

## محاكاة وتنفيذ مبدل متعدد السويات باستخدام منصة dSPACE-DS1104

د. زياد السقا<sup>(1)</sup>

### الملخص

تستخدم المبدلات متعددة السويات في التطبيقات ذات التواترات العالية و الإستطاعات الكبيرة؛ بسبب قابليتها لتكوين شكل موجة أفضل، من خلال الإفادة من التوصيل التسلسلي والتفرعي للعناصر الالكترونية المستخدمة للوصول إلى التواترات والإستطاعات المطلوبة. صُمم ونفذ في هذا البحث نموذج مخبري لمبدل ثلاثي الطور متعدد السويات، باستخدام برنامج (Matlab/Simulink) مع منصة التحصيل والتحكم في الزمن الحقيقي المستقل (dSPACE DS1104 Platform)، فضلاً عن برنامج التحكم والمراقبة (Control-desk). إذ صُمم النموذج الحاسوبي لدارة نبضات القيادة للمبدل المطلوب، واستخدمت بطريقتين: الأولى بإضافة دارة الاستطاعة لإتمام نموذج حاسوبي كامل للمبدل متعدد السويات، والثانية تنفيذ مبدلة ترانزيستورية حقيقية مع دارات القيادة والعزل اللازمة كلاً منها مُقادراً بواسطة نظام DS1104 ويعمل بالزمن الحقيقي، وسُجّلت النتائج لمقارنتها بنتائج النمذجة الحاسوبية.

الكلمات المفتاحية: المبدلات الترانزيستورية، IGBT، Matlab/Simulink، التحكم في الزمن الحقيقي، DS1104.

<sup>(1)</sup> مدرس، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية.

## Simulation and Implement ation of Multi-level Inverter using dSPACE DS1104 Platform

Dr. Ziad Al Sakka<sup>(1)</sup>

### Abstract

Multi level inverters are used in high voltage, and high power applications for its ability to synthesize a better wave form, making use of serial and parallel connection of electronic elements, to reach high voltages and power needed.

In this paper, a three-phase multi level inverter was simulated, and implemented, using (Matlab/Simulink) program, and data acquisition and control (dSPACE -DS1104 Platform), as well as monitoring and control program (Control-Desk). A computer model for the drive pulses of the inverter was designed, and used in two ways: the first was by adding a power circuit to accomplish a full computer model for the multi level inverter, and the second was implementing a real multi-level inverter, with all needed driving and isolating circuit driven by DS1104 system, and running in real time. The results are saved ,to be compared with simulation results.

**Key words:** Transistor Inverters, IGBT, Matlab/Simulink, Control in real time, DS1104.

---

<sup>(1)</sup>Electrical Power Department, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Damascus University, Syria.

## المقدمة:

كما أنه عندما يعمل الترانزيستور ( $S_{a3}$ ) فقط فإن ديود التفريع (Dan) يعمل ليصبح توتر الخرج في هذه الحالة  $V_{out} = 0$  أيضاً.

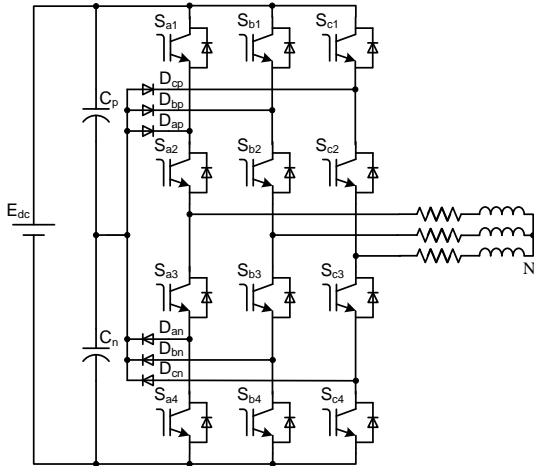
- عندما يعمل كلا الترانزيستورين ( $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$ ) يكون توتر الخرج  $V_{out} = -E_{dc} / 2$ .

ويمكن تلخيص ما سبق بالجدول (1) [4].

الجدول (1) وضعيات القواطع لأحد الأطوار

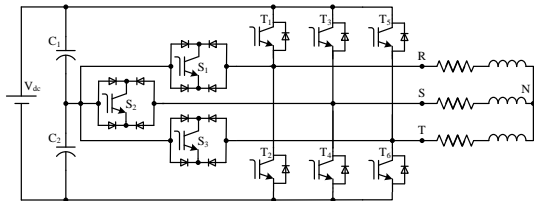
رقم الحالة	قطبية الخرج	وضعية توصيل القواطع (الطور A)	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	توتر خرج المبدل
1	+		ON	ON	OFF	OFF	$+V_d/2$
2	0		OFF	ON	ON	OFF	0
3	-		OFF	OFF	ON	ON	$-V_d/2$

ومن الجدول السابق استنتج تتابع النبضات اللازمة لقيادة أحد الأطوار، ومنها استنتجت نبضات قيادة بقية الأطوار. والشكل (2) يبين الدارة الكاملة لمبدل متعدد المستويات التي نُفذت مخبرياً.



الشكل (2) الدارة الكاملة لمبدل ثلاثي المستويات

وفي بعض الحالات تستخدم مفاتيح إلكترونية ثنائية الاتجاه لتبسيط الدارة، ويبين الشكل (3) إحدى هذه الحالات التي تستخدم تسعة عناصر قطع إلكترونية بدلاً من اثني عشر للحصول على النتيجة ذاتها.



الشكل (3) مبدل ثلاثي المستويات بتسعة عناصر

1- تصنف المبدلات متعددة السويات إما بحسب طريقة التوصيل، أو بحسب طريقة القيادة [1]:

1-1- بحسب طريقة التوصيل:

هناك أشكال كثيرة نذكر أهمها:

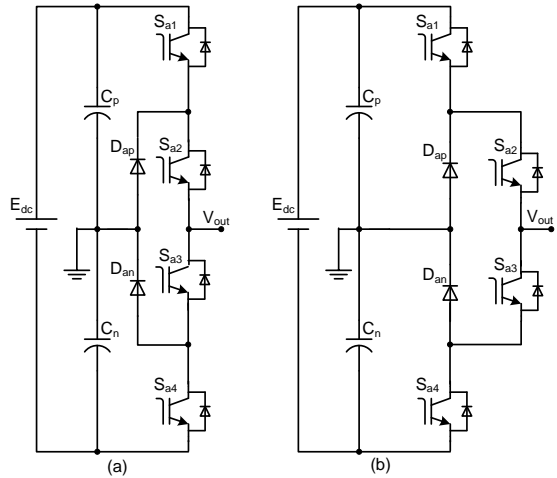
1-1-1- المبدلات المتعددة المثبتة بالديود [1]، [2].

### (Diode Clamped Multi-level Inverters)

يمكن لهذا النوع من المبدلات أن يعطي سويات توتر متعددة، وذلك من خلال مجموعة زوجية من المكثفات مربوطة مع بعضها بشكل تسلسلي توصل مع منبع التغذية المستمرة. ويمكن زيادة عدد السويات بزيادة عدد هذه المكثفات [3].

وتُربط نقطة الوسط لهذه المكثفات إلى مجموعة من الديودات موصلة كما في الشكل (1)، من أجل تثبيت توتر نقطة الصفر خلال تتابع عمل العناصر الإلكترونية (لذلك تدعى هذه الطريقة بـ (Diode Clamped).

والدارة مرسومة بطريقتين (a, b) للتوضيح.



### الشكل (1) مبدأ المبدل ثلاثي السويات المثبت بالديود

إذ إن مستويات التوتر الثلاثة المتاحة للخرج في هذه الحالة بالنسبة إلى نقطة الوسط المرجعية، هي:

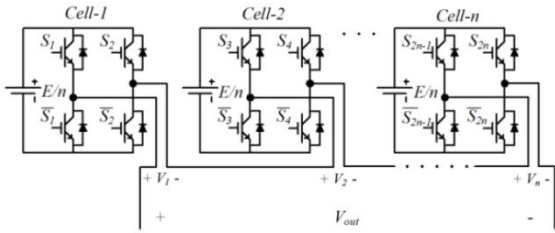
- عندما يعمل كلا الترانزيستورين ( $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ )، يكون توتر الخرج  $V_{out} = +E_{dc} / 2$ .

- عندما يعمل الترانزيستور ( $S_{a2}$ ) فقط فإن ديود التفريع ( $D_{ap}$ ) يعمل، ويصبح توتر الخرج  $V_{out} = 0$ .

توتر الخرج، ممّا يتيح مرونة أكبر في التحكم فضلاً عن استبدال مجموعة المكثفات التسلسلية الموصولة مع المنبع بمكثفة واحدة.

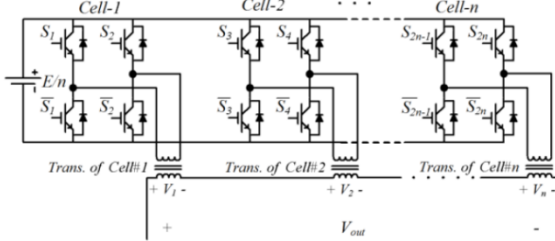
### 1-1-3- المبدلات المتتالية متعددة السويات [1] و [3] (Cascaded Multi-level Inverters):

يستخدم في هذا النوع مجموعة مبدلات أحادية الطور توصل على التسلسل لتحقيق التوتر المطلوب إذ نحتاج في هذه الطريقة إلى مناهج متعددة للتوتر المستمر، ويكون التوتر الناتج هو مجموع التوترات، المختلفة للمبدلات الأحادية كما يبيّن الشكل (6).



