معرجات التوتر النصف جسرية والمتعددة السويات المستخدمة في الأنظمة (HVDC& FACTS)

م. هبة عابدين*

د. جمال الناصير** د. سميح الجابي ***

الملخص

إن التطورات الحالية في خطوط (HVDC) والتجهيزات المرنة (Flexible AC Transmission Systems (FACTS)) سيطرت عليها تقنيتان جديدتان، الأولى هي استخدام خطوط التوتر المستمر العالي جداً من أجل نقل الاستطاعات الضخمة، والثانية زيادة استخدام معرجات التوتر (Voltage Source Converters (VSC)) في دارات خطوط التوتر العالي المستمر والأنظمة المرنة (FACTS). تؤمن تقنية معرجات التوتر (VSC) من الناحية العملية عدة ميزات لافتة للنظر لمواجهة التحديات في إنتاج الطاقة، على سبيل المثال تغذية المدن الضخمة، وربط منابع الطاقة المتجددة من المزارع الريحية على الشواطئ والتنظيم السريع للتوتر من خلال المعوضات الساكنة للاستطاعة الردية. عادة ما تستخدم في تطبيقات (HVDC&FACTS) السابقة المعرجات الثنائية أو الثلاثية السوية (المراحل). وعلى أية حال، يؤمن معرج التوتر متعدد السويات بعض الميزات الفريدة من ناحية الأداء والمحتوى التوافقي. يعرض هذا البحث أحد نماذج المعرجات المتطورة والحديثة المستخدمة في (HVDC & FACTS)، وسيناقش مفهوم هذا المعرج وتقنية تعديل عرض النبضة المستخدمة لقيادته بالتفصيل، وذلك باستخدام البئية البرمجية Matlab/Simulink. ثم ستجري مقارنة وتحليل لتوتر خرج المعرج.

الكلمات المفتاحية: خطوط النقل بالتيار المستمر التوتر العالي- معرجات التوتر- معرجات متعددة السويات-معرج التوتر المتعدد النماذج

* أُعد هذا البحث في سياق رسالة الماجستير للمهندسة هبة عابدين بإشراف الدكتور جمال الناصير ومشاركة الدكتور سميح الجابي -قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق

** قسم هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق

*** هندسة الطاقة الكهربائية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة دمشق

1- المقدمة :

بعد النجاح الكبير الذي لاقاه استخدام المعرجات في قيادة أنظمة الجر التي تتغذى بالتوتر المتوسط في السنوات الأخيرة، أصبح استخدام العناصر الإلكترونية الحديثة Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) من العناصر المهمة جداً في أنظمة نقل الطاقة وتوزيعها مثل (HVDC& FACTS). بالمقارنة بين المعرجات الثيرستورية التقليدية والمعرجات ذاتية التبديل فإن الترانزستور من النوع (IGBT) يؤمن الميزات التقنية المتطورة التي تعدُّ من الميزات التي تواجه التحديات اليومية في صناعة أنظمة نقل القدرة، إذْ تؤمن تقنية معرجات التوتر (VSC) الميزات التقنية **معرجات التوتر النصف جسرية والمتعددة السويات المستخدمة في الأنظمة الآتية** [1,2]:

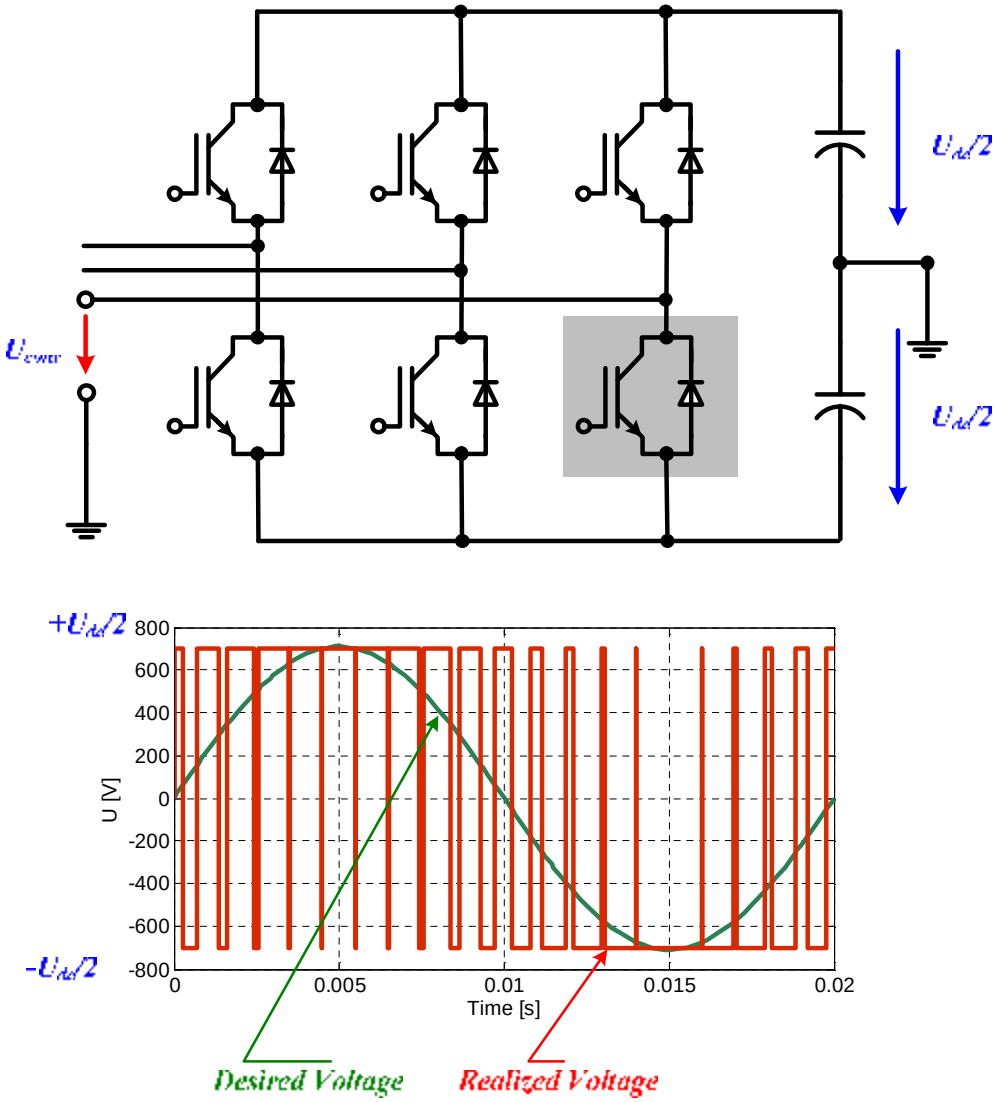
- المساحة المطلوبة أصغر.
- إمكانية التحكم بالاستطاعتين الفعلية والردية بشكل مستقل.
- يمكن تحقيق استجابة ديناميكية ممتازة، وهي مهمة لاستجابة متطلبات الشبكة.
- تشغيل موثوق به عند الأحمال الضعيفة أو غير الفعالة.

كان استخدام معرج التوتر (VSC) في البداية في تجهيزات FACTS(Flexible AC Transmission Systems) المستعملة بشكل واسع في أنظمة نقل القدرة. هناك العديد من تقنيات المعرجات المستخدمة في تطبيقات تجهيزات FACTS ، حيث كانت المعرجات المستخدمة في خطوط (HVDC) كلّها عبارة عن معرجات ثنائية أو ثلاثية سويات التوتر التي تمكن من وصل نهايتي التوتر المتناوب إلى سويتي توتر أوثلاثة. يبيّن الشكل(1) دارة المعرج الثلاثي الطور، وتوتر خرج المعرج والتوتر المرغوب فيه ومبدأ تعديل عرض النبضة المستخدم [3,4].

2- مبدأ عمل معرجات التوتر ثنائية السويات

لمّا كان من غير الممكن التحكم بمطال موجة التوتر المتناوب، استُخدِمَتْ تقانات خاصة مثل مبدأ تعديل عرض النبضة (PWM) التي تستخدم للحصول على شكل الموجة المرغوب فيه. وعلى أية حال، فإن الفرق بين شكل موجة التوتر المرغوب فيها والمنفذة هو تشويه غير مرغوب فيه ويجب ترشيحه (انظر الشكل(1)). تحتاج معرجات التوتر العالي إلى عدد كبير جداً من العناصر النصف ناقلة قد يصل إلى المئات لكل طور التي تُوصَلُ بشكل تسلسلي وتفرعي للحصول على سوية التوتر المطلوبة، وذلك اعتماداً على منبع التوتر المستمر. لتأكيد توزع متماثل للتوتر على العناصر في الحالات الساكنة والعابرة توصل العناصر في المعرج تسلسلياً في كل طور، ويجب أن تعمل في اللحظة نفسها بدقة ضمن مجال الميكروثانية. ونتيجة ذلك يطبق توتر كبير على طرفي خرج المعرج (المتناوب)؛ ويتطلب ذلك وجود أنظمة قياس دقيقة ومرشحات غالية الثمن [5,6].

