

تنفيذ نظام رقمي للتحكم بالتهيج لتخفيض التوافقية الثالثة وتحسين التوتر في المولد التزامني

ابراهيم أيوب حسن^{1*} زياد السقا² نديم مخول³

^{1*} طالب دراسات عليا (دكتوراه) – مهندس، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – جامعة دمشق.

ibrahim.hasan@damascusuniversity.sy

² استاذ مساعد، دكتور، قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

ZiadALSAKKA@Damascusuniversity.edu.sy

³ أستاذ، دكتور، قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.

NadimMakhhol@Damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

مع تطور التجهيزات الكهربائية التي تحتوي على مقومات وممرجات التوتر وانتشارها بشكل كبير، والتي تعتبر من الأحمال غير الخطية حيث يكون شكل موجة التوتر مختلفة عن شكل موجة التيار وبالتالي تسبب تشوه موجة التوتر وتحميلها بالتوافقيات المختلفة حسب نوع الحمل.

فإن التخلص من التوافقيات والحفاظ على الشكل الجيبي النقي لموجة التوتر يعتبر من القضايا المهمة في أنظمة التوزيع والتغذية الكهربائية وخاصة نظم القدرة الكهربائية المستقلة عن الشبكة لما تسببه هذه التوافقيات من مشاكل في زيادة الحرارة والمفايد والضجيج وغير ذلك من الحالات غير المرغوب بها.

في هذا البحث سنقوم بتنفيذ نظام رقمي للتحكم بتهيج المولد التزامني بحيث يكون المولد قادر على تغذية الحمل بالتوتر النظامي إضافة الى تخفيف التوافقيات وتخفيض نسبتها عند تحميلها بأحمال لا خطية دون تغيير في بنية المولد وانما فقط بالتحكم بشكل موجة التهيج. الكلمات المفتاحية: نظام القدرة الكهربائية، المولد التزامني، نظام التهيج، التوافقيات.

تاريخ الإيداع: 2023/6/22

تاريخ القبول: 2023/9/25



حقوق النشر: جامعة دمشق

سورية، يحتفظ المؤلفون

بحقوق النشر بموجب CC BY-

NC-SA

Implementation of A Digital Excitation Control System to Reduce the Third Harmonic and Improve Voltage Quality in A Synchronous Generator

Ibrahim Hasan*¹ Ziad ALSAKKA² Nadim Makhol³

*¹.Postgraduate Student, Eng, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.
ibrahim.hasan@damascusuniversity.sy

². Associate Professor, Dr, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.
ZiadALSAKKA@Damascusuniversity.edu.sy

³. Professor, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.
NadimMakhol@Damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

With The Development And Spread Of Electrical Equipment That Contains Rectifiers And Inverters, Which Are Considered Non-Linear Loads, Where The Shape Of The Voltage Wave Is Different From The Shape Of The Current Wave, And Thus Causes Distortion Of The Voltage Wave And Loads It With Different Harmonics According To The Type Of Load. Getting Rid Of The Harmonics And Preserving The Pure Sinusoidal Form Of The Voltage Wave Is Considered One Of The Important Issues In The Electrical Distribution And Feeding Systems, Especially The Systems Independent From The Network, Because Of The Problems Caused By These Harmonics In Increasing Heat, Losses, Noise, And Other Undesirable Conditions.

In This Research, We Will Implement A Digital System To Control The Excitation Of The Synchronous Generator So That The Generator Is Able To Feed The Load With Regular Voltage, In Addition To Mitigating The Harmonics And Reducing Their Ratio When Loaded With Nonlinear Loads Without Changing The Structure Of The Generator, But Only By Controlling The Excitation Wave Shape.

Keywords: Power System, Synchronous Generator, Excitation System, Harmonics.

Received: 22/6/2023

Accepted: 25/9/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a

CC BY- NC-SA

المقدمة:

في المرحلة الأولى تم دراسة أثر تهبيح المولد التزامني بتوتر متغير (موجة توتر مستمر مضاف إليها موجات متغيرة) على شكل موجة التوتر المنتج، أي إمكانية توليد موجة توتر تحتوي على الموجة الأساسية بالتردد المطلوب وتوافقيات معاكسة للتوافقيات المنتجة بسبب الأحمال اللاخطية مما يؤدي لتحسين شكل موجة التوتر المولد.

