

نظام شمسي لتشغيل مصاعد الأفراد عبر إنفرتر جسري تسلسلي لتقليل التشوه التوافقي

د. م سهيل أسيد *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٢/٢١ . قُبل للنشر في ٢٠٢٦/١/٢٧)

□ ملخص □

تم في هذا البحث تقييم أداء الإنفرتر الجسري التسلسلي متعدد المستويات مقارنة بالإنفرتر الجسري التقليدي في أنظمة تشغيل المصاعد ثلاثية الطور المغذاة من الألواح الشمسية، حيث يركز البحث على تحسين جودة التيار والجهد المغذي للمحرك عبر تقليل معدل التشوه التوافقي مما يسهم في خفض الضياعات الكهربائية وتحسين كفاءة التشغيل وطول عمر المحرك، تم تصميم النظام بحيث تغذى كل وحدة عاكس جسريه من مجموعة فرعية من الألواح الشمسية مما يتيح مرونة في التحكم وتقليل التأثيرات السلبية للظل، تم محاكاة النظام المقترح باستخدام برنامج الماتلاب لمقارنة التشوه التوافقي والكفاءة والاستجابة الديناميكية بين البنيتين تظهر النتائج أن الإنفرتر الجسري التسلسلي يقلل من التشوه التوافقي بنسبة تفوق ٢٥% مقارنة بالإنفرتر التقليدي ويحسن من جودة الطاقة الواصلة للمحرك بشكل ملحوظ ويؤدي إلى التقليل من الضياعات وتحسين العزم الناتج عن المحرك.
الكلمات المفتاحية: الأنظمة الشمسية للمصاعد، الإنفرتر التسلسلي، معدل التشوه التوافقي، ماتلاب سيمولينك.

*مدير أعمال في قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

A solar-powered elevator system using a series bridge inverter to reduce harmonic distortion.

Dr. Sohail Ispier*

(Received 21/12/2025 . Accepted 27/1/2026)

□ ABSTRACT □

This research evaluates the performance of a multilevel cascaded H-bridge inverter compared to a conventional two-level voltage source inverter in three-phase elevator systems powered by photovoltaic (PV) panels. The study focuses on improving the voltage and current quality supplied to the induction motor by reducing the Total Harmonic Distortion (THD), thereby minimizing electrical losses, enhancing operational efficiency, and extending motor lifespan. The proposed system is designed such that each H-bridge module is fed by an independent PV string, enabling flexible control and mitigating the adverse effects of partial shading. The system is simulated using MATLAB/Simulink to compare THD, efficiency, and dynamic response between the two inverter topologies. Results demonstrate that the cascaded H-bridge inverter reduces THD by more than 25% compared to the conventional inverter and significantly improves the power quality delivered to the motor.

Keywords: Solar elevator systems, Cascaded H-bridge inverter, Total Harmonic Distortion (THD), MATLAB/Simulink.

* Business manager in the Department of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

مقدمة

مع تزايد الاهتمام العالمي بالطاقة النظيفة وترشيد استخدامها، ظهرت أنظمة الطاقة الكهروضوئية كخيار مبتكر لتزويد الأحمال الكهربائية الحرجة والمستهلكة للطاقة، مثل أنظمة المصاعد الحديثة [1]. يشكل تشغيل محركات المصاعد ثلاثية الطور مباشرة من مصادر شمسية تحدياً هندسياً كبيراً، نظراً لطبيعة هذه المحركات التي تتطلب جهداً عالياً، وقدرةً لحظيةً مرتفعة عند بدء التشغيل، فضلاً عن الحاجة إلى جودة طاقة عالية لضمان سلاسة الحركة وطول عمر المعدات. ومن هنا، يبرز التحدي الأساسي في كفاءة نقل الطاقة وجودة الشكل الموجي للجهد والتيار المغذيين للمحرك.

لطالما شكل التشوه التوافقي عائقاً رئيسياً في أنظمة القيادة الكهربائية، إذ يؤدي ارتفاع معدل التشوه التوافقي الكلي إلى زيادة ضياعات النحاس والحديد في المحرك، وارتفاع درجة الحرارة، واهتزازات ميكانيكية غير مرغوب فيها وهي عوامل تقلل من كفاءة النظام وتخفض موثوقيته، خاصة في تطبيقات المصاعد التي تتطلب استقراراً ديناميكياً عالياً. وعادة ما تستخدم الأنفرتات الجسرية التقليدية ثنائية المستوى (Two-Level Voltage Source Inverters) في مثل هذه التطبيقات، إلا أن خرجها يتميز بوجود محتوى توافقي عالٍ، مما يستلزم استخدام فلاتر خارجية مكلفة ومعقدة لتلبية معايير جودة القدرة مثل IEEE 519.

في هذا السياق، تبرز العواكس متعددة المستويات، لاسيما الإنفرت التسلسلي Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter كحل، نظراً لقدرة على توليد جهد خرج أقرب إلى الموجة الجيبية النقية، وبالتالي تقليل التشوه التوافقي بشكل جوهري دون الحاجة إلى فلاتر إضافية [3][2]. وتكمن الميزة الإضافية لهذا الإنفرت في توافقه الطبيعي مع الترتيب التسلسلي للألواح الكهروضوئية، حيث يمكن تغذية كل وحدة H-Bridge من سلسلة مستقلة من الألواح، مما يعزز المرونة، ويقلل من تأثير الظل الجزئي، ويحسن كفاءة التتبع لنقطة الاستطاعة العظمى [4].

بناءً عليه، يهدف هذا البحث إلى دراسة وتحليل أداء نظام متكامل يعتمد على ترتيب تسلسلي للألواح الكهروضوئية مرتبط بعاكس جسري تسلسلي ثلاثي الطور لقيادة محرك المصعد، مع التركيز على تحسين كفاءة نقل الطاقة وتقليل معدل التشوه التوافقي (THD) مقارنةً بالأنظمة التقليدية المبنية على العواكس ثنائية المستوى. وسيتم تقييم النظام من خلال محاكاته باستخدام برنامج MATLAB /Simulink.

أهمية البحث وأهدافه

أهمية البحث

تكمن أهمية البحث في:

١. المساهمة في تحسين كفاءة المصاعد التي تعتمد على أنظمة الطاقة الشمسية من خلال اعتماد بنية عاكس متعددة المستويات، يُقلل من ضياعات الطاقة، ويرفع الكفاءة الكلية للنظام، مما يزيد من العائد الطاقي من نفس عدد الألواح الكهروضوئية.
٢. تعزيز جودة القدرة الكهربائية
٣. التركيز على خفض معدل التشوه التوافقي (THD) لتحسين أداء المحركات ثلاثية الطور، وهو أمر حاسم في تطبيقات المصاعد التي تتطلب موثوقية عالية [5].
٣. تقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية

يوفر النظام المقترح حلاً مستقلاً أو شبه مستقل لتغذية المصاعد، خاصة في المناطق النائية أو أثناء انقطاع التيار، مما يعزز استمرارية الخدمة وسلامة المستخدمين.

٤. حلول غير تقليدية، اقتصادية وذات كفاءة عالية.

العاكس الجسري التسلسلي يقلل أو يلغي الحاجة إلى فلاتر خارجية (مثل LCL أو LC) التي تستخدم عادةً مع العواكس ثنائية المستوى، مما يقلل التكلفة، الحجم، والتعقيد.

أهداف البحث

- يهدف البحث إلى تصميم وتحليل نظام طاقة شمسي فعال لتشغيل محركات المصاعد ثلاثية الطور، باستخدام عاكس جسري تسلسلي متعدد المستويات، لتحسين كفاءة تحويل الطاقة وجودة التغذية.
- تحليل ومقارنة معدل التشوه التوافقي (THD) لتيار وجهد المحرك عند استخدام الإنفرتري الجسري التسلسلي مقابل الإنفرتري الجسري التقليدي ثنائي المستوى.