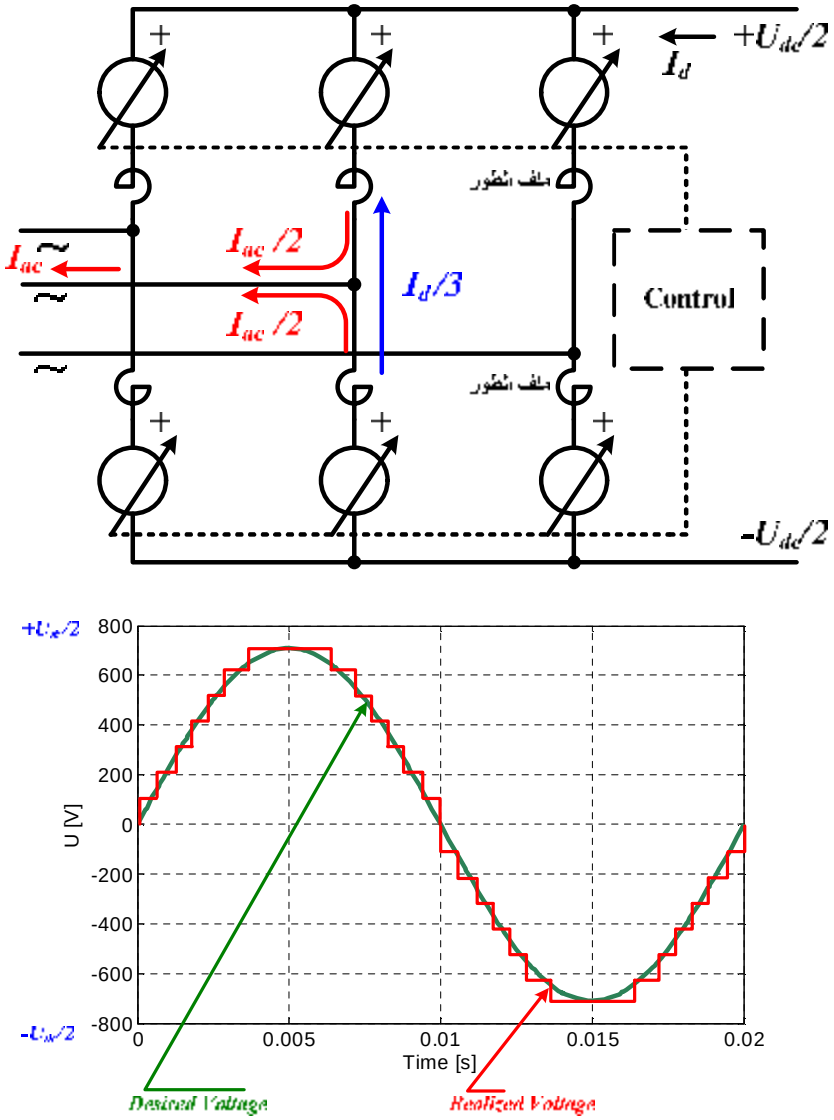
بناءً على ما سبق من المرغوب فيه استخدام معرجات متعددة السويات بسيطة في التطبيقات وخاصة (HVDC& FACT)، وتخلو هذه التطبيقات من عيوب المعرجات ثنائية السوية وتمتلك ميزات فعالة من ناحية الأداء.



الشكل(1) دارة المعرج الثلاثي الطور، ومبدأ تعديل عرض النبضة المستخدم.

3- معرج التوتر متعدد السويات (MMC) Modular Multilevel Converter

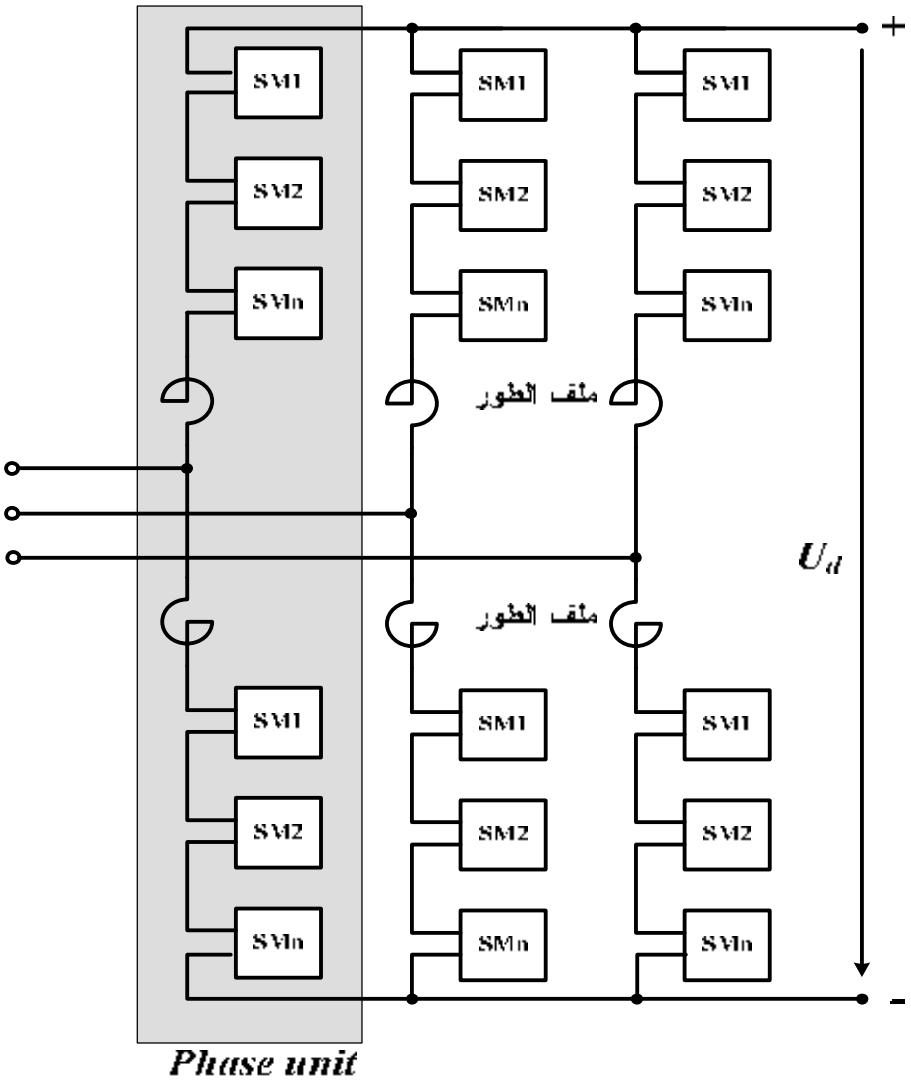
إن الهدف الأساسي من زيادة عدد السويات هو الحصول على أمواج توتر وتيار قريبة جداً من الشكل الجيبي، والتخفيف من نسبة التشويه الكلي. يتألف نظام المعرج من عدد من النماذج (المودولات) الجزئية المتماثلة التي تعدُّ المتطلب الأساسي في هذا المعرج، وذلك للحصول على نموذج معرج صلب وقابل للتحقيق. يبيّن الشكل(2) الدارة المقترحة لتحقيق ذلك، إذْ يجري التحكم بالتوتر خلال حالة العمل المستقرة. مع العلم أنه يمر في كل طور من الأطوار تيار يساوي إلى ثلث التيار المستمر، وبذلك تكون مشاركة كل طور لتغذية حمل التوتر المتناوب بالتيار متساوية في الجزأين العلوي والسفلي لأحد أطوار المعرج. وتمثل المنابع المستمرة المستخدمة في تمثيل المعرج منبع توتر قابل للتحكم وفقاً لعدد السويات الممكنة المبيّنة في الشكل(2) [6,7,8].



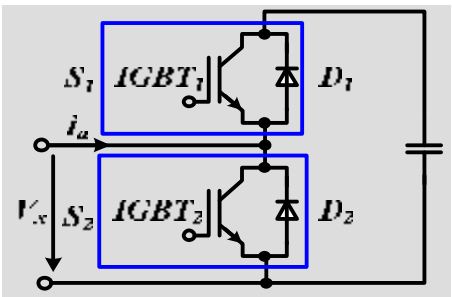
الشكل(2) مبدأ عمل المعرجات المقترحة.

يبيّن الشكل(3) المخطط الرمزي للمعرج ثلاثي الطور المقترح، إذْ يتألف كل طور من عدد n متماثل من الوحدات (معرج نصف جسري) لكل طور، في حين يبيّن الشكل(4) إحدى هذه الوحدات المؤلفة من قاطعين ترانزستوريين من النوع (IGBT) المتطور والمربوط مع كل منهما على التوازي ديود حر، ومنبع توتر مستمر وهو عبارة عن مكثفة C مشحونة. ومن ثمَّ يمكن عَدُّ هذه الوحدة أو المعرج النصف جسري عبارة عن معرج توتر مستمر ($V_{x,i}$) متحكم به، وذلك بغض النظر عن إشارة التيار $i_{a,i}$، مع العلم أن هذا التوتر يساوي توتر المكثفة المشحونة C أي (V_C)، [6].

لتبسيط مبدأ عمل المعرج، يعدُّ التوتر V_c لكل السعات متساوياً ويساوي V_0. بتوصيل عدد من النماذج (أو المودولات) الفرعية بالجزء العلوي أو السفلي يمكن ضبط التوتر V_d أو تعييره. وبطريقة مشابهة يمكن ضبط توتر الخرج المتناوب V_{AC} إلى القيمة المرغوب فيها، [7,8].



الشكل(3) مخطط تمثيلي لمعرج التوتر الثلاثي الطور



الشكل(4) دارة إحدى الوحدات الفرعية في المعرج المقترح وهي دراة معرج نصف جسري.

تبين المعادلات الآتية حدود كل من التوتر $V_d(t)$، إذا اخترنا $V_d = const$ أي ثابت وكان $V_d = n\,V_0$ تبعاً لعدد النماذج الفرعية بكل طور (ذراع): فإن مطال توتر الخرج محدد بالمعادلة:

$$V_d(t) + \left|2V_{AC}(t)\right| \le 2n\,V_0$$

$$\left|V_{AC}\right| \le n\,V_0$$

يبيّن الجدول (1) حالات العمل المختلفة لإحدى الوحدات الفرعية وذلك في حالة العمل الصحيحة دون خطأ. عندما يكون القاطع S_2 بحالة توصيل يكون توتر خرج المعرج النصف جسري مساويًا للصفر. لتطبيق توتر السعة V_c على نهايتي خرج المعرج النصف جسري، تعطي نبضة قدح للقاطع S_1 وتحجز نبضة القدح عن القاطع S_2، وبذلك يصبح توتر الخرج مساوياً لتوتر المكثفة بغض النظر عن جهة التيار (الجدول1)، [6].

الجدول(1) حالات العمل المختلفة للقواطع الإلكترونية.