وبالتالي يمكن استخدام هذه التقنية لتكون ضمن بنية منظم التوتر الآلي الرقمي، ليقوم منظم التوتر في هذه الحالة بوظيفتين الأولى تنظيم مطال التوتر على خرج المولد التزامني في الحالة الطبيعية عن طريق التحكم بتيار التهبيح المستمر والثانية تحسين شكل موجة التوتر المنتج والمحافظة عليها جيبيه دائماً حتى لو تم ربط أحمال لا خطية تحتوي على توافقيات مختلفة حيث يعمل منظم التوتر الآلي الرقمي على إضافة توترات بترددات مناسبة الى موجة التوتر المستمر الأساسية للتهبيح مما ينتج عنه توليد المركبة الأساسية [50Hz] إضافة الى مركبات مرممة لتشوهات موجة الخرج.

يمكن تلخيص نتائج المرحلة الأولى على الشكل التالي:

- 1- يمكن للمولد التزامني توليد موجات توتر بتردد أعلى من التردد [50Hz] عند نفس سرعة الدوران الاسمية وعدد الأقطاب نفسه.
 - 2- يمكن للمولد التزامني أن ينتج موجات تحتوي على أي توافقية حسب تغيير توتر التهبيح.
 - 3- نتيجة لما سبق يمكن أن يقوم المولد التزامني بتحسين شكل موجة التوتر المولد عن طريق توليد موجة مرممة (عن طريق التحكم بموجة التهبيح) تحتوي على توافقيات معاكسة للتوافقيات المسببة للتشوه إضافة للموجة الأساسية اللازمة لتغذية الحمل وذلك عن طريق تهبيح المولد التزامني بموجة توتر مستمر متغير القيمة بما يتناسب مع توافقيات الحمل.
- في المرحلة الثانية تم تنفيذ نموذج عملي مخبري لتنظيم التوتر عن طريق معالج رقمي صغري موجود ضمن كرت تحويل

يوجد نوعين من الأحمال الكهربائية التي يتم تغذيتها من المولد التزامني المستقل عن الشبكة الكهربائية، الأحمال الخطية التي يكون فيها شكل موجة التيار مشابه لشكل موجة التوتر أو بمعنى أدق يكون شكل موجة التيار و التوتر جيبين و يمكن أن يكونا متقنين بالطور كما في الأحمال الأومية أو مختلفين في الطور كما في الأحمال التحريضية أو السعوية، و الأحمال غير الخطية التي يكون فيها شكل موجة التيار مختلف عن شكل موجة التوتر كما في الجسور الثايرستورية أو المبدلات الساكنة المختلفة وتجهيزات الانارة المختلفة التي تحتوي على مقومات الكترونية وهذا النوع من الأحمال يسبب تشوه في موجة الخرج للمولد التزامني برتب مختلفة من التوافقيات و التي تؤثر على باقي الأحمال المتصلة بالمولد.

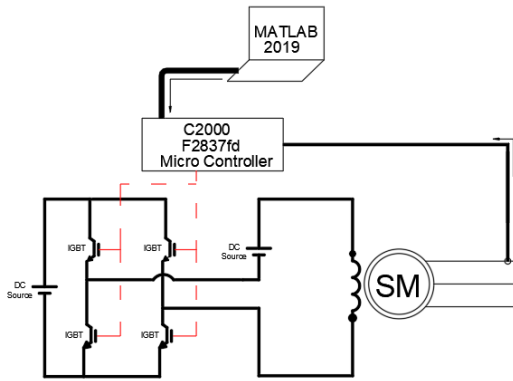
لما تسببه التوافقيات من آثار سلبية على أداء التجهيزات الكهربائية والتي تشمل ارتفاع درجة الحرارة وزيادة الضياعات والاهتزازات في الآلات الدوّارة كان لابد من تخفيف هذه التوافقيات أو الغائها كلياً.