الشكل (6) مبدل أحادي يغذى من عدة مناهج مستمرة

أمّا عند وجود منبع وحيد للتوتر المستمر فيستخدم محول عزل متعدد الملفات، كما يبيّن الشكل (7).



الشكل (7) مبدل متعدد السويات أحادي الطور مع محولة عزل وتُجمع التوترات الناتجة في ملفات الثانوي لكل محول للحصول على التوتر النهائي لهذا المبدل. وتمتاز هذه الطريقة بالبساطة وسهولة التحكم للحصول على موجة الخرج المناسبة.

### 1-2- بحسب طريقة القيادة:

توجد طرائق عديدة لقيادة المبدل متعدد السويات [3]،

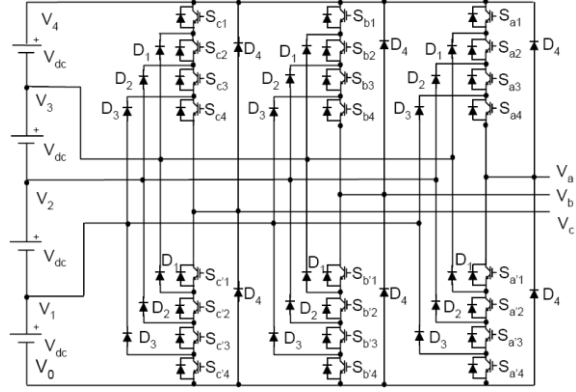
نذكر منها:

1-2-1- تعديل عرض النبضة للشعاع الفراغي.  
(Space-vector pulse width modulation).

1-2-2- التيار المنظم والتحكم بالزمن الميت.  
(Current-regulated Hysteresis control).

ويبيّن الشكل (4) دائرة كاملة لمبدل خماسي المستويات نوع المثبت بالديود (Diode-clamped).

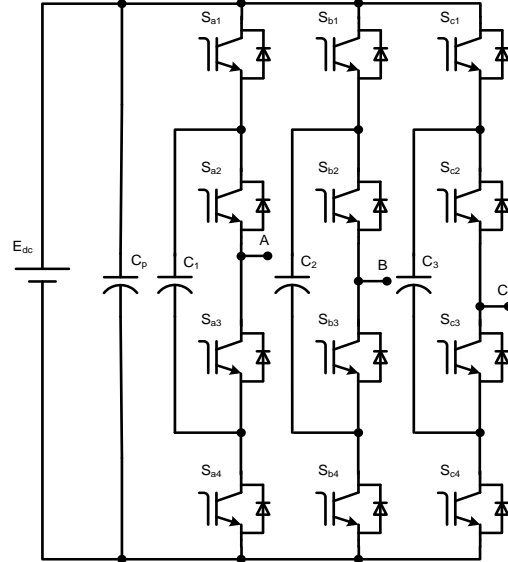
وهي تستخدم أربعة مناهج تغذية مستمرة موصولة على التسلسل، ويمكن استبدال مناهج التغذية بمنبع وحيد وأربعة مكثفات موصولة بشكل تسلسلي.



الشكل (4) مبدل خماسي المستويات مثبت بديود تفريع

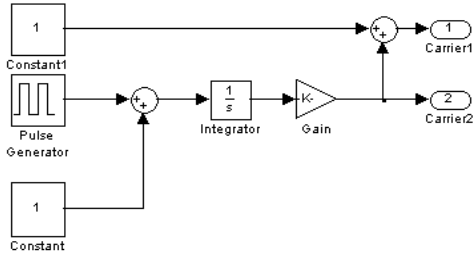
1-1-2- المبدلات المتعددة المثبتة بالمكثف [1] و [3] (Capacitor Clamped Multi-level Inverters):

وتدعى أيضاً بالمبدلات المتعددة ذات المكثف الطائر (Flying Capacitor) [3]. كما يبيّن الشكل (5).



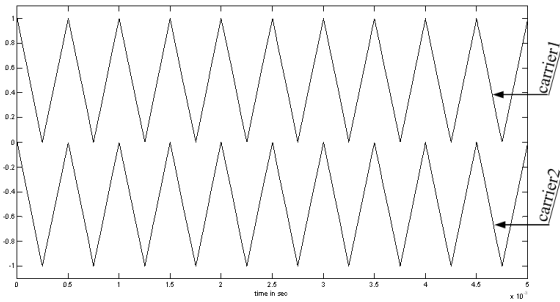
الشكل (5) مبدل ذو المكثف الطائر ثلاثي السويات

والدائرة تبيّن مبدأ العمل لهذا النوع من المبدلات الذي يعتمد على شحن مكثفة التفريع C إلى قيمة مساوية لنصف توتر المنبع المستمر، ويمكن أن يوصل هذا التوتر على التسلسل مع الطور بحيث يضيف أو ينقص من قيمة



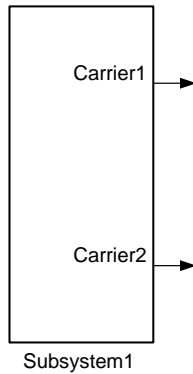
الشكل (10) مراحل توليد الموجة المثلثية الحاملة تكامل الموجة المربعة للحصول على موجة مثلثية الشكل.

تُزاحُ محاور الإحداثيات، كما يُكبَّرُ مطال الإشارة الناتجة من أجل الحصول على الموجتين المثلثيتين الحاملتين المبينتين في الشكل (11).



الشكل (11) الموجتان المثلثيتان الحاملتان.

وقد دُمجت الدارة السابقة بصندوق جزئي مدمج من أجل التبسيط، الشكل (12).



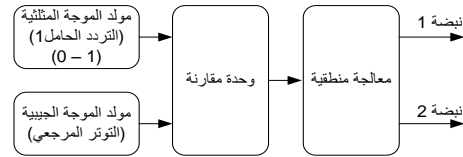
الشكل (12) مجموعة توليد الموجتين الحاملتين.

1-2-3- مقارنة موجة مرجعية جيبيية بموجة حاملة مثلثية. (Sine-triangle modulation).

وهي الطريقة التي اعتمدت في هذا البحث.

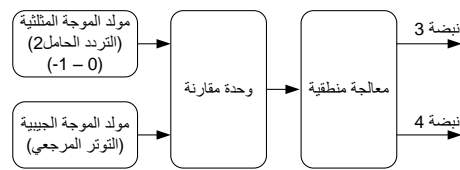
2- نبضات القيادة للمبدل متعدد السويات [5]:

يُولد التردد الحامل الأول، الموجة المثلثية الشكل، للقسم الموجب بمطال تغير ثابت بين الصفر وواحد فولت، والتردد المطلوب (500 هرتز حتى حدود 40 كيلوهرتز)، وتُولد الموجة المرجعية جيبيية الشكل، ذات مطال يمكن تغييره من 0 إلى 1 فولت، وتقارن الموجتان بواسطة وحدة مقارنة، ويعالج خرج المقارن لتشكيل نبضتي القيادة للترانزستورين العلويين في ضلع الطور المطلوب. والشكل (8) يبيّن المخطط الصندوقي لمرحل توليد نبضات القيادة لترانزستوري القسم العلوي لأحد الأطوار.



الشكل (8) مراحل توليد نبضات قيادة القسم العلوي

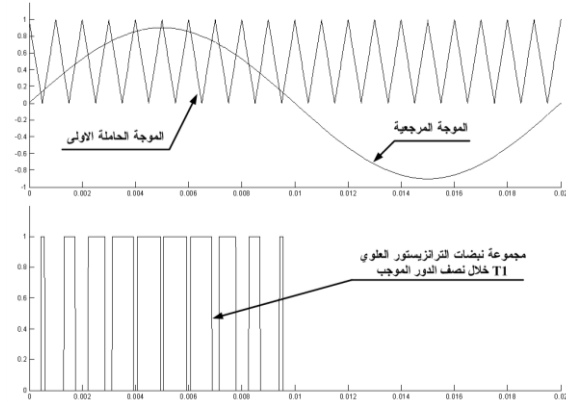
كما يُولّد التردد الحامل الثاني، للقسم السالب بمطال تغير ثابت بين الناقص واحد والصفر، والتردد ذاته. وتقارن الموجتان بواسطة وحدة مقارنة أخرى، ويعالج خرج المقارن لتشكيل نبضتي القيادة للترانزستورين السفليين في ضلع الطور المطلوب. والشكل (9) يبيّن المخطط الصندوقي لمرحل توليد نبضات القيادة لترانزستوري القسم السفلي للطور والأطوار ذاتها.



الشكل (9) مراحل توليد نبضات قيادة القسم السفلي

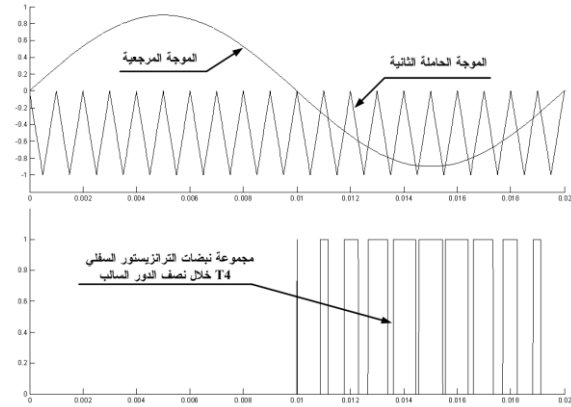
2-1- توليد الموجة المثلثية الحاملة:

يستخدم مولد نبضات لتوليد نبضات مربعة بدور يقابل التردد المطلوب، ومطال يتغير بين (-2.0)، وعرض نبضة بمقدار 50%. والشكل (10) يبيّن ذلك [6].