الدراسة المرجعية

ظهرت العواكس متعددة المستويات (MLI) كحلّ واعد لتحسين جودة القدرة في أنظمة الطاقة المتجددة.

في دراسة أجراها Dhanamjayulu وآخرون عام (٢٠٢٣)، تم تصميم وتنفيذ نظام عاكس جسري تسلسلي متعدد المستويات (Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter – CHB) متكامل مع محول رفع جهد (Boost Converter) مدعوم بخوارزمية MPPT بناءً على الاضطراب والملاحظة (P&O)، خصيصاً لتطبيقات الأنظمة الكهروضوئية الشمسية. يهدف التصميم إلى تحسين الأداء من خلال تقليل عدد المكونات، خفض التشوه التوافقي الكلي (THD)، تقليل خسائر التبديل، ورفع الموثوقية التشغيلية. وقد تم دمج المحول مع عاكس CHB ذي ٢٧ مستوى لتوليد جهد خرج شبه جيبي عالي الجودة، مع تحقيق كفاءة تحويل عالية عبر رفع جهد وصلة التيار المستمر الناتج عن مصفوفة الألواح الشمسية.

أظهرت نتائج المحاكاة باستخدام (MATLAB/Simulink) أن النظام يتمتع باستقرار ممتاز تحت ظروف تحميل ديناميكية وأحمال خطية وغير خطية، مع قيمة THD منخفضة جداً تؤهله للتطبيقات المتصلة بالشبكة [6].

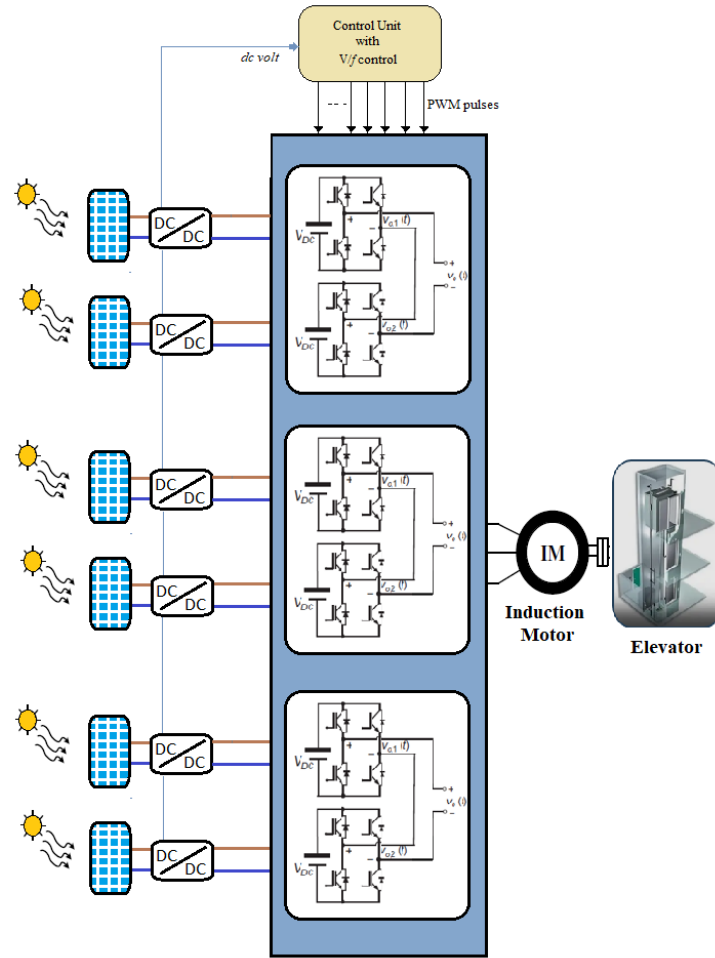
في دراسة قدمها Waqas وآخرون عام (2024) ضمن مؤتمر IEEE الدولي حول الشبكات الذكية، تم تصميم وتحليل عاكس جسري تسلسلي (Cascaded H-Bridge) ذي تسعة مستويات لتحسين جودة القدرة في أنظمة الطاقة الشمسية. اعتمد التصميم على تقنية تعديل عرض النبضة الجيبية (Sinusoidal PWM – SPWM) لتحقيق شكل موجة خرج أقرب إلى الجيبية. وتمت مقارنة أداء الإنفرتري متعدد المستويات مع عاكس تقليدي ثنائي المستوى تحت ظروف تحميل مختلفة، تشمل أحمال أومية (R) وأحمال أومية-حثية (RL)، وهي نماذج تمثل الأحمال الصناعية والمنزلية الشائعة.

أظهرت نتائج المحاكاة في بيئة MATLAB/Simulink أن زيادة عدد مستويات الجهد من مستويين إلى تسعة مستويات أدى إلى انخفاض ملحوظ في التشوه التوافقي الكلي (THD)، حيث اقتربت موجة الجهد الناتجة من الشكل الجيبي النقي، مما يعزز جودة القدرة المغذية للأحمال [7].

في دراسة أخرى قدمها Yadav وآخرون عام (2024)، تم تطوير تقنية محسنة لتعديل عرض النبضة باستخدام موجات حاملة متعددة (Multicarrier PWM) لتطبيقها في أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المبنية على عاكس جسري تسلسلي أحادي المصدر. يهدف البحث إلى تقليل مستوى التوافقيات في جهد خرج الإنفرتر من خلال اقتراح مخطط جديد يسمى MLACS (Modified Level-Shifted Carrier-based PWM Scheme)، والذي يعتمد على جمع نبضات التحكم مع موجات حاملة مثلثة معدلة [8]. مما سبق نجد أن معظم الأنظمة الحالية تعتمد على عواكس تقليدية، مما يحد من جودة القدرة وكفاءة التحويل، لذا سنقدم في النظام المقترح على الإنفرتر الجسري التسلسلي بما يحقق التكامل ما بين الترتيب التسلسلي للألواح الكهروضوئية وكفاءة تحويل الطاقة من مستمر لمتناوب.

مخطط النظام المقترح

تعد أنظمة المصاعد من أكثر الأنظمة استهلاكاً للطاقة في المباني الحديثة، خصوصاً في الأبراج السكنية والتجارية. وتعتمد أغلب المصاعد الحديثة على محركات تحريضية ثلاثية الطور نظراً لموثوقيتها، بساطتها، وقدرتها على توليد عزم عال عند السرعات المنخفضة، وهو ما يتوافق مع طبيعة حركة المصعد (تسارع من السكون، حركة ثابتة، ثم تباطؤ حتى التوقف).



الشكل ١: النظام المقترح لقيادة محرك المصعد ثلاثي الطور

يهدف المخطط المقترح الموضح في الشكل (١) إلى تطوير نظام قيادة لمحرك المصعد التحريضي ثلاثي الطور باستخدام الإنفرتير التسلسلي ثلاثي الطور ذو تسع مستويات، وفقاً لهذا المخطط سنحتاج لمنابع تغذية DC تمثل كل منها بمصفوفة كهروضوئية يوجد على خرج كل مصفوفة مقطع يعمل على ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى وتحويل التغير الحاصل في الإشعاع الشمسي إلى تغير في جهد الخرج للمصفوفة الكهروضوئية. نظام التحكم العام يعمل وفق نظام التحكم v/f لتشغيل محرك المصعد والتحكم بسرعيته، سنعمد فيما يلي إلى محاكاة النظام المقترح باستخدام برنامج Matlab/Simulink.

١ - ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT:

إن تيار وجهد المصفوفة الكهروضوئية يتعلق بدرجة الحرارة وبشدة الإشعاع الساقط على الخلية، وبما أن هذين البارامترين متغيران بصورة مستمرة خلال النهار إذاً ستتغير خصائص المصفوفة الكهروضوئية بشكل مستمر خلال النهار.

لذلك فإنه من المهم والضروري الحصول على الحد الأقصى المتاح من الطاقة الكهربائية انطلاقاً من الخلايا الكهروضوئية، عن طريق ضمان عمل مبدلة DC/DC بالشكل الأمثل، مما يتيح الحصول على الطاقة الأعظمية عند العمل بالتوتر والتيار المقابلين لنقطة المنحني الموافقة لنقطة الاستطاعة الأعظمية، ولكن هذه

النقطة غير ثابتة وتتعلق بالإشعاع الشمسي، لذلك يجب ملاحظة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT) [9] .Maximum Power Point Tracking

من أشهر الطرق المتبعة في ملاحظة نقطة الاستطاعة الأعظمية هي طريقة الموصلية المتزايدة (Incremental Conductance (InCond).

تتلخص طريقة التتبع هذه بما يلي:

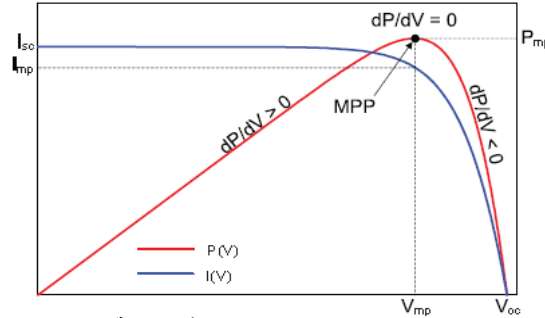
عند نقطة الاستطاعة الأعظمية تتحقق العلاقة (١).

$$\frac{dP}{dV} = 0 \rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \rightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \rightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (3)$$

حيث: $-\frac{I}{V}$ تمثل الناقلية المتغيرة، وعند نقطة الاستطاعة العظمى يجب أن يكونا متساويين ومتعاكسين بالإشارة، المعادلات (٣) و (٢) لتحديد اتجاه البحث الذي تحدث به الإثابة، نستمر بالإثابة حتى تحقق المعادلة (١)، ونستمر بالعمل عندها حتى يطرأ تغير بالتيار المقاس والمتعلق بتغير شدة الإشعاع، فإذا كان $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ أي أن $\frac{dP}{dV} > 0$ وبالتالي فإن نقطة العمل تقع في اليسار ويجب زيادة الجهد المرجعي للوصول إلى MPP ، وعندما $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ أي أن $\frac{dP}{dV} < 0$ وبالتالي فإن نقطة العمل تقع في اليمين ويجب انقاص الجهد المرجعي كما هو موضح بالشكل (٢).



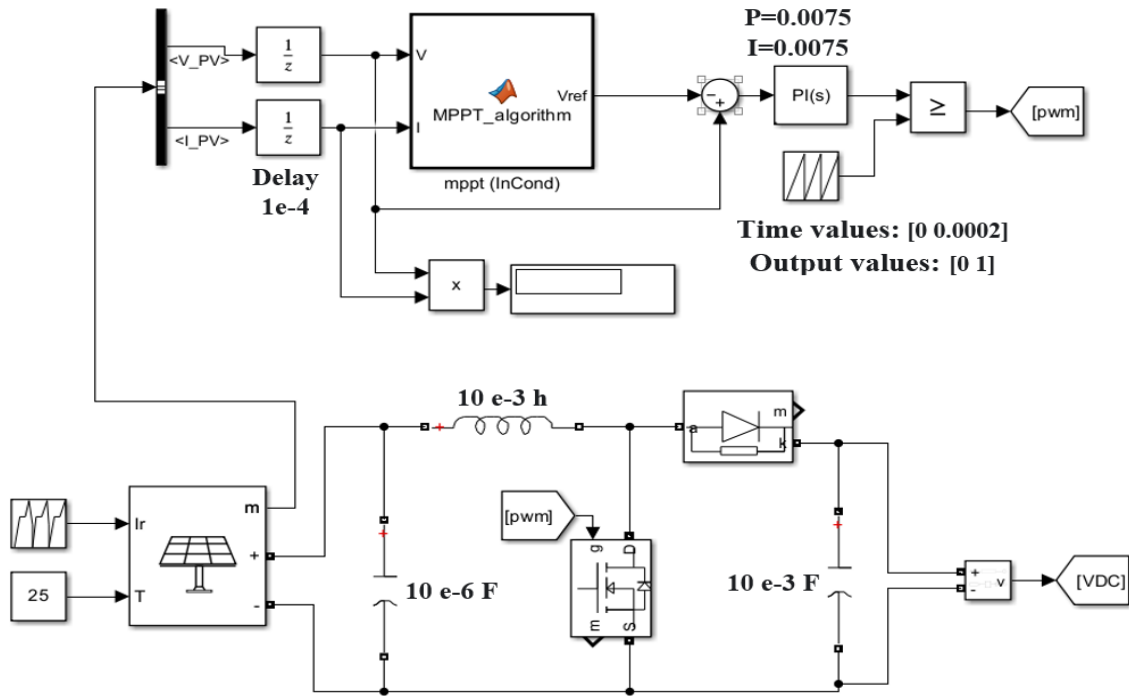
الشكل ٢: منحنى (I-V) ومنحنى (P-V) في طريقة InCond.

الميزة الرئيسية لهذه الطريقة أنها سهلة التطبيق وتحتاج إلى متطلبات حسابية منخفضة، قابلة للتطبيق في معظم الأنظمة، ولا تحتاج إلى أية معلومات عن المصفوفة الكهروضوئية سوى قياس الجهد والتيار.

يوضح الشكل (٣) نموذج Matlab/Simulink لدارة مقطع boost يلاحق نقطة الاستطاعة باستخدام

طريقة InCond.

الكود البرمجي لخوارزمية الملاحظة المتبعة موضح بالشكل (٤).



