مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد(1) – 2025: 76-88

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (1) -2025: 76-88

تنفيذ منظم توتر آلي رقمي لمولد تزامني

ابراهيم أيوب حسن*[1] زياد السقا[2] عبد الله ساميز[3]

*[1]. طالب دراسات عليا (دكتوراه) – مهندس في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – جامعة دمشق
Ibrahim.Hasan@damascusuniversity.edu.sy

[2]. استاذ مساعد– دكتور، قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق .
ZiadAlsakkal@Damascusuniversity.edu.sy

[3]. استاذ - دكتور، قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق.
AbdullaSamez@Damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

إن تأمين الطاقة الكهربائية بموثوقية وكفاءة للمستخدمين النهائيين في الشبكات الكهربائية أو للمستخدمين المستقلين في أنظمة التوليد المستقلة عن الشبكة يتطلب الحفاظ على توتر ثابت على خرج المولد التزامني.

يقوم منظم التوتر الآلي AVR بالتحكم بقيمة تيار التهييج لتأمين توتر متناوب مستقر عند خرج المولد التزامني حيث يزيد من تيار التهييج عند انخفاض قيمة التوتر وبالعكس عند ارتفاع قيمة التوتر.

في هذا البحث سنقوم بتنفيذ منظم جهد رقمي باستخدام معالج رقمي C2000MICROCONTROLLER TMS320F28379D وسيتم تطبيقه على مولدة مخبرية 2 K.V.A.

الكلمات المفتاحية: نظام القدرة الكهربائية، المولد التزامني، نظام التهييج، منظم التوتر الآلي AVR.

تاريخ الايداع: 2022/12/15
تاريخ القبول:2023/4/3

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

Implementation of a Digital Automatic Voltage Regulator for A Synchronous Generator

Ibrahim Ayoub Hasan*[1] Ziad Alsakka[2] Abdulla Samez[3]

*[1]. Postgraduate Student, Eng, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.
Ibrahim.Hasan@damascusuniversity.edu.sy

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

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

Received: 15/12/2022

Accepted: 3/4/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

Providing reliable and efficient electric power to end users in electrical networks or to independent users in off-grid generation systems It requires maintaining constant voltage on the output terminals of the synchronous generator.

The automatic voltage regulator AVR controls the excitation current value to ensure a stable alternating voltage at the output of the synchronous generator, increasing the excitation current when the voltage decreases and vice versa when the voltage rises.

In this paper, we implement a digital voltage regulator using a digital processor C2000 MICROCONTROLLER TMS320F28379D and it will be applied to a 2 K.V.A laboratory generator.

Keywords: Power System, Synchronous Generator, Excitation System, Automatic Voltage Regulator.

المقدمة:

إن تـأمين الطاقـة الكهربائيـة بكفـاءة وموثوقيـة عاليـة يتطلـب الحفاظ على توتر مستقر في أنظمة القدرة الكهربائية

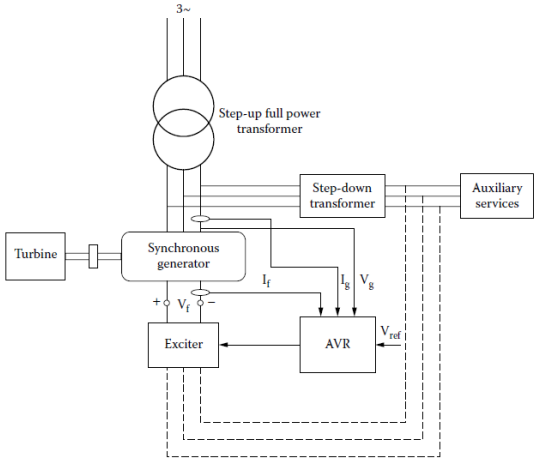
كافة الأحمال سواء غير الفعَالة Passive Loads والأحمال الفعَّالة Active Loads تتطلب استطاعة حقيقية واستطاعة ردَية.

في الشبكات الكهربائية يتم تأمين الاستطاعة الردية للأحمال من خلال طريقين:

1- الـتحكم بتيـار التهيـيج للمولـدات التزامنيـة وبالتـالي التحكم بتوتر المولدات وذلك عن طريق منظمات التوتر الآلية AVR

2- عن طريق معوضات الاستطاعة الردية الستاتيكية والتي يتم اختيار مواقعها بعناية في الشبكات الكهربائية.

الشكل (1) يبين آلية عمل منظم التوتر الآلي في الشبكات الكهربائية



الشكل (1) منظم التوتر الآلي للمولد التزامني

منظم التوتر الآلي AVR يتحكم بتوتر التهيـيج المستمر V_f الذي يغذي ملفات التهييج للمولد التزامني.

إن تغيير تيار التهييج (زيادة أو نقصان) سيؤدي لتغيير (زيادة أو نقصان) للقوة المحركة المغناطيسية emf للمولد التزامني.

