

Syrian Arab Republic
Damascus university
Faculty of Electrical and
Mechanical Engineering
Power Electrical Engineering



الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية
قسم هندسة الطاقة الكهربائية

تطوير معرج متعدد الوحدات - السويات لنظام كهروضوئي

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقة الكهربائية

إعداد المهندسة

أمني حسن

المشرف المشارك:

د. معاذ النهار

المشرف:

د. جمال الناصير

العام الدراسي 2023

الإهداء

تضافرت مجموعة من العوامل الداعمة والمشجعة للقيام بهذا العمل المتواضع وذلك بفضل من الله تعالى ودعم من الأهل والمحيط.

أقدم شكري وتقديري لسورية الحبيبة وقيادتها الحكيمة التي رغم كل الظروف والصعوبات مازالت تولي العلم اهتمامها الأول ولجامعة دمشق الحاضرة الأولى لي.

وأخص بالشكر والتقدير من كان لي شرفه العمل تحت إشرافهم الدكتور المهندس معاذ النهار، والدكتور المهندس جمال الناصير، ولرئيس قسم هندسة الطاقة الدكتور علي السيد لرعاية صدره وأخلاقه العالية.

ومع إنجاز هذا العمل لابد لي من الإقرار بمجهود وتعجب والدي الذين احتضانني بكل حالات التوتر والغضب فالشكر الكبير لهاتين الشمتين اللتين انصهرتا لنحيا وننهل من العلم والمعرفة.

الشكر لأخوتي وأخواتيسندي وأمانتي في هذه الحياة.

الشكر لزوجتي الحبيبة الذي كان سندي الأول وداعمي لآخر لحظة.

والإهداء الأخير لشمتي حياتي والأمل القادمطفلاي الحبيب.....سلطان.....سلمان.

Table of Contents

٤	الفصل الأول
٤	الإطار العام للبحث والدراسات المرجعية
٤	1-1 مقدمة
٤	2-1 إشكاليات البحث
٤	3-1 الهدف من البحث
٤	4-1 تساؤلات البحث
٤	5-1 فرضيات البحث
٤	6-1 أهمية موضوع البحث
٥	7-1 خطوات البحث
٦	8-1 الدراسات المرجعية
٦	1-8-1 الدراسة المرجعية الأولى:
٦	المعرجات متعددة المستويات التحكم بها وتطبيقاتها
٦	"Modular Multilevel Converters: Control and Applications"
٧	2-8-1 الدراسة المرجعية الثانية:
٧	"المعرج الجسري متعدد السويات واستخداماته مع أنظمة الطاقات المتجددة"
٧	"Multilevel Converters as a Utility Interface for Renewable Energy Systems"
٨	3-8-1 الدراسة المرجعية الثالثة:
٨	تصميم وتنفيذ نظام تحويل الطاقة الكهروضوئية باستخدام معرج متعدد الوحدات المعياري متعدد السويات
٨	Design and Implementation of Photovoltaic Power Conversion using Modular
٨	Multilevel Converter (PPCMMC)
٩	4-8-1 الدراسة المرجعية الرابعة:
٩	تصميم ومحاكاة وحدات متعددة المستويات العاكس باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة
٩	Design and Simulation of Modular Multilevel Inverter Using PWM
٩	5-8-1 الدراسة المرجعية الخامسة:
٩	العاكس متعدد المستويات: مسح حول البنى التقليدية والمتقدمة، ومخططات التحكم، وتطبيقات نظام الطاقة
٩	والتوقعات المستقبلية
٩	Multilevel Inverter: A Survey on Classical and Advanced Topologies, Control Schemes,
٩	Applications to Power System and Future Prospects
١٠	6-8-1 الدراسة المرجعية السادسة:
١٠	معرجات الجهد النصف الجسرية ومتعددة السويات المستخدمة في أنظمة الـ HVDC
١١	7-8-1 الدراسة المرجعية السابعة:
١١	بنية وتطبيقات المحولات المعيارية متعددة المستويات الموسعة
١١	Beyond the MMC: Extended Modular Multilevel Converter Topologies and
١١	Applications
١٣	الفصل الثاني
١٣	المعرجات متعددة السويات وتركيبها البنوي
١٣	TOPOLOGY OF MULTI LEVEL INVERTERS
١٣	1-2 مقدمة
١٣	2-2 المعرجات المتعددة السويات [13]
١٤	1-2-2 المعرجات متعددة السويات ذات ديود الربط
١٧	2-2-2 المعرجات ذات المكثفات العائمة
١٩	3-2-2 المعرجات الجسرية المتعاقبة
٢٣	4-2-2 المعرجات الجسرية المتعاقبة النصف جسرية
٢٤	5-2-2 آلية عمل المعرج النصف جسري:
٢٦	6-2 تقنية تعديل عرض النبضة وأنواعها
٢٦	1-6-2 تقنية تعديل عرض النبضة المستخدمة مع المعرجات
٢٧	2-6-2 تقنية تعديل عرض النبضة الثنائية
٢٨	3-6-2 طريقة تعديل عرض النبضة أحادي القطب

٢٩	4-6-2 طريقة تعديل عرض النبضة متعددة الحوامل
٤٠	الفصل الثالث
٤٠	النمذجة والمحاكاة ونتائجها
٤٠	1-3 مقدمة
٤٠	2-3 نموذج المعرج متعدد السويات باستخدام البيئة البرمجية
٤٤	3-3 نتائج المحاكاة:
٤٧	الفصل الرابع
٤٧	القسم العملي – التنفيذ
٤٧	1-4 مقدمة
٤٧	2-4 التصميم الإلكتروني للمعرج
٤٧	1-2-4 دائرة التحكم والقيادة
٤٩	منافذ التوصيل Pins
٤٩	المتحكم Micro Controller
٥٠	3-4 التنفيذ العملي للدائرة
٦٠	النتائج والتوصيات
٦١	المراجع

الأشكال

٦	الشكل (1-1) نموذج المعرج النصف جسري والجسري الكامل [8]
٧	الشكل (2-1) تقنية تعديل عرض النبضة
٨	الشكل (3-1) نبضات القذح للترانزستور
١٤	الشكل (1-2) أنواع المعرجات متعددة المستويات
١٨	الشكل (2-2) المعرج متعدد المستويات ذو ديود الربط [13]
٢٠	الشكل (3-2) المعرج ذو المكثف العائم [13]
٢٢	الشكل (4-2) معرج جسري أحادي الطور
٢٤	الشكل (5-2) حالات عمل المعرج الجسري
٢٤	الشكل (6-2) بنية المعرج النصف جسري (متعدد السويات، متعدد الوحدات)
٢٨	الشكل (7-2) تقنية تعديل عرض النبضة
٢٨	الشكل (8-2) تقنية تعديل عرض النبضة المزدوجة
٢٩	الشكل (9-2) تقنية تعديل عرض النبضة أحادي الطور
٣٠	الشكل (10-2) تقنية تعديل عرض النبضة أحادي الطور
٣٠	الشكل (11-2) تعديل عرض النبضة بطريقة إزاحة الطور
٣٢	الشكل (12-2) تقنية تعديل عرض النبضة بطريقة الإزاحة
٣٣	الشكل (13-2) دائرة المعرج النصف جسري
٣٥	الشكل (14-2) دائرة أحد الوحدات الفرعية في المعرج النصف جسري [3]
٣٥	الشكل (15-2) إحدى حالات عمل المعرج [3]
٣٦	الشكل (15-3) إحدى حالات عمل المعرج [3]
٤٢	الشكل (15-4) إحدى حالات عمل المعرج [3]
٤٢	الشكل (2-3) نموذج المعرج النصف جسري على الماتلاب
٤٣	الشكل (3-3) نموذج وحدة فرعية من المعرج النصف جسري
٤٣	الشكل (4-3) آلية إعطاء نبضات القذح للمعرج النصف جسري
٤٥	الشكل (5-3) تقنية تعديل عرض النبضة المستخدمة
٤٥	الشكل (6-3) نبضات القذح للذراع العلوي
٤٦	الشكل (7-3) نبضات القذح للذراع السفلية
٤٨	الشكل (8-3) شكل موجة الجهد للمعرج النصف جسري
٤٨	الشكل (1-4) بطاقة الأردوينو
٥١	الشكل (2-4) دائرة مطبوعة للمعرج
٥١	الشكل (3-4) دائرة مطبوعة للمعرج
٥٢	الشكل (4-4) دائرة المخطط الكهربائي للمعرج
٥٢	الشكل (5-4) أحد بورادات المعرج المنفذ
٥٢	الشكل (6-4) بورادات المعرج المنفذ
٥٤	الشكل (7-4) محاكاة الأردوينو على البروتوس
٥٥	الشكل (8-4) شكل جهد الخرج للمعرج المنفذ بحالة اللاحمل
٥٥	الشكل (9-4) شكل جهد وتيار الخرج للمعرج المنفذ بحالة الحمل الأومي
٥٦	الشكل (10-4) شكل جهد وتيار الخرج للمعرج المنفذ بحالة الحمل التحريضي
٥٧	الشكل (11-4) خرج المعرج بحالة اللاحمل

