

برمجة مبدل تردد ثلاثي الطور إلى أحادي الطور وتشغيله في الزمن الحقيقي

د. زياد السقا⁽¹⁾

الملخص

تستخدم مبدلات التردد (Cycloconverters) في قيادة المحركات التحريضية والتزامنية، للتطبيقات ذات الاستطاعات الكبيرة، مثل مطاحن الإسمنت، ومحركات الجر في السفن، ومطاحن الفلذات. وتستخدم عادة في قيادة هذه المبدلات جسور التقويم الثايرستورية المقادة بإزالة الطور؛ وذلك بسبب التبديل الطبيعي بين الأطوار، كما أنها متوافرة من أجل تيارات وتوترات عمل كبيرة مما يجعلها تناسب تطبيقات الاستطاعات الكبيرة.

يعمل مبدل التردد على تبديل شكل الاستطاعة المتناوبة للدخل ذات تردد معين، إلى استطاعة خرج ذات تردد مختلف مباشرة وبمرحلة واحدة.

صُمم ونُفذ في هذا البحث مبدل تردد من ثلاثي الطور إلى أحادي الطور، باستخدام جسري تقويم ثايرستوريين ثلاثي الطور، وجرى التحكم بدارات توليد النبضات لهذين الجسرين في الزمن الحقيقي بواسطة كرت تحصيل من النموذج (PCL1711) وبرنامج (Matlab/Simulink). أجريت مجموعة اختبارات على أداء المبدل، مثل تغيير تردد الخرج وتوتره، واستخدامه في تشغيل محرك تحريضي أحادي الطور بسرعة أقل من سرعته الاسمية.

الكلمات المفتاحية: التحكم بجسور التقويم الثايرستورية، مبدل تردد، قيادة محرك تحريضي، التحكم في الزمن الحقيقي.

⁽¹⁾ مدرس، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

Programming and Operating Three Phase to Single Phase Cycloconverter In Real Time

Dr. Ziad Al Sakka⁽¹⁾

Abstract

Cycloconverters is used in driving induction and synchronous motors , at high power applications, like Cement mill drives, propulsion drive in ships and ore mills. Usually, Phase controlled thyristor-bridges are used to drive it, because of its natural comutation between phases. It is also, available for high operating voltages and currents,whitch makes it suitable for high power applications.

It converts the type of alternating power of the input with certain frequency, to an output power with a different frequency directly, and in a single stage.

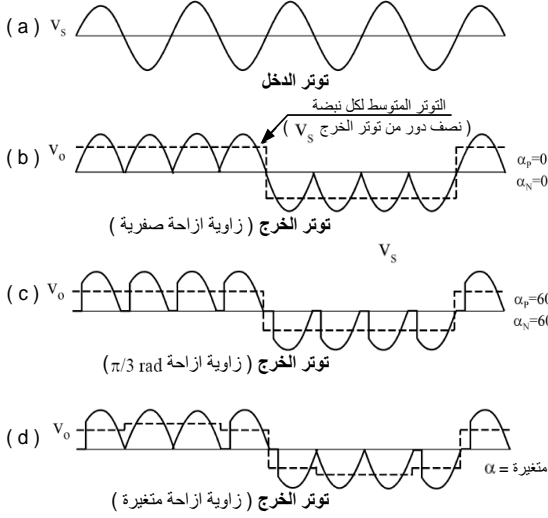
In this paper, three phase to single phase cycloconverter was designed and implemented, using two anti-parallel three phases thyristor converters. The triggering pulse generator was controlled in real time using data acquisition card (DAS) type (PCL1711), and (Matlab/Simulink).

Many tests were made for the performance of the cycloconverter, like changing the output frequency and voltage,and operating a single phase induction motor at alower speed.

Key words: Control of thyristor bridges rectifiers, Cycloconverters, Induction motor drive, Control in real time.

⁽¹⁾Electrical Power Department, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Damascus University.

الذي يبيّن أشكال توترات الدخل والخرج لهذا المبدل عند الحمل الأومي، وفي حالات التشغيل المختلفة، عندما يكون التوتر المرجعي ذا قيمة توتر ثابتة، ويبين زوايا التأخير بالطور للتوترات في النصف الموجب والنصف السالب، وهنا نرى أن زاوية التأخير في الطور α ثابتة للتوضيح. لكن عملياً نستخدم توتراً مرجعياً متناوباً جيبياً للتحكم بزوايا التأخير في الطور، وعندئذٍ فإن كل ثيرستور سيعمل عند زاوية إزاحة مختلفة عن الثيرستور الذي يليه.



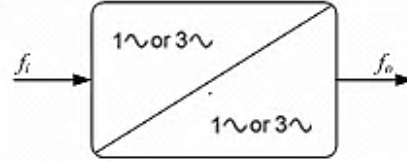
الشكل (3) أشكال التوترات لمبدل التردد أحادي الطور - أحادي الطور

ويفرض أن توتر الدخل V_s هو موجة توتر جيبيّة متناوبة ذات تردد محدد f_i ، (الشكل 3-أ)، وللتبسيط نفترض أن الثايرستورات تعمل عند زاوية قدح صفرية، أي أنها تعمل كمقوم غير مقاد. فللحصول على تردد خرج مساوٍ إلى ربع تردد الدخل، فإنّ الجسر الموجب سيعمل خلال دورين من موجة الدخل V_s ليزود الحمل بأربعة أنصاف أدوار موجبة من موجة توتر الدخل، (الشكل 3-ب)، وخلال الدورين التاليين سيعمل الجسر السالب على تزويده بأربعة أنصاف أدوار سالبة [6]، [7].

وبهذا يصبح تردد الخرج أصغر أربع مرات من تردد الدخل $f_o/f_i=1/4$ ، أي إنّ تردد الخرج أصبح ربع تردد الدخل، ومن ثمّ أصبح لدينا مبدل خافض للتردد، ويمكن تغيير قيمة تردد الخرج بتغيير عدد أنصاف الأدوار التي يمررها كل من الجسر الموجب والجسر السالب، ونلاحظ أنه عندما يعمل أحد المبدلين يُحجز عمل المبدل الآخر، وعليه فإنّه لا يوجد تيار دائر بين المبدلين.

1- أنواع مبدلات التردد (Cycloconverter)

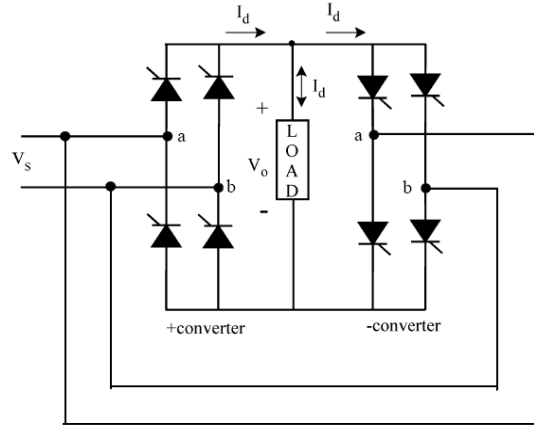
هناك عدة أنواع لمبدل التردد، قد يكون المدخل أحادي الطور أو ثلاثي الطور، وكذلك المخرج ممكن أن يكون أحادي الطور أو ثلاثي الطور [1] و [3] و [6]، كما يبين الشكل (1):



الشكل (1) مبدل التردد المباشر (Cycloconverter)

1-1- مبدأ عمل مبدل التردد أحادي-أحادي الطور (1ph-1ph Cycloconverter):

يتكون هذا المبدل من جسري تقويم أحادي الطور، متعاكسين، كما يبين الشكل (2).



الشكل (2) مبدل التردد المباشر من أحادي إلى أحادي الطور

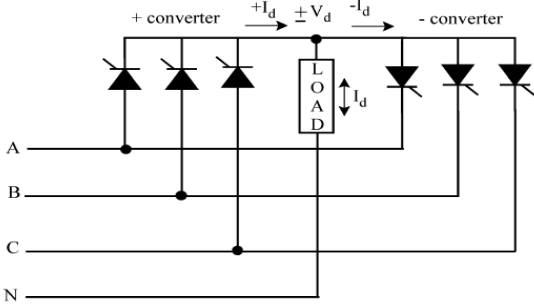
ويمكن التحكم بزوايا القدح لكل منهما، من خلال نظام قيادة خاص، إذ يشكل الجسر الأول النصف الموجب لموجة الخرج، في حين أن الجسر الثاني يشكل النصف السالب لموجة الخرج، ومن خلال جمع نصفي الموجتين تتشكل موجة خرج متناوبة ذات تردد أقل من تردد المنبع.

كما يمكن التحكم بالقيمة الفعالة لتوتر خرج مبدل التردد عن طريق التحكم بمطال التوتر المرجعي، الذي يُقارن بالأمواج المثلثية للتردد الحامل التوتر المرجعي من الصفر إلى الواحد الصحيح.