تطورت نظم التهييج عبر مراحل متعددة حيث يمكن تصنيفها كمايلي [5]:

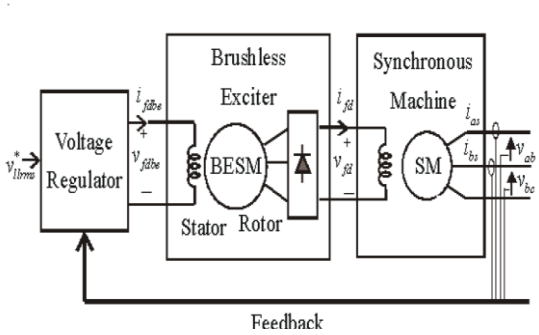
– النظم الكهرو ميكانيكية: تستخدم عناصر ميكانيكية صلبة تتصل مع بعضها بمفاصل ونوابض مع الاستعانة بعناصر كهربائية تعمل بمجملها على ترجمة البعد المقاس أو الفرق النسبي في خرج المولد إلى تغير في الدخل يؤثر على جهد أو تيار التهييج زيادةً أو نقصاناً حسب خرج المولد.

– أنظمة التهييج الكهرومغناطيسية التي تعتمد على خاصية المغنطة والاشباع المغناطيسي لتؤمن الدقة الكافية والحساسية المطلوبة والاستجابة السريعة مثل المنظم ذو وشيعة الاشباع والمنظم ذو المضخم الكهربائي.

– أنظمة التهييج القسرية المركبة التي تحتوي على حواكم أتوماتيكية للتهييج تستجيب لتغيرات القطبية بالإضافة لتغيرات التوتر والتيار كما يحتوي على مصحح كهرومغناطيسي للتوتر.

– نظم التهييج الالكترونية والتي تعتبر من أهم النظم التي تستخدم في تهييج المنوبات حيث تتعامل هذه النظم مع التوتر المقاس بين أحد أطوار المنوبة (أو الأطوار الثلاث) وأحياناً يضاف للقياس تيار الحمل ثم يضبط التوتر المستمر المطبق على ملف التهييج للوصول الى التوتر المطلوب بحيث تكون الدارة الأساسية له هي جسر تقويم ثايروستوري نصف مقاد أو مقاد يرتبط مع الدائر للمنوبة كما في الشكل (2) وهذا النظام هي المستخدم في البحث الحالي ولكن لن يكون الجسر دوار بل سيتم تغذية الدائر عن طريق مسفرات.

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.pHp/index/index
ISSN (online): 2789-6854



الشكل (2) نظام التهييج الالكتروني

يقدم المرجع رقم (1) التحكم بتوتر التهييج للمولد التزامني باستخدام التحكم بعرض النبضة عبر معالج صغري، ويتم قياس القيمة العظمى لتوتر الخرج وتحويلها لقيمة رقمية ليتم مقارنتها مع قيمة مرجعية.

يقدم المرجع رقم (2) كيفية التحكم بتوتر التهييج المستمر عبر mosfet ومتحكم تناسبي تكاملي ليتم استخدام المنظم مع المولدات في الشبكات المكروية.

أما المرجع رقم(3) فيتم التحكم بتوتر التهييج المستمر عبر مولد تزامني ذو مغناطيس دائم PMG مثبت على محور الآلة التزامنية و يتم تغذية ملفات التهييج بعد تقزيم خرج المولد PMG و التحكم بسوية التوتر عبر حلقة تحكم تحوي متحكم تناسبي تكاملي تعطي النبضات لـ MOSFET

في هذا البحث سنقوم بتصميم وتنفيذ منظم توتر رقمي لمولد تزامني مخبري KVA 2 حيث دارة الاستطاعة مؤلفة من ترانزستور وحيد IGBT يعمل كمقطع DC-DC ويتم التحكم به عن طريق معالج رقمي C2000 -TMS320F28379D متصل مع برنامج الماتلاب حيث يعمل الكرت بتوصيل توتر الخرج للآلة التزامنية الى الحاسب ويقوم باستقبال برنامج التحكم المناسب من الماتلاب.

1- وصف النموذج المقترح: Description of the proposed model

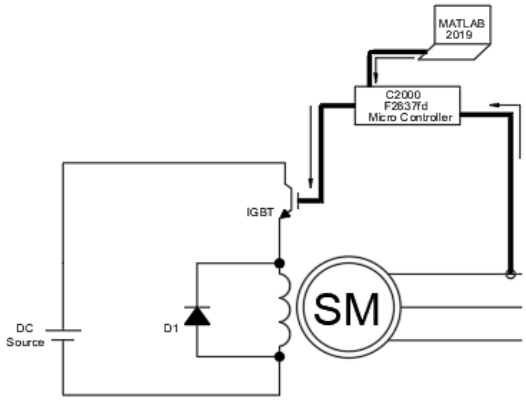
الغاية الرئيسة من منظم التوتر في المولدات التي تعمل بشكل مستقل لتغذية الأحمال هو الحفاظ على سوية توتر ثابتة في خرج المولد التزامني بالرغم من تغيرات الحمل بين اللاحمل الى الحمل الكامل.

الشكل (3) يوضح النموذج المخبري للنظام المقترح.