حالة التشغيل	S_2	S_1	i_a	V_x	dV_C/dt
1	Off	Off	> 0	0	0
2	Off	Off	< 0	0	0
3	Off	On	> 0	V_C	> 0
4	Off	On	< 0	V_C	< 0
5	On	Off	> 0	0	0
6	On	Off	< 0	0	0

كما يبيّن الشكل(5) مسارات التيارات الممكنة لعمل الوحدة الفرعية في المعرج. ويمكن تقسيم حالات التشغيل الممكنة إلى ما يأتي:

الحالة الأولى: كلا القاطعين $IGBT_{1,2}$ في حالة فصل:

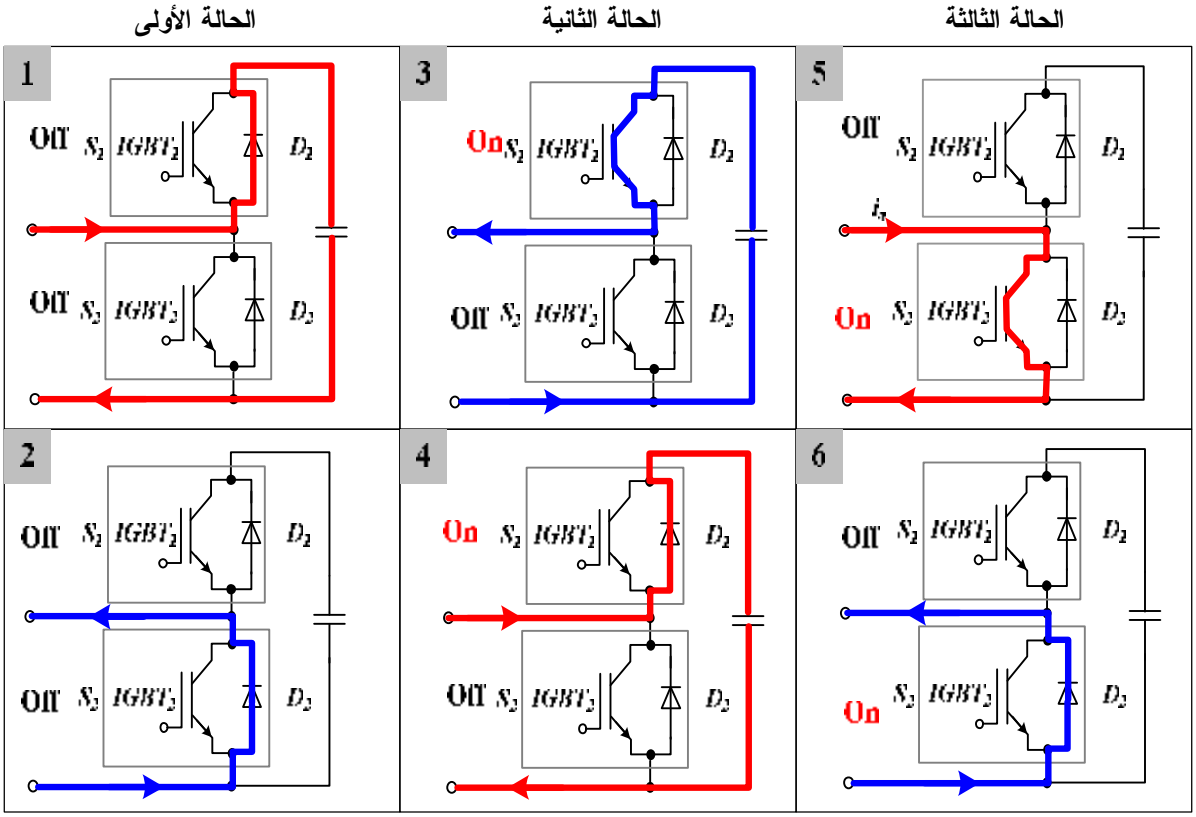
يمكن مقارنة ذلك بحالة الحجز لمعرج توتر ذي سويتين. إذْ يلاحظ أنه خلال عملية الشحن، أي يعني بعد إغلاق قواطع التوتر المتناوب، سوف تقع الوحدات الفرعية كلّها في المعرج في هذه الحالة خارج التشغيل، وهذه الحالة تحدث عند وقوع عطل للمعرجات الفرعية كلّها في المعرج. خلال حالة التشغيل الطبيعية مع تحويل القدرة لن تحدث مثل هذه الحالة. في حال جريان التيار من القطب الموجب باتجاه طرفي التوتر المتناوب، سوف يمر هذا التيار من خلال المكثفة في الوحدات الفرعية أي إنَّها سوف تشحن. وعندما يمر التيار بالاتجاه المعاكس سوف يمر التيار في الديود D_2 من خلال المكثفة ذاتها.

الحالة الثانية: القاطع $IGBT_1$ في حالة وصل والقاطع $IGBT_2$ في حال فصل:

بغض النظر عن جهة مرور التيار، يطبق توتر المكثف على طرفي الوحدة الفرعية في المعرج. واعتماداً على جهة مرور التيار الذي سيمر إمَّا في الديود D_1 ويعمل على شحن المكثفة، أو من خلال القاطع $IGBT_1$؛ وبناء على ذلك يعمل على تفريغ المكثفة.

الحالة الثالثة: القاطع $IGBT_2$ في حالة وصل والقاطع $IGBT_1$ في حال فصل:

سوف يمر التيار إمَّا من خلال القاطع $IGBT_2$ أو من خلال الديود D_2، وذلك اعتماداً على جهة التيار الذي يؤكد أن التوتر المطبق على نهايات وحدة المعرج الفرعية مساوٍ للصفر (فيما عدا التوتر الأمامي على العنصر النصف ناقل). يبقى التوتر على طرفي المكثفة ثابتاً، [6,7,8].



الشكل(5) مخطط حالات العمل المختلفة للقواطع الإلكترونية.

من أجل المحافظة على التوترات نفسها للمكثفات كلّها للتأكد من أن العناصر الإلكترونية تتعرض لإجهادات التوتر نفسها يجب اتباع الخوارزمية الآتية على كل طور كما يأتي [6,7,8]:

- تُقَاسُ توترات المكثفات بشكل دوري وذلك بأخذ عينة ضمن مجال زمني من مرتبة الميلي ثانية. وفقاً لتوترات هذه السعات فإنها تقسم (توزع) باستخدام البرمجيات [7, 8].

- عندما يكون التيار موجباً، يحدد عدد النماذج الفرعية المطلوبة عن طريق عنصر التحكم بالخرج، بحيث تكون أصغر التوترات بحالة توصيل. وعليه فإن المكثفات التي اختيرت سوف تشحن. عندما يكون التيار في الطور المرافق سالباً، تُختَارُ النماذج الفرعية ذات التوترات الأعلى بحيث تصبح بحالة توصيل. بهذه الطريقة يتم ضمان حدوث توازن دائم لتوترات المكثفات.

- يدعم هذا المفهوم الاستخدام الأمثل للطاقة المخزنة وفي الوقت نفسه ضياعات القدرة الموزعة للعناصر الإلكترونية المركبة. فضلا عن ذلك يمكن المحافظة على ضياعات القدرة بحيث تكون منخفضة؛ وذلك بتشغيل النماذج الجزئية فقط عندما يكون هناك تغيّر مطلوب على توتر الخرج.

4- تصميم النموذج بالتجهيزات الأساسية:

يسمح استخدام النموذج التقريبي باستخدام أحدث التقنيات في العناصر النصف ناقلة والمكثفات مع سهولة في استبدالها ضمن المعرجات الفرعية. يفضل استخدام عناصر (IGBT) (مع العلم أن الديود الحر الواجب ربطه مع الترانزستور أصبح جزءاً منه) في تطبيقات هذا النوع من المعرجات تبعاً لتوافرها من قبل العديد من

المصنعين وميزاتها وسرعة تطورها والتقنية العالية التي تمتاز بها هذه العناصر مقارنة بالعناصر الترانزستورية الأخرى [6,7].

5- مرونة المعرج:

يمتاز هذا المعرج بالمرونة وفقاً لبنيته، فهو مرن في إعداد توصيلاته، وتوافر التقنيات المتعددة لتصميم الحلول المثلى الممكنة وتحقيقها للمعرج. يقدم تصميم المعرج مرونة متزايدة من ناحية تركيب العناصر (صمام) ومخطط الدارة. يمكن التصميم العالي للمعرج من تحقيق توازن ممتاز في بنية الدارة وبرمجياتها معاً.

6- مبدأ تخزين الطاقة في المعرج:

في هذا النوع من المعرجات تكون مكثفات التخزين موزعة على كامل المعرج مع أن حجم التخزين يجب أن يكون كبيراً، إلا أن ذلك يقدم بعض الفوائد:

أ- إمكانية التشغيل غير المتوازن:

بسبب عدم وجود مكثفات توتر مستمرة مشتركة لكل الأطوار فإن كل طور يمكن أن يعمل بشكل مستقل دون أن يتسبب ذلك بحدوث تشوه وتموج للتوتر على الأطوار الأخرى.

وبذلك يمكن تشغيل هذا المعرج بشكل متواصل عند توترات غير متوازنة، على سبيل المثال في حال وجود توتر عالٍ كبير سالب ناتج عن توترات الشبكة المتناوبة. يعطي ذلك ميزة كبيرة في خطوط نقل القدرة بالتوتر المستمر؛ وذلك عند العمل في حالة الأعطال غير المتوازنة. ولاسيَّما حالات التحميل البعيدة مثل حدوث عطل طور-أرض وقاطع إعادة الإغلاق. يمكن للطورين غير المتضررين الاستمرار بنقل القدرة الاسمية لهما، وهذا يحدُّ من النقص في الطاقة الصافية المنقولة إلى نحو ثلث القيمة العظمى. قد يكون ذلك مفيداً للشبكات الضعيفة لأنه يخفف من تغيّرات التردد، ويؤدي إلى تجنب الحاجة إلى فصل الحمل أو فصل المولدة.

ب- تحسين الأداء في أثناء العطل:

يعطي تخزين الطاقة الكبير بشكل عام أداء أفضل خلال أعطال الشبكات المتناوبة؛ وذلك لأن التوتر المستمر يبقى شبه ثابت، وهذا يسمح بعمل متواصل وثابت للمعرج.

ج- توازن توتر بسيط:

إن التحدي الأكبر الذي تواجهه معرجات التوتر (VSCs) هو تأكيد توازن التوتر على سويات العناصر النصف الناقلة كلّها. بالنسبة إلى استخدام تعديل عرض النبضة (PWM) في المعرج يشير ذلك إلى توازن مئات من تجهيزات الفصل والوصل بآنٍ واحد التي تشكل الصمام (مجموعة من العناصر IGBT الموصولة على التسلسل والتفرع)، يتطلب ذلك دقة تحكم إلكترونية عالية تنخفض لتصل إلى مجال عشرات النانو ثانية. بالإشارة إلى خصائص التشغيل الممتازة لحالة العمل تقدم تقنية المعرج أداءً ديناميكياً قوياً، والضروري للاستجابة لمتطلبات الشبكة بما فيها المقدرة على مواجهة العطل وخاصة في حال حدوث أعطال في الشبكة المتناوبة. على الرغم من أن المعرجات متعددة السويات تستخدم عدداً يساوي ضعف عدد العناصر النصف ناقلة لدعم التوتر المستمر نفسه كما في تصميم (PWM)، يوصل كل فرع (طور) من أطوار المعرج التيار بشكل متواصل وعند العمل عند ترددات فصل ووصل منخفضة أكثر. عند أخذها معاً يسمح ذلك للنظام المستمر المعتمد على المعرج المذكور لنقل ضعف التيار المستمر مقارنة بتصميم (PWM) المبني بتيار يساوي التيار الاسمي لـ IGBT.