التشوهات التي تصيب موجة الخرج تكون ذات ترددات من مضاعفات تردد الموجة الأساسية وبالتالي لإلغاء التشوه يجب أن يكون المولد التزامني قادر على توليد الموجة الأساسية الجيبية والموجة المرممة التي تعاكس التشوهات. بالتالي نحن بحاجة لأن يكون المولد قادر على إنتاج موجات توتر بترددات أعلى من [50Hz] بالإضافة للموجة الأساسية. (M. T. Abolhassani, 2001, [1])

تم في المراحل السابقة إيجاد الطريقة العملية لتحسين شكل موجة التوتر عن طريق إضافة موجة توتر متناوب الى الموجة المستمرة وبترددات مختلفة متناسبة مع تردد التوافقيات المطلوب ازلتها وتم ذلك عن طريق النمذجة والمحاكاة ضمن بيئة الماتلاب وقمنا بتنفيذ منظم توتر رقمي آلي لتنظيم التوتر في المولد التزامني.

ترانزستورات IGBT يتم التحكم بنبضات القذح لهم من خلال المعالج الرقمي لإنتاج توتر متناوب مناسب موصول على التسلسل مع منبع توتر مستمر لإنتاج التوتر المستمر الخاص بالقيمة الأساسية [50Hz].

توتر التهبيج الناتج سيكون عبارة عن توتر مستمر خاص بالرتبة الأساسية وتوتر متناوب مضاف للتوتر المستمر خاص بإنتاج توافقيات معاكسة لتوتر توافقيات الحمل وبالتالي الغاؤها.



الشكل (1) النموذج المقترح

أما دارة التحكم فهي مؤلفة من كرت التحصيل - C2000 TMS320F28379D المتصل من جهة مع خرج المولد التزامني عبر حساس توتر يقوم بقياس قيمة توتر الخرج للمولد ويعطي نبضات القذح المناسبة على بوابة الترانزستورات ويتصل ببرنامج الماتلاب عبر وصلة USB لتحقيق عملية النمذجة في الزمن الحقيقي.

(A. Elrajoubi-2017-[4])

حيث يقوم حساس التوتر بإدخال شكل موجة التوتر للكرت ليقوم الكرت بتحليل الموجة وفق فورييه لإيجاد قيم التوافقيات الموجودة في الخرج ويحدد القيم المرجعية لتوتر التهبيج المطلوب.

2- النمذجة والمحاكاة:

Modeling and simulation

الشكل رقم (3) يظهر النموذج الكامل للنظام المقترح حيث يتألف من مولد تزامني [2kVA] له مفاعلة تزامنية موافقة

من شركة Texas Instruments وقد تمت عملية التحكم في الزمن الحقيقي باستخدام برنامج الماتلاب عن طريق تعليمة Deploy وقد تم استخدام إشارة التوتر كإشارة مرجعية والمقارنة مع إشارة التوتر المولد من المولد ومن ثم معالجة الخطأ عن طريق متحكم PI تمت معايرة قيمه بعد عدة محاولات لإيجاد القيمة المثلى ($K_p=200, K_i=1$)

يمكن تلخيص نتائج المرحلة الثانية على الشكل التالي:

4- تنفيذ المتحكم الرقمي يمكننا من ادخال عدة تقنيات بسهولة على برنامج التحكم.

5- النمذجة في الزمن الحقيقي تمكننا من مراقبة عمل الآلات المخبرية وبالتالي تحديد قيم المعاملات الأمثلية بدقة

6- يمكننا إضافة حلقة للتيار لتكون أكثر موثوقية في عمل المولد التزامني لتفادي التهبيج الزائد

بناء المتحكم الرقمي وفق الطريقة السابقة ستمكننا من تعديله مستقبلا بسهولة ليكون المولد التزامني قادر على تصحيح شكل موجة التوتر عن طريق تغيير توتر التهبيج.