الشكل (15) نبضات القيادة للترانزيستور العلوي  $T_1$

كما تُقارن الموجة الحاملة الثانية والموجة المرجعية من أجل توليد نبضات القيادة للترانزيستور السفلي  $T_4$ ، وذلك بحسب الشكل (16).



الشكل (16) نبضات القيادة للترانزيستور السفلي  $T_4$

أما بالنسبة إلى نبضات القيادة للترانزيستور  $T_2$  فيتم الحصول عليها بعد أن تُعكس نبضة الترانزيستور  $T_4$  منطقياً.

في حين أن نبضات الترانزيستور  $T_3$  يتم الحصول عليها بعد أن تعكس نبضة الترانزيستور  $T_1$  منطقياً. وقد ضُغِطت هذه الدارة في صندوق جزئي مدمج للتبسيط، كما يوضح الشكل (17).

## 2-2- توليد الموجة الجيبية المرجعية:

تولد الموجة الجيبية من خلال التابع:

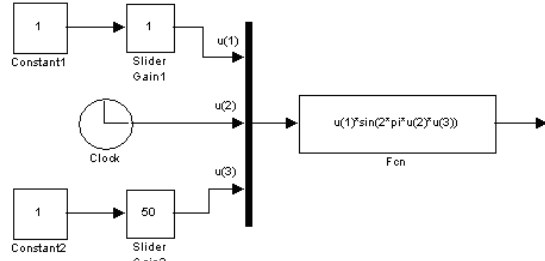
$$u(1)*\sin(2*\pi*u(2)*u(3))$$

$u(1)$ : مطال الموجة الجيبية، ويمكن تغييره من الصفر إلى 1 فولت باستخدام عنصر التكبير المتغير (slider-gain).

$u(2)$ : الزمن.

$u(3)$ : التردد، ويمكن تغييره من 5 إلى 60 هرتزاً باستخدام عنصر التكبير المتغير (slider-gain).

وهذا ما يبيّنه الشكل (13) [6].



الشكل (13) يبيّن كيف تُولّد الموجة الجيبية.

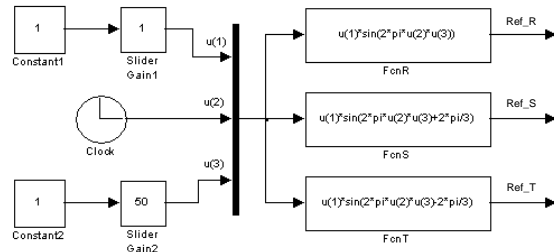
ومن أجل توليد ثلاثة أطوار جيبية نضيف زاوية  $2\pi/3$  مرة، ونطرحها مرة أخرى فينتج لدينا التتابع الثلاثة الآتية:

$$-Ref\_R = u(1)*\sin(2*\pi*u(2)*u(3))$$

$$-Ref\_S = u(1)*\sin(2*\pi*u(2)*u(3) - 2*\pi/3)$$

$$-Ref\_T = u(1)*\sin(2*\pi*u(2)*u(3) + 2*\pi/3)$$

وهذا ما يوضحه الشكل (14).

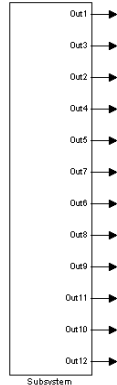


الشكل (14) توليد ثلاثة أطوار جيبية مرجعية.

## 2-3- وحدة المقارنة والمعالجة المنطقية:

تُقارن الموجة الحاملة الأولى والموجة المرجعية من أجل توليد نبضات القيادة للترانزيستور العلوي  $T_1$ ، وذلك بحسب الشكل (15).

ومن أجل التبسيط ضغطت هذه الدارة في صندوق جزئي مدمج (Subsystem)، الشكل (20).



الشكل (20) دارة النبضات كاملة مضغوطة.

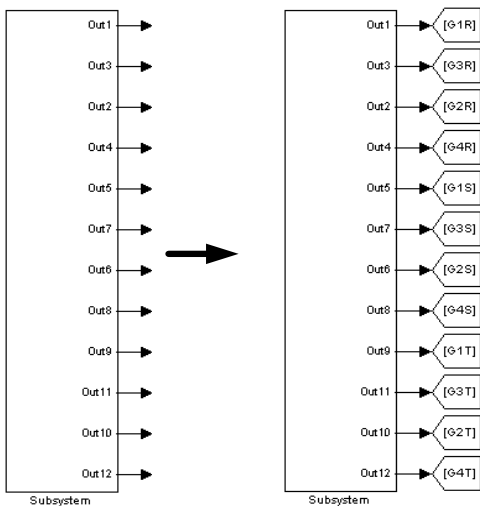
### 3- النمذجة الحاسوبية للمبدل متعدد السويات [6]:

نُفذ نموذج حاسوبي للمبدل ثلاثي السويات باستخدام دارة توليد النبضات المذكورة الشكل (20).

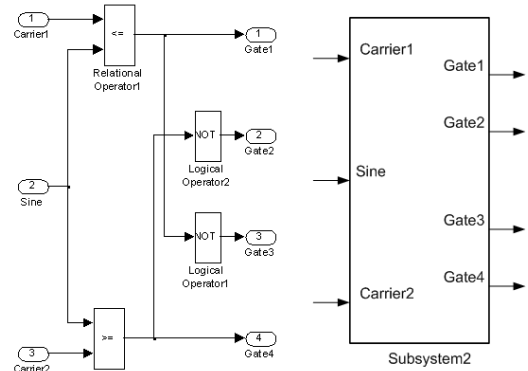
إذ وصلت المخارج المختلفة لدارة النبضات إلى دارة الاستطاعة التي وُصِّلت كما بيّن الشكل (3) السابق، باستخدام عناصر وصل خاصة من كل مخرج نبضات في الدارة لتصل إلى مدخل بوابة كل ترانزيستور، وهذا ما يبيّنه الشكل (21).

لتصبح الدارة النهائية للنموذج الحاسوبي للمبدل متعدد السويات، كما يبيّنه الشكل (22) والملحق 1.

وقد شُعِلَّت هذه الدارة للحصول على النتائج.

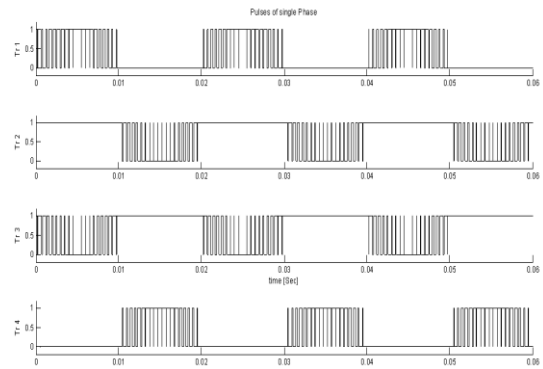


الشكل (21) توصيل دارة النبضات



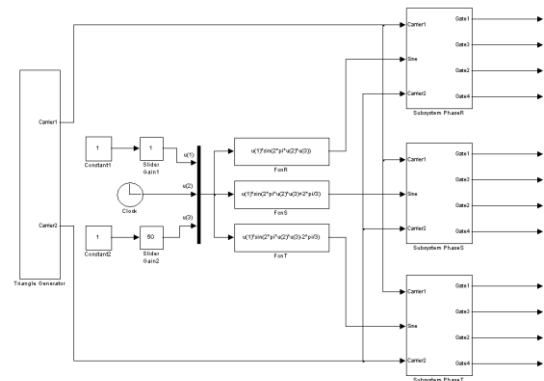
الشكل (17) دارتنا المقارنة والمعالجة المنطقية.

ويكون شكل النبضات الأربع الخاصة بطور واحد كما في الشكل (18). إذ تبدو النبضات لكل من الترانزيستورات  $(T_1, T_2, T_3, T_4)$  بالترتيب.



الشكل (18) نبضات القيادة لطور واحد.

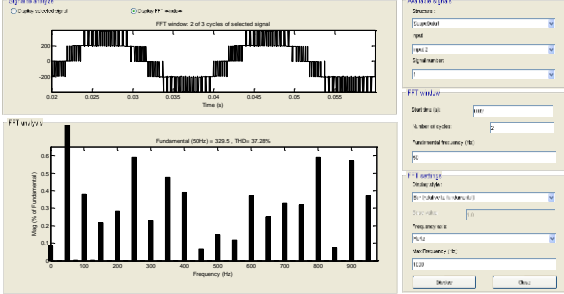
ويصبح الشكل النهائي لدارة توليد النبضات لجسر ثلاثي الطور وثلاثي السويات، كما هو مبين في الشكل (19).



الشكل (19) دارة توليد النبضات لجسر ثلاثي الطور، ثلاثي السويات.