تدعو الحاجة إلى صالة صمامات كبيرة من أجل المعرج المذكور؛ وذلك وفقاً لزيادة حجم المكثفات، ولكن ذلك متوازن مع عدد العناصر الخارجية الأقل مثل مرشحات الحجز، والمساحة الكلية التي يحتاج إليها المعرج والتي سوف تنخفض [6,7].

7- النمذجة باستخدام البيئة البرمجية Matlab/Simulink

تمتلك البيئة البرمجية **MATLAB/SIMULINK** إمكانية القيام بعملية النمذجة والمحاكاة لعناصر معرج التوتر كلّها ولمختلف السويات، بما في ذلك معرج عرض النبضة المطلوب، يبيّن الشكل(6) توتر خرج معرج ثلاثي السويات وخماسي السويات . جرى كما هو مبين الشكل(7) بناء المخطط الصندوقي لدارة المعرج المقترحة باستخدام عناصر البيئة البرمجية المذكورة.

علماً أن هذه الدراسة تجري للمعرج المدروس؛ وذلك عند سويات توتر مختلفة للحصول في النهاية على السويات المطلوبة لاستخدام هذا النوع من المعرجات في تطبيقات **(HVDC & FACTS)**. ويبيّن الشكل(8) عنصر الترانزستور المستخدم حيث يتم اختيار محدداته المبينة بما فيها مقاومته الداخلية وهبوط التوتر الأمامي وأزمنة الفصل والوصل وعناصر دارة الإخماد الضرورية لحمايته في أثناء عمليات الفصل والوصل من خلال صندوق الحوار الخاص به. وفي الشكل(9) تمثيل لدارة نظام تعديل عرض النبضة المقترح باستخدام عناصر المكتبة Simulink. بالنسبة إلى توصيف عناصر دارة القيادة المستخدمة في MATLAB/SIMULINK:

- الدارة المكافئة للقاطع الترانستوري لا تحتوي على ديود حر لذلك نحتاج إلى ديود حر مربوط على التفرع مع القاطع.

- يجب ربط ممانعة (مقاومة بقيمة صغيرة) تسلسلية مع منبع التوتر المستمر (منبع مثالي) في الدارة؛ وهذا من متطلبات البرنامج المستخدم، إذْ تعبّر هذه المقاومة عن المقاومة الداخلية لمنبع التوتر.

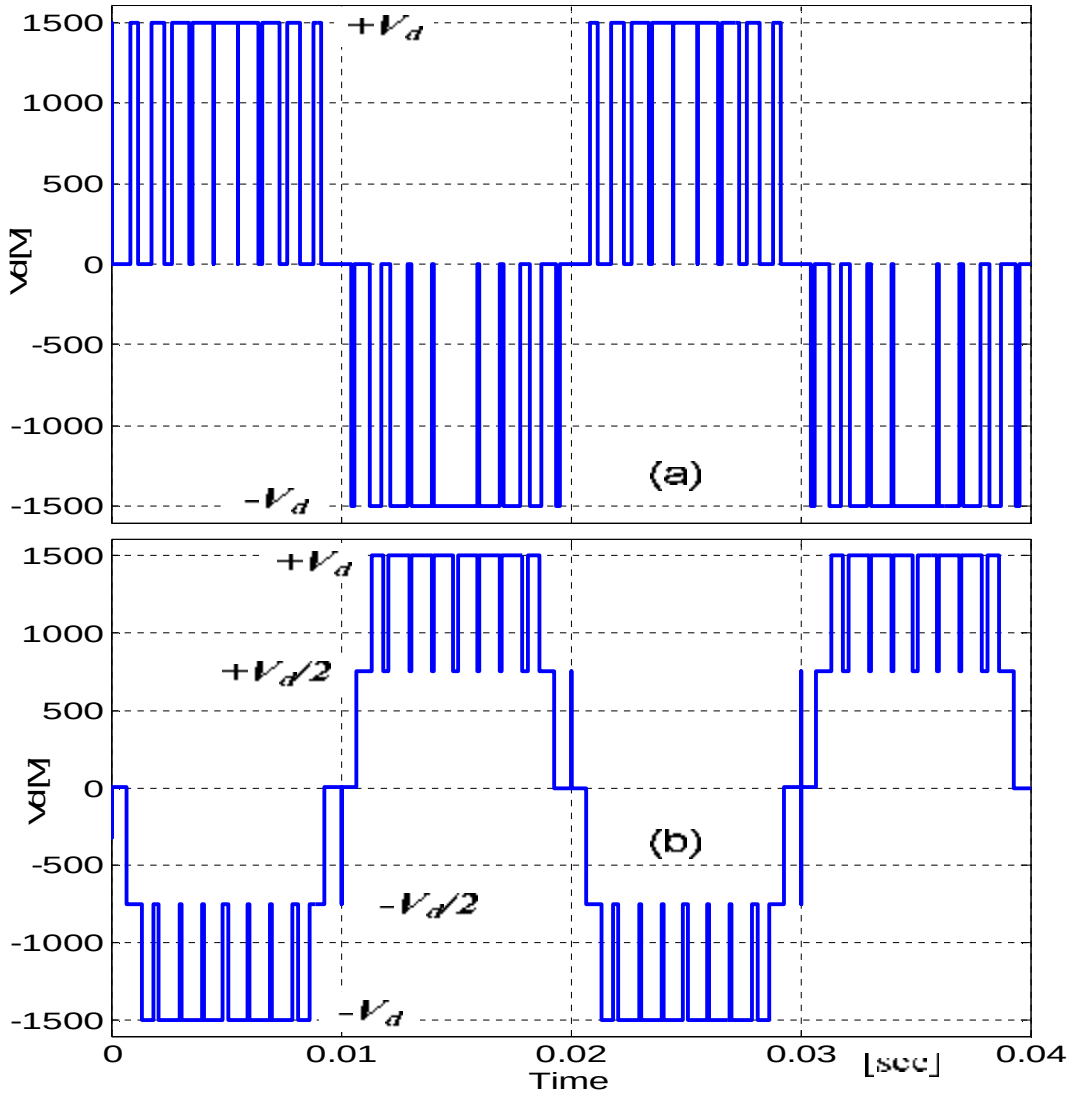
- في الدارات الموجودة في الشكل(9)، لدينا عادة إشارة جيبية مرجعية أساسية تُقَارَنُ منطقياً بموجة سن المنشار التي تُوَلَّدُ من موجة مربعة ذات تردد معين ثم تؤخذ هذه الإشارة إلى مكبر ثم عنصر مكاملة وفي النهاية تُقَارَنُ بالموجة الجيبية المرجعية للحصول على نبضات القيادة التي تطبق على بوابة القاطع الإلكتروني.

7-1 الإجراء الأول: محاكاة معرج توتر ذي ثلاث سويات باستخدام MATLAB/SIMULINK:

يكون لتوتر خرج معرج ثلاثي السويات وخماسي السويات القيم الآتية على التتالي (انظر الشكل(6)):

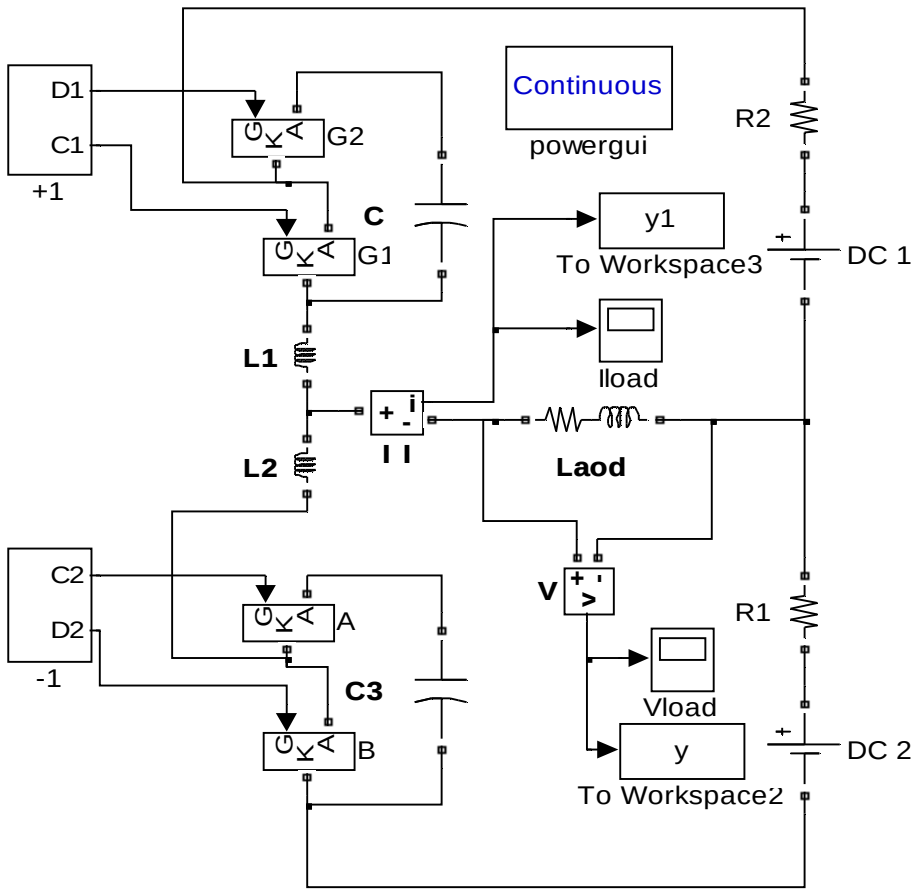
$+V_d, 0, -V_d$

$+V_d, +V_d/2, 0, -V_d/2, -V_d$ ، يمثل التوتر المذكور توتر خرج المعرجات التقليدية (ذات ديودات الربط أو المكثفات العائمة أو الجسرية) . ستُدرَسُ وتُحَلَّلُ خرج المعرج المقترح للحصول على توتر خرج مشابه لتوتر الخرج المبيّن في الشكل(6) ، وذلك باستخدام البرامج المتوافرة في البيئة البرمجية المعتمدة في الدراسة.

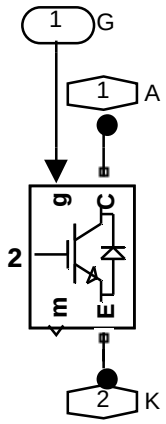


الشكل(6) خرج معرجات توتر (a) ذات ثلاث سويات (b) وذات خمس سويات.