إذ يمكن التحكم بقيمة توتر الخرج بتغيير المطال ولكي نوضح آلية عمل المبدل بشكل مبسط نتابع الشكل (3)

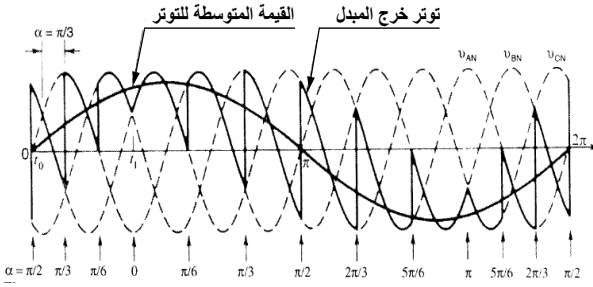
1-2- مبدأ عمل مبدل التردد ثلاثي- أحادي الطور (3ph-1ph Cycloconverter):

هناك نوعان أساسيان من مبدل التردد من ثلاثي إلى أحادي الطور (3φ-1φ):
النوع الأول يستخدم مقومات ثلاثية الطور تفرعية بسيطة، (تقويم نصف موجة)، كما يبين الشكل (4):



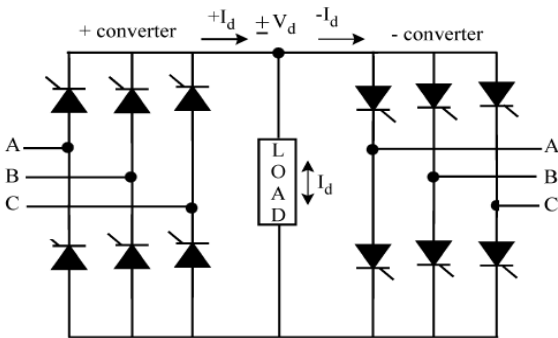
الشكل (4) مبدل تردد ثلاثي إلى أحادي الطور (نصف موجة)

ويبين الشكل (5) شكل توتر الخرج لمبدل تردد ثلاثي - أحادي نصف موجة، وشكل القيمة المتوسطة للتوتر، ويظهر فيه أن زوايا التأخير في الطور غير متساوية.



الشكل (5) شكل توتر الخرج لمبدل تردد ثلاثي أحادي نصف موجة

النوع الثاني يستخدم مقومات ثلاثية الطور تفرعية مضاعفة جسرية، (جسور تقويم ذات موجة كاملة)، كما يبين الشكل (6):



الشكل (6) مبدل تردد ثلاثي إلى أحادي الطور (موجة كاملة)

وفي هذا النوع من مبدلات التردد يمكن التحكم بتردد موجة توتر الخرج بأعداد صحيحة من مضاعفات تردد موجة الدخل، فإذا افترضنا أن زوايا القدح للمبدل الموجب هي α_p ، وللمبدل السالب هي α_N ، فإن قيمة توتر الخرج المستمر لكل من الجسرين عند زاوية قرح α يعطى بالعلاقة المبسطة الآتية:

$$V_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cos \alpha \quad (1)$$

إذ: V هي القيمة الفعالة لتوتر الدخل، والخط المنقط في الشكل (3-d) يبين التوتر المستمر في كل نصف دور.

وعليه فإن توتر الخرج هو [1]، [6]:

$$V_{o1}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cos \alpha \quad (2)$$

ونلاحظ أن قيمة توتر الخرج تعتمد على قيمة زاوية القرح α ، فمن أجل زاوية $\alpha=0^\circ$ فإن:

$$V_{o1} = V_{do} \times 1 = V_{o1}$$

$$V_{do} = \frac{4}{\pi} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \quad \text{إذ:}$$

وإذا ازدادت قيمة الزاوية α إلى $\pi/3$ كما يبين الشكل (3-c)، يكون:

$$V_{o1} = V_{do} \times 0.5$$

أي إن تغيير زاوية القرح α يغير توتر خرج المبدل. لكن العمل عند زاوية قرح α ثابتة لجسور التقويم يعطي في الخرج موجة توتر فيها كثير من التوافقيات والخط المنقط في الشكلين (3-b، c)، يبين موجة توتر مربعة، فإذا أمكن تعديل هذه الموجة المربعة لتبدو أقرب إلى الموجة الجيبية، فإنه يمكن تخفيض نسبة التوافقيات في شكل موجة التوتر الناتجة.

لذلك تُعدّل الزاوية α للحصول على شكل توتر متدرج، والشكل المنقط سداسي الخطوات، الذي يبينه الشكل (3-d)، وهو أقرب إلى الشكل الجيبي، وذو توافقيات أقل. وعليه فإنه كلما ازداد عدد النبضات ذات زوايا القرح المختلفة، في خرج المبدل كانت نسبة التوافقيات في خرجه أقل [1] و [5].

وحديثاً يقوم عدد كبير من الباحثين بمقارنة تجب توتر المصعد للثريستور بالموجة المرجعية لتحديد زوايا القرح المطلوبة.

في الشكلين (7) و(8) نرى كيف أن كل جسر وخلال نصف الدور الواحد يعمل كمقوم مقدما الاستطاعة من المنبع إلى الحمل، كما أنه يعمل كعاكس يعيد الاستطاعة من الحمل إلى المنبع، ذلك لأن جداء التوتّر بالتّيار يجب أن يبقى موجباً عند حقن الاستطاعة من المنبع إلى الحمل.

في مبدأ العمل المبسط لدينا:

$$\alpha_P + \alpha_N = \pi \quad (3)$$

بفرض أن زاوية القدح للجسر الموجب هي α_P ، وزاوية القدح للجسر السالب هي α_N . هذا وتعطى المركبة الأساسية للتوتر المبين في الشكل (8) بالعلاقة الآتية:

$$v_{o_1}(t) = \sqrt{2} V_o \sin \omega_o t \quad (4)$$

إذ: V_o هي القيمة الفعالة للمركبة الأساسية للتوتر. وعند زمن t_0 يكون توتر الخرج:

$$v_{o_1}(t_0) = \sqrt{2} V_o \sin \omega_o t_0 \quad (5)$$

ويمكن لجسر التقويم الموجب أن يزود الحمل بهذا التوتر إذا كانت الزاوية α_P تحقق العلاقة:

$$v_{o_1}(t_0) = \sqrt{2} V_o \sin \omega_o t_0 = V_{do} \cos \alpha_P \quad (6)$$

إذ:

$$V_{do} = \sqrt{2} V_o \frac{P}{\pi} \sin \frac{\pi}{P} \quad (7)$$

مع ملاحظة أن P عدد الأطوار من أجل مقوم نصف موجة، $P=3$ ، ومن أجل المقومات الجسرية المضاعفة فإن $P=6$.

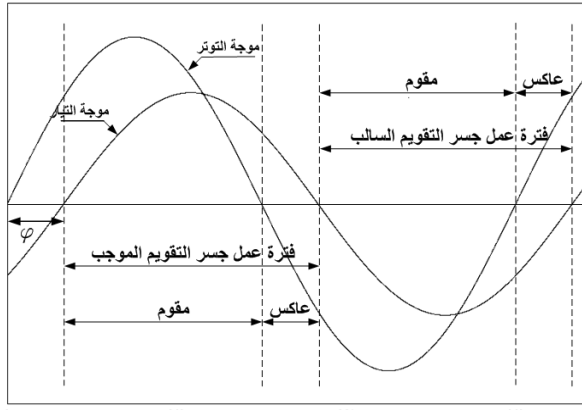
ومن شرط الزاوية α في المعادلة (3) نجد أن:

$$v_{o_1} = V_{do} \cos \alpha_P = -V_{do} \sin \alpha_N$$

إن عمل مبدلات التردد من ثلاثي الطور إلى أحادي الطور الجسرية ذات الموجة الكاملة، مشابه لطريقة تقويم نصف الموجة المشروحة أعلاه، مع ملاحظة أن عدد النبضات في هذه الحالة هو (6) نبضات.

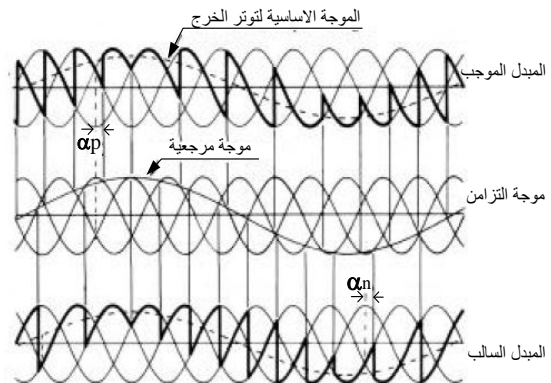
يزود مبدل التردد توتراً مقوماً إلى الحمل في كل نصف دور، إذ يقوم جسر التقويم الموجب بتقديم نصف الموجة الموجبة إلى الحمل، كما يقوم جسر التقويم السالب بتقديم نصف الموجة السالبة إلى الحمل، وهكذا يتكامل عمل كل من المقومين المقوم الموجب والسالب لتشكيل موجة توتر الخرج المتناوب بالتردد المطلوب.

إن قطبية موجة التيار هي التي تحدد أيّاً من الجسرين سيقدّم الاستطاعة إلى الحمل، ففي النصف الموجب لموجة التيار سيعمل جسر التقويم الموجب على تقديم الاستطاعة للحمل، أمّا في النصف السالب فإنّ جسر التقويم السالب سيتولى المهمة، ويتناوب كل من الجسرين في تقديم الاستطاعة اللازمة إلى الحمل. وذلك ما يبيّنه الشكل (7).



الشكل (7) فترات عمل كل من الجسر الموجب والجسر السالب

ستؤدي عملية التبديل من جسر التقويم الأول إلى جسر التقويم الثاني إلى حدوث قفزة غير مرغوب فيها في التوتر. ولتجنب حدوث هذه القفزة، يُجبر كل جسر على توليد القيمة المتوسطة ذاتها في كل نصف دور من أدوار موجة توتر الخرج، (الشكل 8).