الشكل (25) والملحق 4 يبينان عامل التشوه الكلي لموجة توتر الخط:

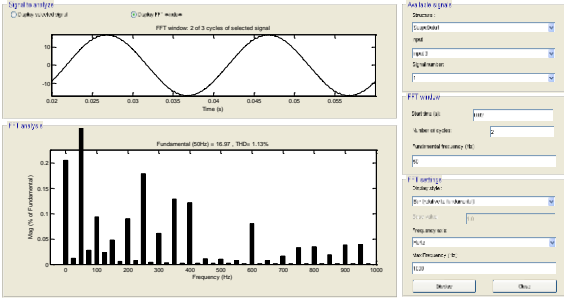
(THDVline = 37.28 %)



الشكل (25) توافقيات توتر الخط

الشكل (26) والملحق 4 يبينان عامل التشوه الكلي لموجة تيار الخط:

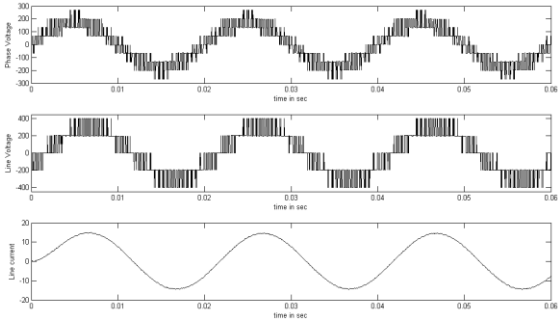
(THDIline = 1.13%)



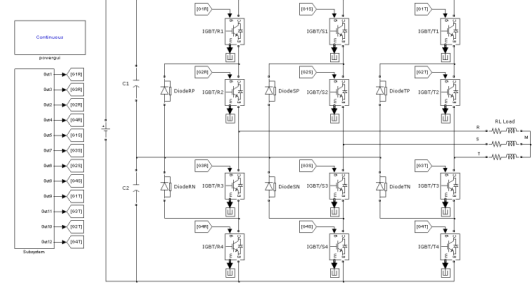
الشكل (26) توافقيات تيار الخط

ونلاحظ مدى انخفاض توافقيات التيار واقتربها من الشكل الجيبي، وهي من أهم ميزات هذا النوع من المبدلات.

خُفض مطال الموجة المرجعية إلى 0.85 فولتاً عند التردد ذاته الحامل 2000 هرتز، فكانت النتيجة الشكل (27).



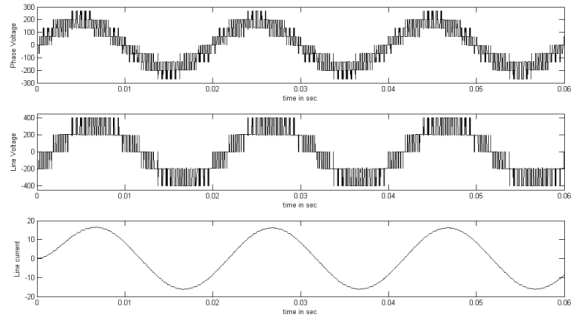
الشكل (27) شكل التوتّر والتيار عند تردد حامل 2000 هرتز ومطال المرجع 0.85 فولتاً



الشكل (22) النموذج الحاسوبي للمبدل متعدد السويات. وقد اختير التوتر المستمر  $V_{dc}=400V$ ، والحمل  $(R=1W, L=20\text{ mH})$ .

4- نتائج النمذجة الحاسوبية:

شُغل النموذج الحاسوبي عند تردد حامل قيمته بحدود 2000Hz، ومطال الموجة المرجعية 0.95 فولتاً ونتج لدينا الشكل (23) والملحق 2 الذي يبيّن كلاً من توتر الطور وتوتر الخط وتياره بالترتيب.

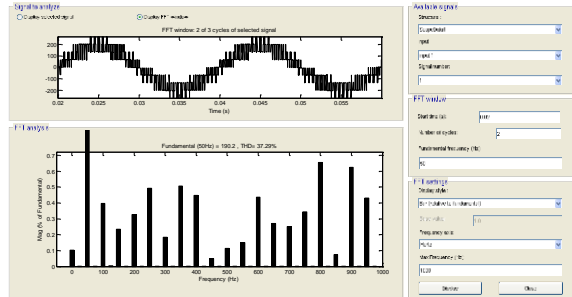


الشكل (23) شكل التوتّر والتيار عند تردد حامل 2000 هرتز ومطال المرجع 0.95 فولتاً

وبدراسة التوافقيات للموجات الناتجة تبين ما يأتي:

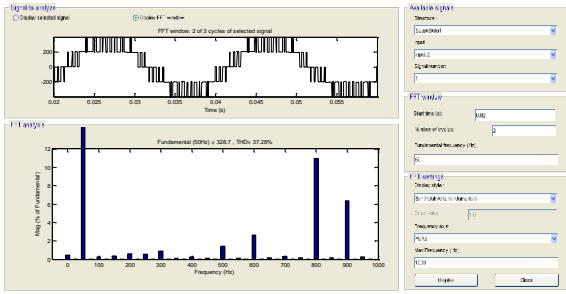
الشكل (24) والملحق 3 يبينان عامل التشوه الكلي لموجة توتر الطور:

(THDVphase = 37.29 %)



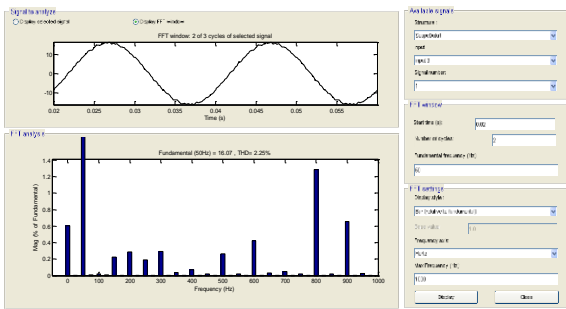
الشكل (24) توافقيات توتر الطور





الشكل (30) توافقيات توتر الخط

- والشكل (31) يبيّن عامل التشوه الكلي لموجة تيار الخط: (THDline = 2.25 %)



الشكل (31) توافقيات تيار لخط

ونجد أن تخفيض قيمة التردد الحامل قد أثرت تأثيراً سلبياً في التوافقيات، إذ ازدادت قيمة عامل التشوه الكلي.

5- تنفيذ مبدل متعدد السويات باستخدام منصة dSPACE-DS1104 :

بعد أن أنجزت النمذجة الحاسوبية للمبدل متعدد السويات نبين فيما يأتي مراحل تنفيذ النموذج المخبري للمبدل متعدد السويات باعتماد المخطط المبين في الشكل(3).

5-1- دائرة الاستطاعة:

نستخدم في دائرة الاستطاعة 12 ترانزيستوراً من نوع IGBT ذات الرقم FGA25N120AN .

بتيار اسمي 25 أمبيراً، وتوتر 1200 فولت.

وبالنسبة إلى الدبوبات استُخدمت عناصر ترددية سريعة الفصل ذات الرقم FR607، بتيار اسمي 6 أمبير، وتوتر 1000 فولت، إذ رُبط كل عنصرين على التوازي لمضاعفة التيار.

وقد استُخدمت مجموعتان متساويتان من المكثفات كل منهما قيمتها نحو 1000uF، وتوترها بحدود 350 فولتاً ربطتا على التسلسل.

وكانت نسب التوافقيات كما يأتي:

- عامل التشوه الكلي لموجة توتر الطور:

(THDVphase = 40.65 %)

- عامل التشوه الكلي لموجة توتر الخط:

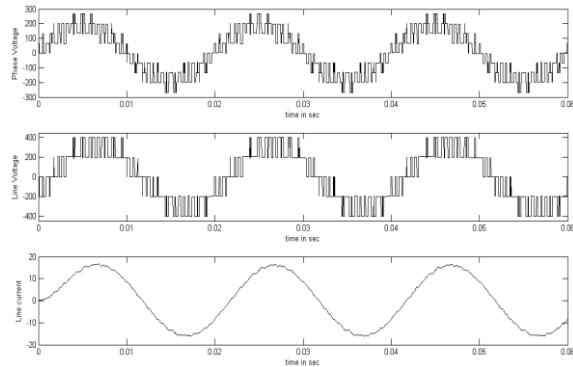
(THDVline = 40.66 %)

- عامل التشوه الكلي لموجة تيار الخط:

(THDIline = 1.24 %)

ونلاحظ عند تخفيض مطال الموجة المرجعية تزايد نسب التوافقيات.

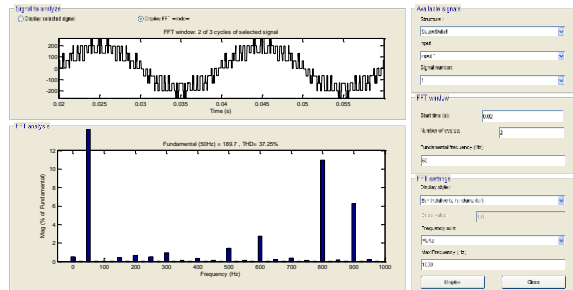
- بعدها حُفّض التردد الحامل إلى 1000Hz، ومطال الموجة المرجعية 0.95 فولتاً، فكانت أشكال التوترات والتيار، كما هو مبين في الشكل(28).