بالنسبة إلى مبدأ قيادة المعرج المقترح وفق مبدأ تعديل عرض النبضة الذي بُني باستخدام البيئة البرمجية المدروسة، فإن هذا المبدأ يعتمد على مقارنة الموجة الجيبية المرجعية بالموجة الحاملة (موجة سن المنشار)، بحيث يكون ناتج المقارنة عبارة عن نبضات القدح الواجب تطبيقها على بوابات القواطع الإلكترونية (G_1,G_2)، المبيّنة في الشكل(7).



الشكل(7) المخطط الصندوقي لدارة المعرج باستخدام عناصر البيئة البرمجية MATLAB/SIMULINK.



الشكل(8) الدارة المكافئة للقاطع الترانزستوري المستخدم وفق البيئة البرمجية MATLAB/SIMULINK

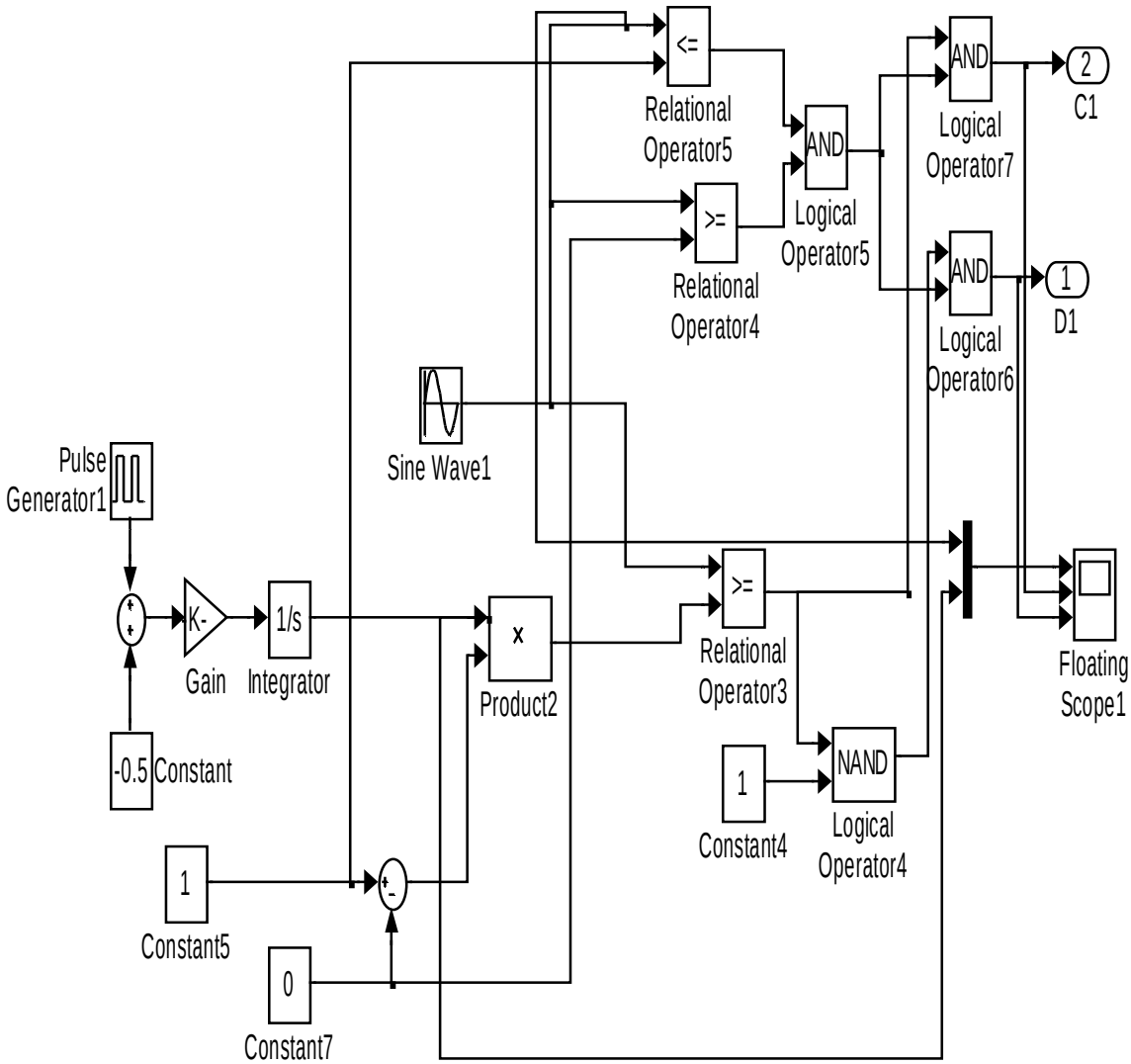
يبيّن الشكل(10) نبضات القدح الناتجة عن مقارنة الموجة الجيبية الأساسية بموجة سن المنشار. علماً أن عمليات المقارنة جرت كما يأتي:

$$\sin(w\,t) > V_{tri} \Rightarrow G_1(On), G_2(Off)$$

$$\sin(w\,t) < V_{tri} \Rightarrow G_2(On), G_1(Off)$$

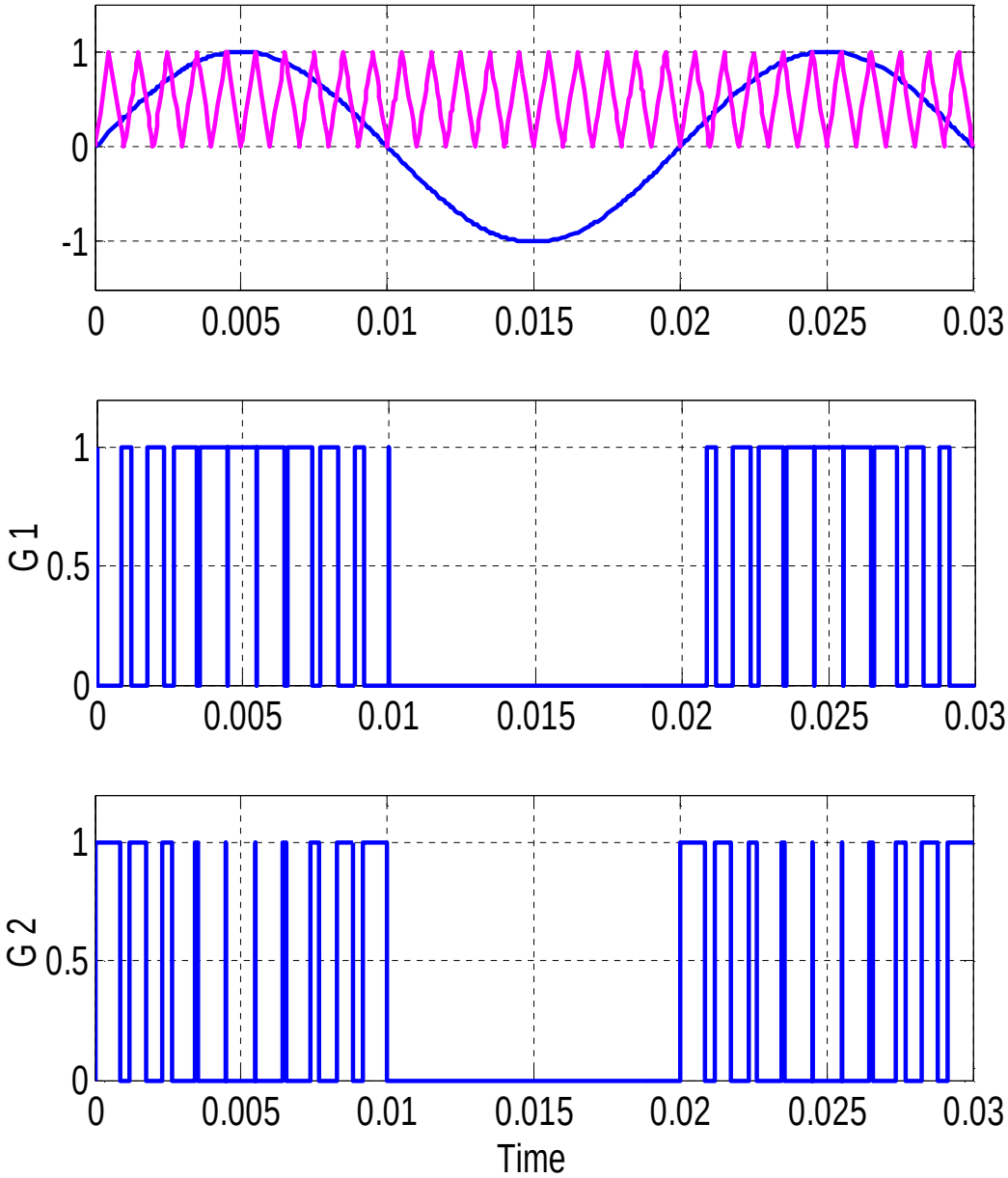
تطبق نبضات القدح على القاطعين التابعين للجزء العلوي

من المعرج، أي القاطعين المسؤولين عن الجزء الموجب من موجة الخرج. ويكون خرج المعرج عبارة عن توتر ذي ثلاث سويات، كما هو مبـيّن فـي الـشكلين (11) و(12).

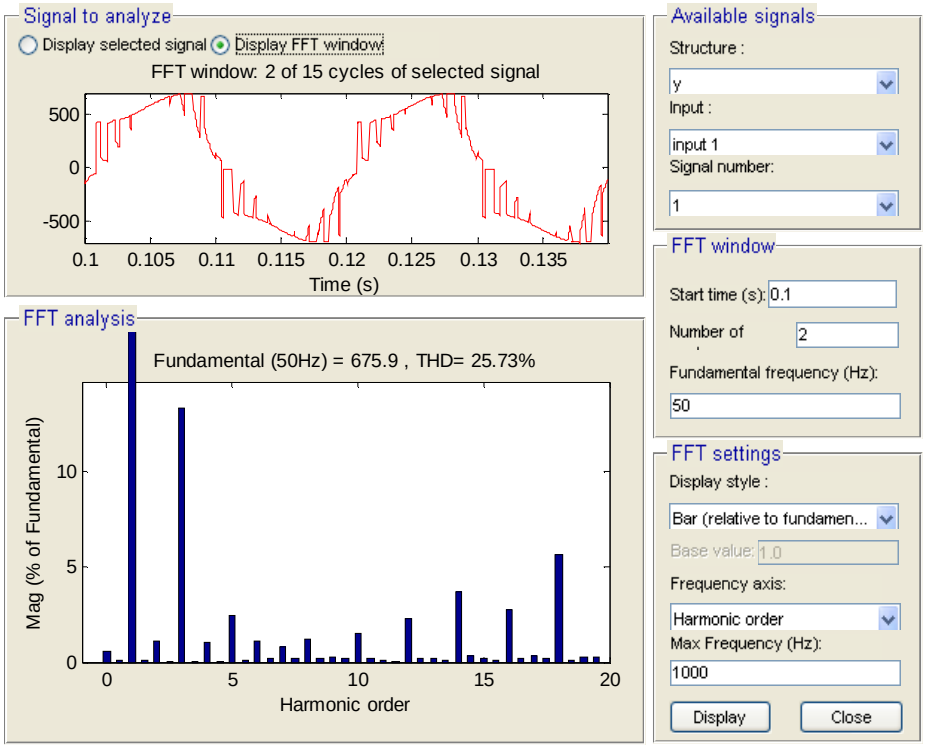


الشكل(9) المخطط الصندوقي لدارة نظام تعديل عرض النبضة المستخدمة.