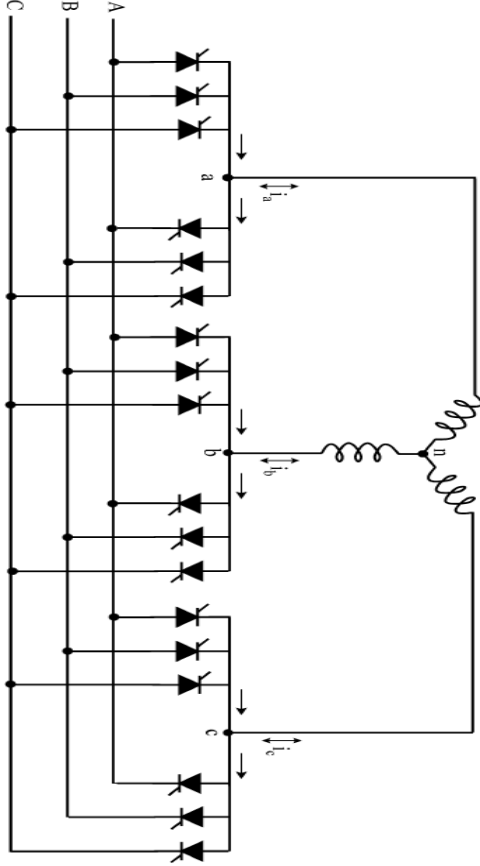


الشكل (8) توترات عمل كل من الجسرين الموجب والسالب (حالة تقويم ثلاثي الطور نصف موجة)

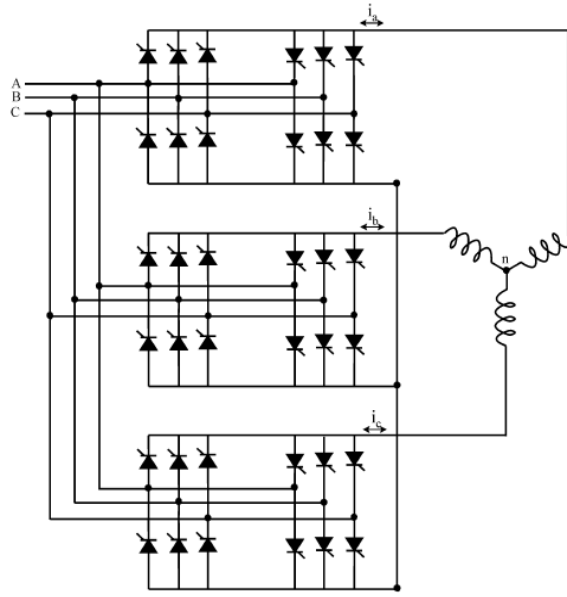
3-1- مبدأ عمل مبدل التردد ثلاثي - ثلاثي الطور (3ph-3ph Cycloconverter)

يُشكّل هذا المبدل باستخدام ثلاثة مبدلات أحادية الطور متشابهة، مزاحة عن بعضها بزوايا $2\pi/3$ ، توصل إما بشكل نجمي أو مثلثي.

كما يبيّن الشكل (9) دائرة مبدل تردد من ثلاثة أطوار إلى ثلاثة أطوار (3ph-3ph)، تستخدم ثلاثة جسور تقويم تفرعية مضاعفة لتشكيل مبدل تردد ثلاثي الطور، يستخدم فيها 36 ثايرستوراً.



الشكل (10) مبدل تردد $3f - 3f$ نصف موجة



الشكل (9) مبدل تردد $3f - 3f$ موجة كاملة

2- طرائق العمل لمبدلات التردد:

1-2- طريقة الحجز (Blocking Mode):

تُراقب في هذه الطريقة موجة التيار. عندما يعبر في نقطة الصفر من السالب إلى الموجب يُحجز جسراً التقويم معاً مدة قصيرة، ثم يؤهّل الجسر الموجب حتى العبور التالي بالصفر، وتكرر هذه العملية كل نصف دور بالتناوب بين المقومين.

ويبيّن الشكل (11) التوترات في مبدل تردد يعمل بطريقة الحجز. ونلاحظ أنّه عندما يعمل أحد المبدلين يُحجز عمل المبدل الآخر، وعليه فإنّه لا يوجد تيار دائر بين الجسرين [1].

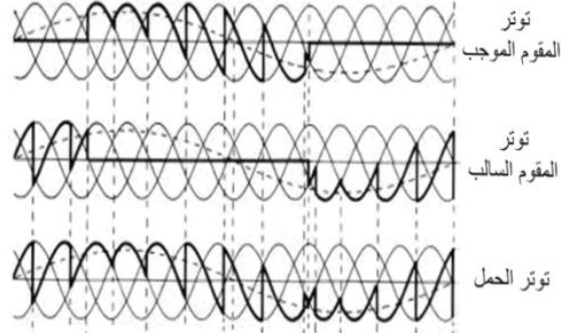
ويبيّن الشكل (10) دائرة مبدل تردد من ثلاثي الطور إلى ثلاثي الطور (3φ-3φ)، تستخدم ثلاثة جسور تقويم تفرعية بسيطة لتشكيل مبدل تردد ثلاثي الطور، ويستخدم فيها 18 ثايرستوراً.

على أداء هذا النظام؛ إلا أنها لا تعطي أي مدلول عن الأداء الفيزيائي المتكامل لهذا النظام عند تنفيذه على الواقع، فضلاً عن أنه عندما تبدأ عملية تصنيع النموذج الفيزيائي الأولي لهذا النظام (prototype)، من المهم معرفة الأزمنة الحقيقية التي يتعامل فيها النظام مع المحيط الخارجي. إذ غالباً ما تكون الأزمنة التي تجري فيها عملية المحاكاة أكبر بكثير من زمن المدة المدروسة، فقد يمتد زمن التنفيذ لمحاكاة مدة أقل من ثانية، مدة تتجاوز عدة دقائق، كما أن الزمن اللازم لتنفيذ المحاكاة غالباً ما يكون أكبر بكثير من الزمن الحقيقي لأداء النظام، وهنا ظهرت الحاجة إلى المحاكاة في الزمن الحقيقي، وبدأت الشركات المصنعة لأنظمة التحصيل الإلكترونية تزود منتجاتها ببرامج إضافية خاصة تدعم البرامج المختلفة للنمذجة والمحاكاة من أجل تحقيق العمل في الزمن الحقيقي للنماذج المدروسة.

ومن أهم برامج المستخدمة في النمذجة والمحاكاة (EASY5, SIMULINK, System-Build)، اخترنا العمل على برنامج Simulink الذي يشكل قسم المحاكاة من برنامج الـ Matlab. لدى القيام بنمذجة نظام تحكم ما من أجل دراسة أدائه، يقوم برنامج Matlab بتخزين هذا النموذج ضمن ملف خاص لاحقته .mdl. ونختار الاسم له وليكن model و يصبح اسم الملف كاملاً model.mdl، ويمكن استدعاء هذا الملف من أجل تنفيذ المحاكاة .

ومن أجل الانتقال من النمذجة إلى المحاكاة في الزمن الحقيقي، يستخدم نظام تحصيل معلومات (Data Acquisition System)، ويُربط النموذج الخاص بنظام التحكم المدروس مع العالم الخارجي من خلال نظام التحصيل فتوصل الإشارات الخارجية التي قد تنتج عن لواقط أو حساسات أو مبدلات قياس، إلى المداخل التمثيلية لنظام التحصيل وذلك بعد المعالجة وإجراء التعديلات المناسبة عليها لتلائم هذه المداخل. وتوصل المخارج التمثيلية إلى المشغلات (Actuators)، أو إلى دارات القيادة للتجهيزات الخارجية المتعلقة بنظام التحكم.

وتجدر الإشارة إلى وجود طرائق عديدة لتحقيق المحاكاة في الزمن الحقيقي، تختلف من حيث البنية، وبيئة العمل، فضلاً عن الكلفة المادية. وسنذكر فيما يأتي وبالتفصيل المبدأ الأساسي للطرائق المختلفة التي قمنا باختبار أدائها من أجل الوصول إلى الطريقة المناسبة لقيادة نظام التحكم وتشغيله في مبدل التردد (cycloconverter).



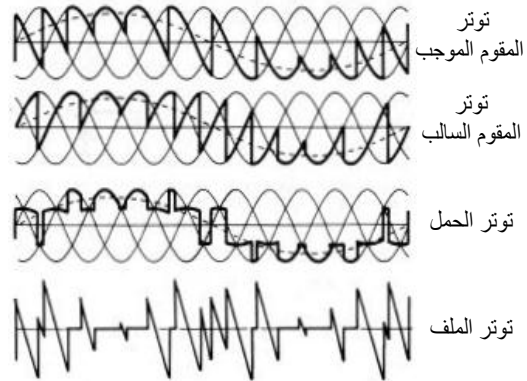
الشكل (11) توترات مبدل يعمل بطريقة الحجز

2-2- طريقة التيار الدائر

(Circulating Current Mode):

يعمل في هذه الطريقة جسرا التقويم معاً لتوليد موجة توتر الخرج الأساسية، وهكذا عندما يعمل أحد الجسرين كمقوم (rectifier)، يكون الجسر الآخر عاكساً (inverter)، والعكس بالعكس. فإذا كان التوتر الناتج عن كل من المقومين جيبياً بحتاً، يكون فرق التوتر اللحظي بين الجسرين مساوياً إلى الصفر، لكن في الواقع يُضاف ملف ذو نقطة وسط بين الجسرين؛ وذلك من أجل امتصاص الفروقات اللحظية في التوتر بين الجسرين.

والشكل (12) يبين التوترات في مبدل التردد عندما يعمل بطريقة التيار الدائر.