الجدول

١٠	الجدول (1-1) مقارنة بين أداء المعرج عند سويات جهد مختلفة
١٥	الجدول (1-2) حالات عمل المعرج ذو ديودات الربط
١٨	الجدول (2-2) حالات عمل المعرج ذو المكثف العائم
٢١	الجدول (3-2) حالات عمل مفاتيح المعرج وجهد خرج الجسر لكل منها
٢٣	الجدول (4-2) مقارنة بين المعرجات التقليدية والمعرجات متعددة السويات
٢٥	الجدول (5-2) حالات عمل المعرج النصف جسري
٣٤	الجدول (5-2) حالات العمل المختلفة للقواطع الإلكترونية
٥٠	جدول (4-1) مقارنة بين الترانزستورات من نوع الIGBT و الMOSFET

المعادلات

٣٣	 الجهد المستمر تبعاً لعدد الموديولات	(1-2)
٣٣	 الجهد المتناوب تبعاً لعدد الموديولات	(2-2)
٣٧	 الطاقة الكلية المخزنة في المكثفات	(3-2)
٣٧	 الطاقة الأسمية للمكثفات	(4-2)
٣٧	 سعة كل وحدة فرعية للمعرج	(5-2)
٣٧	 علاقة التوتر والتيار من جهة الشبكة	(6-2)
٣٨	 الاستطاعة الظاهرية، الاستطاعة الفعلية للمعرج	(7-2)
٣٨	 قيمة سعة مكثف كل وحدة فرعية	(8-2)
٣٨	 عدد الوحدات الفرعية للمعرج بدلالة التوتر المستمر	(9-2)
٣٩	 سعة مكثف كل وحدة فرعية	(10-2)

ملخص

أصبح استخدام المعرجات ضرورة ملحة في الوقت الحالي، بسبب التوجه الكبير لاستخدام مصادر الطاقات المتجددة من أجل الحفاظ على البيئة وإيجاد مصدر طاقة بديل للوقود الأحفوري، وبما أن الجهد الناتج عن بعض هذه المصادر هو جهد مستمر، فكان لابد من استخدام أنظمة تحويل الطاقة (المعرجات) لتحويل الجهد المستمر إلى جهد متناوب يناسب الشبكة الكهربائية.

يوجد أنواع مختلفة من المعرجات، منها ذات ديود الربط والمكثفات العائمة والجسرية، ومنها ثنائية السوية أو ثلاثية السويات أو متعددة السويات. تركز هذه الرسالة على المعرج متعدد المستويات-الوحدات، لما له من مزايا تتمثل بتردد التقطيع المنخفض وتقليل ضياعات الفصل والوصل بشكل كبير إضافة إلى التغير التدريجي في جهد الخرج مما يقلل من التداخل الكهرومغناطيسي (EMI)، وبسبب المحتوى التوافقي المنخفض للتيار الناتج يمكننا الاستغناء عن المرشحات في جانب التيار المتناوب وبالتالي تقليل التكلفة الكلية.

تمتاز هذه المعرجات بمرونة كبيرة في حالة الأعطال، كونها وحدات منفصلة عن بعضها البعض بحيث عند حدوث عطل في إحدى الوحدات يمكننا استبدالها بدون التأثير على باقي الوحدات.

تم تصميم ونمذجة وتنفيذ معرج متعدد السويات-الوحدات خماسي السويات.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث والدراسات المرجعية

1-1 مقدمة:

يزداد التوجه محلياً وعالمياً لاستثمار الطاقة الشمسية وتزداد استطاعات مشاريع التوليد من الطاقة الشمسية. يتطلب ذلك ويحتاج إلى المعرجات الالكترونية للتبديل من المستمر إلى المتناوب. يكمن التحدي في إنتاج الطاقة من الخلايا الشمسية في استخدام المعرجات من أجل التحويل من الجهد المستمر إلى المتناوب. يضاف إلى ذلك مجال استخدام المعرجات المختلفة في نظم القدرة وفي قيادة المحركات الكهربائية وغيرها.

1-2 إشكاليات البحث

يواجه استخدام الخلايا الشمسية مجموعة من المشاكل والتحديات من أهمها:

- تخفيض عدد العناصر المستخدمة في الدارة الالكترونية.
- الحصول على قيمة الجهد المطلوبة مع ظروف استخدام الخلايا الشمسية متغيرة الخرج مع تغير الإشعاع الشمسي والظروف الجوية الأخرى.
- تحتاج معرجات تحويل الجهد المستمر إلى متناوب إلى محولات مناسبة، وخاصةً إذا كانت القدرة المطلوبة عالية فيكون المحول بأبعاد كبيرة ومقاطع نواقل كبيرة أيضاً.

1-3 الهدف من البحث

تصميم معرج متعدد السويات حيث يتم تأمين مصدر التغذية المستمرة له من خلال ألواح كهروضوئية أو بطاريات مع مراعاة ظروف الأحمال وطرق الربط المناسبة.

1-4 تساؤلات البحث

يتمثل التساؤل الرئيسي في كيفية تصميم معرج يناسب المنظومات الكهروضوئية ويقدم على خرجه جهوداً بسويات متعددة، وتنفيذ هذا المعرج.

1-5 فرضيات البحث

يستند البحث إلى أنواع المعرجات المستخدمة في المنظومات الكهروضوئية.

1-6 أهمية موضوع البحث

إن المعرج المراد تنفيذه يمتاز بعدد من النقاط وأهمها:

- ❖ تخفيض عدد العناصر المستخدمة في الدارة الالكترونية.
- ❖ الحصول على قيمة الجهد المطلوبة مع ظروف استخدام الخلايا الشمسية متغيرة الخرج مع تغير الإشعاع الشمسي والظروف الجوية الأخرى.
- ❖ تحسين جودة الشبكة الكهربائية واستقرارها.
- ❖ القدرة على المزامنة مع الشبكات الكهربائية الأخرى عند مختلف الجهود والترددات.
- ❖ النقل من تشوهات الموجة والتوافقيات الموجودة فيها.

7-1 خطوات البحث

- ❖ الدراسة المرجعية.
- وتم فيها ذكر بعض الدراسات المرجعية التي تناولت المعرجات وأنواعها وآلية استخدامها ومجالات استخدامها والسبب الذي أدى إلى التوجه نحو المعرجات المتعددة المستويات.
- ❖ المعرجات متعدد الوحدات-المستويات.
- ❖ أهمية وتصنيف المعرج متعدد الوحدات-المستويات.
- ❖ مجال استخدام المعرج متعدد الوحدات-المستويات.
- ❖ مقارنة المعرج متعدد الوحدات-السويات مع الأنواع الأخرى من المعرجات.
- ❖ نمذجة وتصميم وتنفيذ مبدل متعدد الوحدات -المستويات.
- حيث تم استخدام برنامج الماتلاب ونمذجة المعرج وتوثيق النتائج التي تم الحصول عليها.
- ❖ تنفيذ نظام كهروضوئي حاوي على مبدل متعدد الوحدات -المستويات.
- ❖ تحليل ودراسة النتائج وأداء المعرج المقترح في النظام الكهروضوئي.
- ❖ النتائج والمقترحات
- حيث تمت المقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها من النمذجة مع النتائج التي تم الحصول عليها بالتطبيق العملي، حيث كانت النتائج متطابقة.