يتألف النموذج من دارة استطاعة ودارة تحكم

دارة الاستطاعة مؤلفة من المولد المخبري 2kva ومقطع DC-DC حيث يتألف المقطع من منبع توتر مستمر القيمة العظمى له هي 220 فولت وهي قيمة توتر التهييج العليا للمولد التزامني المخبري المعتمد

يتم التحكم بقيمة توتر التهييج عبر ترانزستور IGBT وموصول على التسلسل مع ملف التهييج للمولد التزامني.



الشكل (3) 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 القدح المناسبة على بوابة الترانزستور ويتصل ببرنامج الماتلاب عبر وصلة USB لتحقيق عملية النمذجة في الزمن الحقيقي.

2- العلاقات الرياضية للنموذج المقترح:

Mathematical Equations of Proposal Model

القوة المحركة الكهربائية المنتجة داخل المولد التزامني نتيجة لمعدل القطع بين ملفات الثابت و الفيض المغناطيسي المنتج من الدائر بواسطة توتر التهييج المستمر تُعطى بالعلاقة التالية :[4]

$$V_G(s) = \frac{G_o}{1+sT_{do}} * V_{fd}(s) \qquad (1)$$

أما التوتر على أطراف المولد يمكن تحديده بدلالة تيار الحمل والمفاعلات وفق ما يلي:

$$V_T(s) = V_G(s) - sX_sI_A(s)R_AI_A(s) \qquad (2)$$

يمكن اختصار النموذج الرياضي للمولد التزامني على المحورين d,q وفق ما يلي:

$$V_d(s) = X_qI_q(s) - R_AI_d(s) \qquad (3)$$

$$V_q(s) = V_G(s) - X_DI_d(s) - R_AI_q(s) \qquad (4)$$

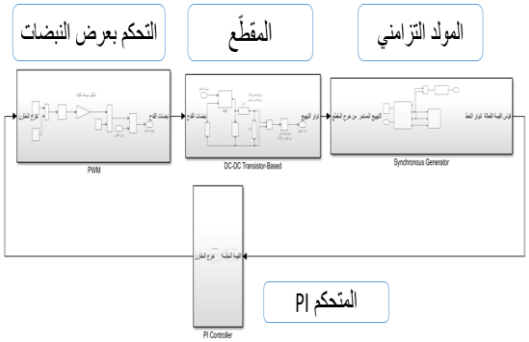
$$X_D(s) = \frac{X_d + sX'_d T'_{do}}{1 + sT'_{do}} \qquad (5)$$

إن عملية التحكم بتوتر الخرج للمولد التزامني ستتم عبر منحكم PID والذي يعبر عنه بتابع التحويل التالي:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d.s \qquad (6)$$

3- النمذجة والمحاكاة:
Modeling and simulation

يتألف النموذج من مولد تزامني 2KVA وحمل 1500 W عند عامل استطاعة 0.8 و يتم تهييج المولد التزامني عبر مقطع DC-DC يتم التحكم بسوية التوتر فيه عبر تعديل عرض النبضة PWM و يتم تحديد عرض النبضة المطلوب عن طريق مقارنة التوتر على خرج المولد التزامني مع قيمة مرجعية والناتج يتم مقارنته مع إشارة مثلثية لتنتج النبضات المطلوبة وفق الشكل رقم 4.

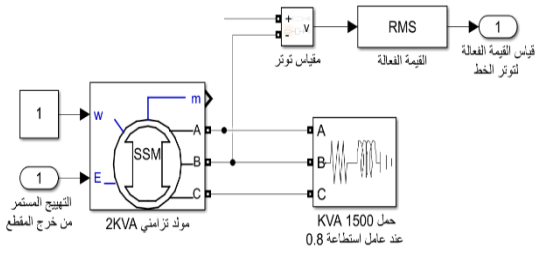


الشكل (4) نموذج الماتلاب المقترح

فيما يلي شرح كل بلوك موجود ضمن الشكل 4.

4-1 نموذج الآلة التزامنية:
Modeling of Synch. Gen.

الشكل رقم 5 يوضح تفاصيل الصندوق Synchronous Generator في الشكل 4.



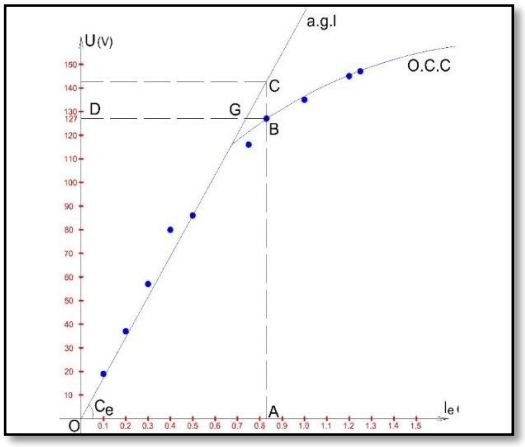
الشكل (5) نموذج المولد التزامني

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 الالة التزامنية تتعلق بالفيض المغناطيسي وسرعة الدوران يتم تنظيمها باستخدام منظم السرعة فالنمذجة ستقوم عاساس أن السرعة دوما ثابتة وهي 1pu

مقياس التوتر في النموذج يقيس القيمة اللحظية للتوتر لذلك نقوم بتحويلها لقيمة فعالة.