الشكل (12) توترات مبدل يعمل بطريقة التيار الدائر

3- النمذجة في الزمن الحقيقي [10]:

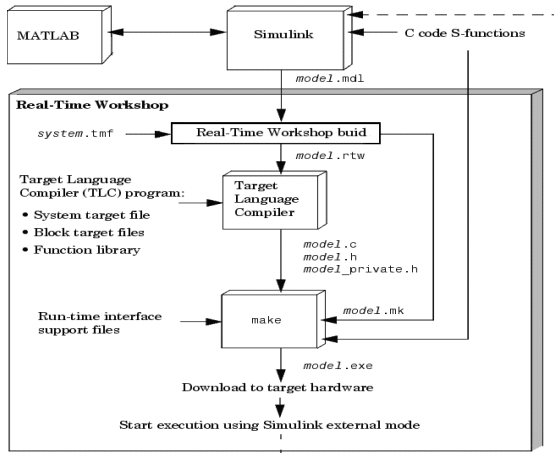
تفيد النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية لأي نظام في دراسة هذا النظام وتصميمه، والتأكد من أدائه، وتسجيل النتائج المختلفة للمحاكاة، وهي تعطينا فقط مؤشراً مبدئياً

- مراقبة الإشارة Signal monitoring: إذ يمكن استخدام رواسم الإشارة التي نستخدمها من أجل مراقبة الإشارة في المحاكاة، ومن أجل مراقبة الإشارة في أثناء تشغيل التطبيقات في الزمن الحقيقي.

- توليف المحددات (Parameters Tuning): يمكن استخدام صناديق الحوار للعنصر من أجل تغيير المحددات في أثناء تشغيل التطبيقات في الزمن الحقيقي. في هذه الطريقة يبقى الحاسب محجوراً لهذه العملية ولا يمكن في أثناءها تشغيل أي برنامج، أما طريقة توليد البرنامج التنفيذي لنموذج التحكم فتكون بمساعدة "ورشة عمل الزمن الحقيقي".

3-2- ورشة عمل الزمن الحقيقي (Real-Time Workshop)

يبدأ العمل من أجل تحويل الملف النموذج لنظام التحكم المدروس model.mdl إلى ملف تنفيذي مستقل بتشكيل ملف ترجمة وسيط Real-Time Workshop File هو model.rtw، هذا الملف يساعد على توليد ملف النموذج المدروس بلغة C؛ وذلك بمساعدة ملفات النظام Template make files، وهي system.tmf، الموجودة في إحدى مكتبات "ورشة عمل الزمن الحقيقي". ثم يحول هذا الملف الناتج إلى ثلاثة ملفات: الأول ملف بلغة C وهو model.c، والثاني ملف ارتباط يستخدمه مترجم لغة C وهو model.h، والثالث ملف ارتباط خاص بالنموذج المدروس model-private.h. ويبيّن الشكل (13) المراحل المختلفة لبناء البرنامج.



الشكل (13) المراحل المختلفة لبناء البرنامج التنفيذي

يكون ملف النموذج الخاص بالنظام المدروس model.mdl قابلاً للعمل في الزمن الحقيقي، يجب أن

ظهرت المحاكاة في الزمن الحقيقي في برنامج Matlab، (الإصدارات حتى 6.5) بشكل مجموعة برمجية تعمل تحت بيئة نظام التشغيل (Dos Real-Time Target)، وكانت تدعم كرت تحصيل وحيد هو DAS1601، وهو من صنع شركة (Keithley Metra Byte)، وقد أُجريت اختبارات عديدة على هذا النظام الذي لم يعد موجوداً في الإصدارات الأحدث.

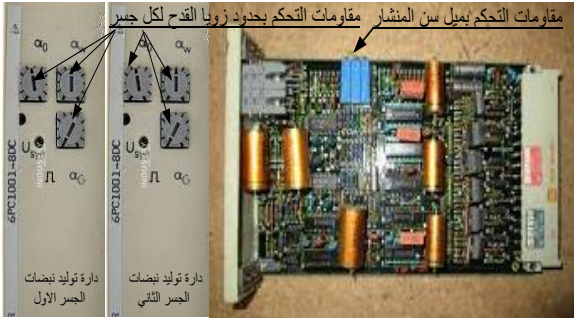
ثم قامت الشركة بإصدار مجموعة برمجية أخرى للمحاكاة في الزمن الحقيقي تعمل تحت بيئة نظام النوافذ (Windows)، وهي المجموعة البرمجية (Real-Time Target) التي تدعم العديد من أنظمة التحصيل المختلفة، والتي هي من إنتاج شركات متعددة.

وهذه الطريقة التي اعتمدها في إنجاز هذا البحث. ثم ظهرت طريقة محاكاة الزمن الحقيقي المستقل (Real Time Interface)، تعتمد هذه الطريقة على أنظمة مستقلة مزودة بمعالجين رئيسيين، المعالج الأول هو معالج كلمات (Word Processor)، والمعالج الثاني هو معالج إشارة رقمية (Digital Signal Processor).

3-1- محاكاة الزمن الحقيقي في بيئة النوافذ Real Time Windows Target

العمل في الزمن الحقيقي في بيئة النوافذ (Windows) هو الحل المناسب كثير من أنظمة التحكم ومحاكاتها واختبارها، في هذه الطريقة يستخدم حاسب وحيد كمضيف وهدف بأن واحد، إذ يُستخدم الحاسب الشخصي مع بيئة (MATLAB \ Simulink)، لتشكيل نماذج حاسوبية من خلال عناصر Simulink، وبعد تشكيل النموذج وإجراء المحاكاة في النمط الطبيعي للبرنامج Normal Mode، وباستخدام المجموعة البرمجية "ورشة الزمن الحقيقي"، (Real-Time Workshop)، وبرنامج الترجمة للغة C أو C++، والربط مع أحد كروت التحصيل المتوفرة، يمكننا توليد برنامج تنفيذي خاص لنموذج هذا النظام (يمكن استخدام أي برنامج C/C++ compiler لهذا الغرض)، هذا البرنامج التنفيذي يمكننا من تشغيل النظام المدروس في الزمن الحقيقي؛ وذلك من خلال اختيار نظام المحاكاة في النمط الخارجي (Mode External)، لعمل برنامج Simulink، لكي يُربط مع كرت التحصيل.

إن التكامل بين النمط الخارجي لبرنامج Simulink والزمن الحقيقي في بيئة النوافذ يسمح باستخدام عناصر Simulink من أجل التخاطب مع النظام وهذا ما يمكننا من:



الشكل (14) دارتي توليد نبضات القذح لجسري التقويم

في كل دائرة من دارات النبضات توجد ست مقاومات ضبط، ثلاث منها داخلية يُضبط فيها ميل سن المنشار المولد من كل طور، وثلاث مقاومات ضبط خارجية على واجهة كل دائرة هي:

α_0 الزاوية المقابلة لقيمة الصفر في توتر الخرج.

α_w الحد الأدنى لزوايا القذح.

α_G الحد الأعلى لزوايا القذح.

هذا وقد أُجريت التعديلات اللازمة كلها من أجل تشغيل دائرة الاستطاعة كمبدل تردد، فُصلت الملفات الخانقة، ومقاييس التوتر والتيار الرئيسان، ثم أُعيد ضبط المقاومات المختلفة في دائرة القذح لتلائم الوضع الجديد لجسري التقويم للعمل كمبدل ترد.

4-3- عناصر العمل في الزمن الحقيقي:

من أجل توليد أوامر التحكم اللازمة لقيادة المبدل استُخدمت طريقة النمذجة في الزمن الحقيقي، وهذه الطريقة تحتاج إلى:

- حاسب الكتروني مزود بنسخة حديثة من برنامج (Matlab/Simulink)، تتضمن بيئة العمل في الزمن الحقيقي (Real Time Windows Target).

- كرت تحصيل نموذج PCI1711 يركب ضمن الحاسب، مبيّن في الشكل (15)، وهو مزود بمجموعة من المداخل والمخارج التماثلية، ومجموعة أخرى من المداخل والمخارج الرقمية [11].

تكون طريقة الحل الرياضي ذات خطوة ثابتة Fixed Step Solver، وزمن المحاكاة إلى اللانهاية ∞ . ومن التطبيقات الأساسية لمحاكاة الزمن الحقيقي في بيئة النوافذ:

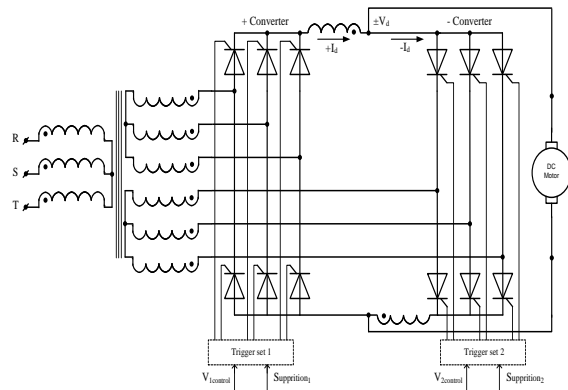
1- يمكن إعداد النماذج الأولية (prototype) لأنظمة التحكم، وضبط ثوابت التحكم، واختبار الأداء من خلال المحاكاة في الزمن الحقيقي.

2- يمكن تشكيل نموذج حاسوبي للمتحكمات موصول مع النموذج الفيزيائي للمنشأة موضوع الدراسة، أو تشكيل نموذج حاسوبي لهذه المنشأة موصول مع متحكمات حقيقية.