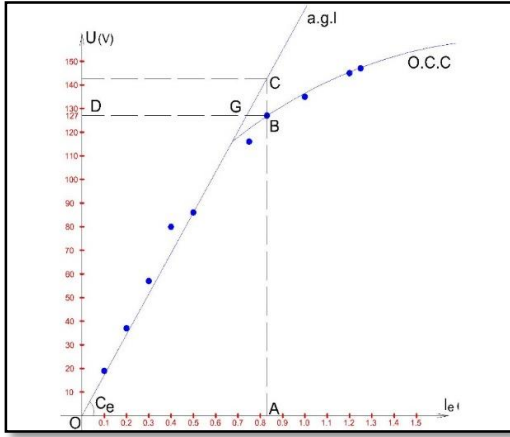
في هذه المرحلة التي تعتبر مرحلة مكملة للمراحل السابقة سنقوم بتنفيذ نظام تحكم بالتهبيج رقمي يحافظ على سوية التوتر ويخفف من توافقيات الخرج عن طريق تعديل منظم التوتر الرقمي الآلي الذي تم تصميمه في المرحلة الثانية.

1- وصف النموذج المقترح: Description of the proposed model

كما ورد سابقاً فإن الطريقة الرئيسية لعملية تصحيح موجة التوتر تتم عن طريق التحكم بشكل موجة التهبيج وإضافة توترات متناوبة للموجة الأساسية المستمرة بترددات معينة مناسبة لإلغاء أو تخفيف التوافقيات في موجة الخرج.

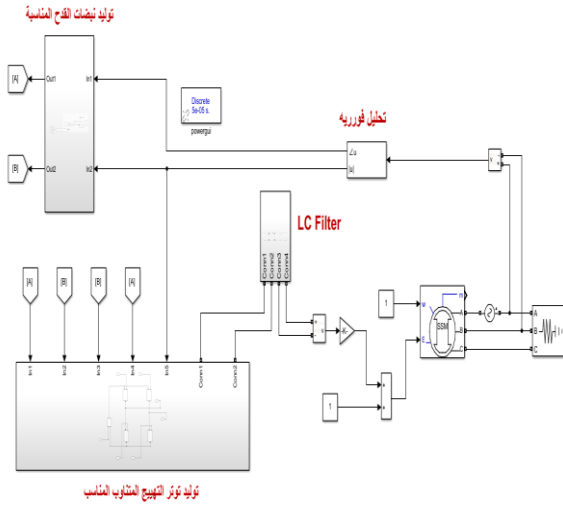
يتألف النموذج من دارة استطاعة ودارة تحكم كما يوضح الشكل (1).

دارة الاستطاعة مؤلفة من المولد المخبري [2kVA] ومخرج DC-AC أحادي الطور مؤلف من منبع توتر مستمر وأربعة



الشكل (3) النموذج الكامل للنظام المقترح

التهيج بعد الحصول على التوتر الاسمي لنحصل على منحنى المغنطة. وبعد رسم المنحنى نقوم بحساب ميل المنحنى.



الشكل (4) تجربة اللاحمل

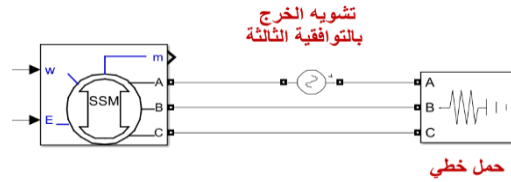
في تجربة القصر نقوم بإيجاد العلاقة بين تيار التهيج وتيار الحمل عند قصر أطراف المولد

للمفاعلة التزامنية للمولد الحقيقي في النموذج الفيزيائي $X=0.1$ pu مع حمل خطي $1500[W]$ و حمل لا خطي فيه التوافقية الثالثة فقط ونظام قياس التشوهات و تحديد نبضات القح المناسبة لتوليد توتر متناوب مناسب عبر اربع ترانزستورات و مرشح LC لتحسين شكل توتر التهيج المتناوب.

1-3 نموذج المولد التزامني

Modeling of SG

الشكل رقم 2 يوضح نموذج الآلة التزامنية مع الحمل الخطي والحمل اللاخطي.