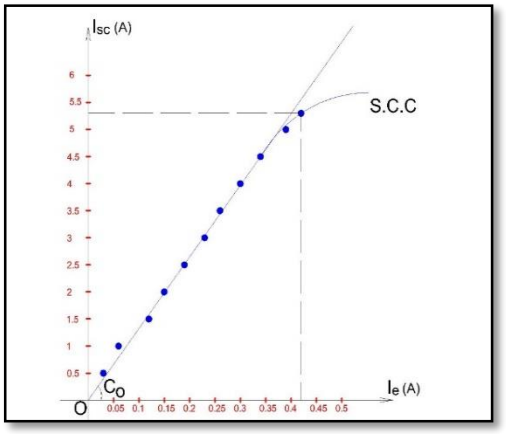
المفاعلة التزامنية يتم حسابها باستخدام تجربتي اللاحمل والقصر وفق ما يلي:



الشكل (5-1) تجربة اللاحمل

في تجربة اللاحمل نوجد العلاقة بين تيار التهييج و توتر المولد عند اللاحمل حيث نقوم بزيادة تيار التهييج تدريجياً و تسجيل قيمة التوتر الناتج حتى نحصل على التوتر الاسمي و نستمر بزيادة تيار التهييج بعد الحصول على التوتر الاسمي لنحصل على منحني المغنطة. وبعد رسم المنحني نقوم بحساب ميل المنحي.

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



الشكل (5-2) تجربة القصر

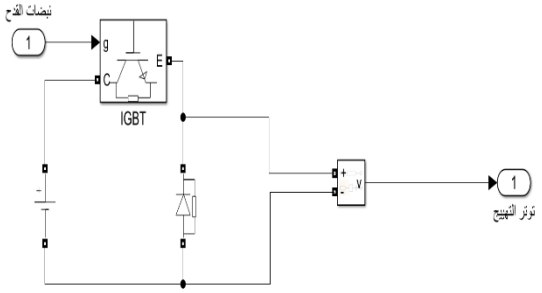
التزامني حيث نقوم بزيادة تيار التهييج بشكل تدريجي وبخطوات صغيرة وتسجيل قيمة التيار المار عند قصر أطراف المولد ونقوم بالزيادة حتى نصل للتيار الاسمي للمولد ونرسم منحني الخواص النحاسية ونحسب ميل المنحني.

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

2-4 نموذج المقطع DC-DC:

Modeling of DC-DC

الشكل رقم 6 يوضح تفاصيل الصندوق DC-DC Transistor-Based في الشكل 4.



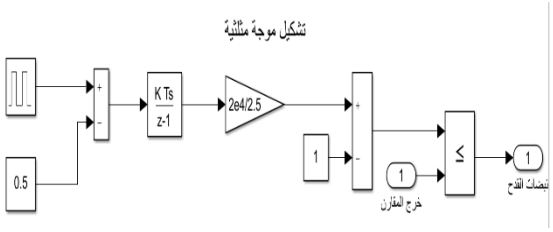
الشكل (6) نموذج المقطع DC-DC

يتألف هذا النموذج من منبع توتر مستمر القيمة العظمى له تساوي 1.15 من قيمة توتر التهييج للمولد التزامني وهو الحد المسموح لزيادة التهييج في المولد التزامني.

ترانزستور IGBT و ديود عكسي على طرفي ملف التهييج.

3-4 نموذج PWM Modeling of PWM

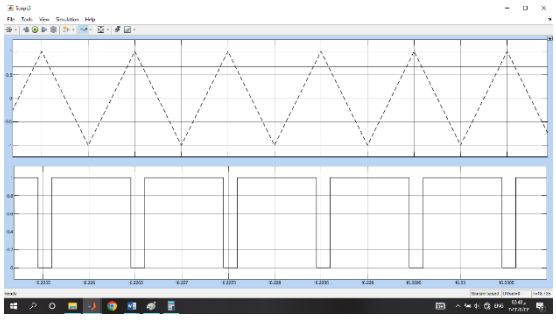
الشكل رقم 7 يوضح تفاصيل الصندوق PWM في الشكل 4.



الشكل (7) PWM

يتألف هذا النموذج من موجة مربعة نقوم بتكاملها وطرح منها قيمة الواحد لتصبح موجة مثلثية من −1 الى +1 ثم تتم المقارنة بين خرج الموجة المثلثية وخرج المقارن يتم انتاج نبضات القدح اللازمة لعمل الترانزستور لإعطاء توتر التهييج المناسب لعمل المولد التزامني.