8-1 الدراسات المرجعية

1-8-1 الدراسة المرجعية الأولى:

المعرجات متعددة المستويات التحكم بها وتطبيقاتها

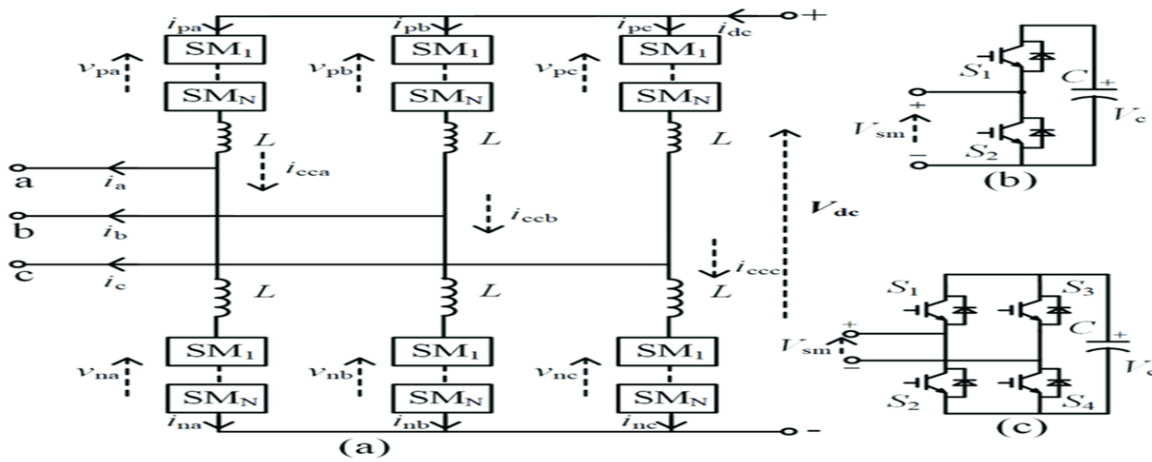
Modular Multilevel Converters: Control and Applications"

1-Fernando Martinez-Rodrigo, 2-Dionisio Ramirez, 3-Alexis B. Rey-Boue, 4-Santiago de Pablo, and Luis Carlos Herrero

24 September 2017; Accepted: 23 October 2017; Published: 26 October 2017

هذه الدراسة المرجعية هي عبارة عن مقالة بحثية في مجال المعرجات متعددة المستويات قام بها مجموعة من الباحثين لتوضيح أهمية هذه المعرجات وكيفية عملها وتطبيقاتها في المجالات المختلفة، وتم عرض الهيكل الأساسي لوحدة التبديل للتشغيل العادي وللقضاء على أعطال التيار المستمر. تم أيضاً ذكر طرق الحفاظ على توازن جهد المكثف.

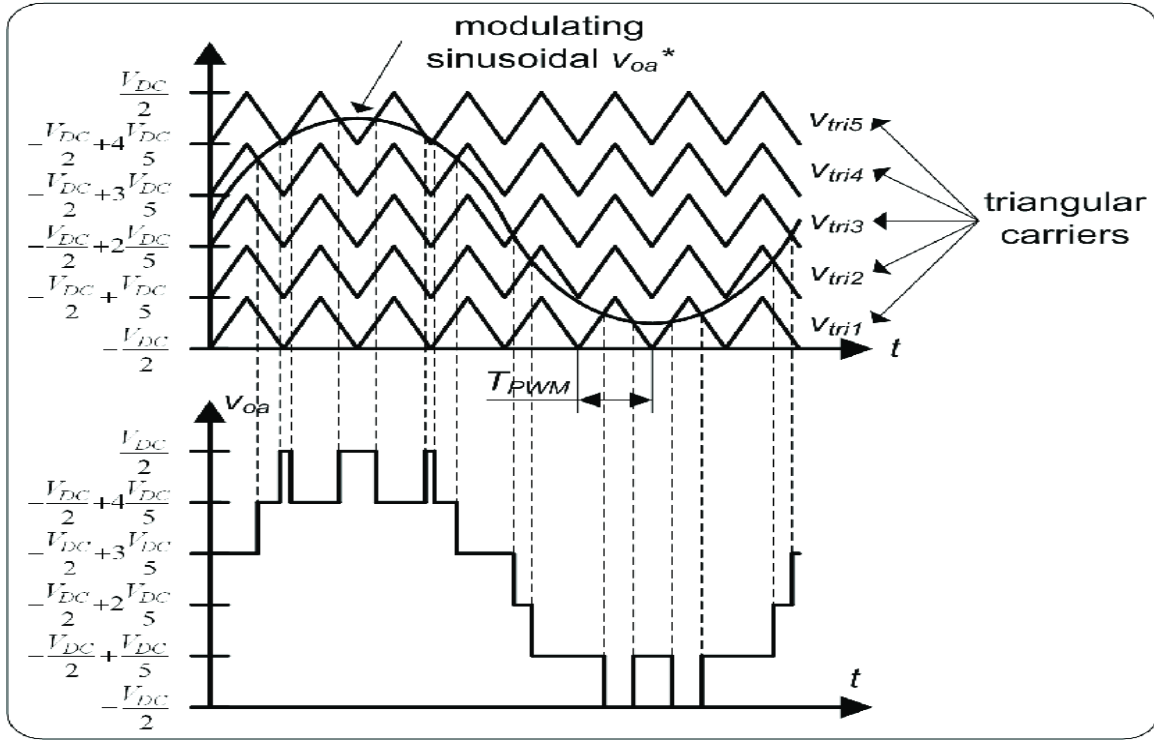
تم في هذا البحث أيضاً تحليل حالات الشبكات غير المتوازنة والمشوهة، ويتم تحليل المخططات المقترحة بحيث تساهم MMC في تحسين جودة الشبكة.



الشكل (1-1) نموذج المعرج النصف جسري والجسري الكامل [8]

ومن خلال التطبيق على برنامج الماتلاب ومن خلال النتائج التي تم الحصول عليها تبين أن

المعرجات متعددة السويات تلعب دور مهم في تحسين جودة الطاقة الكهربائية [8]



الشكل (2-1) تقنية تعديل عرض النبضة [8]

2-8-1 الدراسة المرجعية الثانية

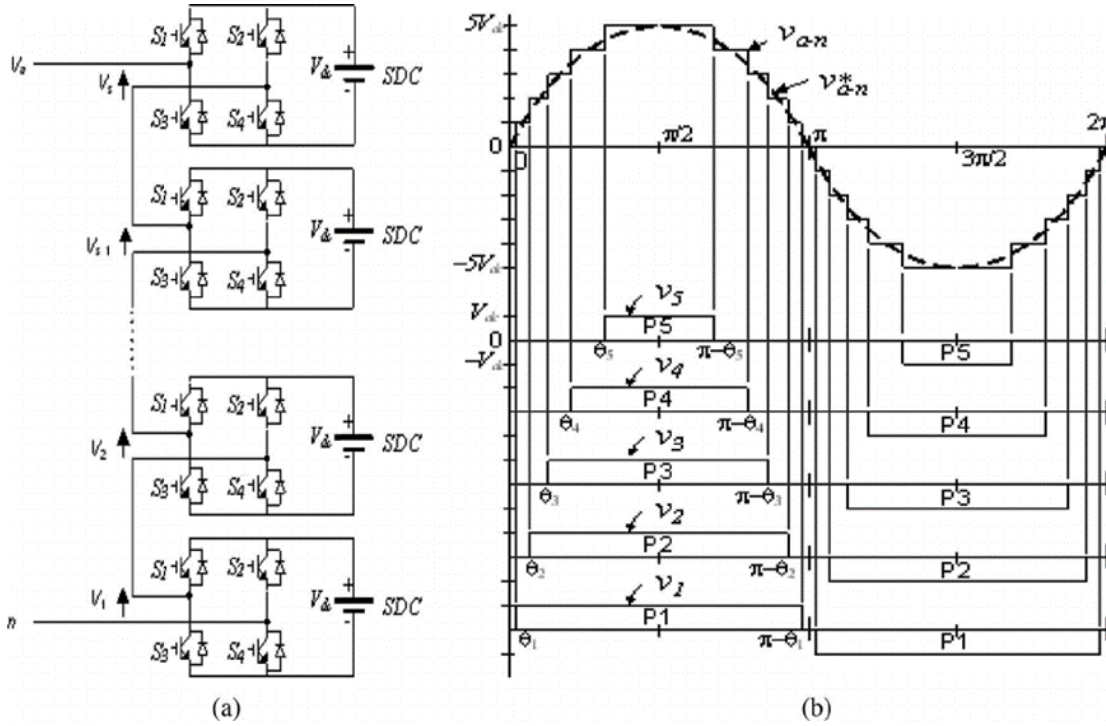
"المعرج الجسري متعدد السويات واستخداماته مع أنظمة الطاقات المتجددة"

Multilevel Converters as a Utility Interface for Renewable Energy Systems"

By L.M. Tolbert, F.Z. Peng

Published in: 2000 Power Engineering Society Summer Meeting

الهدف من هذا البحث تأمين الربط المثالي للشبكة المتناوبة مع مصادر الطاقات المتجددة مع اختلاف التردد والجهد باختلاف الظروف الجوية وتنفيذ مثال تجريبي لمعرج ثلاثي الطور ذو ١١ مرحلة على مستوى ١١ كيلو فولط باستخدام ترانزستورات ال IGBT .