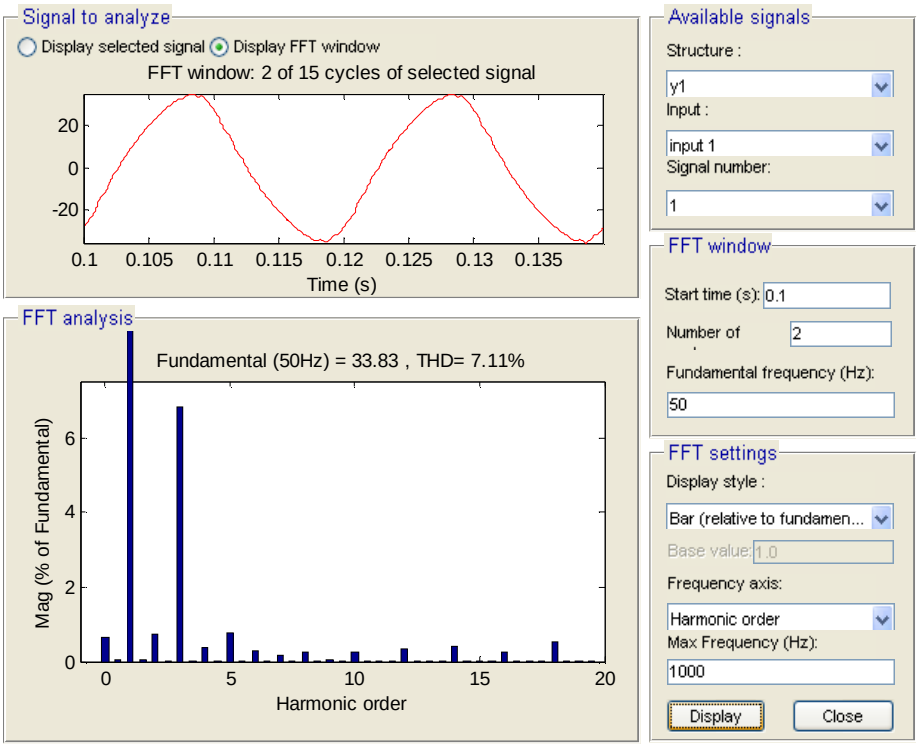
أُجريَ في الشكلين (12) و(11) تحويل فوريه الـسريع لتيار الحمل وتوتره لمعرفة مطال التوافقيـة الأساسـية وعامل التشويه الكلي ونسب التوافقيات الموافقـة لكـل منهما.



الشكل(10) نبضات القدح الناتجة عن مقارنة الموجة الجيبية الأساسية



الشكل(11) تحويل فورييه السريع لتوتر خرج المعرج ذي ثلاث سويات توتر.

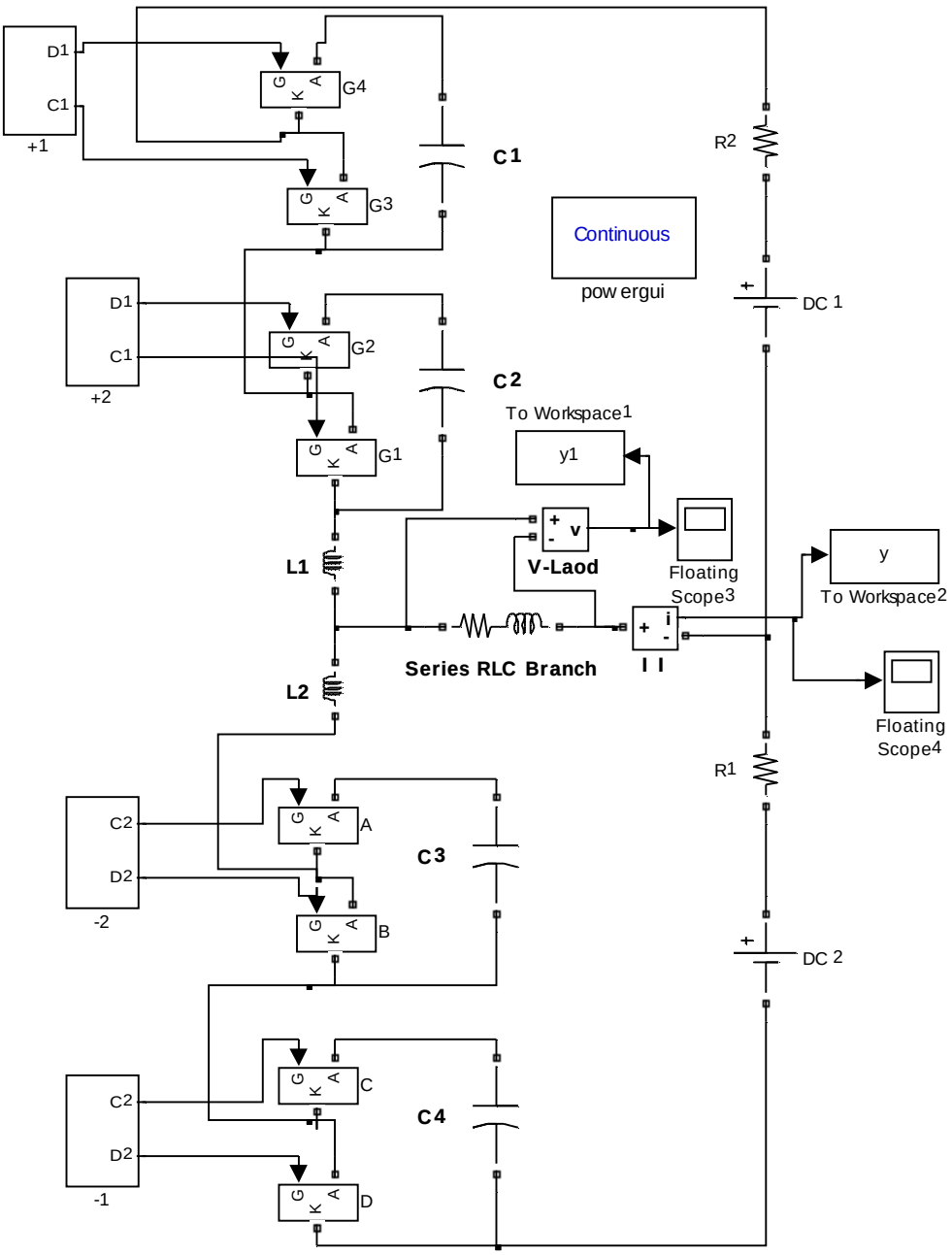


الشكل(12) تحويل فورييه السريع لتيار خرج المعرج ذي ثلاث سويات توتر

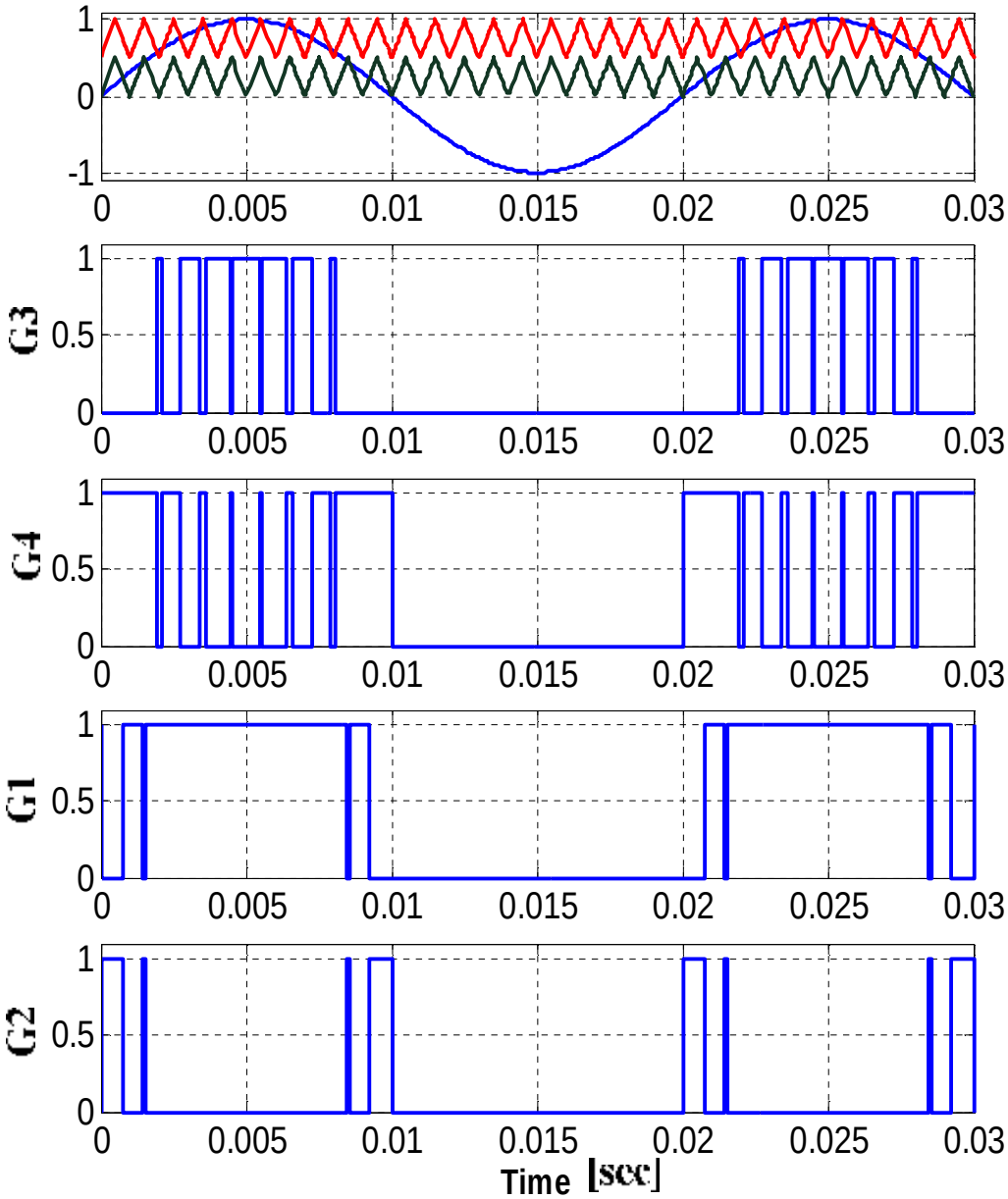
2-7 الإجراء الثاني: محاكاة معرج توتر ذي خمس سويات باستخدام MATLAB/SIMULINK:

يبيّن الشكل(13) مخططاً صندوقياً لمحاكاة معرج جسري ذي خمس سويات توتر باستخدام البيئة البرمجية MATLAB/SIMULINK. يبيّن الشكل(14) نبضات القدح الواجب تطبيقها على القواطع الإلكترونية لقيادة المعرج المذكور وذلك لنصف الجسر الموجب، مع العلم أن للنصف السالب الآلية نفسها في قيادة قواطعه الإلكترونية.