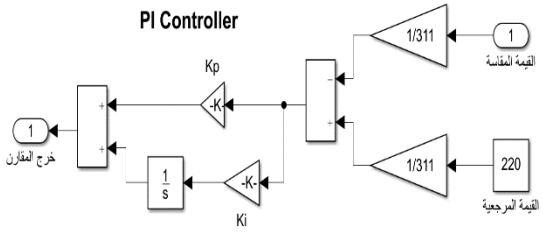
عند انخفاض توتر الخرج للمولد التزامني سيؤدي لازدياد الفرق بين القيمة المرجعية والمقاسة وبالتالي سيزداد عرض نبضات القدح وبالتالي زيادة توتر التهييج والعكس في حال ارتفاع توتر الخرج للمولد التزامني وبالتالي الحفاظ على قيمة ثابتة لخرج المولد والشكل 8 يوضح آلية توليد النبضات.



الشكل (8) توليد نبضات القدح

4-4 نموذج المتحكم PI Modeling of PI Controller

الشكل رقم 9 يوضح تفاصيل الصندوق PI Controller في الشكل 4.



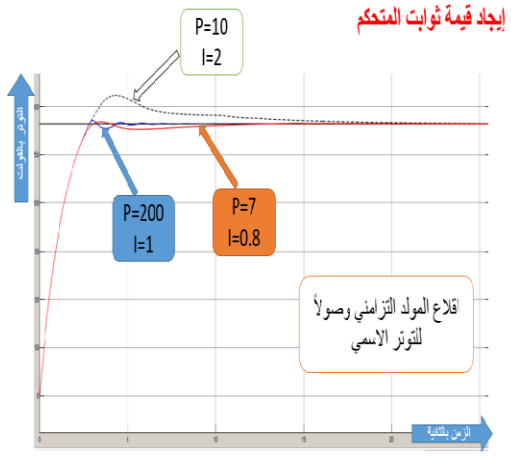
الشكل(9) نموذج الـPI Controller

تنفيذ منظم توتر آلي رقمي لمولد تزامني

نقوم في البداية بمقارنة القيمة المقاسة مع القيمة الفعّالة المرجعية كتوتر الخط 220 V

اشارة الخطأ الناتجة نقوم بمعالجتها ب متحكم PI وسنقوم بحساب محددات PI تجريبياً و ذلك بتغيير قيم P و I للحصول على القيم التي تعطي افضل نتائج من حيث الاستقرار و زمن الاستجابة.

الشكل 9-1 يوضح كيفية اختيار الثوابت.



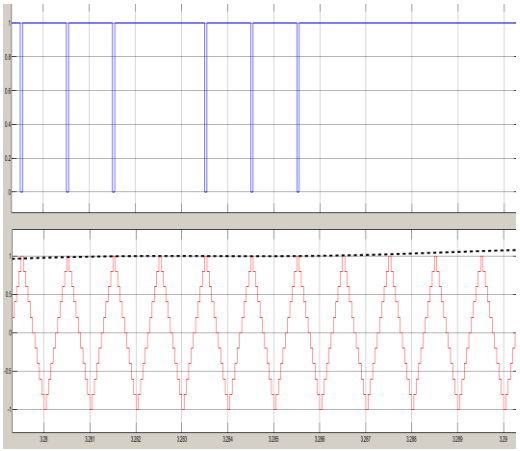
الشكل (9-1) اختيار ثوابت المتحكم

من الشكل السابق نجد ان القيم المناسبة هي P=200 و I=1

5- نتائج النمذجة والمحاكاة: Modeling and simulation results

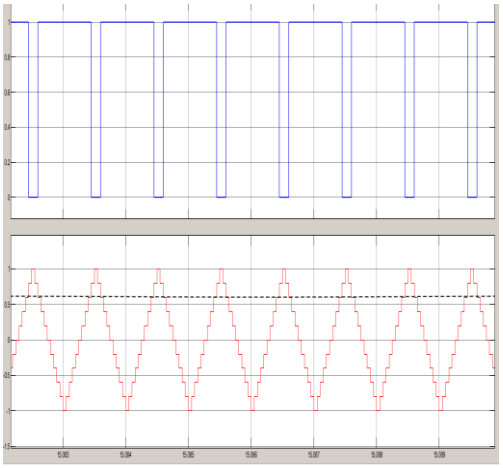
بعد تجهيز النموذج الوارد في الفقرة 4 سنقوم بتغيير توتر الخرج للمولد اما زيادة او نقصان عن طريق زيادة الحمل او إنقاصه ومراقبة خرج المولد التزامني من حيث سوية التوتر وهل قام منظم التوتر الآلي بتثبيت القيمة المرغوبة. كما هو مبين في الشكل 9-1 عند القيم التي تم اعتمادها والشكل 10 يوضح الية العمل المتبعة لوصول توتر خرج المولد للتوتر الاسمي.