4-4 مراحل تصميم مبدل التردد وتنفيذه واختباره وتشغيله في الزمن الحقيقي:

4-4-1 دائرة الاستطاعة:

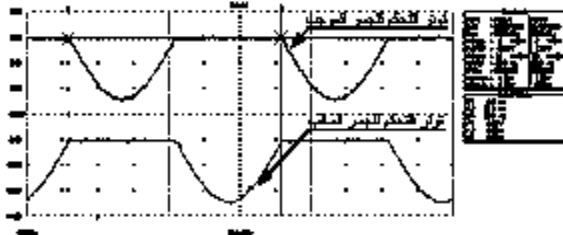
استُخدمت دائرة الاستطاعة المكونة من جسرين ثايرستوريين، الموضحة في الشكل (a-13) التي كانت تستخدم مخبرياً لقيادة محرك تيار مستمر في الإحداثيات الأربع للتوتر والتيار، يغذى الجسرين من محولة ذات ثانويين مستقلين موصولان بشكل نجمي، وبنسبة تحويل 1/1/1. وسوف نعتد طريقة العمل من دون تيار دائر (طريقة الحجز).



الشكل (a-13) جسري التقويم المستخدم لقيادة محرك تيار مستمر في أربعة أرباع

4-4-2 دائرة توليد نبضات القذح:

الجسرين مقادان بواسطة دارتين لتوليد النبضات من النموذج (6PC1001-8DC)، (الشكل 14)، وكل دائرة منها تستخدم ثلاث دارات متكاملة من النموذج (TCA785). [12].

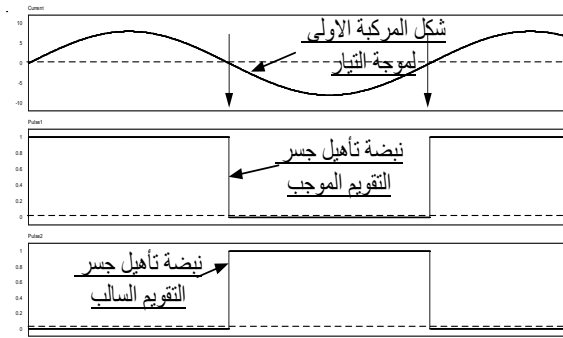


الشكل (17) توتر التحكم على المخارج التماثلية لكارت التحويل

ويوصل كل جزء إلى أحد المخارج التماثلية لكارت التحويل، ومن ثم يوصل كل مخرج تماثلي إلى مدخل القيادة لجسر التقويم المطلوب ليقوم بدوره بالتحكم بزاوية العمل للجسر، كما سنبين لاحقاً.

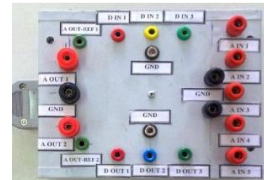
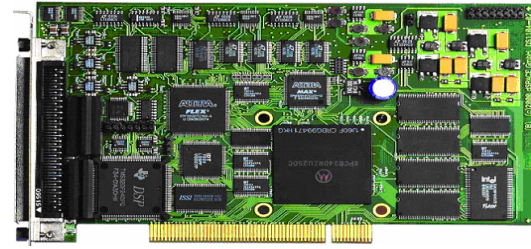
4-5- توليد نبضات التأهيل لجسري التقويم:

عندما يعمل المبدل عند حمل تحريضي تتشكل زاوية ϕ بين التوتر والتيار، وهذه الزاوية تتغير بحسب مواصفات الحمل التحريضي، كما وضح في الشكل (7)، ويوضح الشكل أيضاً مجال عمل كلا من الجسرين والذي تحدده موجة التيار، إذ إن القسم الموجب من موجة التيار هو مدة عمل جسر التقويم الموجب، كما أن القسم السالب من هذه الموجة هو مدة عمل جسر التقويم السالب (الشكل 18).



الشكل (18) طريقة الحصول على نبضات التأهيل لكل جسر انطلاقاً من موجة التيار

قيس تيار الحمل للمبدل بواسطة حساس تيار يعمل بمبدأ أثر هول، (Hall-effect)، نموذج HYP-10 من أجل دقة القياس وإدخاله إلى المدخل التماثلي في كارت التحويل، إذ رُشحت إشارة تيار الحمل باستخدام مرشح خاص لاستخلاص المركبة الجيبية الأساسية من موجة التيار، (الشكل 19).



الشكل (15) كرت التحويل PCL1711 وعلبة التوصيل

وقد صُنعت علبة توصيل مساعدة الشكل (15)، من أجل تسهيل الوصول إلى المداخل والمخارج المختلفة لكارت التحويل.

4-4- توليد توتر القيادة لجسري التقويم:

تولد موجة التوتر المتناوبة الجيبية بواسطة التابع:

$$u(1) * \sin(2 * \pi * u(2) * u(3))$$

إذ: $u(1)$ المطال ويتغير بواسطة العنصر

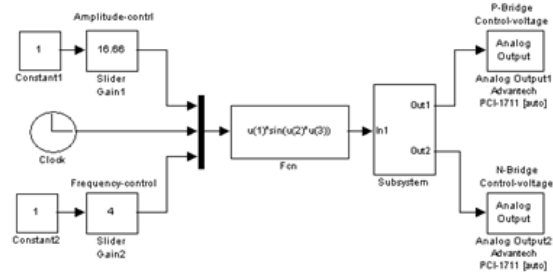
(slide-gain1)، من 1 حتى 10 فولت،

$u(2)$ الزمن بالثانية

$u(3)$ التردد ويتغير بواسطة العنصر

(slide-gain2)، من 1 حتى 25 هرتزاً، وذلك بحسب

ما بيّنه الشكل (16).

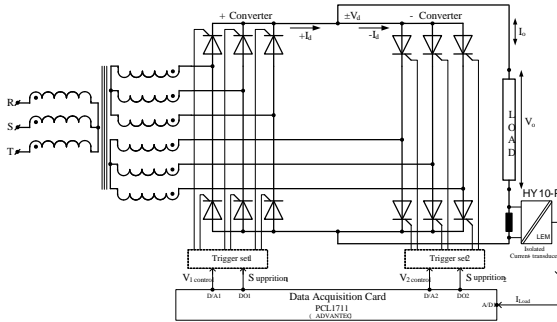


الشكل (16) مراحل توليد توتر التحكم على المخارج التماثلية

ويعالج التوتر المرجعي للحصول على توتر القيادة الموضح في الشكل (17) الذي هو عبارة عن نصفي موجة جيبية، يمكن التحكم بترددهما ومطالهما.

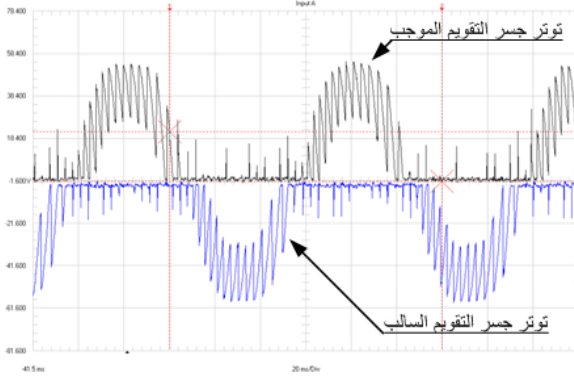
4-6- مخطط الدارة النهائية لمبدل التردد المنفذ

بناء على ماسبق وُصِّلت دارة المبدل كاملة وفقاً لمخطط التوصيل النهائي (الشكل 22).



الشكل (22) مخطط التوصيل النهائي لدارة مبدل التردد المنفذة

في البداية شُغِّل كلُّ من الجسرين بشكل مستقل مع قراءة التيار الكلي للجسرين من خلال نقطة وصل مشتركة، وكانت النتيجة المبينة في الشكل (23).

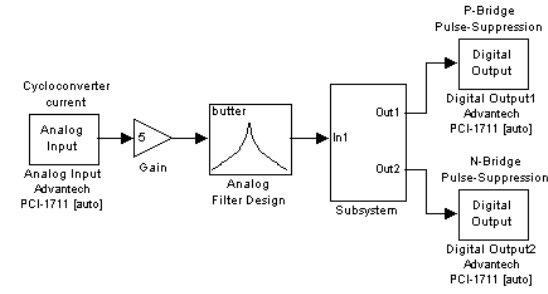


الشكل (23) اختبار توترات الخرج لكل جسر (قبل الربط)

ويعد التأكد من عمل كل جسر بشكل مستقل رُبط الجسيران بشكل متعاكس للحصول على مبدل التردد. مع إمكانية تغيير كل من التردد والتوتر. وللتأكد من الأداء الجيد للمبدل المنفذ شُغِّل في حالات عمل مختلفة.

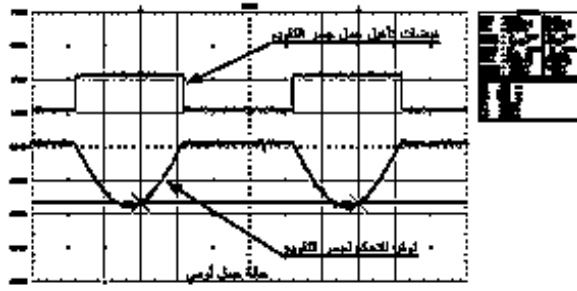
5- تشغيل مبدل التردد المنفذ عند حالات عمل مختلفة:

5-1- تُبَّت التردد عند (25Hz)، وغيّر مطال توتر التحكم، وحصلنا على النتائج المبينة في الأشكال الآتية:
الشكل (24) يبيّن توتر الخرج 326 فولتاً عند توتر تحكم بحدود 10 فولت.