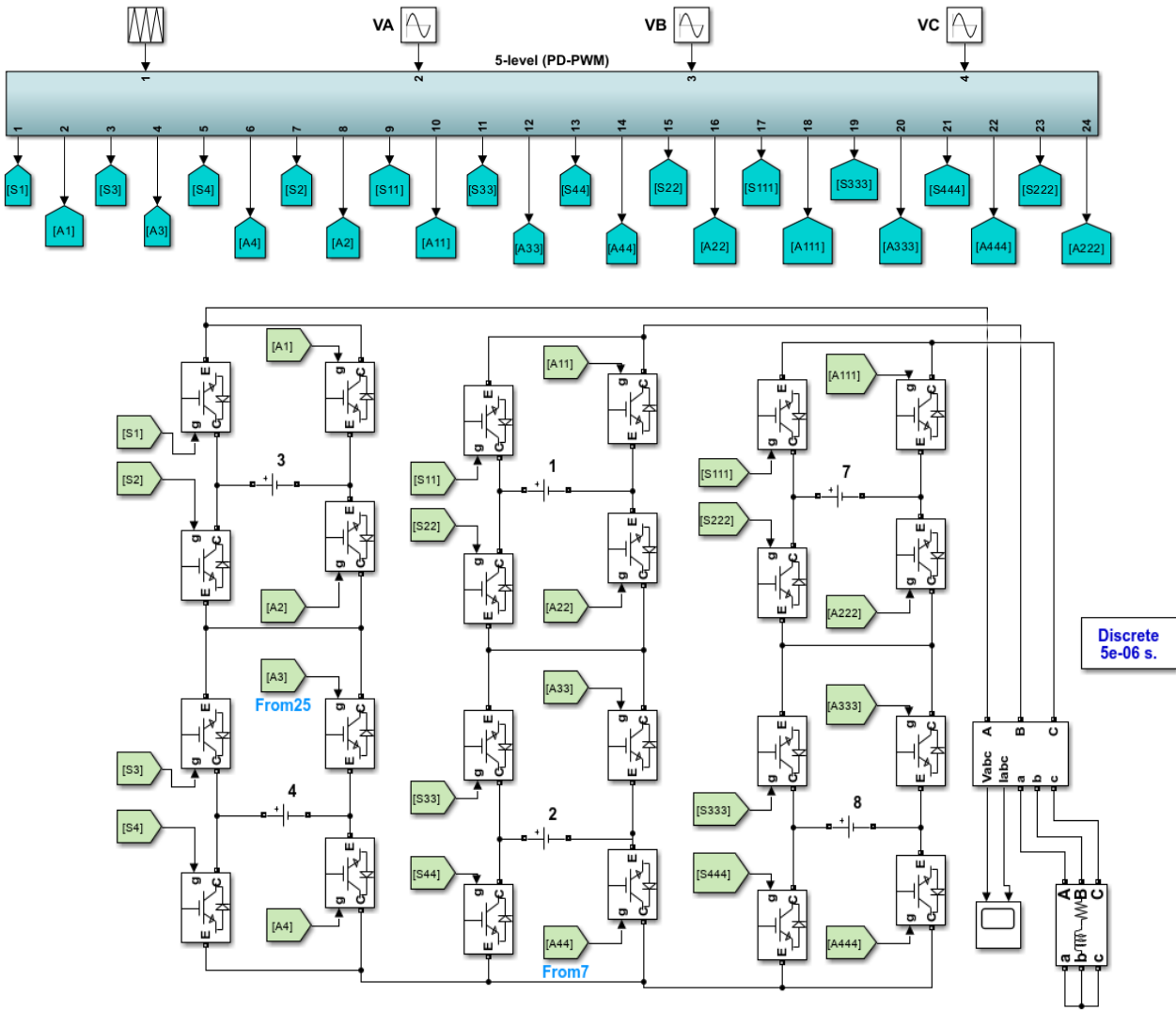
الشكل (٣) نموذج Matlab/Simulink لدارة مقطع boost يلاحق نقطة الاستطاعة باستخدام طريقة InCond

<pre> function Vref = MPPT_algorithm(V , I) Vrefmax = 309; ← جهد الدارة المفتوحة لمصفوفة الألواح Vrefmin = 0.0; Vrefinit = 258; ← القيمة الابتدائية للجهد المرجعي deltaVref = 0.05; ← معدل الإثابة في الجهد المرجعي persistent Vold Pold Vrefold; datatype = 'double'; if isempty(Vold) Vold=0; Pold=0; Vrefold=Vrefinit; end P= V*I; dV= V - Vold; dP= P - Pold; if dP ~= 0 if dP < 0 if dV < 0 Vref = Vrefold + deltaVref; else Vref = Vrefold - deltaVref; end else if dV < 0 Vref = Vrefold - deltaVref; else Vref = Vrefold + deltaVref; end end end %the below if limits the duty % between min and max if Vref >= Vrefmax Vref <= Vrefmin Vref = Vrefold; end % stored data Vrefold = Vref; Vold=V; Pold=P; </pre>	<pre> else if dV < 0 Vref = Vrefold - deltaVref; else Vref = Vrefold + deltaVref; end end end Vref = Vrefold; end %the below if limits the duty % between min and max if Vref >= Vrefmax Vref <= Vrefmin Vref = Vrefold; end % stored data Vrefold = Vref; Vold=V; Pold=P; </pre>
---	---

الشكل (٤) الكود البرمجي لخوارزمية MPPT InCond

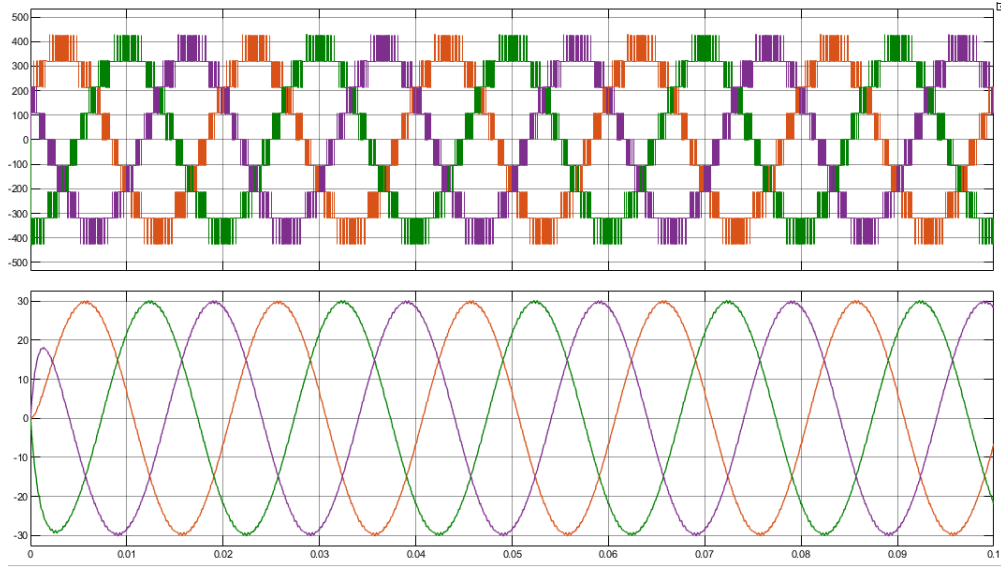
محاكاة الإنفرتير الجسري ثلاثي الطور ذو تسع مستويات

يوضح الشكل (٥) نموذج Matlab / Simulink للإنفرتير التسلسلي (CHB) ذو تسع مستويات ثلاثي الطور، باستخدام استراتيجية التعديل (PD-PWM) وعند تردد موجة حامل ٣٠٠٠ Hz، خرج الإنفرتير متصل بحمولة تحريضية قيمتها $Z_L=7+0.003j$ [10].