الشكل (10) نبضات القدح الناتجة



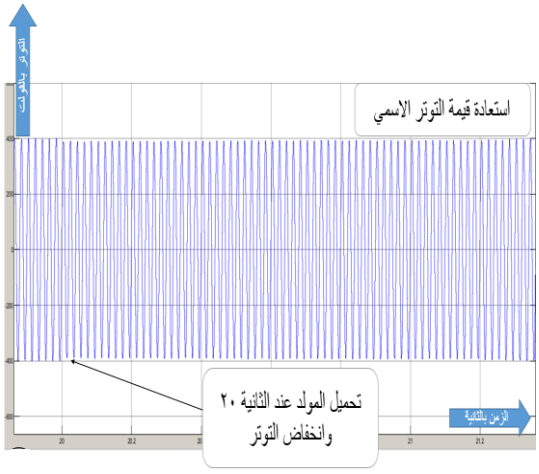
الشكل (10-1) توضيح نبضات القدح الناتجة

من الشكل 10-1 يوضح كيفية عمل المعالج حيث عندما تكون إشارة الخطأ كبيرة (الفرق بين القيمة المقاسة والقيمة المرجعية) يكون خرج المتحكم أكبر من الواح وبالتالي تكون النبضات دائما مساوية للواحد وبالتالي يدخل كامل منبع التوتر المستمر للتهييج وعندما تقل قيمة إشارة الخطأ وتقترب من التوتر المطلوب ويستقر التوتر عند القيمة المطلوبة يكون لدينا نبضات بعرض ثابت كما في الشكل 11



الشكل (11) نبضات القدح عند الوصول للتوتر المرجعي

ولاختبار عمل المنظم نقوم بتحميل المولد بحمل إضافي بعد الاستقرار بفترة زمنية و نراقب عملية إعادة التوتر لقيمة التوتر الاسمي كما في الشكل 12.



الشكل (12) إعادة قيمة التوتر للقيمة المطلوبة

6- النموذج المخبري:Lab Model

مكونات النموذج المخبري المقترح موجودة في الشكل رقم 3. المعالج المستخدم موجود ضمن كرت التحصيل من نوع C2000 وهو عبارة عن لوحة تطوير كاملة منخفضة التكلفة والذي يسمح بواجهة مباشرة لجهاز كمبيوتر لسهولة البرمجة وتصحيح الأخطاء والتقييم.

يتم الاتصال مع جهاز الكمبيوتر عبر USB ويحتوي على مداخل ومخارج تماثلية ورقمية ويمكن التعامل مع الكرت في النمذجة بالزمن الحقيقي سواء بطريقة المراقبة والتحكم اللحظية او بطريقة تحميل البرنامج على الكرت ويقوم المعالج الصغري بالتحكم بالعملية المطلوبة والشكل 13 يوضح تفاصيل الكرت.

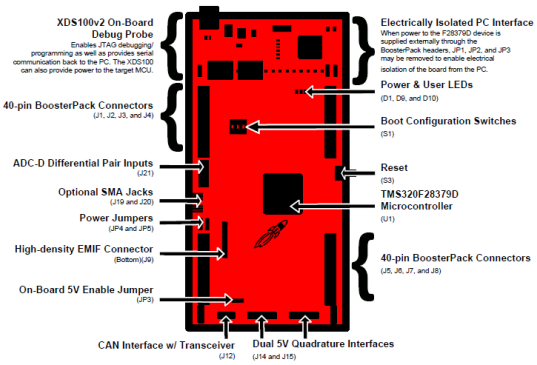
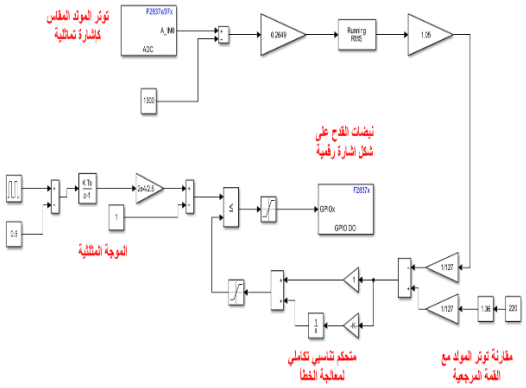


Figure 1. LAUNCHXL-F28379D Board Overview

الشكل (13) كرت التحصيل F28379D

اعتمدنا في هذا البحث طريقة تحميل البرنامج على الكرت بعد اعداد القيم المناسبة للمتحكم و القيم المرجعية المطلوبة حيث يتم تحصيل قيمة التوتر عبر مقياس توتر كإشارة تماثلية يتم معالجتها عن طريق المعالج الصغري المتضمن في الكرت TMS320F28379D و تحويلها للقيمة الفعالة ومقارنتها بالقيمة المرجعية لانتاج إشارة خطأ يتم معالجته بمتحكم PI ثم مقارنة النتيجة مع الموجة المثلثية لانتاج نبضات مناسبة لقدح الترانزستور و بالتالي التحكم بسوية التوتر المطلوبة.

الشكل 14 يوضح البرنامج الذي يتم تحميله على الكرت.



الشكل (14) برنامج الـ AVR

بعد تحميل البرنامج على الكرت باستخدام تعليمة Deploy to hardware نقوم بتدوير محرك التيار المستمر الذي يقوم بتدوير الآلة التزامنية وعند الوصول للسرعة الاسمية نقوم بتشغيل النظام وعند الوصول للتوتر الاسمي عند اللاحمل نقوم بتحميل الآلة بأحمال مختلفة أومية وتحريضية ومختلطة ومراقبة أداء منظم التوتر الرقمي الذي يعمل لوحده على تنظيم التوتر لتبقى قيمة التوتر عند القيمة الاسمية.

