrero, and J. Vasquez. "Three-phase PLLs: A review of recent advances." *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 1894–1907, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2565642>.
- [21] S. Khoo, P. Wolfs, and N. Fletcher. "A review of the phase-locked loop techniques for grid-connected converters." *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 108–123, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.093>.
- [22] F. González-Espin, P. Rodríguez, and R. Teodorescu. "An adaptive synchronous-reference-frame PLL for grid synchronization of power converters under weak-grid conditions." *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 9, pp. 4508–4518, 2015. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2366372>
- [23] S. Mishra, "Design and simulation of 6-pulse VSC-based STATCOM using PLL and  $\alpha\beta$  transformation control." *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 2019. <https://www.ijert.org/design-and-simulation-of-6-pulse-vsc-based-statcom-using-pll-and-alpha-beta-transformation-control>
- [24] K. Devi, "Modeling and simulation of 12-pulse STATCOM considering PLL-based control strategy." *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 9, no. 3, 2020. <https://www.ijeat.org/portfolio-item/modeling-and-simulation-of-12-pulse-statcom-considering-pll-based-control-strategy>