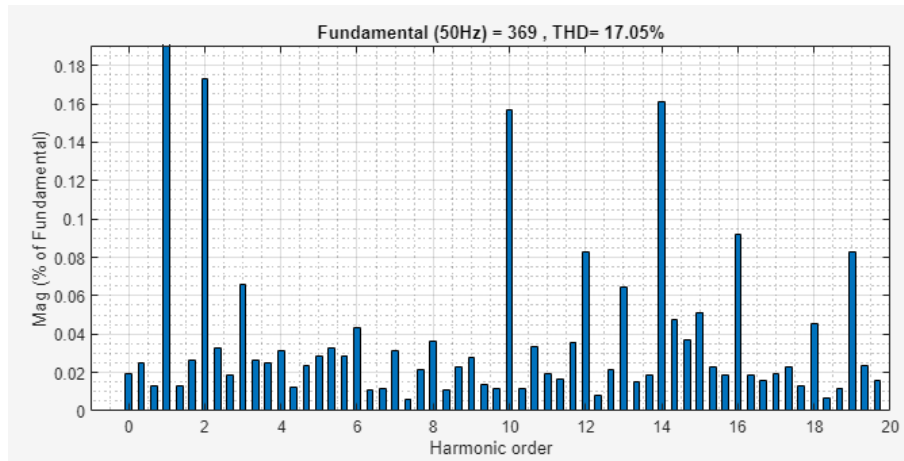


الشكل (٥) نموذج الإنفترت التسلسلي ذو تسع مستويات

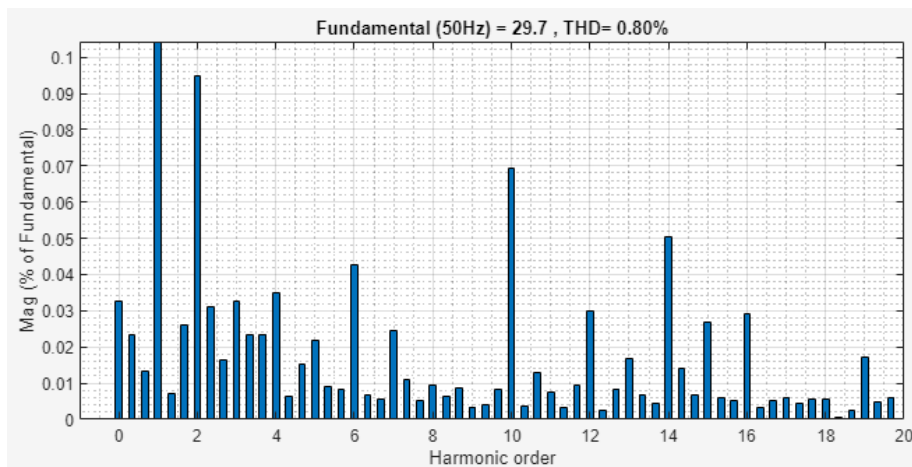
يوضح الشكل (٦) إشارة موجة جهد الخرج والتيار الحمل للإنفترت ثلاثي الطور ذو تسع مستويات. عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة جهد الخط كانت $17,05\%$ كما هو موضح بالشكل (٧)، في حين كان معدل التشوه التوافقي لموجة تيار الخط الناتجة $0,80\%$ ، كما هو موضح بالشكل (٨).



الشكل (٦) إشارة موجة جهد الخرج و تيار الحمل للإنفرتير ثلاثي الطور ذو تسع مستويات



الشكل (٧) التشوه التوافقي لموجة جهد الخط للإنفرتير ثلاثي الطور ذو تسع مستويات



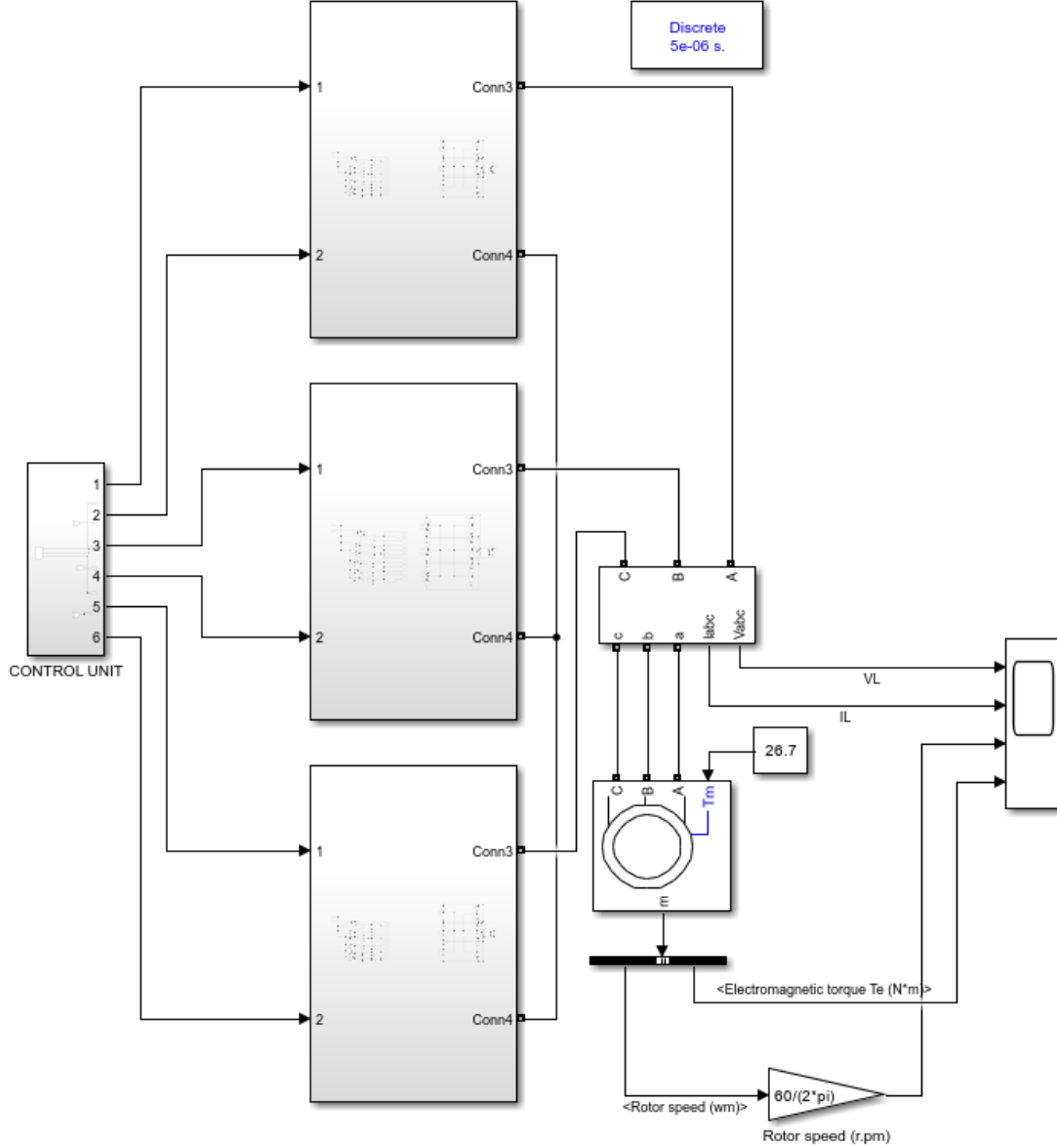
الشكل (٨) التشوه التوافقي لموجة تيار الحمل للإنفرتير ثلاثي الطور ذو تسع مستويات

٢ نمذجة النظام المقترح لقيادة محرك المصعد ثلاثي الطور:

يوضح الشكل (٩) نموذج Matlab/simulink للنظام المقترح لقيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور

لمصعد له المواصفات التالية:

5.4 hp (4 KW), 400 V, 50Hz, 1430 RPM



الشكل (٩) نموذج Matlab/Simulink للنظام المقترح لقيادة محرك المصعد

النموذج المختبر مجهز بوحدة تحكم تعمل على قيادة المحرك ثلاثي الطور وفق نظام V/F فكانت منحنيات

الأداء موضحة بالشكل (١٠).

المنحني الأول: يوضح إشارة الجهد المطبق على المحرك وتتألف من ثلاث موجات جهد ذات تسع