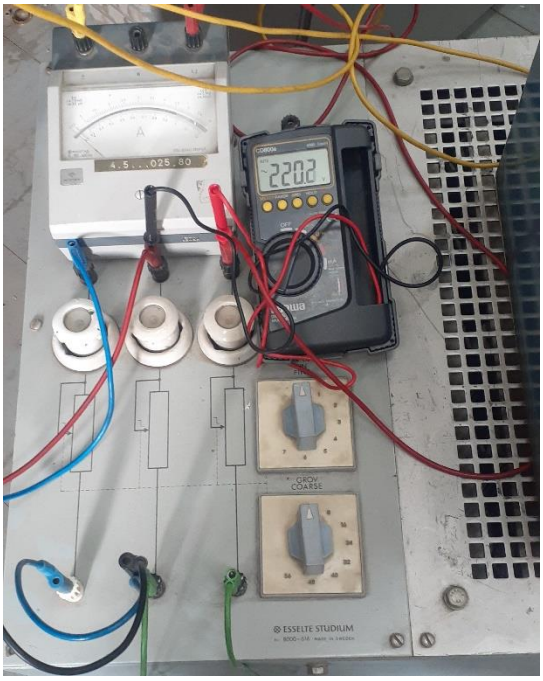
الشكل 15 يوضح الشكل العام للنموذج المخبري.

تنفيذ منظم توتر آلي رقمي لمولد تزامني

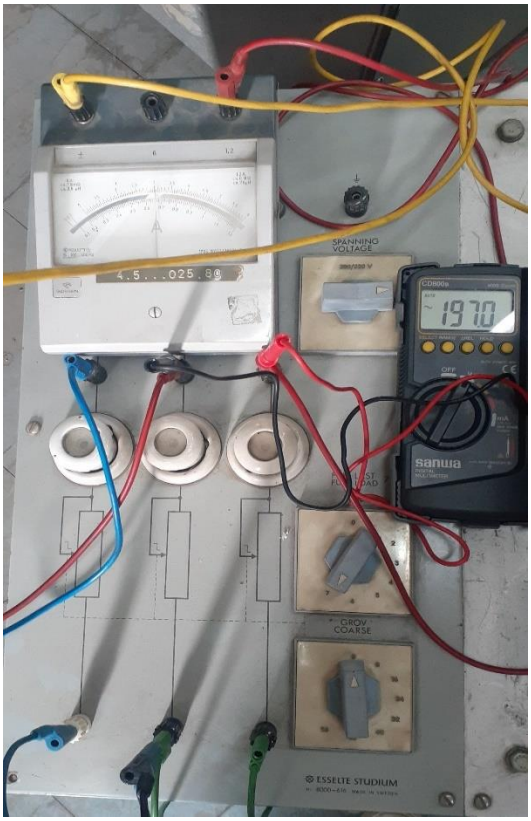
الأشكال من 15 إلى 20 توضح نتيجة عمل منظم الجهد الرقمي عند اللاحمل و عند دخول حمل مسبباً انخفاض التوتر وكيف تم تنظيمه و عند خروج حمل و ارتفاع التوتر و كيف تمت اعادته للتوتر الاسمي.

الالة التزامنية المخبرية لها توترات متعددة توتر الخط 220 فولت في حال التوصيل نجمي وتوتر الطور 127 فولت وفي البحث اعتمدنا توصيل المولد بطريقة النجمي في القسم العملي وقمنا بقياس توتر الطور أما في النمذجة قمنا بقياس توتر الخط وكانت النتائج متوافقة من حيث العمل.