الشكل (28) شكل التوتر والتيار عند تردد حامل 1000 هرتز ومطال المرجع 0.95 فولتاً

وبدراسة التوافقيات للموجات الناتجة في هذه الحالة تبين ما يأتي:

- الشكل(29) يبيّن عامل التشوه الكلي لموجة توتر الطور: (THDVphase = 37.25 %)



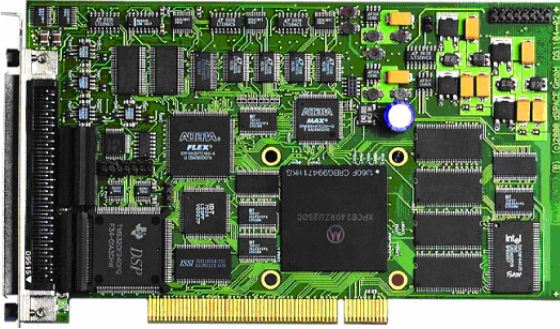
الشكل (29) توافقيات توتر الطور

- والشكل (30) يبيّن عامل التشوه الكلي لموجة توتر الخط: (THDVline = 37.28 %)

### 5-3- منصة التحصيل والتحكم في الزمن الحقيقي (dsSPACE DS1104 Platform) [7]:

تحتوي هذه المنصة على نظام تحصيل ومعالجة مستقل عن الحاسب المضيف، إذ يُنقل فيها نقل برنامج النمذجة والمحاكاة للنظام المدروس، إلى النظام المستقل لمعالجته، في حين يبقى الحاسب متفرغاً لأعمال أخرى مثل المراقبة والقيادة للنظام.

وتتألف بشكل رئيس من كرت التحصيل والمعالجة المبيّن في الشكل (35).



الشكل (35) كرت التحصيل والمعالجة DS 1104

ويبيّن المخطط الصندوقي في الشكل (36)، البنية الداخلية لنظام التحصيل والمعالجة الذي يتكون بشكل أساسي من معالжин:

- المعالج الرئيس Word Processor نموذج :

PowerPC 603e

(Motorolla microprocessor)

- معالج الإشارة الرقمية

Digital Signal Processor (D.S.P.)

نموذج:

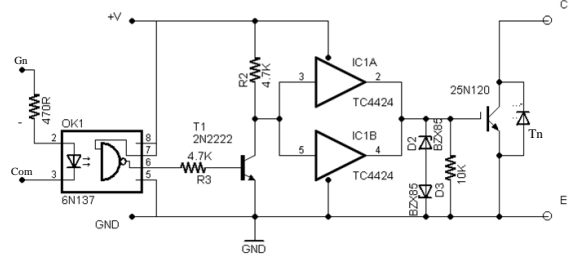
TMS320F240

( DSP Texas Instruments)

إذ يشكّل هذان المعالجان مع بقية العناصر والذاكر، نظاماً حاسوبياً مستقلاً.

### 5-2- دائرة القيادة لترانزيستورات الاستطاعة:

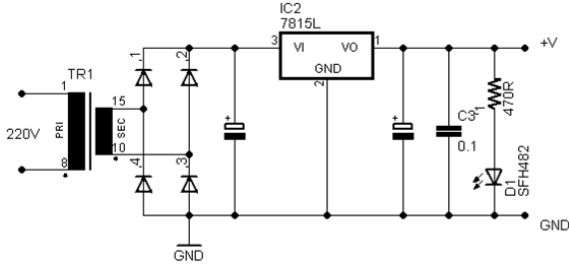
استخدمت الدارة المبيّنة في الشكل (32) لقيادة ترانزيستورات الاستطاعة، واختُبرت بنجاح حتى حدود 40KHz.



الشكل (32) دائرة القيادة والعزل لترانزيستور الاستطاعة

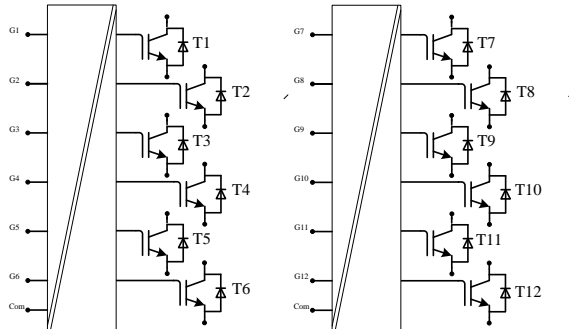
واستخدمت الدارة الموضحة في الشكل (33) لتغذية دائرة القيادة لترانزيستور.

إذ نُقِدت دائرة مطبوعة خاصة لكل دائرة قيادة مع تغذيتها بمجموع إجمالي 12 دائرة مطبوعة مستقلة لتشكل مبدلة ترانزيستورية عامة.

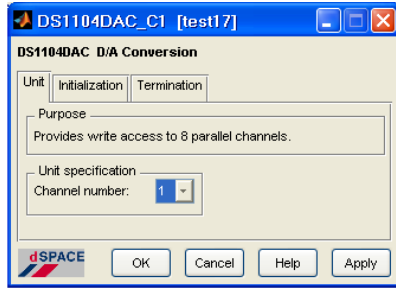


الشكل (33) تغذية دائرة القيادة والعزل

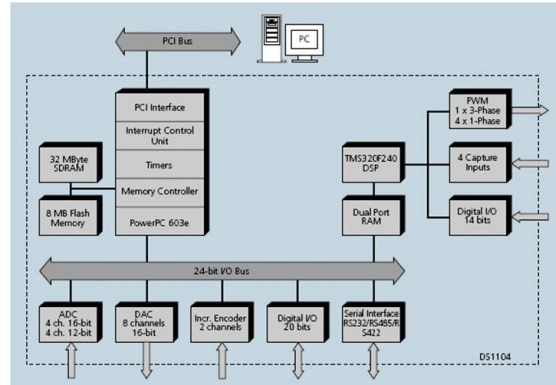
وبالنتيجة يصبح لدينا مجموعة ترانزيستورات يمكن قيادتها مباشرة من أي مخرج من نوع TTL سواء كان بوابة معالج أو مخرجاً لكُرت تحصيل ... والمخطط الصندوقي مبيّن في الشكل (34).



الشكل (34) المخطط الرمزي لجسر المعرج المنفذ



الشكل (37,c) المخارج التماثلية لنظام التحصيل والمعالجة DS 1104



الشكل (36) المخطط الصندوقي لنظام التحصيل والمعالجة DS 1104

- عشرون مدخلاً ومخرجاً رقمياً TTL levels.  
- مخرج مخصص لقيادة الجسور أحادية الطور، وله أربعة مخارج فرعية يخصص كل منها لقيادة أحد عناصر الجسر، ويمكن الاختيار بين طريقتين: تعديل عرض النبضة المتناظر، أو تعديل عرض النبضة غير المتناظر.  
- مخرج مخصص لقيادة الجسور ثلاثية الطور:

1- الطريقة الأولى: قيادة الجسور ثلاثية الطور بطريقة تعديل عرض النبضة المتناظر، ويمكن فيها تغيير تردد الموجة الحاملة حتى 5 ميغا هرتز، والتحكم بالزمن الميت حتى  $100\mu s$ .

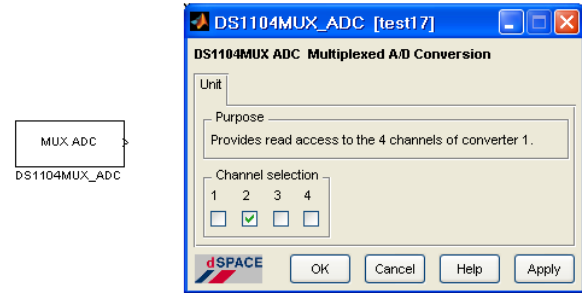
2- الطريقة الثانية: هي تعديل عرض النبضة بالشعاع الفراغي، وتحتاج إلى رقم القطع العامل ونسبة التوصيل لكل من الشعاعين المتجاورين.

وقد صُنعت لوحة توصيل مخصصة للمداخل والمخارج المذكورة سابقاً الشكل (38)، وذلك من أجل سهولة التوصيل مع بقية الدارات.



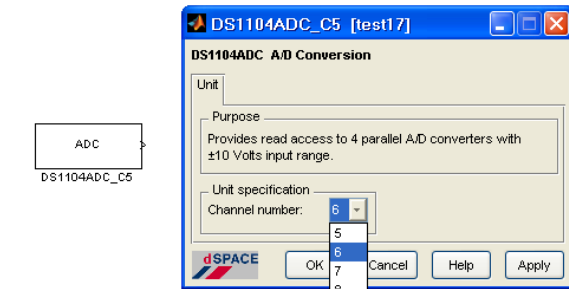
الشكل (38) لوحة التوصيل المنفذة

وهو مزود بعدة وظائف يمكن التعامل معها مباشرة أو من خلال برنامج (Matlab-Simulink) أهمها:  
- أربعة مداخل تماثلية تسلسلية، بدقة 16-bit مبيّنة في الشكل (37,a).



الشكل (37,a) المداخل التماثلية التسلسلية لنظام التحصيل والمعالجة DS 1104

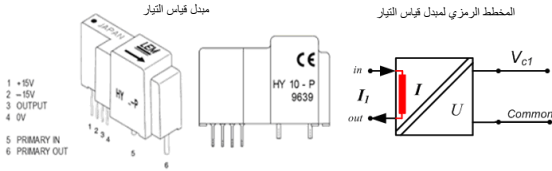
- أربعة مداخل تماثلية تفرعية، بدقة 12-bit الشكل (37,b).



الشكل (37,b) المداخل التماثلية التفرعية لنظام التحصيل والمعالجة DS 1104

- ثمانية مخارج تماثلية تفرعية، بدقة 16-bit الشكل (37,c).

LEM، ومن أهم مواصفاته تبديل قيمة التيار (من 0 إلى 10 أمبير) إلى توتر (من 0 إلى 4 فولت)، هذا فضلاً عن أن زمن الاستجابة لهذا المبدل أصغر من  $3\mu s$ ، ويمكنه أن يقيس تيارات تردداتها من 0 Hz إلى 50 KHz. وهو مبين في الشكل (41).