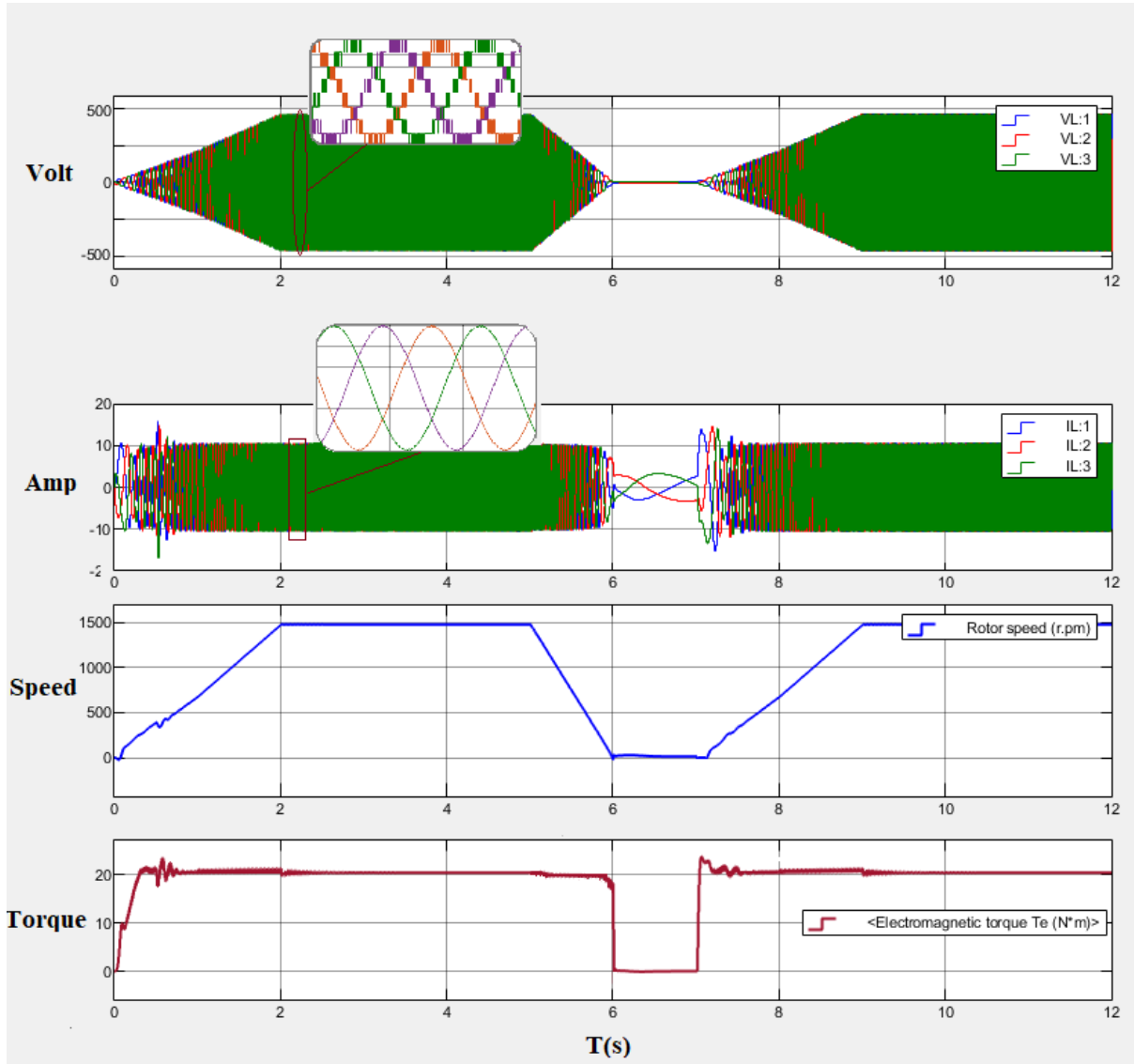
مستويات قادمة من الإنفرتر المتعدد المستويات في البداية تتزايد إشارة الجهد مع زيادة التردد وفق نظام V/F حتى الوصول للجهد الاسمي، وانتهاء مرحلة اقلاع المحرك ليستقر على السرعة الاسمية الخاصة به، بعد ذلك

تأتي مرحلة توقف محرك المصعد وانخفاض قيمة الجهد حتى التوقف والاقلاع من جديد بعد فترة زمنية، عند قياس قيمة التشوه التوافقي لموجة الجهد كانت حوالي ١٧%.

المنحني الثاني: يوضح إشارة تيار الحمل للمحرك عند عزم يساوي 20 N.m كانت القيمة العظمى لإشارة التيار تساوي ١٠ أمبير وبمعدل تشوه توافقي لكل موجة حوالي ٠,٨%.

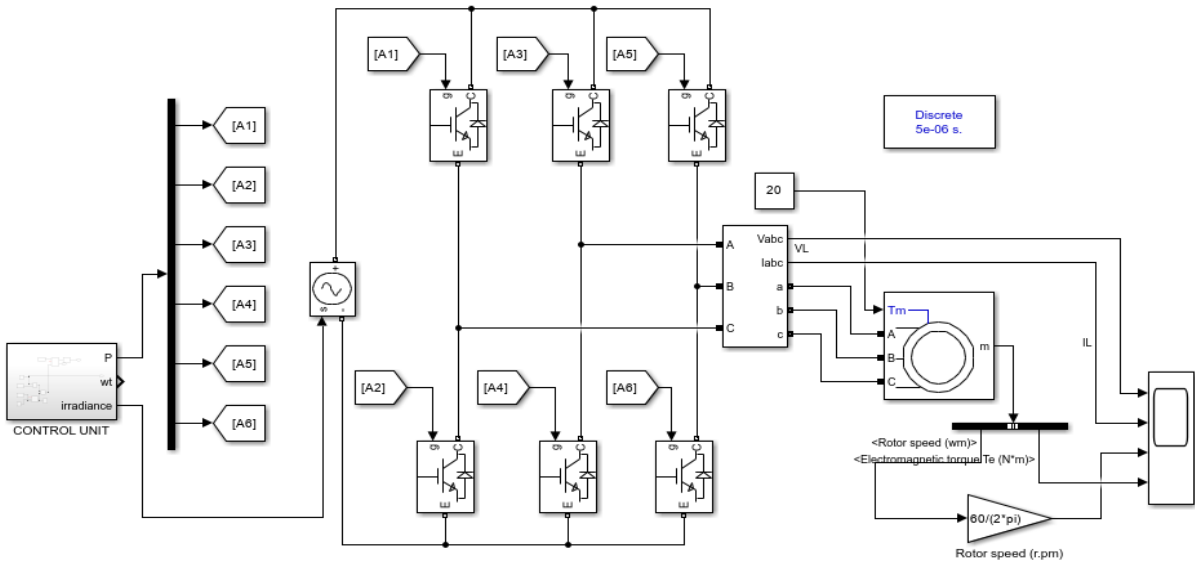
المنحني الثالث: يمثل سرعة المحرك حيث تتزايد السرعة من الصفر عند الإقلاع لتصل للسرعة الأسمية ثم تتباطئ من جديد ثم التوقف بعد ذلك تتكرر عملية الإقلاع من جديد.

المنحني الرابع: يمثل عزم المحرك ويلاحظ الاستقرار بإشارة العزم عند قيمة الحمل المطبق 20 N.m وهذا يدل على عدم وجود اهتزازات ميكانيكية.



الشكل (١٠) منحنيات الأداء لمحرك المصعد ثلاثي الطور في النموذج المقترح عند استخدام الإنفرتر متعدد المستويات

لمقارنة الأداء تمت نمذجة نظام التحكم بوجود الإنفرتر التقليدي ثلاثي الطور ذو المستويين بدون وجود مرشحات كما هو موضح بالشكل (١١).