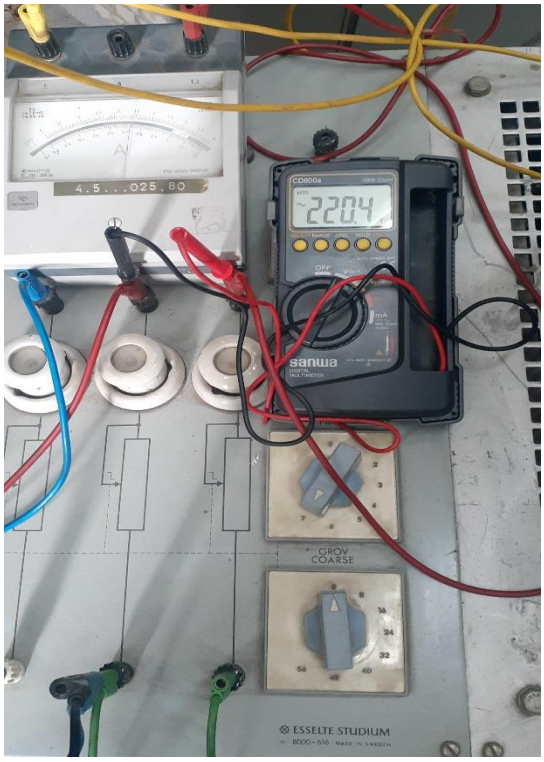
الشكل (15) النموذج المخبري



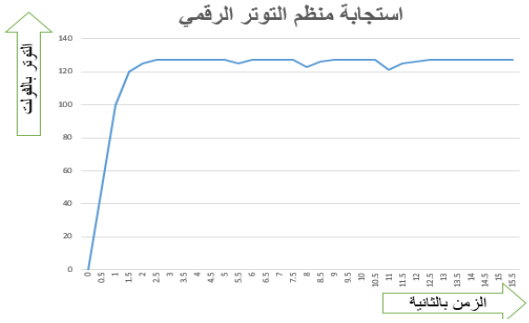
الشكل (16) توتر الخط المولد بدون حمل



الشكل (17) توتر الخط المولد بعد التحميل



الشكل (18) توتر الخط المولد بعد التحميل والتنظيم



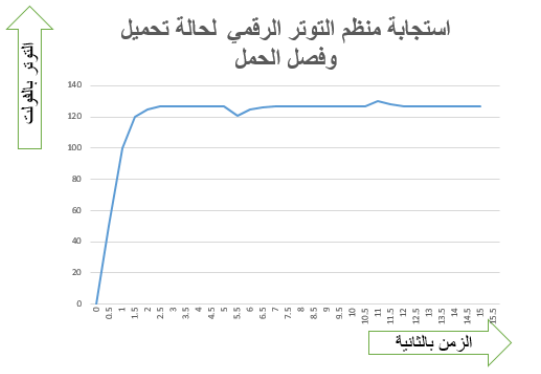
الشكل (19) تنظيم التوتر في عند احمال مختلفة

في الشكل 19 يظهر لدينا كيفية اقلاع المولد التزامني وصولا للتوتر المطلوب و عند حالات تحميل مختلفة كما يوضح الجدول رقم(1) نجد أن منظم التوتر قد أعاد التوتر للتوتر المطلوب في كل مرة.

الجدول (1) تحميل المولد التزامني

الحمل	توتر الطور النهائي	تيار التهييج	زمن الاستجابة
NO LOAD	127 V	0.8	اقل من 3 ثانية
200 VAR Lag	127 V	0.86	لحظي
400 VAR Lag	127 V	0.9	اقل من ١ ثانية
600 VAR Lag	127 V	0.95	اقل من ١ ثانية

الشكل (20) يوضح حالة إضافة حمل للمولد ومن ثم إزالة هذا الحمل وارتفاع قيمة التوتر عن القيمة المطلوبة ومن ثم تدخل منظم التوتر لإعادة قيمة التوتر للقيمة المطلوبة.



الشكل (20) تنظيم التوتر عند ارتفاع توتر الخرج

الجدول رقم (2) يوضح نتائج تحميل و إزالة الحمل في الشكل 20.

الحمل	توتر الطور النهائي	تيار التهييج	زمن الاستجابة
NO LOAD	127 V	0.8	اقل من 3 ثانية
600 VAR Lag	127 V	0.95	اقل من ١ ثانية
NO LOAD	127 V	0.8	اقل من ١ ثانية

الجدول (2) تحميل وإزالة الحمل للمولد التزامني

التوتر يتم بناؤه تدريجياً حتى الوصول لقيمة 127 فولت كتوتر طور (220 فولت توتر خط كما موضح في الأشكال 17-18-19) وهي القيمة المرجعية.

عند تحميل المولد ينخفض التوتر ويقوم منظم التوتر الآلي الرقمي بإعادة قيمة التوتر للقيمة الاسمية كما هو موضح في الأشكال 17 و18

عند ارتفاع التوتر نتيجة خروج بعض الأحمال يقوم منظم التوتر بإعادة قيمة توتر الخرج للمولد الى القيمة المطلوبة كما في الشكل 20.

7- الاستنتاجات: Conclusions

في هذا البحث تم تنفيذ نموذج عملي مخبري لتنظيم التوتر عن طريق معالج رقمي صغري موجود ضمن كرت تحصيل 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 P=200 I=1

يمكن تلخيص نتائج البحث على الشكل التالي:

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

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

3- يمكننا إضافة حلقة للتيار لتكون أكثر موثوقية في عمل المولد التزامني لتفادي التهييج الزائد

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

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

8-References :

1- I. A. Khan, Y. Xu and B. Tahir, "Design and manufacturing of digital MOSFET based-AVR for synchronous generator," 2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation,

Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2015, pp. 217-22, doi: 10.1109/CYBER.2015.7287938.

2-S. -H. Park, S. -K. Lee, S. -W. Lee, J. -S. Yu, S. -S. Lee and C. -Y. Won, "Output voltage control of a synchronous generator for ships using compound type digital AVR," INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/INTLEC.2009.5352002.

3-S. -H. Park, J. -S. Yu, S. -S. Lee, S. -W. Lee and C. -Y. Won, "Output voltage control of synchronous generator for ships using a PMG type digital AVR," 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, pp. 417-421, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316195.

4-Geoff Klempner; 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.

5- Jicheng Li, "Evolution and Development of Excitation Control," in Design and Application of Modern Synchronous Generator Excitation Systems IEEE, 2019, pp.1-34, doi: 10.1002/9781118841006.ch1.