الشكل (3-1) نبضات القدح للترانزستور [9]

حيث تبين من خلال هذا البحث أن ربط مصادر التوليد الموزع مع الشبكة الكهربائية باستخدام المعرجات المتعددة السويات هي الطريقة المثلى بكفاءة تصل لأكثر من 98% وذلك بسبب المميزات التي تضيفها من حيث تردد التبديل المنخفض و تحسين جودة واستقرار الشبكة. [9]

3-8-1 الدراسة المرجعية الثالثة:

تصميم وتنفيذ نظام تحويل الطاقة الكهروضوئية باستخدام معرج متعدد الوحدات المعياري متعدد السويات

Design and Implementation of Photovoltaic Power Conversion using Modular Multilevel Converter (PPCMMC)

by P. Sheeba, M. Nivedha

International Journal of Science and Research (IJSR), November 2013

تناول الباحثين موضوع تطوير النمذجة المتصلة بالشبكة لتحويل الطاقة الكهروضوئية باستخدام محول معياري متعدد المستويات (PPCMMC). يستفيد النظام المقترح من تحويل الطاقة بمرحلة واحدة بأقصى طاقة، ونمذجة تحويل الطاقة الكهروضوئية باستخدام المحول المعياري متعدد المستويات (PPCMMC) كوحدة ببنية في الشبكة. وتم استخدام طريقة الاضطراب والمراقبة لخوارزمية نقطة الطاقة القصوى لتنظيم جهد وصلة التيار المستمر للتيار المستمر.

ولكن الطاقة التي يتم الحصول عليها من الوحدة الكهروضوئية تعمل كمصدر تيار مستمر منخفض الجهد ولها كفاءة تحويل منخفض نسبياً ومن أجل تحسين الكفاءة وتحويل مصدر تيار مستمر منخفض الجهد إلى مصدر تيار متردد قابل للاستخدام نلجأ للمعرجات التي تستخدم لتحويل التيار المستمر إلى تيار متردد. نتائج المحاكاة المقدمة في هذه الورقة تتحقق من تشغيل بنية MMC المقترحة مثل أن خرج التيار المتردد خالٍ من التوافقيات ذات الترتيب الأعلى وأن جهد الشبكة والتيار في الطور. تم استخدام برنامج الماتلاب للتحقق من النتائج. [10]

1-8-4 الدراسة المرجعية الرابعة:

تصميم ومحاكاة وحدات متعددة المستويات العاكس باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة

Design and Simulation of Modular Multilevel Inverter Using PWM

BY: andhakumar Arumugam1 Mugilraj Suresh 2 and Mohanrajan N Dharmalinga

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1084 (2021) 012099

ركز الباحثون على أهمية المعرجات متعددة المستويات في تطبيقات التوتر العالي والمتوسط، وتم ذكر أنواع المعرجات وخصائصها وتم عرض آلية تعديل عرض النبضة وكيفية الحصول على نبضات القذح للترانزستورات، وتم إجراء نمذجة باستخدام الماتلاب. [38]

1-8-5 الدراسة المرجعية الخامسة

العاكس متعدد المستويات: مسح حول البنى التقليدية والمتقدمة، ومخططات التحكم، وتطبيقات نظام الطاقة والتوقعات المستقبلية

Multilevel Inverter: A Survey on Classical and Advanced Topologies, Control Schemes, Applications to Power System and Future Prospects

by

Subhashree Choudhury, Taraprasanna Dash, Salah Kamel, Francisco Jurado

Published: 13 September 2021

في السنوات الأخيرة ، برزت العواكس متعددة المستويات (MLIs) لتكون أكثر تقنيات تحويل الطاقة تمكياً للعديد من العمليات مثل موارد الطاقة المتجددة (RERs) ، وأنظمة نقل التيار المتردد المرنة (FACTS) ، و المحركات الكهربائية ، اكتسبت MLI شعبية في عمليات الطاقة المتوسطة إلى العالية بسبب العديد من المزايا مثل الحد الأدنى من المحتويات التوافقية ، وتقليل تبديد الطاقة من التداخل الكهرومغناطيسي للطاقة ، يمتلك MLI العديد من المزايا الأساسية بالمقارنة مع العاكس التقليدي ذي المستويين ، كزيادة كفاءة النظام العام ، والقدرة على توليد مخرجات عالية الجودة بتردد تبديل منخفض ، وتقليل التشوهات التوافقية الكلية (THD) دون تقليل طاقة العاكس. تم التركيز في هذه المقالة على جوانب مختلفة من MLIs مثل التكوينات المختلفة، وتقنيات التعديل، ومفهوم بنية MLI الجديدة، والتطبيقات المتعلقة بالواجهة مع الطاقة المتجددة [11].

6-8-1 الدراسة المرجعية السادسة

معرجات الجهد النصف الجسرية ومتعددة السويات المستخدمة في أنظمة ال HVDC: وهي رسالة ماجستير في هندسة الطاقة الكهربائية من كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بدمشق بإشراف الدكتور جمال الناصير عام 2016. بينت نتائج هذه الدراسة أن معرجات الجهد النصف جسرية المقترحة ذات ملائمة كبيرة للاستخدام في أنظمة خطوط نقل القدرة بالتيار المستمر HVDC، الأنظمة ذات الاستطاعات الكبيرة. ومن خلال النمذجة على الماتلاب أجريت مقارنة بين مطالات الجهود والتيارات ونسب التشوه الكلي الموافقة لكل منهما. ويبين الجدول (1-2) هذه المقارنة ونلاحظ أنه مع زيادة عدد سويات معرج الجهد المقترح، وتنخفض نسبة التشوه الكلي لموجة جهد خرج المعرج وتياره، ونقترب من شكل موجة جيبي لجهد الخرج للمعرج وتياره،

الجدول (1-1) مقارنة بين أداء المعرج عند سويات جهد مختلفة

عدد سويات الجهد	مطال التيار (A)	THD للتيار	مطال الجهد (V)	THD للجهد
سويتان	33.83	7.11%	675.9	25.37%
ثلاث سويات	32.45	7.06%	649.2	19.12%
17سوية	171.8	1.54%	690.2	4.43%

تمت في هذه الدراسة نمذجة الأنواع المختلفة للمعرجات متعددة السويات، وذلك باستخدام البيئة البرمجية MATLAB/SIMULINK. وقد أوضحت نتائج النمذجة أنه في المعرج ذي الجسري قد انخفضت نسبة التشوه الكلي، وتم الحصول على تيارات وجهود جيبيية صافية تقريباً. [3]

7-8-1 الدراسة المرجعية السابعة

بنية وتطبيقات المحولات المعيارية متعددة المستويات الموسعة

Beyond the MMC: Extended Modular Multilevel Converter Topologies and Applications

By: Pingyang Sun; Yumeng Tian; Josep Pou; Georgios Konstantino

Published in: IEEE Open Journal of Power Electronics

Date of Publication: 20 May 2022

قام الباحثون في هذا البحث بمقارنة مفصلة لأنواع المحولات متعددة المستويات القابلة للتوسعة، بما في ذلك الهياكل والخصائص الفريدة والمزايا والعيوب لكل محول. وفقاً للبنى والوظائف المختلفة، يتم تحليل مخططات التحكم الرئيسية ومجالات التطبيق.