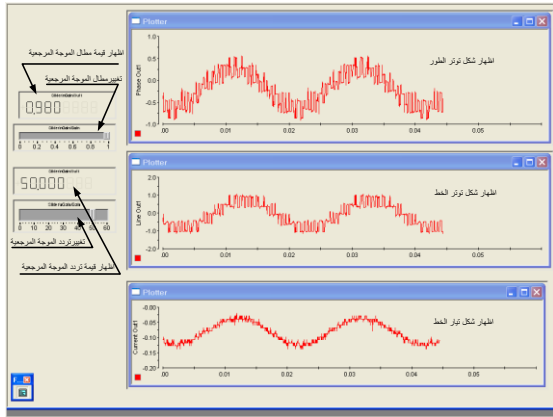
الشكل (41) مبدل قياس التيار HY10-P

كما أُضيفت إمكانية القراءة إلى كل من مطال الإشارة المرجعية وتردها، مع منزلقات لتغيير هذه القيم ضمن الحدود المفروضة بالبرنامج:

مطال الإشارة المرجعية (من 0 إلى 1 فولت).

تردد الإشارة المرجعية (من 5 إلى 60 هرتزاً).

ويصبح الشكل النهائي للوحة المراقبة والتشغيل المنفذة من خلال برنامج Control-Desk، كما يبين الشكل (42).



الشكل (42) واجهة المراقبة والتحكم للمبدل المنفذ

#### 5-5- مراحل التشغيل:

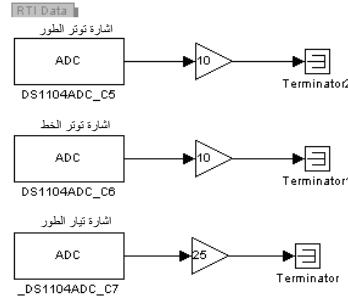
- تم توصيل دارة النبضات المنفذة المبيّنة في السابق رقم (20) إلى المخارج الرقمية لنظام DS1104؛ وذلك وفقاً للشكل (43).

#### 5-4- برنامج المراقبة والتحكم Control Desk:

يمكن من خلال هذا البرنامج تشغيل النظام المدروس وإيقافه بحسب الحاجة، ووضع لوحات مراقبة وتشغيل لمتغيرات النظام المدروس كله، كما يمكن تغيير الثوابت المختلفة من أجل ضبط الأداء.

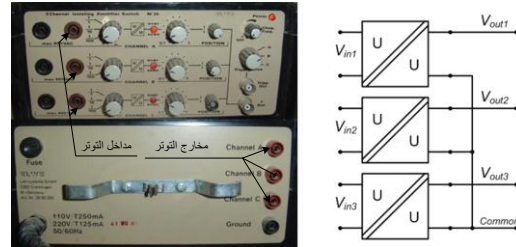
وقد صُممت لوحة مراقبة وتحكم بسيطة للمبدل المنفذ تمكن من مراقبة توتري الطور والخط فضلاً عن تيار الطور.

وجرى ذلك بإضافة الدارة التالية إلى دارة النبضات التي شرحت سابقاً، قبل بناء برنامج الزمن الحقيقي، المبيّنة في الشكل (39).



الشكل (39) إضافة القيم التماثلية من أجل المراقبة

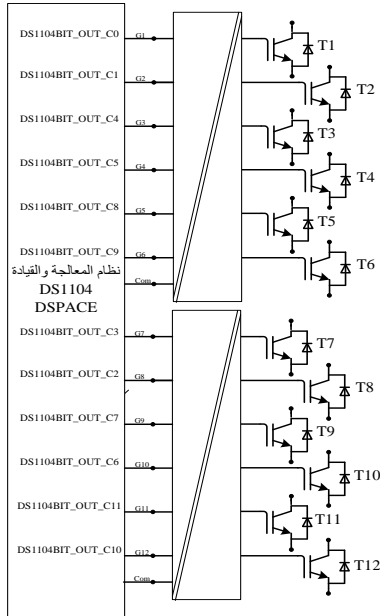
تُدخل إشارتنا توتر الطور وتوتر الخط من خلال المدخلين التماثليين C5 و C6 بالترتيب؛ وذلك بعد عزلها وتخميدها بواسطة مبدل قياس وعزل التوتر نموذج M35 من صنع شركة ELWE، وهو مزود بثلاثة أقيان معزولة لقياس التوتر، ومحمد ثلاثي الأوضاع لكل قناة (X100, X10, X1)، إشارة الخرج لكل قناة هي توتر تحكم (0-10Volts) وبيّن الشكل (40) صورة للجهاز مع مخططه الرمزي للتوصيل.



الشكل (40) مضخم قياس التوتر وعزله ومخططه الرمزي

أمّا قراءة التيار فقد جرت بواسطة مبدل قياس تيار يعمل بطريقة أثر هول نموذج HY10-P من صنع شركة

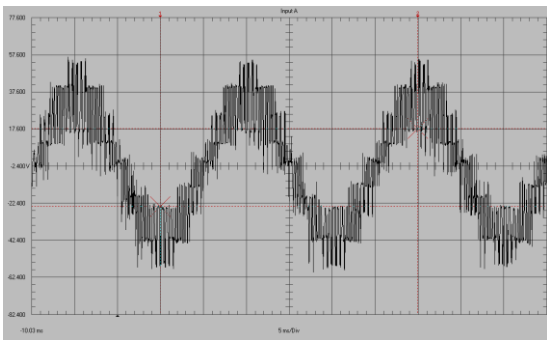
- وُصِّلت المخارج الرقمية إلى مداخل دارات القيادة لترانزيستورات الاستطاعة بحسب النتائج الآتي المبين في الشكل (45) لتسهيل التوصيل.



الشكل (45) توصيل النبضات إلى المخارج الرقمية

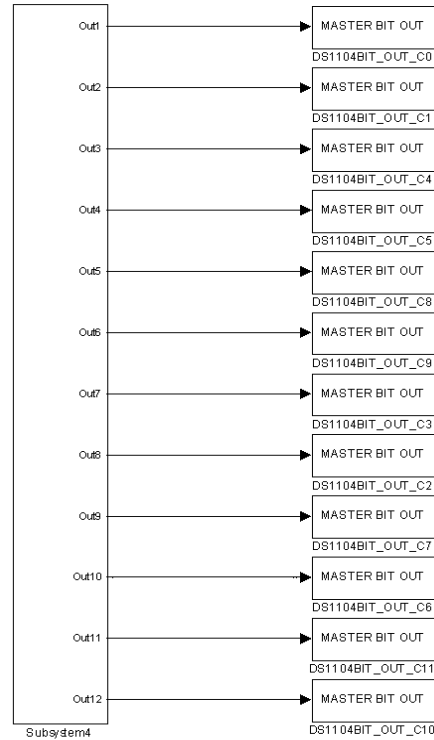
6- نتائج اختبار المبدل متعدد السويات المنفذ:

شُغِّل المبدل المنفذ وبيِّن الشكل (46) توتر الطور الناتج عند تردد حامل مقداره 2000 هرتز ومطال توتر المرجع مقداره 0.98 فولتاً.



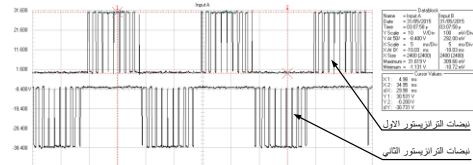
الشكل (46) توتر الطور الناتج (تردد 2KHz)

وعندما خُفِّض التردد الحامل إلى 1000 هرتز كان شكل توتر الطور كما في الشكل (47).

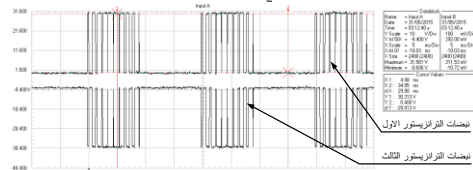


الشكل (43) توصيل النبضات إلى المخارج الرقمية

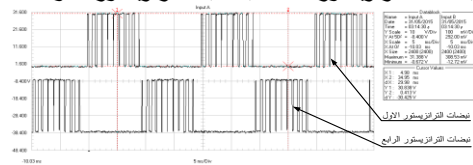
- بُني برنامج العمل في الزمن الحقيقي ونُقل إلى معالج نظام التحصيل والتحكم ثم شُغِّل للتأكد من صحة مواقع النبضات وحصلنا على النتائج المبينة في الشكل (44).