أُجريَ في الشكلين (15) و(16) تحويل فوريه السريع لتيار الحمل وتوتره لمعرفة مطال التوافقية الأساسية لكل منهما، وعامل التشويه الكلي، ونسب التوافقيات الموافقة لكل منهما.

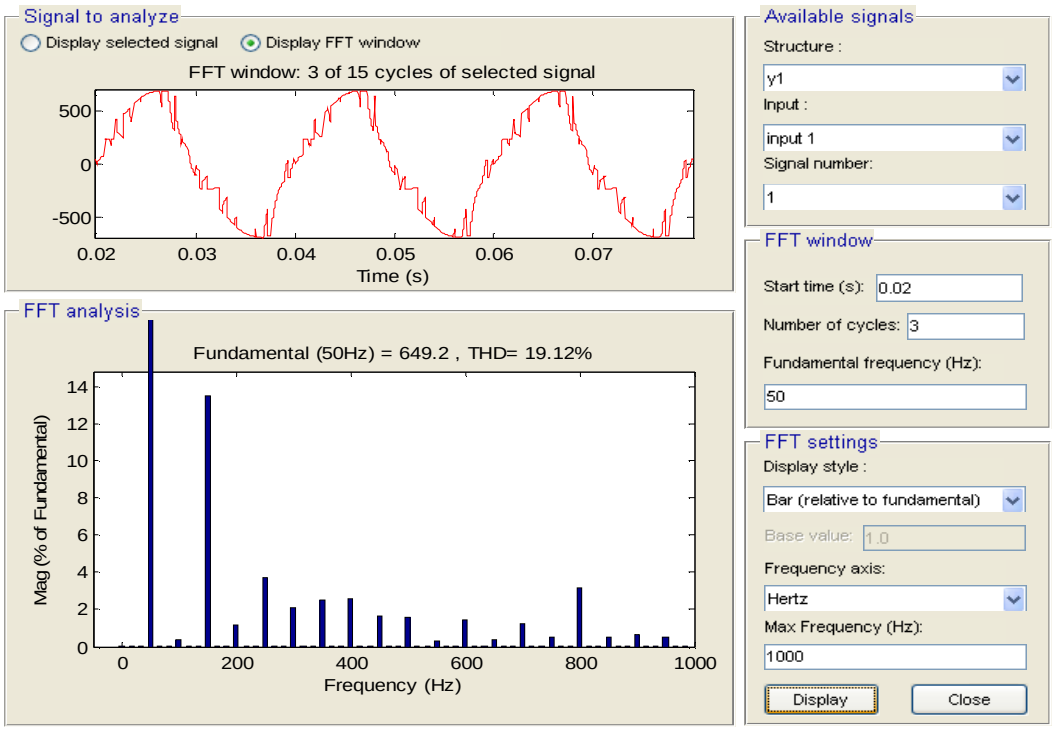


الشكل(13) دارة معرج توتر ذي خمس سويات.

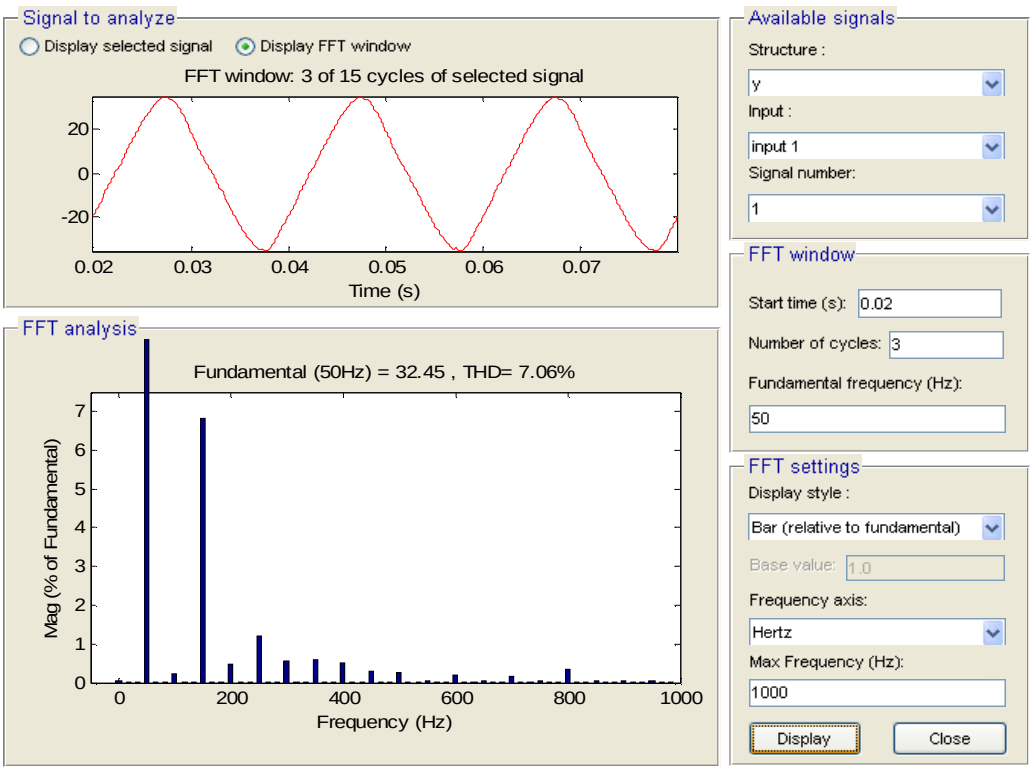


الشكل(14) نبضات القدح الوجب تطبيقها على نصف الجسر الموجب للقواطع الأربعة.

بناء على ما سبق، يمكن استخدام هذا المعرج للحصول على توتر متعدد السويات بحيث يلائم التطبيقات المطلوبة المذكورة ذات التوترات والتيارات العالية. وبالنسبة إلى تأمين سوية التوتر والتيار المطلوبة، تتوافر عناصر إلكترونية ذات توترات وتيارت اسمية عالية يمكن وصلها على التسلسل للوصول إلى سوية التوتر العالي المطلوب، وعلى التفرع للحصول على التيار الاسمي المطلوب، علماً أن هذه العناصر بعد ربطها معاً تأخذ المصطلح العملي صماماً كهربائياً. ومن ثمَّ يمكن استخدام هذه الصمامات في المعرج المقترح للحصول على توتر من مرتبة مئات من الكيلوفولطات.



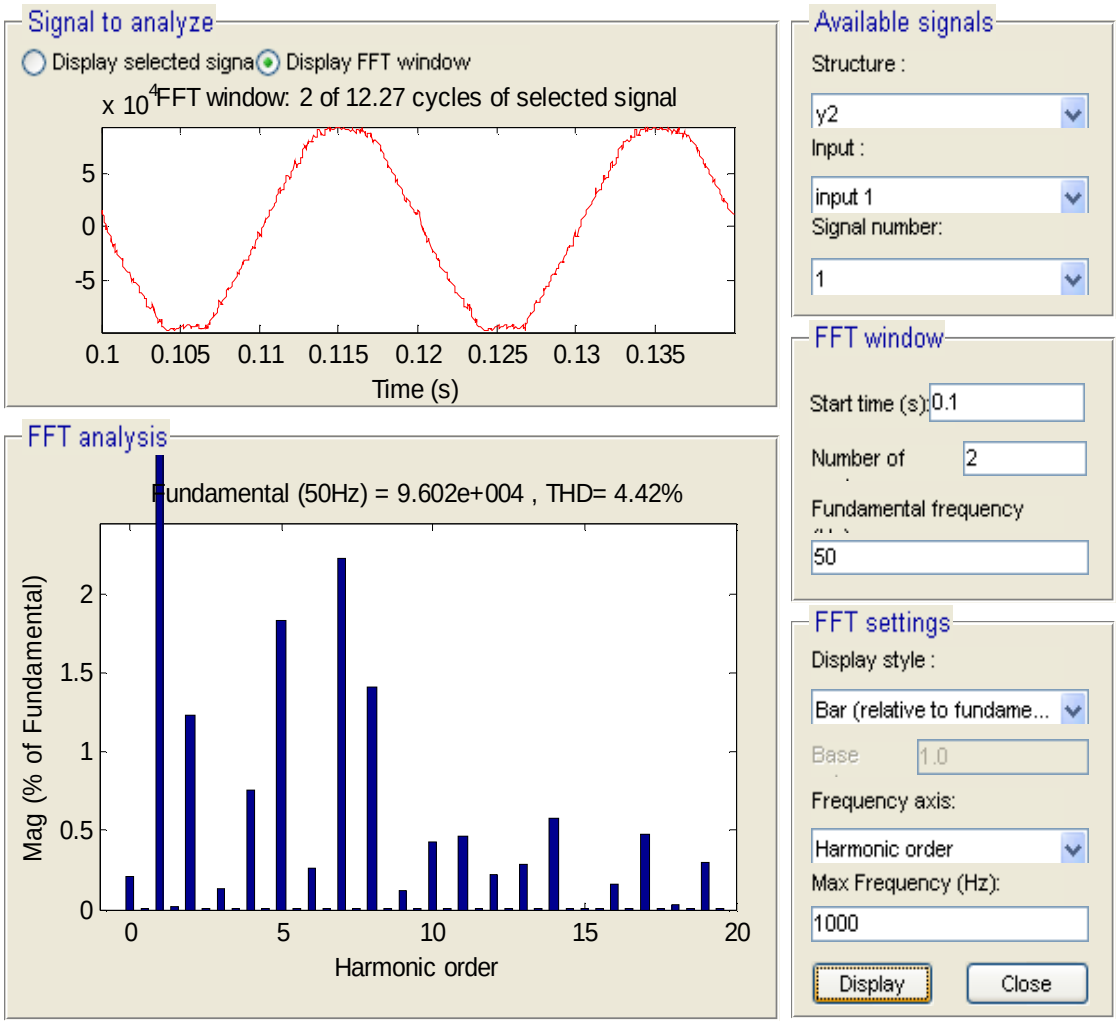
الشكل(15) تحويل فورييه السريع لتوتر خرج المعرج ذي خمس سويات توتر