المعرج النصف جسري (HBSM) هو عبارة عن بنية مستخدمة على نطاق واسع تتكون من ترانزستورات ثنائية القطب معزولة البوابة (IGBTs) مع مكثف على التوازي. يستخدم MMC SMS المتتالية مع تردد تبديل منخفض في كل ذراع لتجميع أشكال موجة التيار المتردد. يتم تحديد عدد SMS التي سيتم إدخالها / تجاوزها في كل ذراع من خلال مرحلة التحكم والتعديل بناءً على دورات العمل.

يمكن تطبيق تقنيات تعديل مختلفة في مرحلة التعديل. تقنيات التشكيل النموذجية هي تعديل عرض النبضة (PWM) وتعديل المستوى الأقرب (NLM). مع زيادة عدد SMS، يوفر NLM نهجاً أبسط لتشغيل MMC. ومع ذلك، فإن NLM التقليدية تؤدي إلى تشويه شديد للتيار عند تطبيقها في أنظمة MVDC بسبب انخفاض عدد SMS بشكل كبير. [12]

رقم	عنوان الدراسة المرجعية	الفائدة
1	المعرجات متعددة المستويات التحكم بها وتطبيقاتها	- شرح طريقة وآلية عمل المعرج. - نمذجة النتائج باستخدام البيئة البرمجية ماتلاب.
2	المعرج الجسري متعدد السويات واستخداماته مع أنظمة الطاقات المتجددة	- توضيح أهمية المعرجات المتعددة المستويات في تحسين جودة الشبكة الكهربائية. - أهمية المعرجات المتعددة المستويات في ربط المزارع الريحية بالشبكة الأرضية.
3	تقنية التعديل المستخدمة في المعرجات متعددة الوحدات - السويات في أنظمة النقل HVDC	- تنفيذ نموذج مخبري يعتمد على المعرج النصف جسري المتعدد المستويات. - مردود النموذج 0.96%
4	تصميم ومحاكاة وحدات متعددة المستويات العاكس باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة	تم التعريف بأنواع المعرجات وطريقة تعديل عرض النبضة المست
5	العاكس متعدد المستويات: مسح حول البنى التقليدية والمتقدمة، ومخططات التحكم، وتطبيقات نظام الطاقة والتوقعات المستقبلية	- التعريف بالأنواع المختلفة للمعرجات متعددة السويات. - التعريف بمزايا ومساوئ كل نوع من أنواع المعرجات.
6	معرجات الجهد نصف الجسرية ومتعددة السويات المستخدمة في نظم ال HVDC:	- بينت الدراسة أن المعرجات متعددة السويات هي الواجهة الأمثل لربط مصادر التوليد الموزع مع الشبكة الكهربائية. - تحسين كفاءة الشبكة الكهربائية لأكثر من 98% - تحسين جودة واستقرار الشبكة.
7	بنية وتطبيقات المحولات المعيارية متعددة المستويات الموسعة	تم في هذه الدراسة مقارنة أنواع المحولات متعددة المستويات القابلة للتوسعة، بما في ذلك الهياكل والخصائص الفريدة والمزايا والعيوب لكل محول.

خلصت الدراسة المرجعية إلى أهمية استخدام المعرجات متعددة السويات وخاصة مع مصادر الطاقة المتجددة وذلك لما تتمتع من مزايا تم ذكرها سابقاً.

الفصل الثاني

المعرجات متعددة السويات وتركيبها البنيوي

TOPOLOGY OF MULTI LEVEL INVERTERS

1-2 مقدمة

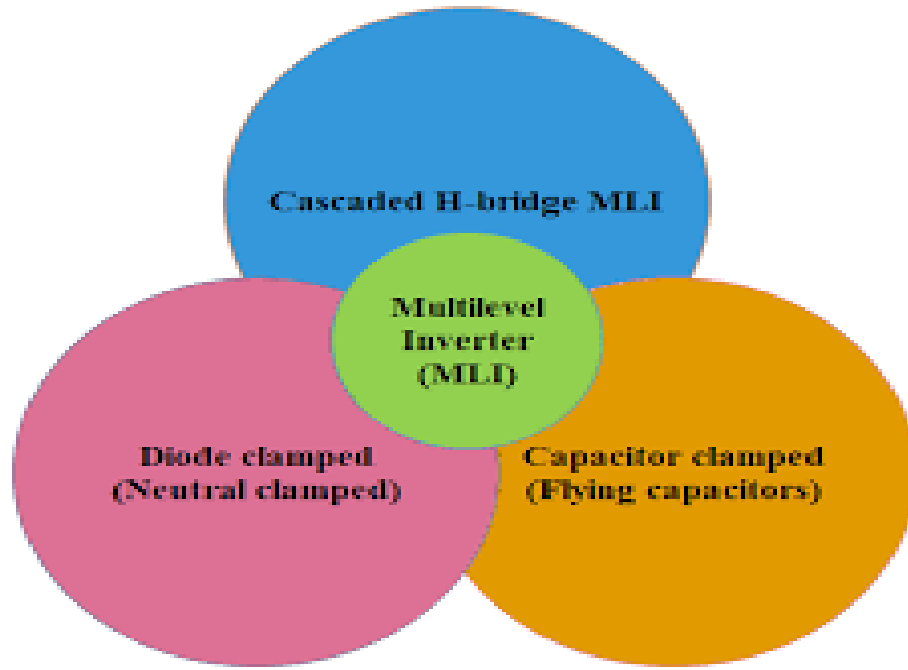
تعد المعرجات متعددة السويات من التقنيات الحديثة ذات المردود العالي، إضافة لما تتمتع به من مزايا، كل ذلك فتح المجال لاستخدامها في التطبيقات في مختلف المجالات.

2-2 المعرجات المتعددة السويات [1],[13]

تتوفر المعرجات متعددة السويات ببنى متعددة، أكثرها شيوعاً H-BRIDGE MULTI LEVEL INVERTER والمعروفة اختصاراً بـ (HMI)، ويشكل الجسر H-BRIDGE أحادي الطور وحدتها الأساسية.

يشكل المعرج متعدد السويات ذو ديودات الربط النوع الثاني Diode Clamped multilevel inverter، والذي ينفذ بواسطة $(2^{*}(n-1))$ من القواطع الالكترونية، وتربط المكثفات على التسلسل عبر قضيب الجهد المستمر المحدد عن طريق الديودات. ويوجد نوع آخر من المعرجات المتعددة السويات وهو معرج المكثفات العائمة (FLYING CAPACITOR MULTILEVEL INVERTER(FCMI)). الذي يشبه في تركيبه معرج ديودات الربط متعدد السويات ولكنه لا يحتاج لأي ديودات، حيث يستخدم المكثف بدلاً منه. ويمتلك المعرج متعدد السويات مزايا أكثر من المعرج التقليدي ذي السويتين، ولكن العائق الوحيد هو استخدام عدد أكبر من القواطع الالكترونية. يبين الشكل (1-2) أنواع المعرجات متعددة السويات.

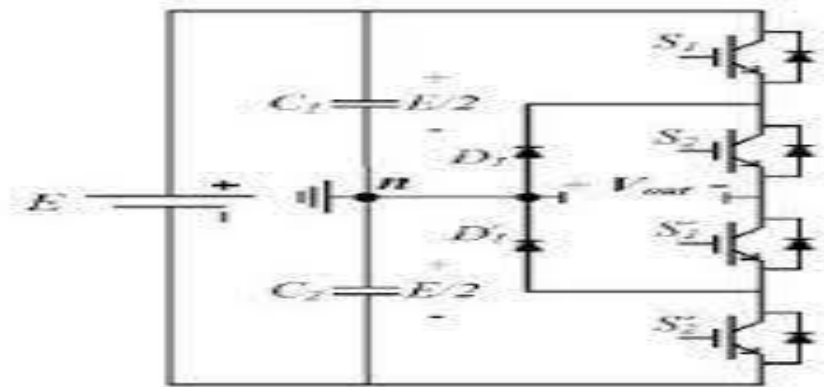
وتتميز المعرجات المتعددة السويات بمردودها العالي، وقدرتها على العمل عند الجهد العالي، والضياعات المنخفضة، والتداخل الكهرومغناطيسي المنخفض. والمعرج متعدد السويات عبارة عن نظام تحويل طاقة إلكتروني قادر على توليد جهد متناوب بتردد محدد أو بجهد وتردد متغيرين على خرجه، وتعد هذه المعرجات من أفضل الخيارات الممكن استخدامها في تطبيقات الجهد العالي. أبسط تقنية تم تبنيها هي ربط المعرجات على التوازي أو على التسلسل للمعرجات التقليدية لتشكيل معرج متعدد المستويات.