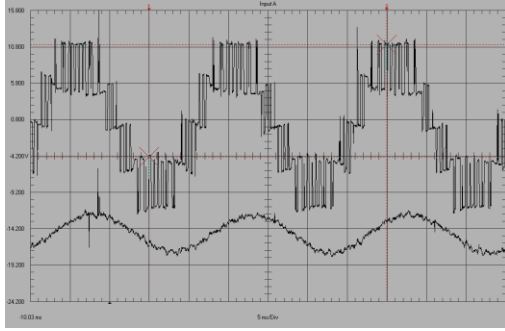
نبضات الترانزيستور الثاني بالنسبة للترانزيستور لأول



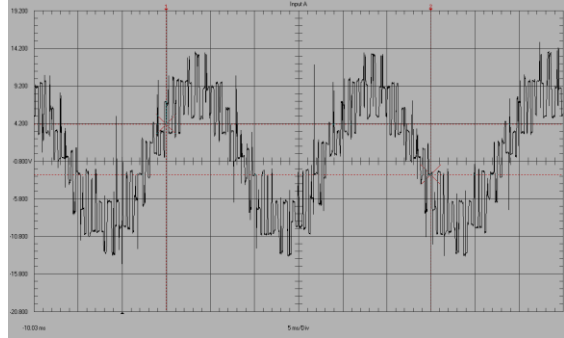
نبضات الترانزيستور الثالث بالنسبة للترانزيستور لأول



نبضات الترانزيستور الرابع بالنسبة للترانزيستور لأول  
الشكل (44) التحقق من النبضات لأحد الأطوار

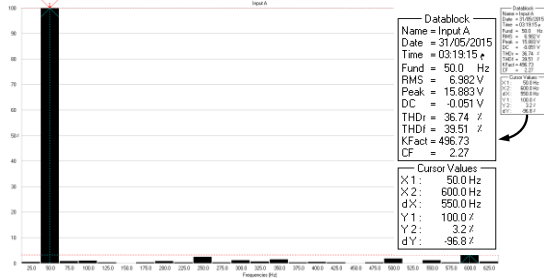


الشكل (50) موجتا توتر الخط والتيار للمبدل المنفذ



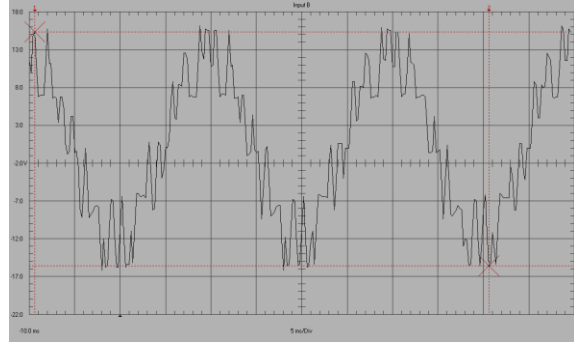
الشكل (47) توتر الطور الناتج (تردد 1KHz)

وأوجدت التوافقيات وعامل التشوه الكلي لكل من الإشارتين، والشكل (51) الملحق 7 يبين توافقيات التوتر ويظهر أن عامل التشوه الكلي  $THD=36.74\%$ .



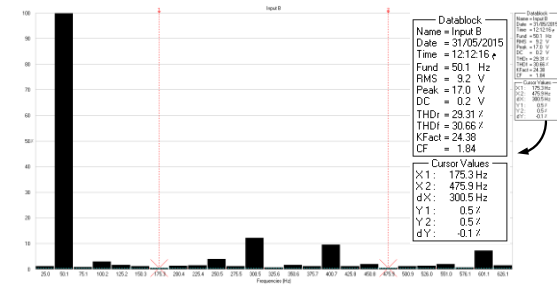
الشكل (51) توافقيات موجة توتر الخط

أما عندما حُفّض التردد الحامل إلى 500 هرتز فكان شكل توتر الطور هو المبين في الشكل (48).



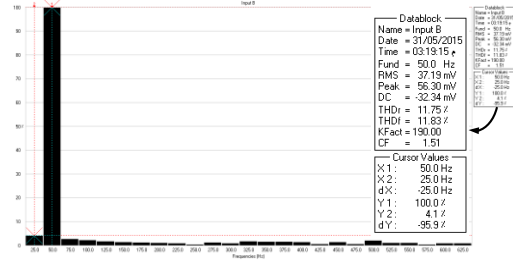
الشكل (48) توتر الطور الناتج(تردد 500Hz)

ويبين الشكل (49) التوافقيات الناتجة في هذه الحالة إذ بلغ عامل التشوه الكلي  $THD=29.31\%$ .



الشكل (49) توافقيات التوتر عند التردد 500Hz

أما الشكل (52) الملحق 8 فيبين توافقيات التيار، وأنعامل التشوه الكلي للتيار  $THD=11.75\%$ .



الشكل (52) توافقيات موجة التيار

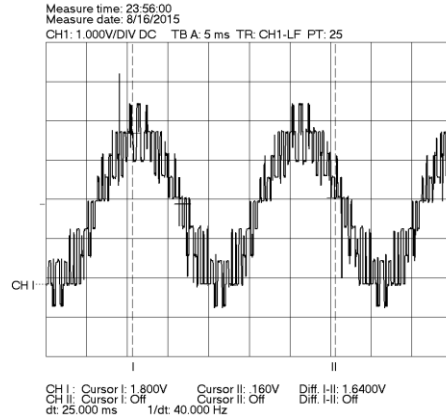
وقد سُجّلت النتائج بطريقة أخرى نورد بعضاً من هذه النتائج للتوضيح.

يبيّن الشكل (53) توتر الطور عند التردد 1000 هرتز.

وأعيد التردد الحامل إلى قيمة 1000 هرتز، ويبيّن الشكل (50) الملحق 6 موجتي توتر الخط والتيار، ويظهر مدى اقتراب شكل موجة التيار من الشكل الجيبي، وهذه من أهم ميزات هذا النوع من المبدلات.



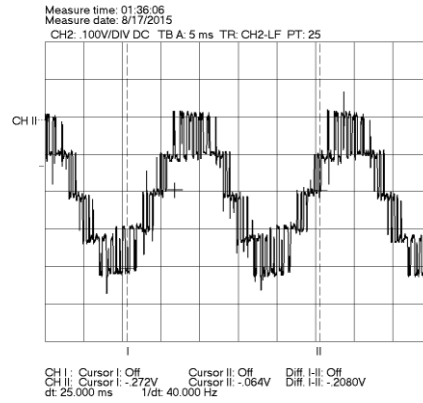
الشكل (56) توتر الخط عند التردد 1000 هرتز



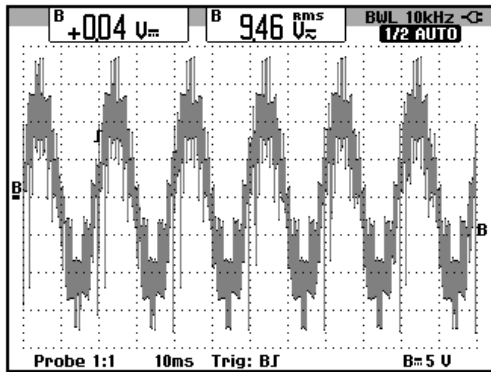
الشكل (53) توتر الطور عند التردد 1000 هرتز

يبين الشكل (54) توتر الخط عند التردد 1000 هرتز .

والشكل (57) يبين لقطة (snap-shot) لشاشة الراسم الأول يظهر فيها توتر الطور .



الشكل (54) توتر الخط عند التردد 1000 هرتز



الشكل (57) لقطة لتوتر الطور

كما نورد فيما يأتي صورة مباشرة لشاشة الراسم، إذ إنَّ الإشارة المسجلة على الحاسب قد تفقد بعض تفاصيلها بسبب سرعة التحصيل الخاصة بالحاسب فيظهر في الشكل (55) صورة توتر الطور، والشكل (56) يظهر صورة توتر الخط.



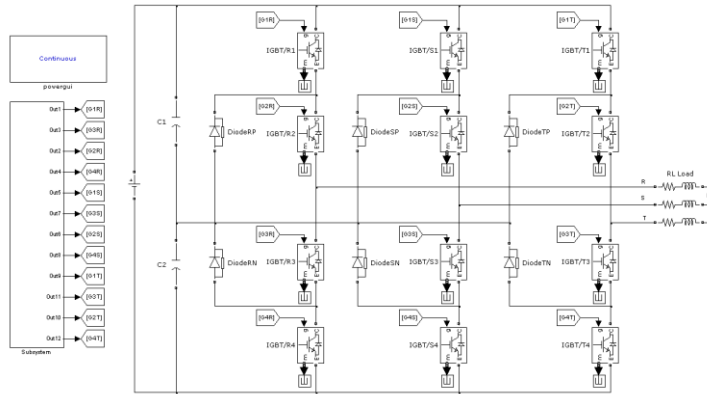
الشكل (55) توتر الطور عند التردد 1000 هرتز

#### 7- نتائج البحث:

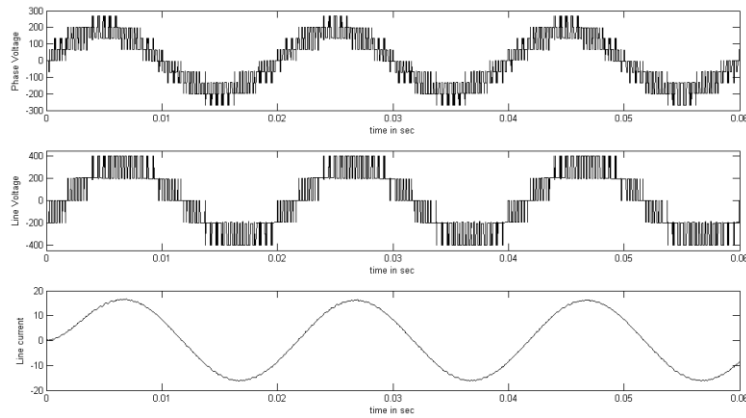
- نُفِّذ نموذج حاسوبي لمبدل ثلاثي المراحل باستخدام المجموعة الرمجية (Matlab-Simulink). وشُغِّل وسُجِّلَت النتائج.
- نُفِّذ نموذج مخبري لمبدل تردد ثلاثي الطور ثلاثي المراحل مقاد في الزمن الحقيقي، بواسطة منصة التحكم (dsPACE-DS1104)، واخْتَبِر وشُغِّل وسُجِّلَت النتائج.
- كانت نتائج الاختبار العملي للمبدل المنفذ قريبة من نتائج النمذجة، مما يشكل حافزاً لاستخدام هذا النظام من أجل الدراسات والتطوير للأنظمة الالكترونية المختلفة.
- صُنِّعت دارة الاستطاعة مع دارات القيادة للترانزيستورات لتشكل مبدلة عامة بحيث يمكن توصيل الترانزيستورات الاثني عشر بطرائق مختلفة لتلائم معظم تطبيقات الكترونيايات القدرة، إذ من خلالها زُوِّد المبدل المنفذ بإمكانية التحكم بكل من التردد والمطال للموجة المرجعية من خلال واجهة تحكم خاصة يمكنها أيضاً مراقبة شكل التوتر والتيار في المبدل.
- من المهم ذكره أنه يمكن الاستفادة من المبدل العام المنفذ مع منصة التحصيل لتنفيذ كثير من تطبيقات الكترونيايات القدرة وتشغيلها، والتحكم بها لغرض النواحي البحثية والدراسات العليا.