الشكل (2) نموذج المولد التزامني

يتألف هذا النموذج من مولد تزامني من مكتبة simscape وليكتمل النموذج يجب تحديد استطاعة المولد وتوتر الخط وهي قيم معروفة.

بما ان القوة المحركة الكهربائية المتولدة في الآلة التزامنية تتعلق بالفيس المغناطيسي وسرعة الدوران يتم تنظيمها باستخدام منظم السرعة فالنمذجة ستقوم على أساس أن السرعة دوما ثابتة وهي 1pu

المفاعلة التزامنية يتم حسابها باستخدام تجربتي اللاحمل والقصر وفق ما يلي:

(Geoff Klempner, 2018, [2])

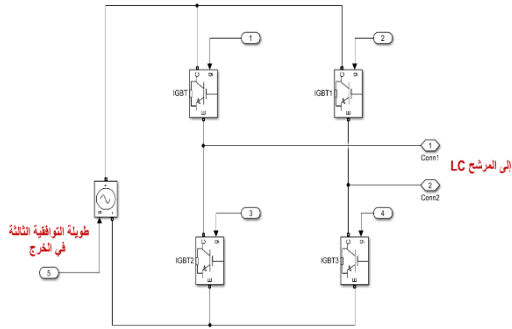
في تجربة اللاحمل نوجد العلاقة بين تيار التهيج و توتر المولد عند اللاحمل حيث نقوم بزيادة تيار التهيج تدريجياً و تسجيل قيمة التوتر الناتج حتى نحصل على التوتر الاسمي و نستمر بزيادة تيار

المناسبة حيث يعمل ذراعي المعرج بالتناوب لذلك تم وضع بوابة NOT لإنتاج نبضات القدح للذراع الآخر.

3-3 نموذج المعرج

Modeling of inverter

يتألف من 4 ترانزستورات IGBT يتم قدها عبر مولد النبضات الوارد في الفقرة السابقة. (Saleh, 2011,[6])
طويلة التوتر المستمر المطلوب يتم عبر تحليل فورييه لتوتر الخرج وإعطاء طويلة التوافقية الثالثة. وخرج المعرج يتم إرساله الى مرشح LC لإعطاء الشكل الجيبي للتوتر المتناوب. كما هو موضح في الشكل (7).



الشكل (7) نموذج المعرج

4-3 نموذج المرشح LC

Modeling of LC filter

التوتر المنج بدون ترشيح يكون على شكل متقطع لذلك عمل المرشح على حجز الترددات العالية وتميرير فقط التردد .100[Hz]

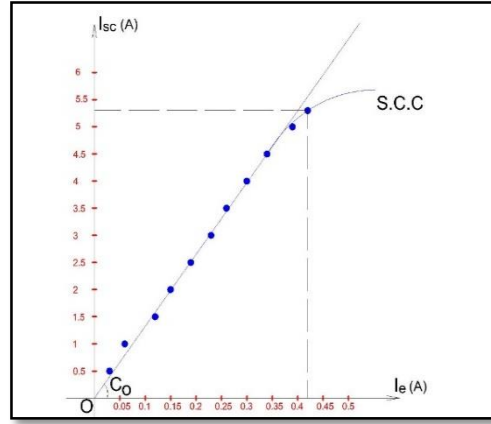
لحساب قيم المفاعلة والسعة (chang,2012, [3]) المطلوبين يتم

عبر علاقة المرشح المعروفة:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}}$$

انطلاقاً من هذه العلاقة نجد أن القيم المناسبة هي:

$$L = 0.6 \text{ mH} , C = 7 \text{ mF}$$



الشكل (5) تجربة القصر

التزامني حيث نقوم بزيادة تيار التهيج بشكل تدريجي وبخطوات صغيرة وتسجيل قيمة التيار المار عند قصر أطراف المولد ونقوم بالزيادة حتى نصل للتيار الاسمي للمولد ونرسم منحنى الخواص النحاسية ونحسب ميل المنحنى.