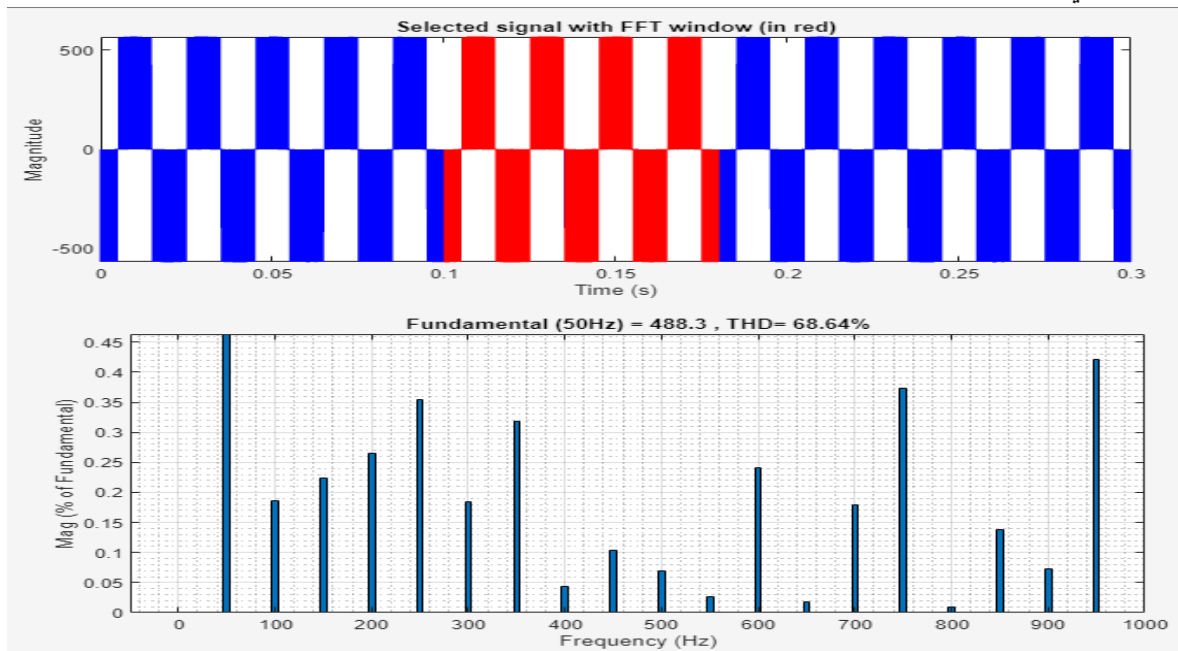
الشكل (١١) نموذج Matlab/Simulink للنظام التقليدي للإنفرتر ثلاثي الطور ذو مستويين

فكانت إشارة موجة جهد الخط موضحة بالشكل (١٢) وعند قياس قيمة التشوه التوافقي لموجة الجهد

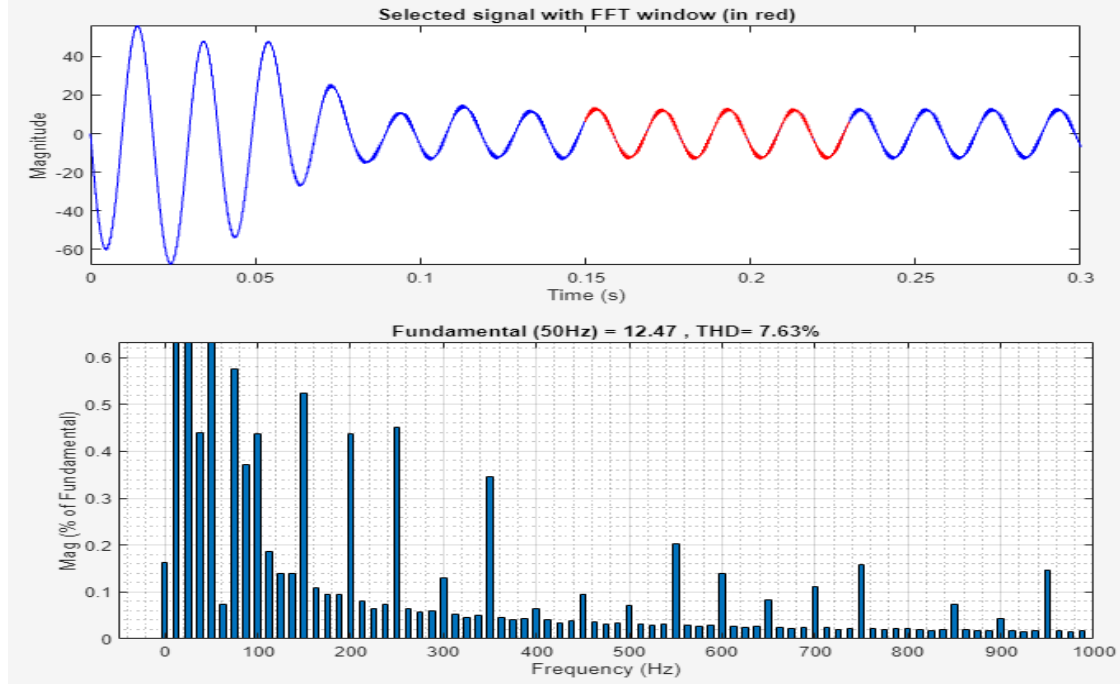
كانت حوالي ٦٨%.

في حين أن إشارة موجة التيار موضحة بالشكل (١٣) وعند قياس قيمة التشوه التوافقي لموجة التيار

كانت حوالي ٧,٦%.



الشكل (١٢) التحليل التوافقي لموجة جهد الخط للإنفرتر التقليدي ثلاثي الطور



الشكل (١٣) التحليل التوافقي لموجة تيار الخط للإنفرتر التقليدي ثلاثي الطور

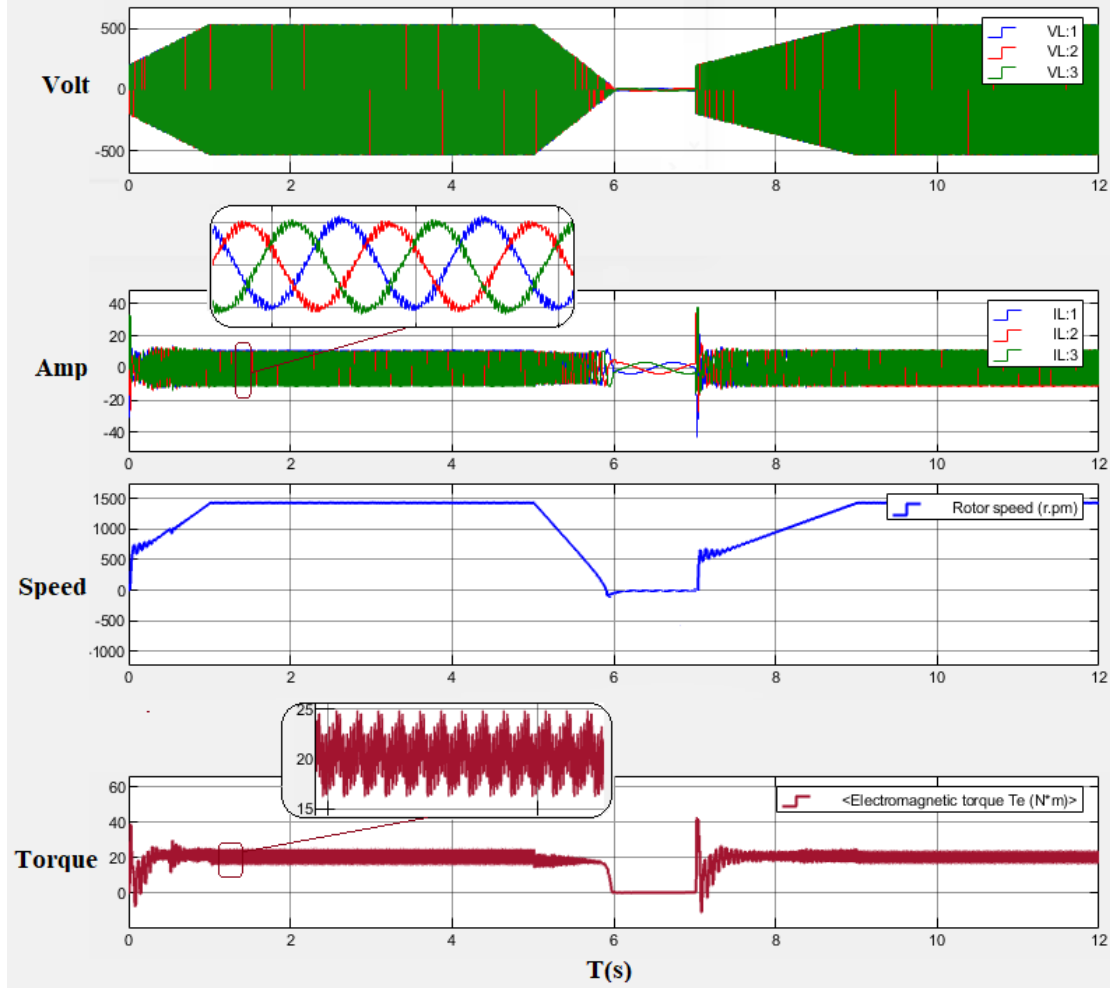
تم إجراء المحاكاة عند ذات الظروف السابقة الموافقة للنظام المقترح بوجود بوحدة تحكم تعمل على قيادة المحرك ثلاثي الطور وفق نظام V/f فكانت منحنيات الأداء موضحة بالشكل (١٤).