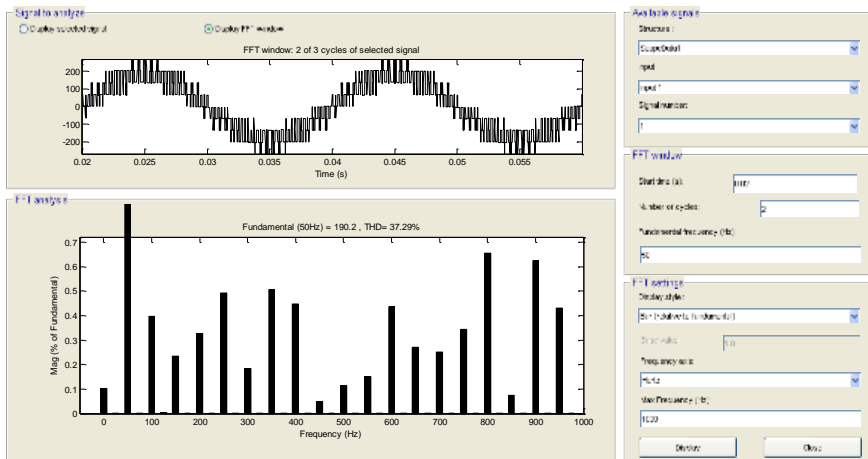
## الملاحق Appendix



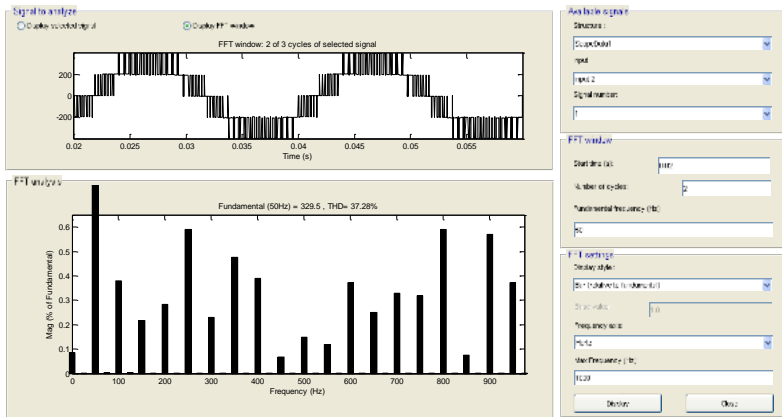
الملحق (1) النموذج الحاسوبي للمبدل متعدد السويات.



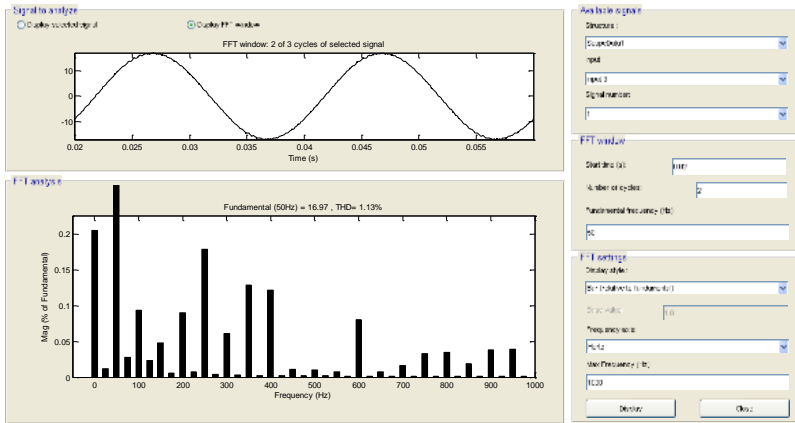
الملحق (2) شكل التوتر والتيار عند تردد حامل 2000 هرتز ومطال المرجع 0.95 فولت



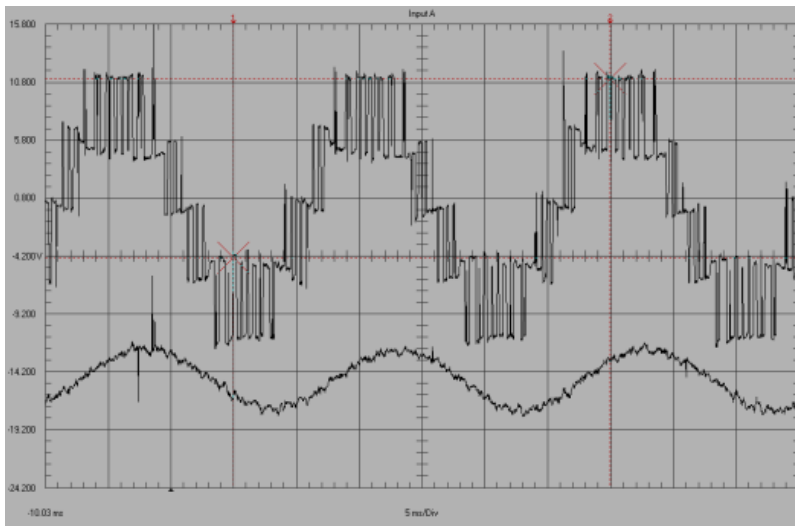
الملحق (3) توافقيات توتر الطور



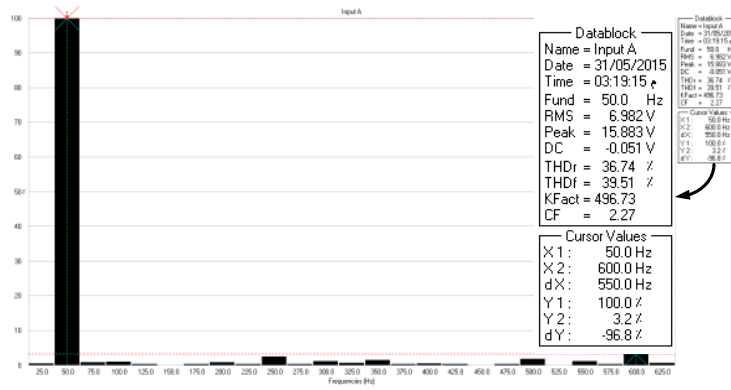
الملحق (4) توافقيات توتر الخط



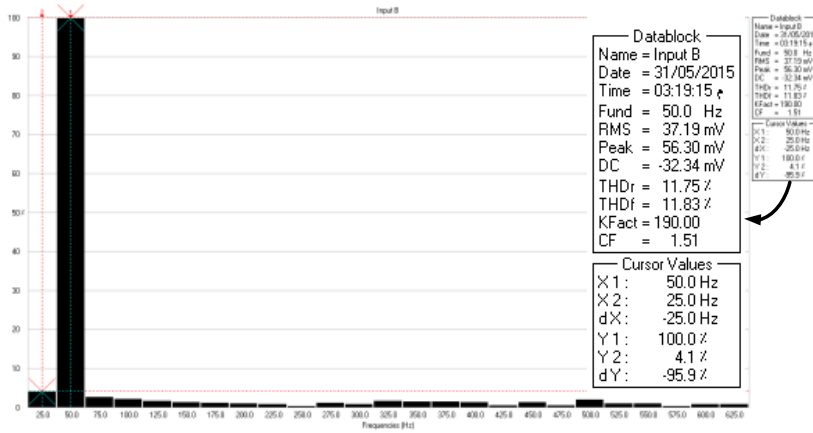
الملحق (5) توافقيات تيار الخط



الملحق (6) موجتي توتر الخط والتيار للمبدل المنفذ



الملحق (7) توافقيات موجة توتر الخط



الملحق (8) توافقيات موجة التيار

## المراجع REFERENCES

- [1] K. Corzine, " Operation and Design of Multilevel Inverters", Developed for the Office of Naval Research, December 2003  
Revised June 2005.
- [2] Timothy L. Skvarenina, " The Power Electronics Handbook", CRC Press LLC, 2002.
- [3] J. Rodríguez, J. Lai, F. Peng. 2002. "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications", "Ieee Transactions on Indistrial Electronics, 49(4).
- [4] S. Umashankar, "Hardware Implementation of Three Level NPC Inverter Using dSPACE DS1104 Controller Interface", dSPACE User Conference, India , 2014.
- [5] P. Mohanty, S. Sahoo, "ANALYSIS OF TWO LEVEL AND THREE LEVEL INVERTERS", master thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela  
Rourkela-769008, Orissa, 2009.
- [6] (Matlab/Simulink Documentations),  
<http://www.mathwork.com>
- [7] (dSPACE DS1104 research and development controller board documentations and programs)  
<http://www.dspace.com>

Received	2015/08/23	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2015/09/17	قبول البحث للنشر