الشكل (1-2) أنواع المعرجات متعددة المستويات

1-2-2 المعرجات متعددة السويات ذات ديود الربط

يتألف المعرج من زوج من القواطع الالكترونية التسلسلية العلوية والسفلية وعلى التفرع موصل معها مكثفتين مربوطتين على التسلسل، ويكون مصعد الديود موصل بنقطة المنتصف (الحيادي) للمكثفات ويكون مهبط الديود مع نقطة المنتصف لزوجي القواطع الالكترونية العلوية، ويتصل المهبط للديود السفلي مع نقطة الوسط للمكثفات، ويقسم توتر المستمر إلى توترات أقل، كما هو مبين بالشكل (2-2).



الشكل (2-2) المعرج متعدد المستويات ذو ديود الربط [14] [13]

يوضح الشكل (2-2) البنية الأساسية للمعرج متعدد السويات ذو ديود الربط ثلاثي السويات حيث يحدد عدد العناصر للدائرة على الشكل التالي:

$$n = \text{عدد السويات}$$

$$= 2(n-1) = 4 \text{ عدد الترانزستورات}$$

$$= 2(n-1)(n-2) = 2 \text{ عدد الديودات}$$

$$= 2(n-1) = 2 \text{ عدد المكثفات}$$

تتمتع المعرجات متعددة السويات ذات ديودات الربط بالعديد من المزايا، مما يؤهلها للاستخدام في مجالات مختلفة. وهي مجموعة من محولات الطاقة متعددة المستويات التي تتميز باستخدام الديودات لضمان المشاركة المناسبة للجهد عبر مفاتيح الطاقة.

عند استخدام هذا النوع من المعرجات فإننا نحصل على شكل موجة عالية الجودة مقارنةً بالمعرجات ثنائية المستوى غالبًا ما تكون موجودة في تطبيقات الجهد المتوسط، حيث تعد القدرة الفائقة لجهد الحجب مطلبًا أساسيًا أيضًا.

آلية العمل:

تستخدم الديودات في هذا النوع من المعرجات من أجل تمرير التيار والمحافظة على سوية توتر محددة، مقابلة للتوتر على المكثف.

فمن أجل توليد توتر خرج خماسي السويات يجب أن تعمل القواطع الالكترونية بترابعية معينة، يبين الجدول (1-2) حالات العمل المختلفة للمعرج، ونلاحظ من الجدول أنه من أجل الحصول على قيمة التوتر الكلي المطبق نقوم بتشغيل (S_1, S_2, S_3, S_4) والقواطع الالكترونية (S_1', S_2', S_3', S_4') بحلة إيقاف تشغيل، ومن أجل الحصول على قيمة توتر مساوية للصفر تكون القواطع الالكترونية (S_3, S_4) بحالة تشغيل، والقواطع الالكترونية (S_1', S_2') بحالة إيقاف تشغيل، وهكذا من أجل بقية الحالات كما موضح في الجدول (1-2).

الجدول (1-2) حالات عمل المعرج ذو ديودات الربط

S_1	S_2	S_3	S_4	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'	V_0
1	1	1	1	0	0	0	0	$V_{dc}/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$V_{dc}/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-V_{dc}/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-V_{dc}/2$

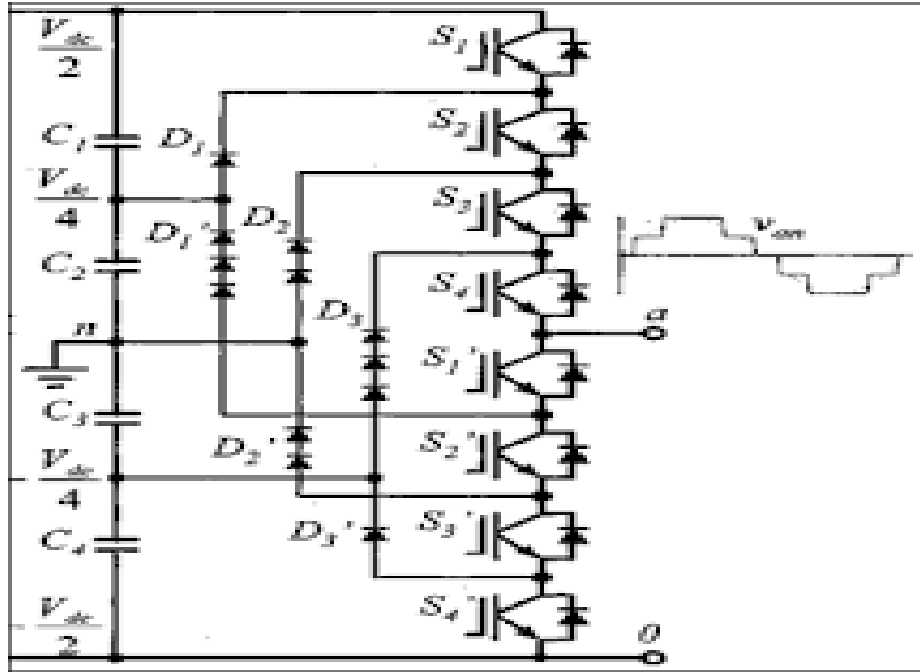
يبين الشكل (3-2) مخطط دائرة المعرج الجسري ذو ديود الربط خماسي السويات حيث يتكون من العناصر التالية

$$n=5 \text{ عدد السويات}$$

$$= 2(n-1) = 8 \text{ عدد القواطع الالكترونية}$$

$$= (n-1)(n-2) = 12 \text{ عدد الديودات}$$

$$= 4(n-1) \text{ عدد المكثفات}$$



الشكل (3-2) دائرة المعرج الجسري ذو ديودات الربط

❖ مزايا المعرجات ذات ديودات الربط:

- تحتاج لعدد أقل من مكثفات التوصيل إلى الم منبع المستمر، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في تطبيقات الجهد العالي وتنظيم سرعة محركات نظم القيادة باستطاعة عالية.
- يعد نظام التحكم بها بسيط نسبياً.
- يمكن شحن مكثفاتها مسبقاً.
- تكون بمردود عالي إذا تم تشغيلها عند التردد الاسمي.

- تحتاج لعدد عناصر أقل منها لحالة النوع الجسري-H.
- يمكن توصيلها بشكل متعاكس Back to Back.
- ❖ مساوي المعرجات من النوع Diode-clamped:
- توجد صعوبة في التحكم بتدفق القدرة الفعلية في المعرجات الأحادية الطور.
- يتناسب عدد ديودات الربط اللازمة مع مربع عدد السويات، وبالتالي يمكن أن يصبح عددها كبير، ويقود إلى تعقيد بناها في حالة زيادة عدد السويات.
- لا تتمتع بالمرونة وإمكانية إعادة البناء عند حدوث عطل في أي مفتاح (قاطع) فيها، يؤدي ذلك إلى خروج المعرج عن العمل والفصل عن الشبكة.
- ❖ مجالات استخدام المعرجات ذات ديودات الربط
- تصلح المعرجات لربط خطوط نقل القدرة بالتيار المستمر مع خطوط النقل بالتيار المتناوب.
- تمتاز المعرجات متعددة السويات ببنية هندسية مناسبة للاستخدام في التحكم بسرعة المحركات في نظم القيادة باستطاعات متوسطة وكبيرة.
- تصلح لتطبيقات تعويض الاستطاعة الردية.
- تناسب نظم الربط بالجهود العالية

يستخدم الديود العكسي المبين في الشكل (2-2) الذي يمثل مخططاً للمعرج متعدد السويات ذي ديودات الربط، من أجل تأمين المسار القسري الذي يفرضه الحمل الكهربائي وتخفف زيادة عدد سويات المعرج من التغيرات الحادة للتيار والجهد عند عمليات الوصل والفصل للعناصر الالكترونية، وتخفف من مطال التوافقيات الناتجة عن التبديل.