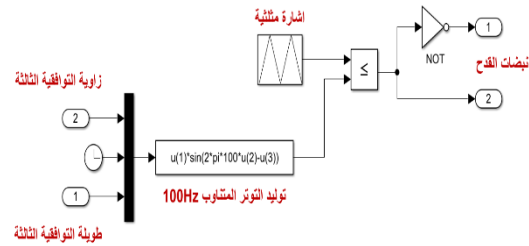
$$X_s = \frac{1.25}{13.1} \cong 0.1 \text{ p.u}$$

2-3 نموذج مولد النبضات:

Modeling of Pulses Generator

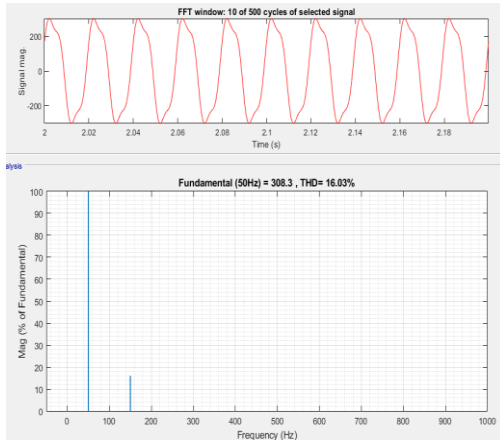
يتألف النموذج من مدخلين:

الأول طويلة التوافقية الثالثة بعد تحليل فورييه لتوتر الخرج والثاني زاوية هذه التوافقية كما يبين الشكل (6). (Euzeli, 2014,[5])

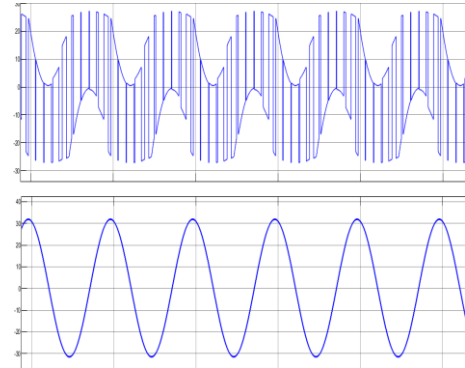


الشكل (6) نموذج مولد النبضات

ثم يتم انتاج التوتر المرجعي المناسب بتردد 100[Hz] لتتم مقارنته مع إشارة مثلثية بتردد 1[kHz] لتنتج نبضات القدح



الشكل (10) نسبة التوافقيات قبل التحسين THD=16.3%



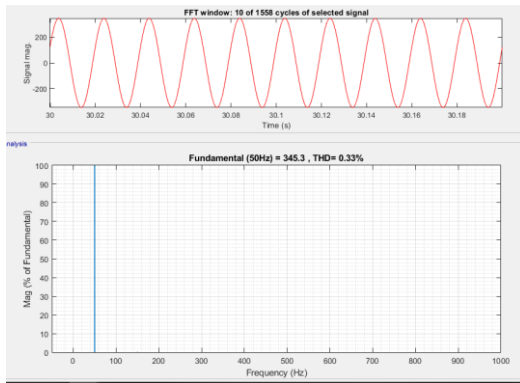
الشكل (8) توتر التهيج المتناوب

ويكون شكل التوتر قبل الترشيح وبعده كما يوضح الشكل 8.

3-5 نتائج النمذجة والمحاكاة:

Modeling Results

سنقوم باعتبار زمن النمذجة والمحاكاة 10 ثواني بحيث يكون التهيج في البداية فقط توتر مستمر ثم نقوم بعملية التصحيح عند الثانية 5 لتظهر نتيجة المعالجة والشكل (9) يوضح شكل توتر الخرج قبل الثانية 5 وبعدها وتوتر التهيج في الحالتين عندما كان التهيج مستمر فقط وعندما أضفنا المركبة المتناوبة. الشكلان (10) و(11) يوضحان تحليل فورييه ونسبة التوافقيات لموجة الخرج في الحالتين.