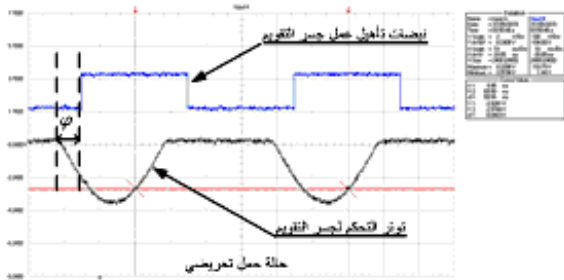
الشكل (19) مراحل توليد نبضات الحجز على المخارج الرقمية

ثم عُولجت هذه المركبة للحصول على نبضتين، الأولى متزامنة مع القسم الموجب للمركبة الأولى لموجة التيار، والثانية متزامنة مع القسم السالب لهذه المركبة، ومن ثم توصل كل نبضة إلى مخرج رقمي وكانت النتيجة كما في الشكل (20).



الشكل (20) نبضات التأهيل وتوتر التحكم لجسر التقويم (حمل أومي)

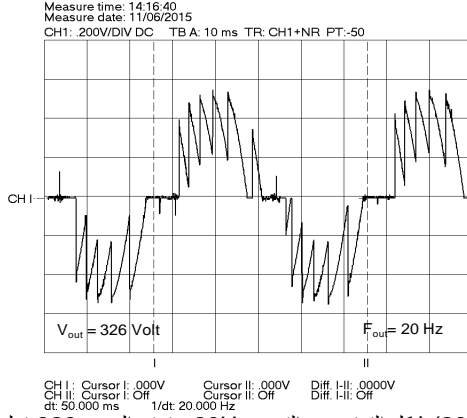
وأما عند حالة الحمل التحريضي، حيث تظهر الزاوية ϕ بين التوتر والتيار فكانت النتيجة، (الشكل 21).



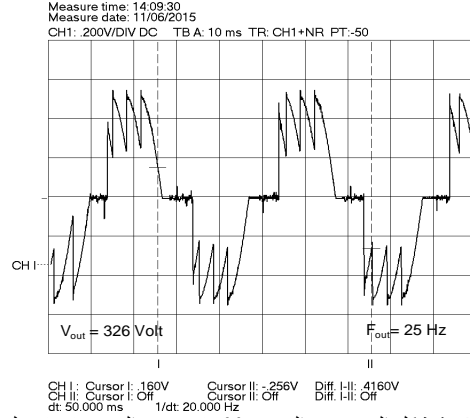
الشكل (21) نبضات التأهيل وتوتر التحكم لجسر التقويم (حمل تحريضي)

وقد عدّل مستوى الإشارة المنطقية من 5 فولت إلى 10 فولت بحسب ما تتطلبه دارات توليد النبضات لجسور التقويم.

السقا - برمجة مبدل تردد ثلاثي الطور إلى أحادي الطور وتشغيله في الزمن الحقيقي

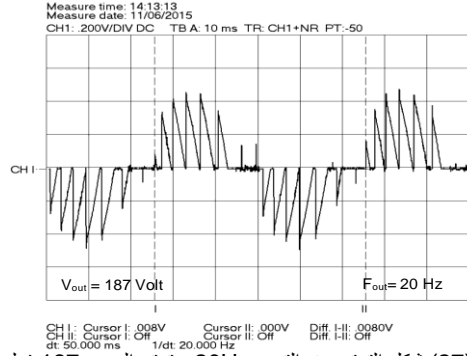


الشكل (26) شكل التوتر عند التردد 20Hz ، توتر الخرج 326 فولت



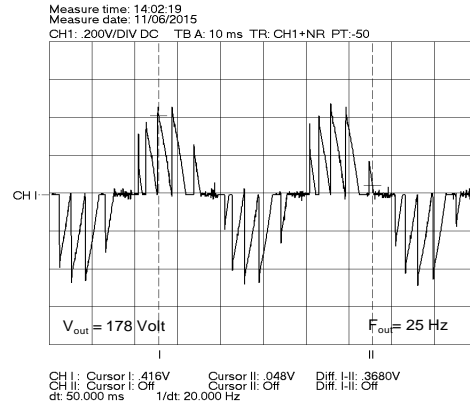
الشكل (24) شكل التوتر عند التردد 25Hz ، توتر الخرج 326 فولت

الشكل (27) فيه توتر الخرج 187 فولتاً عند توتر تحكم 5 فولت.



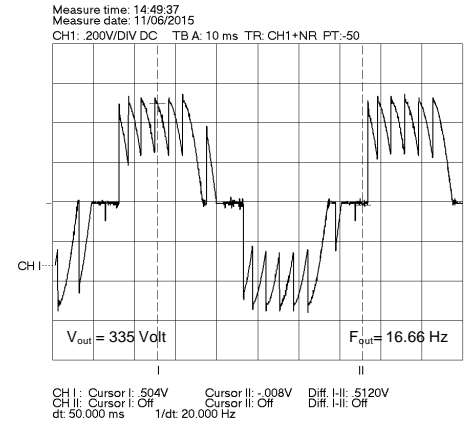
الشكل (27) شكل التوتر عند التردد 20Hz ، توتر الخرج 187 فولت

والشكل (25) فيه توتر الخرج 178 فولتاً، عند توتر تحكم بحدود 5 فولت.



الشكل (25) شكل التوتر عند التردد 25Hz ، توتر الخرج 178 فولت

5-3- عند تثبيت التردد عند (16.66Hz) وتغيير مطال



الشكل (28) شكل التوتر عند التردد 16.66Hz ، توتر الخرج 335 فولت

ونلاحظ اختلاف زوايا القدح في الشكلين السابقين.

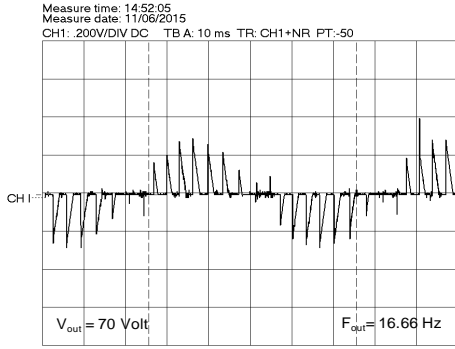
5-2- عند تثبيت التردد عند (20Hz) وتغيير مطال توتر التحكم حصلنا على النتائج الآتية:

الشكل (26) فيه توتر الخرج 326 فولتاً، عند توتر تحكم بحدود 10 فولت.

توتر التحكم نتجت لدينا الأشكال الآتية:

الشكل (28) توتر الخرج فيه 335 فولتاً عند توتر تحكم 10 فولت.

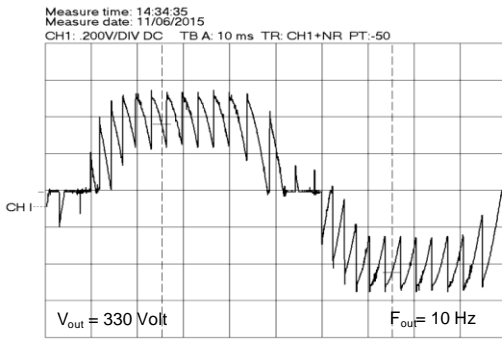
أما الشكل (29) فهو عند توتر خرج 270 فولتاً



CH1: Cursor I: 090V Cursor II: 008V Diff. I-II: -0080V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 50.000 ms 1/dt: 20.000 Hz

الشكل (31) شكل التوتر عند التردد 16.66Hz، توتر الخرج 70 فولت

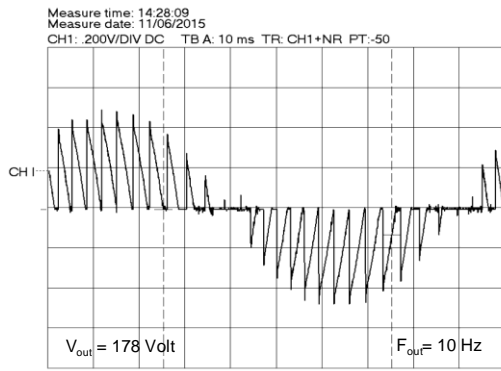
4-5- عند تثبيت التردد عند (10Hz) وتغيير مطال توتر التحكم حصلنا على النتائج الآتية:
الشكل (32) توتر الخرج بحدود 330 فولتاً.



CH1: Cursor I: 368V Cursor II: -440V Diff. I-II: 8080V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 50.000 ms 1/dt: 20.000 Hz

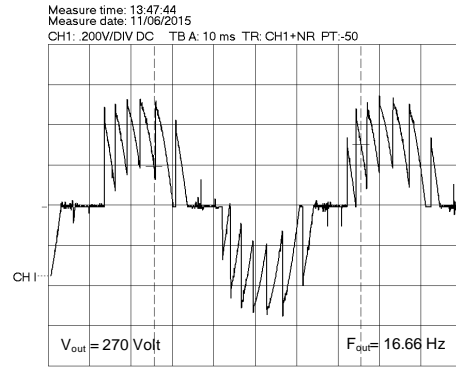
الشكل (32) شكل التوتر عند التردد 10Hz، توتر الخرج 330 فولت

الشكل (33) توتر الخرج بحدود 178 فولتاً.



CH1: Cursor I: 000V Cursor II: -128V Diff. I-II: 1280V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 50.000 ms 1/dt: 20.000 Hz

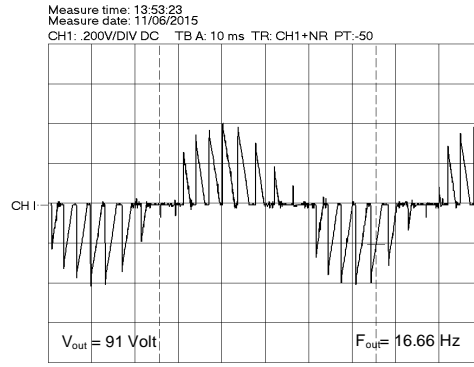
الشكل (33) شكل التوتر عند التردد 10Hz، توتر الخرج 178 فولت



CH1: Cursor I: 200V Cursor II: 312V Diff. I-II: -1120V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 50.000 ms 1/dt: 20.000 Hz

الشكل (29) شكل التوتر عند التردد 16.66Hz، توتر الخرج 270 فولت

والشكل (30) عند توتر خرج 91 فولتاً.