المنحني الأول: يوضح إشارة الجهد المطبق على المحرك وتتألف من ثلاث موجات جهد ذات مستويين قادمة من الإنفرتر التقليدي ثلاثي الطور بدون وجود مرشحات، في البداية تم إقلاع المحرك تحت الحمل الموافق 20 N.m ، التردد عند الإقلاع وفق نظام V/f كان يوافق 25 هرتز، حيث أن النظام فشل في إقلاع المحرك عند ترددات اقل بس التوافقيات العالية في موجة التيار وما ينجم عنه من اهتزازات وعدم استقرار في العزم، وهذا سيؤدي بدوره لتسارع مفاجئ عند الإقلاع. بعد ذلك يستقر المحرك عند السرعة الاسمية الخاصة به، ثم مرحلة توقف محرك المصعد وانخفاض قيمة الجهد حتى التوقف والاقلاع من جديد بعد فترة زمنية، عند قياس قيمة التشوه التوافقي لموجة الجهد كانت حوالي 68% .

المنحني الثاني: يوضح إشارة تيار الحمل للمحرك عند عزم يساوي 20 N.m كانت القيمة العظمى لإشارة التيار تساوي 10 أمبير وبمعدل تشوه توافقي لكل موجة حوالي $7,6\%$.

المنحني الثالث: يمثل سرعة المحرك حيث تزداد السرعة من الصفر الى حوالي 700 rpm عند الإقلاع مباشرة لأن النظام يقلع عند تردد 25 هرتز لتصل بعد ذلك للسرعة الاسمية، ثم تتباطئ من جديد، ثم التوقف بعد ذلك تتكرر عملية الإقلاع من جديد.

المنحني الرابع: يمثل عزم المحرك ويلاحظ التذبذب الكبير بإشارة العزم عند قيمة الحمل المطبق 20 N.m وهذا يدل على وجود اهتزازات ميكانيكية كبيرة ناتجة عن التشوهات التوافقية لتيار الحمل.



الشكل (١٤) منحنيات الأداء لمحرك المصعد ثلاثي الطور عند استخدام الإنفرتير التقليدي ثنائي المستوى

الاستنتاجات

تحسين كفاءة تحويل الطاقة الكهروضوئية وجودة تغذية محركات المصاعد ثلاثية الطور من خلال اعتماد بنية عاكس جسري تسلسلي متعدد المستويات، وبعد تحليل ومحاكاة النظام المقترح مقارنةً بالأنظمة التقليدية القائمة على العواكس ثنائية المستوى، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

١. الإنفرتير الجسري التسلسلي متعدد المستويات يحسن من جودة القدرة الكهربائية، حيث سجل معدل التشوه التوافقي الكلي (THD) لتيار المحرك أقل من ٠,٨ % دون الحاجة إلى فلتر خارجية، مقارنةً بـ ٨ % في الإنفرتير ثنائي المستوى.

٢. تقليل التوافقيات أدى إلى انخفاض ملحوظ في الضياعات الحديدية والنحاسية داخل المحرك، مما ينعكس إيجاباً على كفاءة التشغيل، وانخفاض درجة حرارة المحرك، وزيادة عمره الافتراضي، وهي عوامل حاسمة في تطبيقات المصاعد التي تتطلب موثوقية عالية.

٣. البنية المعيارية للعاكس الجسري التسلسلي تتوافق بشكل طبيعي مع الترتيب التسلسلي للألواح الشمسية، حيث يمكن تغذية كل وحدة H-Bridge من سلسلة مستقلة، مما يتيح تتبعاً فردياً لنقطة الاستطاعة العظمى MPPT ويقلل من تأثيرات التظليل الجزئي على الأداء الكلي للنظام.

٤. النظام المقترح أظهر استقراراً ديناميكياً جيداً أثناء مراحل التشغيل المختلفة للمصعد (التسارع، الحركة الثابتة، التباطؤ)، مع قدرة كافية على تلبية متطلبات العزم العالي عند بدء التشغيل.
٥. من الناحية الاقتصادية، يُقلل النظام من التكلفة الإجمالية على المدى الطويل عبر الاستغناء عن الفلاتر الخارجية، وتقليل تكاليف الصيانة الناتجة عن تلف المحرك بسبب التوافقيات.

التوصيات المستقبلية

- تطبيق استراتيجيات تحكم متقدمة مثل التحكم الموجه (Field-Oriented Control) أو التحكم المباشر بالعزم (DTC) لتحسين أداء المحرك تحت ظروف تحميل غير منتظمة.
- بناء نموذج تجريبي مخبري للتحقق من نتائج المحاكاة وتوثيق الأداء الفعلي تحت ظروف بيئية حقيقية.
- توسيع الدراسة لتشمل تأثير عدد المستويات الأكبر على THD والكفاءة، لتحديد التوازن الأمثل بين التعقيد والأداء.
- دراسة مقارنة مع الأنفرترات العادية من حيث المردود وجودة الطاقة الكهربائية المقدمة.

المراجع

[1] AHMED, SHOAIB, et al. "A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic Systems: Scope, Technologies, Applications, Progress, Challenges and Recommendations." *IEEE Access* (2025).

[2] AHAMAD, ISARAR, et al. "Performance assessment of solar energy driven cascaded H-bridge multilevel inverters." *Microsystem Technologies* 31.7 (2025).

[3] MAHESWARI, K. T., et al. "A comprehensive review on cascaded H-bridge multilevel inverter for medium voltage high power applications." *Materials Today: Proceedings* 45 (2021).

[4] YADAV, SHIVAM KUMAR, NIDHI MISHRA, AND BHIM SINGH. "An Improved Multicarrier PWM Technique for Harmonic Reduction in Cascaded H-Bridge Based Solar Photovoltaic System." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 20.7 (2024).

[5] SANDHU, MAMATHA, AND TILAK THAKUR. "Modified cascaded H-bridge multilevel inverter for hybrid renewable energy applications." *IETE Journal of Research* 68.6 (2022).

[6] DHANAMJAYULU, C., & GIRIJAPRASANNA, T. (2023). Experimental Implementation of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with an Improved Reliability for Solar PV Applications. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, (2023)

[7] WAQAS, MUHAMMAD, AND MOHSIN JAMIL. "Power Quality Improvement Using Nine-Level Cascaded H-Bridge Voltage Source Inverter for PV Applications." 2024 12th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid). IEEE, (2024).

[8] YADAV, SHIVAM KUMAR, NIDHI MISHRA, AND BHIM SINGH. "An Improved Multicarrier PWM Technique for Harmonic Reduction in Cascaded H-Bridge Based Solar Photovoltaic System." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 20.7 (2024).

[9] KATCHE, MUSONG L., et al. "A comprehensive review of maximum power point tracking (mppt) techniques used in solar pv systems." *Energies* 16.5 (2023): 2206.

[10] TINA, GIUSEPPE MARCO, AND GIOVANNI CELSA. "A Matlab/Simulink model of a grid connected single-phase inverter." 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2015.