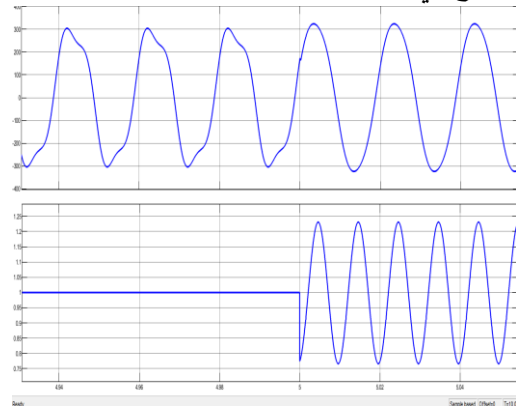


الشكل (11) نسبة التوافقيات بعد التحسين THD=0.3%

فيما يلي الجدول رقم 1 يوضح نتائج النمذجة عند نسب مختلفة من التوافقيات.

الجدول (1) نتائج النمذجة

رقم التجربة	THD% قبل التحسين	THD% بعد التحسين
1	32%	0.33%
2	16.03%	0.33%
3	12.83%	0.31%
4	9.63%	0.27%
5	8.01%	0.2%



الشكل (9) توتر الخرج قبل وبعد التحسين

3- التطبيق العملي:

Practical Implementation

المسار الثاني هو انتاج التوتر المتناوب المطلوب اضافته الى التوتر المستمر عبر معرج احادي الطور مؤلف من 4 ترانزستورات.

بعد اجراء تحليل فورييه لموجة الخرج تنتج لدينا طويلة وزاوية التوافقية الثالثة ومن ثم عبر التابع F_{cn} يتم انتاج الموجة المرجعية المطلوب توليدها عبر المعرج بتردد $100[Hz]$ يتم توليد النبضات عبر المقارنة بين الموجة المرجعية والموجة المثالية.

4- النتائج والتوصيات:

1- بإمكاننا عبر هذه الطريقة التحكم بقيمة التوتر الأساسي المطلوب من المولد التزامني $50[Hz]$ بشكل مستقل عن التحكم بالتوتر المتناوب المطلوب اضافته للتهيج لإزالة التوافقيات او تخفيض قيمتها لتكون ضمن الحدود المطلوبة.

2- في هذا البحث تمت إزالة التوافقية الثالثة ويمكن تعميم النتيجة وإضافة حلقات تحكم أخرى لإزالة باقي التوافقيات بالترتيب الخامسة والسابعة مثلاً.

3- باستخدام النمذجة في الزمن الحقيقي يمكننا معايرة القيم المطلوبة بشكل دقيق قبل تحميل البرنامج على المعالج الرقمي

4- تتيح هذه الطريقة إمكانيات واسعة من حيث تعديل القيم واجراء عمليات التحكم وتغيير طريقة التحكم للوصول للقيم المثلى.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

References:

- 1- M. T. Abolhassani, H. A. Toliyat and P. Enjeti, "An electromechanical active harmonic filter," IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485), 2001, pp. 349-355, doi: 10.1109/IEMDC.2001.939324.
- 2- Geoff Klemperer; Isidor Kerszenbaum, "Principles of Operation of Synchronous Machines," in Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance , IEEE, 2018, pp.1-52, doi: 10.1002/9781119390718.ch1.
- 3- Qing-Chang Zhong; Tomas Hornik, "Front Matter," in Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration , IEEE, 2012, pp.i-xxv, doi: 10.1002/9781118481806.fmatter.
- 4- A. Elrajoubi, S. S. Ang and A. Abushaiba, "TMS320F28335 DSP programming using MATLAB Simulink embedded coder: Techniques and advancements," 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Stanford, CA, USA, 2017, pp. 1-7, doi: 10.1109/COMPEL.2017.8013418.
- 5- Euzeli dos Santos; Edison R. da Silva, "OPTIMIZED PWM APPROACH," in Advanced Power Electronics Converters: PWM Converters Processing AC Voltages, IEEE, 2014, pp.221-263, doi: 10.1002/9781118886953.ch8.
- 6- S. A. Saleh; M. Azizur Rahman, "Modeling of Power Inverters," in An Introduction to Wavelet Modulated Inverters , IEEE, 2011, pp.41-63, doi: 10.1002/9780470647998.ch3.