CH1: Cursor I: 000V Cursor II: 200V Diff. I-II: 2000V
CH II: Cursor I: Off Cursor II: Off Diff. I-II: Off
dt: 50.000 ms 1/dt: 20.000 Hz

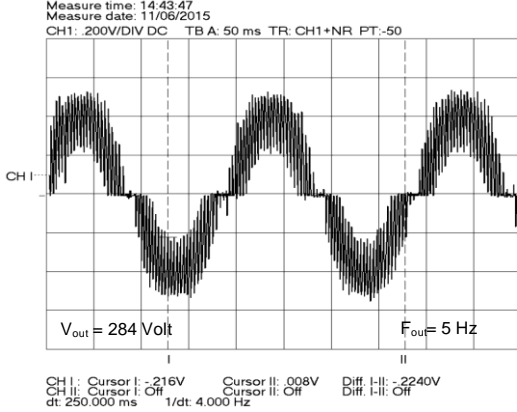
الشكل (30) شكل التوتر عند التردد 16.66Hz، توتر الخرج 91 فولت

والشكل (31) عند توتر خرج 70 فولتاً.

5-5 - عند تثبيت التردد عند (5Hz) وتغيير مطال توتر التحكم حصلنا على النتائج الآتية:

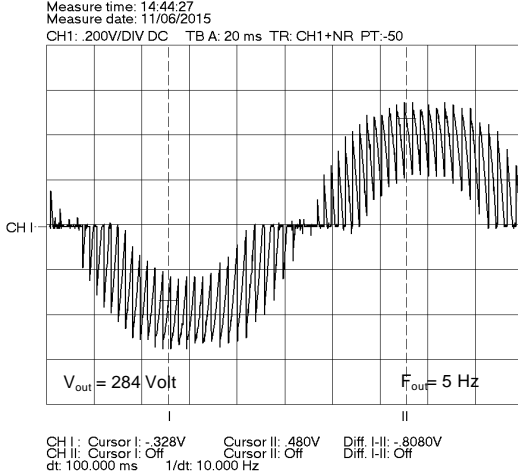
الشكل (34) توتر الخرج بحدود 315 فولتاً.

ونلاحظ ازدياد نبضات كل جسر بشكل ملحوظ.



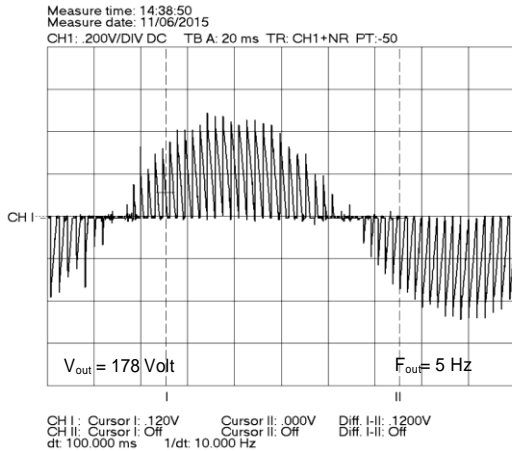
الشكل (36) شكل التوتر عند التردد 5Hz، توتر الخرج 284 فولت

الشكل (37) إعادة للشكل السابق مع تكبير الزمن للتوضيح

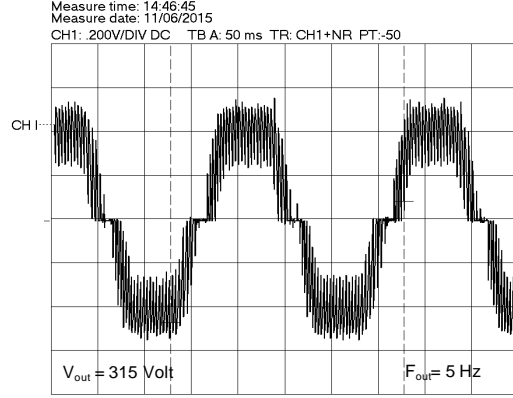


الشكل (37) شكل التوتر عند التردد 5Hz، توتر الخرج 284 فولت

الشكل (38) توتر الخرج بحدود 178 فولتاً.

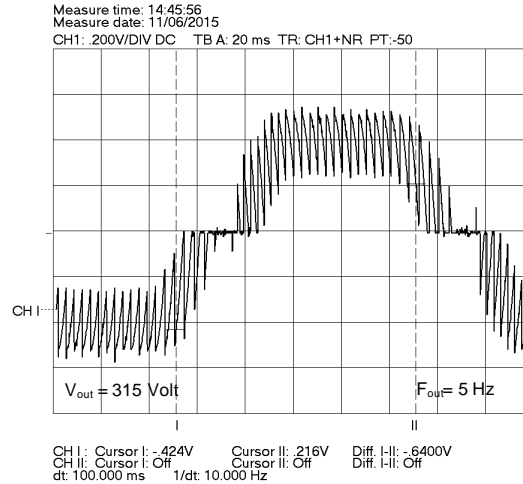


الشكل (38) شكل التوتر عند التردد 5Hz، توتر الخرج 178 فولت



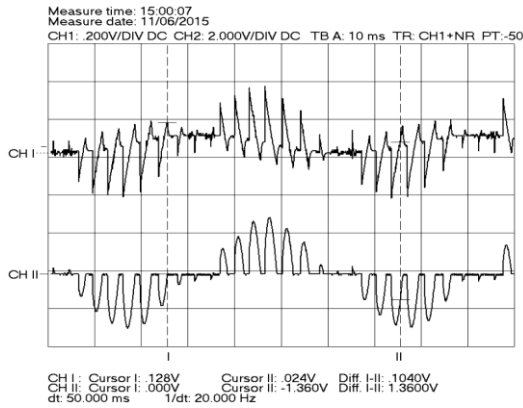
الشكل (34) شكل التوتر عند التردد 5Hz، توتر الخرج 315 فولت

الشكل (35) إعادة للشكل السابق مع تكبير الزمن للتوضيح نلاحظ بوضوح عدد النبضات الفعالة في هذه الحالة.



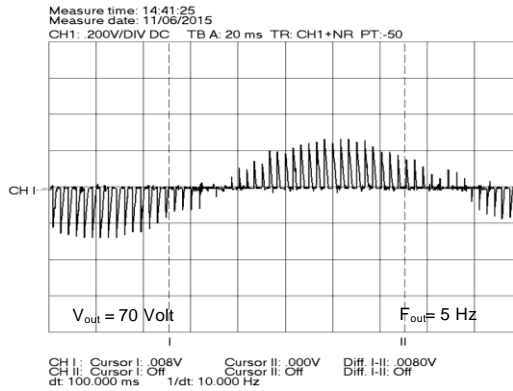
الشكل (35) شكل التوتر عند التردد 5Hz، توتر الخرج 315 فولت

الشكل (36) توتر الخرج بحدود 284 فولتاً.



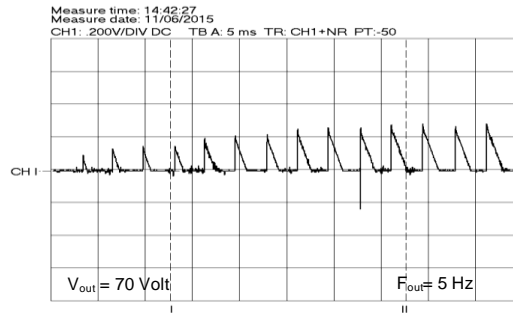
الشكل (41) شكل التوتر والتيار عند تشغيل محرك أحادي الطور على التردد 16.66Hz ، والتوتر حوالي 100 فولت

الشكل (39) توتر الخرج بحدود 70 فولتاً.



الشكل (39) شكل التوتر عند التردد 5Hz، توتر الخرج 70 فولت

الشكل (40) توتر الخرج بحدود 70 فولتاً.



الشكل (40) شكل التوتر عند التردد 5Hz، توتر الخرج 70 فولت

أما الشكل (42) فيبين المحرك مع مقياس سرعة الدوران ومقياس التوتر والتردد.



الشكل (42) تشغيل محرك أحادي الطور على التردد 50/3Hz، والتوتر حوالي 100 فولت وسرعة الدوران 1/3 السرعة الاسمية.

6- نتائج البحث:

- تم التوصل إلى تنفيذ نموذج مخبري لمبدل تردد من أحادي الطور إلى ثلاثي الطور (3ph-1ph)، مقاد في الزمن الحقيقي، بواسطة كرت تحصيل (PCL1711).
- أُضيفت إمكانية للتحكم بالتردد ضمن مجال واسع، في أثناء تشغيل المبدل، بواسطة منزلقة برمجية خاصة بتغيير التردد مباشرة من شاشة (slide-gain) الحاسب.
- أُضيفت إمكانية للتحكم بالتوتر ضمن مجال واسع، في أثناء تشغيل المبدل، بواسطة منزلقة برمجية خاصة بتغيير التوتر على الشاشة (slide-gain).

ونلاحظ من النتائج السابقة مدى المرونة في عمل النظام سواء في تغيير التردد نزولاً إلى 5 هرتز، أو في تغيير التوتر حتى قرابة 70 فولتاً.