2-2-2 المعرجات ذات المكثفات العائمة

سميت بهذا الاسم بسبب وجود مكثفات عائمة الطرفين، حيث يتغير جهد مربطي كل مكثفة ويأخذ أكثر من قيمة. تلعب هذه المكثفات دور مولدات جهد (يجب التحكم بجهودها). يجب الانتباه إلى أنه يجب عدم تشغيل منبعين معاً بنفس الطرف وذلك لتجنب قصر منابع الجهد مع بعضها. يحدد فرق التوتر بين مكثفتين تدرج سويات التوتر في موجة الخرج. [14] يوضح الشكل (2-4) شكل دائرة المعرج ذو المكثف العائم خماسي السويات، حيث يحدد عدد العناصر للدائرة على الكل التالي:

$$n=5 \text{ عدد السويات}$$

$$= 8 \text{ عدد القواطع الترانزستورية}$$

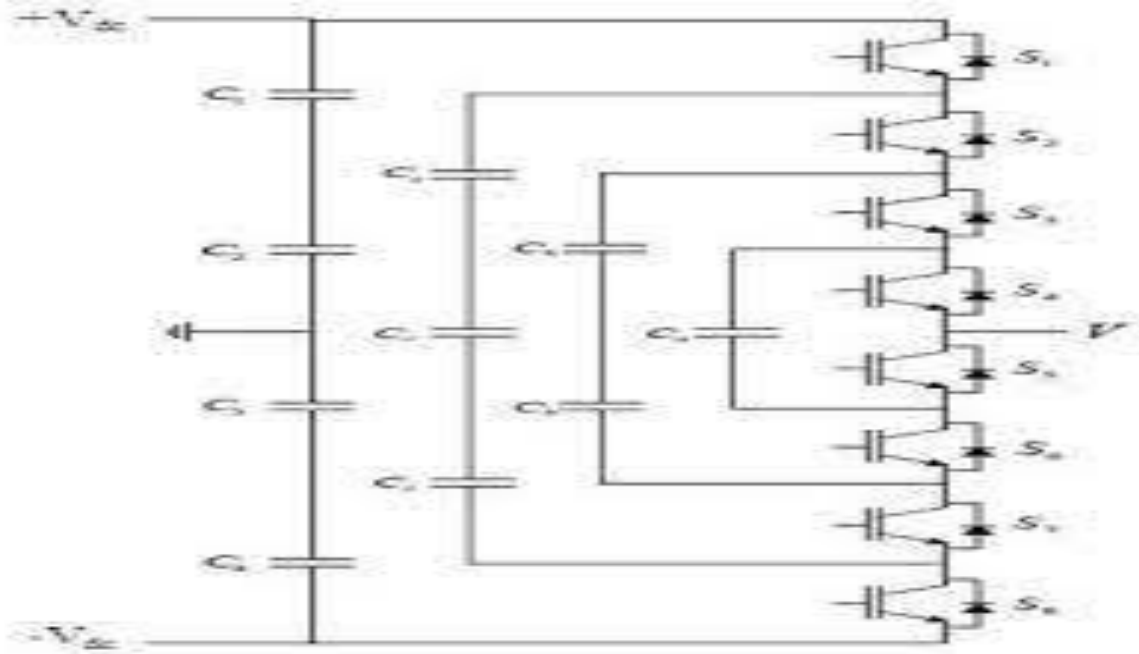
$$= 10 \text{ عدد المكثفات}$$

آلية العمل:

من أجل الحصول على قيمة التوتر الكلي المطبق تكون القواطع الالكترونية (S_1, S_2, S_3, S_4) بحالة تشغيل، والقواطع الالكترونية (S_1', S_2', S_3', S_4') بحالة إيقاف تشغيل، ومن أجل الحصول على قيمة توتر مساوية للصفر تكون القواطع الالكترونية (S_1, S_2, S_1', S_2') بحالة تشغيل، والقواطع الالكترونية (S_3, S_4, S_3', S_4') بحالة إيقاف تشغيل. والحصول على بقية الحالات كما هو موضح في الجدول (2-2).

الجدول (2-2) حالات عمل المعرج ذو المكثف العائم

S_1	S_2	S_3	S_4	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'	V_0
1	1	1	1	0	0	0	0	$V_{dc}/2$
1	1	1	0	1	0	0	0	$V_{dc}/4$
1	1	0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	$-V_{dc}/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-V_{dc}/2$



الشكل (4-2) المعرج ذو المكثف العائم [13]

❖ مزايا المعرجات من النوع Flying Capacitor:

- تسمح عدد السويات الكبيرة باختزان المكثفات قدرة إضافية في أثناء حالات التفريغ الطويل.
- كلما زاد عدد سويات التوتّر انخفضت نسبة التشوه التوافقي.
- المعرج قادر على العمل خلال فترات انقطاع قصيرة الأمد وانخفاض جهد كبير بسبب وجود عدد كبير من المكثفات في بنيته.
- يمكن التحكم بجريان الاستطاعة الفعلية والردية.

❖ مساوئ المعرجات من النوع Flying Capacitor:

- صعوبة التحكم في متابعة سويات الجهد على كل المكثفات.
- إن عملية الشحن المسبقة للمكثفات عند نفس سويات الجهد قبل عملها عملية معقدة جداً.
- إن مردود المعرج عند استخدامه في نقل الاستطاعة الفعلية صغير.
- التكاليف العالية بسبب العدد الكبير للمكثفات، وأكبر من تكاليف الديودات في المعرج من النوع diode-clamped.
- جريان الاستطاعة الفعلية في المعرجات الأحادية الطور.
- يتناسب عدد ديودات الربط المطلوبة بشكل تربيعي مع عدد السويات، والتي يمكن أن يصبح تحديدها لعدد كبير من مستويات الإخراج معقداً.
- لا يتمتع المعرج بالمرونة، ولا يمكن إعادة بناء المعرج عند حدوث عكّل ونتيجة لذلك فإن هذه البنية الهندسية ليست عملية، أي في حالة عطل في أي قاطع، يصبح المعرج بأكمله مفصول عن الشبكة.

❖ مجالات استخدام المعرجات من النوع Flying Capacitor:

- في قيادة المحركات التحريضية.
- في تطبيقات التعويض بالاستطاعة الردية.
- في تطبيقات AC-DC and DC-AC.
- في التطبيقات ذات المحتوى التوافقي العالي،
- في مقومات التيار الجيبية.

3-2-2 المعرجات الجسرية المتعاقبة

المعرج متعدد المستويات لجسر H المتتالي (HMI(HBridge Multi-Level Inverter) هو عبارة عن مجموعة من خلايا الجسر H، تحتوي خلية الجسر H على أربعة مفاتيح تبديل أشباه موصلات للطاقة، كما هو موضح في الشكل (2-5). تعتمد خصائص أدائها، مثل التشوه التوافقي الكلي (THD)، وفقدان التبديل، وخسارة التوصيل، على مخطط التشكيل. بالنسبة إلى HMI(H-Bridge Multi-Level Inverter)، يمكن تقسيم