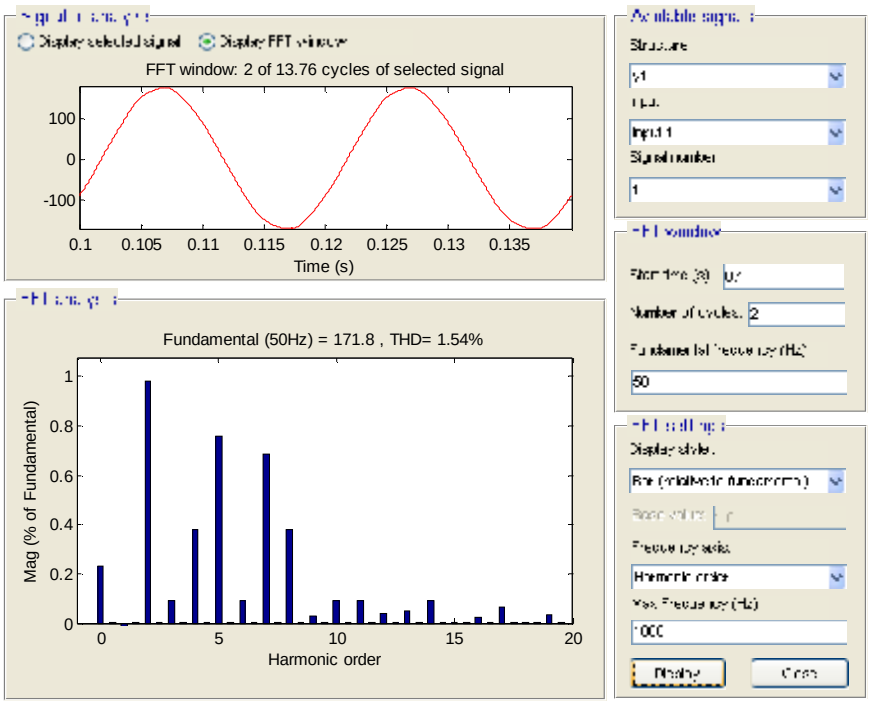
الشكل(16) تحويل فورييه السريع لتيار خرج المعرج ذي خمس سويات توتر

3-7 الإجراء الثالث: محاكاة معرج توتر ذي 17-سوية باستخدام MATLAB/SIMULINK:

أجريت دراسة مشابهة على معرج توتر ذي 17-سوية توتر، ويبيّن الشكل(17) و(18) تحويل فوريه السريع لتيار الحمل وتوتره لمعرفة مطال كل من التيار والتوتر، وعامل التشويه الكلي، ونسب التوافقيات الموافقة لكل منهما.

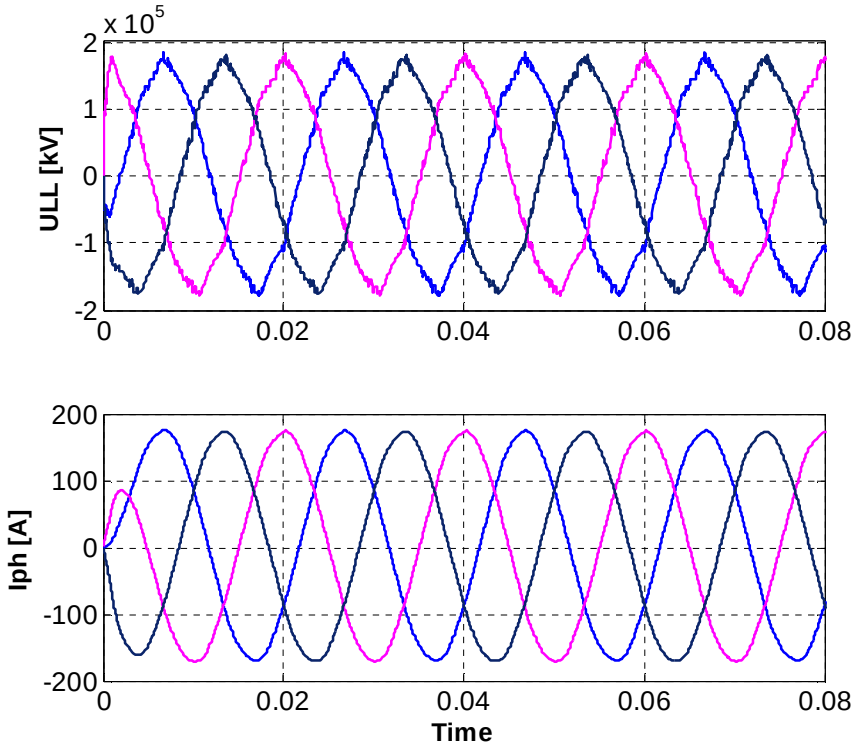


الشكل(17) تحويل فوريه السريع لتوتر خرج المعرج ذي 17-سوية توتر.



الشكل(18) تحليل فورييه السريع لتيار خرج المعرج ذي ذي 17-سوية توتر.

أمَّا بالنسبة إلى الشكل(19) فيبيّن التوترات الخطية والتيارات للمعرج المقترح ثلاثي الطور ذي 17-سوية.



الشكل(19) التوترات الخطية وتيارات الأطوار لمعرج ثلاثي الطور 17-سوية.

8- مناقشة النتائج

بالعودة إلى مجموعة الأشكال المتعلقة بتوترات وتيارات خرج معرجات التوتر المختلفة السويات التي جرت نمذجتها باستخدام البيئة البرمجية المشار إليها سابقاً، أجريت مقارنة بين مطالات التوترات والتيارات ونسب التشوه الكلي الموافقة لكل منهما، يبيّن الجدول(2) هذه المقارنة. نلاحظ أنه مع زيادة عدد سويات للمعرج التوتر المقترح، سوف تنخفض نسبة التشوه الكلي لموجة توتر خرج المبدل وتياره، وأننا نقترب من شكل موجة جيبي لتوتر الخرج وتياره للمعرج. فقد انخفضت نسبة تشوه التيار في حالة معرج توتر ذي سويتين من 7.11% إلى 1.54% في المعرج ذي 17-سوية، أمَّا بالنسبة إلى موجة توتر الخرج، فقد انخفضت نسبة التشوه الكلي من 25.73% إلى 4.42%. إن النسب العالية للتشوه الكلي (7.11%، 25.73%) والتوافقيات المتسببة فيها، غير مقبولة وهي أعلى بكثير من القيم المسموح بها وفق النظم العالمية الهندسية مثل IEC، و IEEE، ومن أهم المساوئ التي تنتج عنها هي زيادة الضياعات، على سبيل المثال. مما سبق، يمكن استخدام المعرج المقترح في تطبيقات التيار المستمر بالتوتر العالي والتطبيقات الأخرى (FACTS) للحصول على توترات وتيارات جيبية صافية تقريباً.

الجدول(2) مطالات التوتر والتيار ونسب التشوه الكلي لكل منهما.

عدد سويات التوتر	مطال التيار[A]	THD للتيار	مطال التوتر[V]	THD للتوتر
سويتين	33.83	7.11%	675.9	25.73%
ثلاث سويات	32.45	7.06%	349.2	19.12%
17-سوية	171.8	1.54%	96020	4.42%

9- الخاتمة

إن معرجات التوتر النصف جسرية المقترحة ملائمة بشكل كبير للاستخدام في معرجات أنظمة خطوط نقل القدرة بالتيار المستمر HVDC والأنظمة المرنة FACTS، أي الأنظمة ذات الاستطاعات الكبيرة. تمتاز هذه المعرجات بالعديد من الإيجابيات مقارنة بمعرجات التوتر التقليدية، مثل الضياعات والحصول على سويات التوتر المختلفة. إن التقنية المستخدمة لقيادة هذا المعرج سهلة الفهم بالنسبة إلى المهندسين المختصين في المجالات المذكورة وفضلاً عن ذلك سهلة التطبيق من الناحية الكهربائية والتركيب الميكانيكي.

جرت في هذه الدراسة نمذجة معرج التوتر المقترح، متعدد السويات أُجِدَتْ طريقة القدح الملائمة باستخدام مبدأ تعديل عرض النبضة وذلك باستخدام البيئة البرمجية Matlab/Simulink. وقد أعطت نتائج النمذجة للمعرج المقترح نتائج جيدة حيث انخفضت نسبة التشوه الكلي مع زيادة عدد السويات، وتم الحصول على تيارات وتوترات جيبية صافية تقريباً.

المراجع:

1. Hashim W., Power Electronic2, Electric Power Department, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Damascus University, 2009.
2. Hashim W., Jamal A. Lectures in Power Electronic2, Electric Power Department, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Damascus University, 2010-2011.
3. T. Bruckner and D.G. Holmes, "Optimal Pulse Width Modulation for Three-Level Inverters," Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference, volume 1, pages 165-170، June 2003.
4. B.P. McGrath and D.G. Holmes، "Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters, " *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, volume 49, number 4, pages 858-867, August 2002.
5. F.Z. Peng, "A Generalized Multilevel Inverter Topology with Self Voltage Balancing, " *Proceedings of the IEEE Industry Applications Society Conference*، volume 3, pages 2024-2031, October 2000.
6. Lesnicar, and R. Marquardt, "An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range", IEEE bologna Power Tech Conference، June 23th-26th، Bologna, Italy 2003.
7. HARTMUT HUANG, "Multilevel Voltage-Sourced Converters for HVDC and FACTS Applications", Cigré SC B4 2009 Bergen Colloquium.
8. J. DORN, H. HUANG, D. RETZMANN, "A new Multilevel Voltage-Sourced Converter Topology for HVDC Applications", CIGRE 2008, B4-304, 21, rue d'Artois, F-75008 PARIS.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2010/2/14.