5-6- تشغيل محرك أحادي الطور

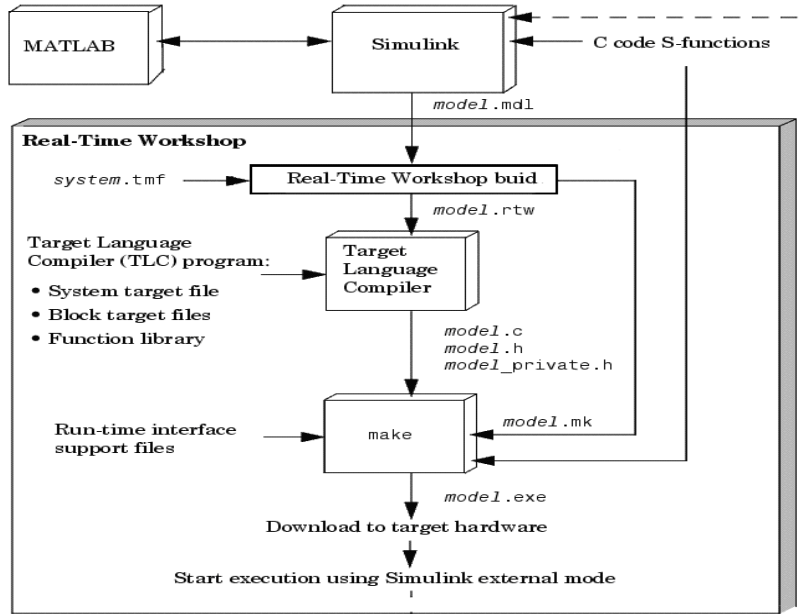
شُغل محرك أحادي الطور عند 1/3 التردد الاسمي أي عند $50/3=16.66$ Hz، ومن أجل بقاء كثافة السيالة ثابتة في الشغرة الهوائية يجب المحافظة على النسبة V/F ثابتة، أي يجب أن يكون التوتر مساوياً إلى 1/3 التوتر الاسمي أيضاً، $(220/3=73.33)$ فولت إلا أنه في الترددات الصغيرة فإن الممانعة التحريضية تنقص، مما يزيد في أثر المقاومة في الدارة المكافئة للمحرك، وللتغلب على هذه الظاهرة تُرفع قيمة التوتر عن القيمة المذكورة وبناء عليه فقد شُغل المحرك عند تردد 16.66Hz وتوتر بحدود 100 فولت، وكانت النتيجة أن دار المحرك بسرعة تعادل 1/3 سرعته الاسمية، أي بحدود 495 r.p.m.

الشكل (41) تبين فيه القناة الأولى العلوية شكل التوتر على المحرك، والقناة الثانية السفلية تبين شكل التيار.

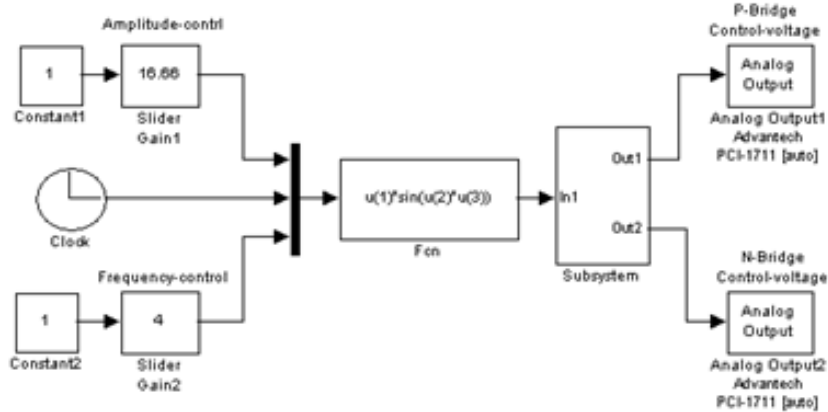
مسرد المصطلحات:

الرمز	المصطلح
α	زاوية القدح لجسر التقويم
α_P	زاوية القدح لجسر التقويم الموجب
α_N	زاوية القدح لجسر التقويم السالب
α_0	الزاوية المقابلة لتوتر خرج صفري
α_W	الحد الأدنى لزوايا القدح
α_G	الحد الأعلى لزوايا القدح
f	زاوية الطور بين توتر وتيار المبدل
V_S	القيمة الفعالة لتوتر دخل المبدل
v_O	القيمة اللحظية لتوتر خرج المبدل
V_o	القيمة الفعالة لتوتر خرج المبدل
V_P	توتر جسر التقويم الموجب
V_N	توتر جسر التقويم السالب

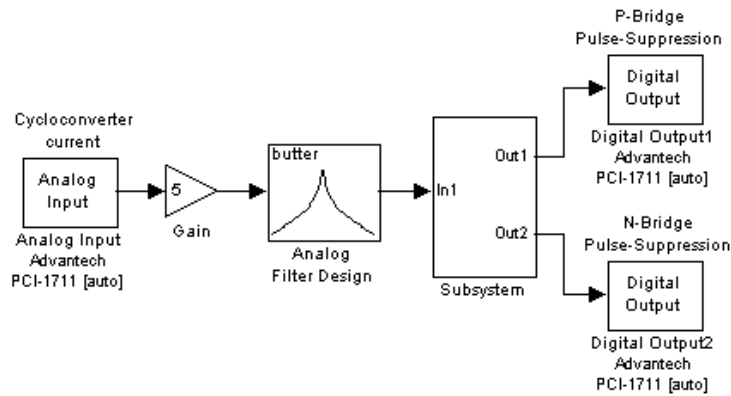
- تم التحقق من أداء المبدل عند حالات تشغيل مختلفة:
- تثبيت التوتر بقيم مختلفة وتغيير التردد.
- تثبيت التردد بقيم مختلفة وتغيير التوتر.
- تشغيل محرك تحريضي أحادي الطور، وتدويره بسرعة أقل من سرعته الاسمية تقريبا.
- من المهم ذكره أنه يمكن الإفادة من المبدل المنفذ في النواحي البحثية و منصة اختبار متكاملة، إذ يمكن إعادة ضبط الثوابت المختلفة لمبدل التردد من أجل الدراسات البحثية، وتطويره أيضاً من أجل تشغيل أنواع أخرى من مبدلات التردد.



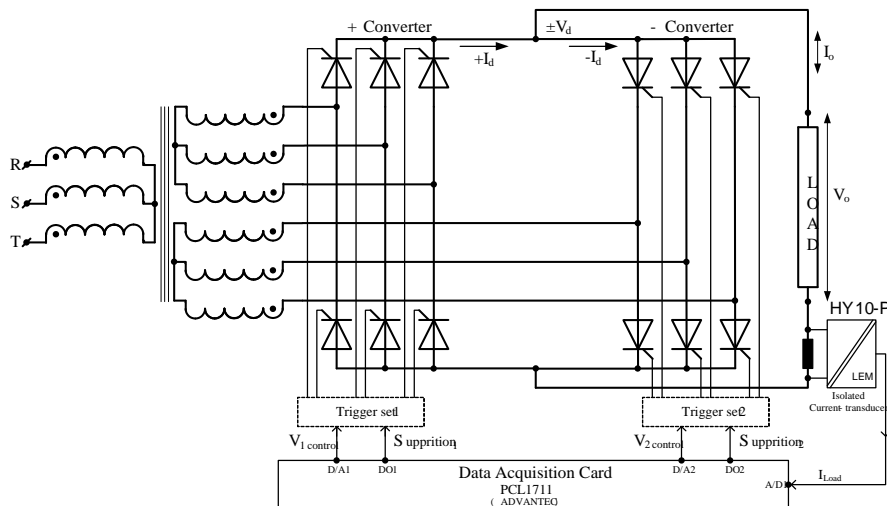
الملحق (1) المراحل المختلفة لبناء البرنامج التنفيذي



الملحق (2) مراحل توليد توتر التحكم على المخارج التماثلية



الملحق (3) مراحل توليد نبضات الحجز على المخارج الرقمية



الملحق (4) مخطط التوصيل النهائي لدارة مبدل التردد المنفذة

References

1. B. R. Pelly. 1971. "Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters", Wiley, New York.
2. M. H. Rashid," 2009. Power Electronics Circuits, Devices and Application ",6th edition, Copy right, Prentice Hall, Inc Upper Saddle River, NJ.
3. N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. 2003. "Power Electronics Converters Applications and Design", John Wiley & Sons, INC.
4. Bimal K. Bose "Power Electronics and Motor Drives Advances and Trends", Copyright © 2006, Elsevier Inc. All rights reserved.
5. Wildi Th. 2006. "Electrical Machines Drives and Power Systems"; book; USA; New Jersey; Sperika Enterprises, Ltd. And published by Pearson Education, Inc, 6th edition.
6. Ozpineci B., Tolbert Leon M. "Cycloconverters", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Knoxville Tennessee-Knoxville, TN 37996-2100.
7. B. Sai Sindura, B. N. Kartheek. 2013. "Speed Control of Induction Motor using Cycloconverter", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 4(4).
8. R. B. Roy, M. R. Amin. 2012. "Design and Construction of Single Phase Cycloconverter ", International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, 1(3).
9. (Cyclo-converters)
<http://www.tutorialsarea.com/EEE/Power%20Electronics/5/Cyclo-converter.html>
10. (Matlab/Simulink Documentations),
<http://www.mathwork.com>
11. (PCL1711- Data Acquisition Card)
<http://www.advantec.com>
12. (Siemens-Documentations)
<http://www.siemens.com>

Received	2015/06/25	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2015/08/09	قبول البحث للنشر