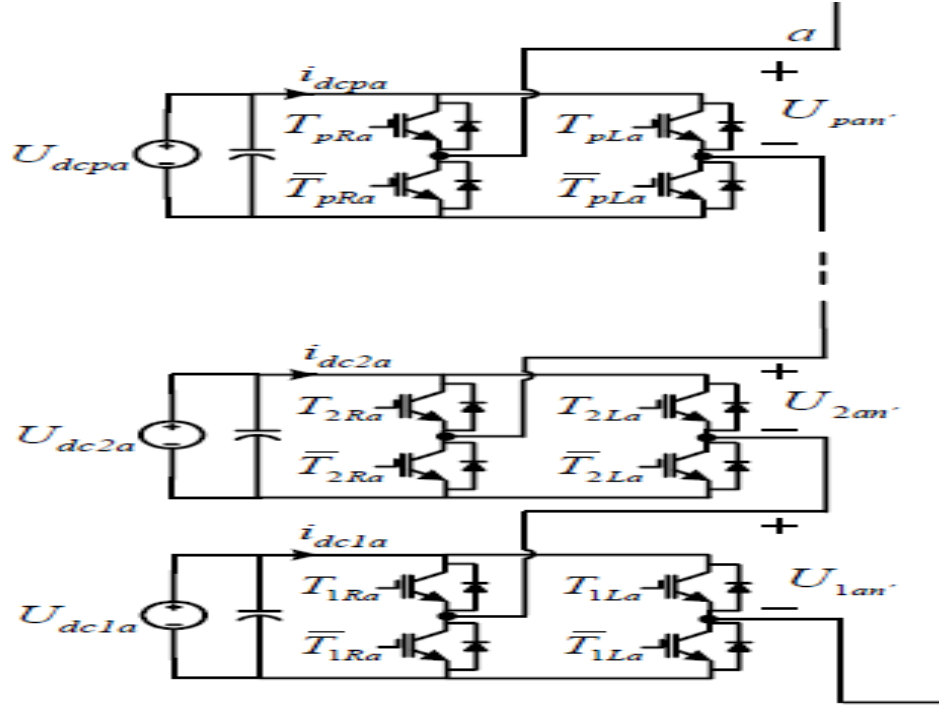
مخططات التشكيل إلى طريقة PWM ذات المستوى المزاح (LS-PWM) وطريقة PWM المزاحة على مراحل (PS-PWM) [31]. تولد طريقة LS-PWM خسارة تبديل موحدة بين الخلايا. ومع ذلك، فإنه يحتوي على ترددات تبديل غير متكافئة، ولا يتم توزيع وقت التوصيل لأجهزة التبديل بالتساوي. تسبب هذه الخصائص فترات حياة غير متساوية بين الخلايا [36].

تقسم المعرجات الجسرية المتعاقبة:

- المعرجات الجسرية المتعاقبة ذات الجسر الكامل.
- المعرجات الجسرية المتعاقبة النصف جسرية.

المعرجات الجسرية المتعاقبة:

يبين الشكل (5-2) أحد هذه المعرجات. حيث تتكون من مجموعة من الجسور المربوطة مع بعضها بحيث نحصل على قيمة التوتر المطلوبة



الشكل (5-2) مخطط دائرة المعرج الجسري أحادي الطور

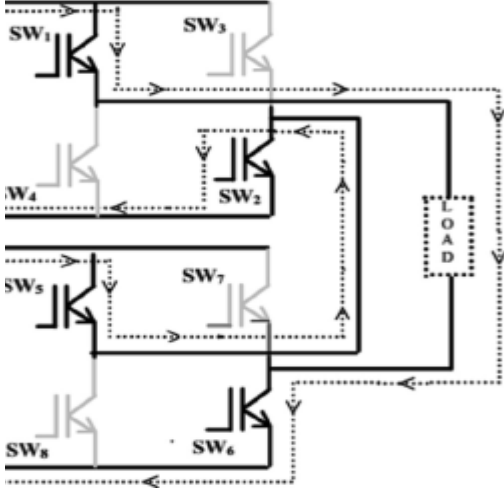
يوضح الجدول (3-2) حالات عمل المعرج ذو الخمس مستويات، ويعرض الشكل (6-2) حالات التبديل الممكنة فيه، وجهد خرج الجسر في كل مرة.

فمن أجل الحصول على قيمة التوتر الكلية يجب أن تكون القواطع الالكترونية $S_{W1}, S_{W2}, S_{W5}, S_{W6}$ بحالة تشغيل، والقواطع الالكترونية $S_{W3}, S_{W4}, S_{W7}, S_{W8}$ بحالة إطفاء. وبقية الحالات موضحة في الجدول (3-2) والشكل (6-2)

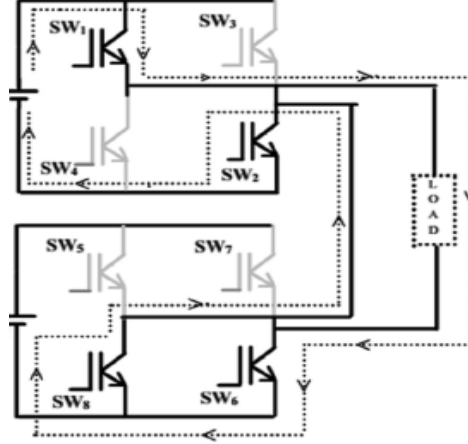
الجدول (3-2) حالات عمل مفاتيح المعرج وجهد خرج الجسر لكل منها

vload	Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Sw5	Sw6	Sw7	Sw8
vdc	1	1	0	0	1	1	0	0
Vdc/2	1	1	0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	0	1	0	1
-vdc/2	0	0	1	1	0	1	0	1
-vdc	0	0	1	1	0	0	1	1

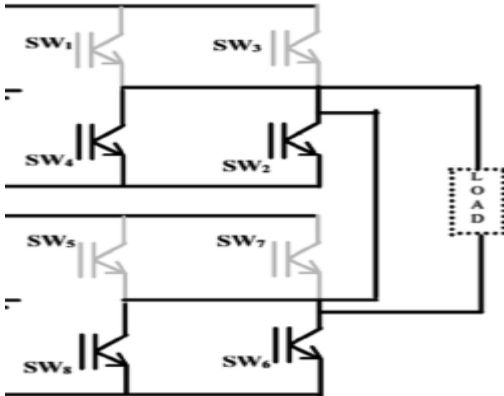
يوضح الشكل (6-2) مسارات التيار في القواطع الترانزستورية في كل حالة نحصل فيها على قيمة توتر مختلفة.



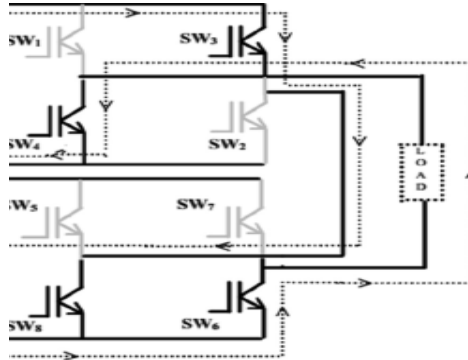
a) $V_{load} = V_{dc}$



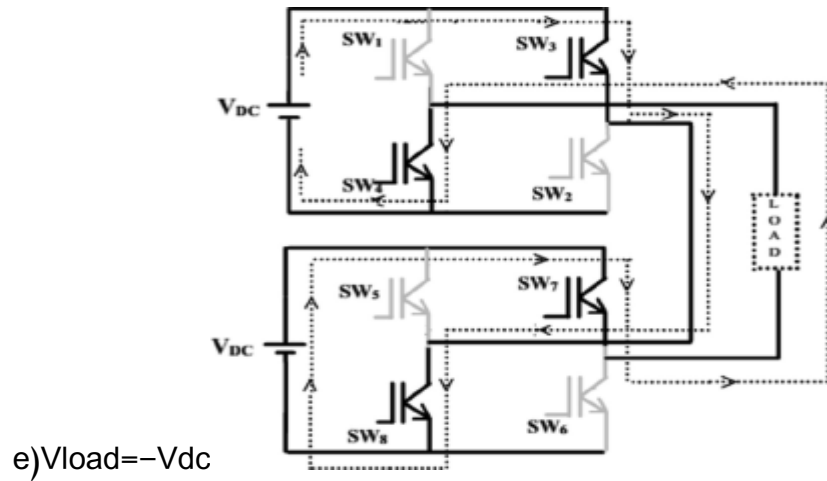
b) $V_{load} = V_{dc}/2$



c) $V_{load} = 0$



d) $V_{load} = -V_{dc}/2$



الشكل (2-6) حالات عمل المعرج الجسري

❖ مزايا المعرجات من النوع H-Bridge

- في هذا النوع من المعرجات يكون العدد الكلي لمستويات جهد الخرج أكثر من ضعف عدد منابع التيار المستمر المتوفرة.
- يؤمن استخدام منابع منفصلة للتيار المستمر عزلاً بين المصادر.
- الجهود العكسية على القواطع الالكترونية تكون قليلة وذلك لأن الجهد الأسمى لكل جسر يكون منخفض.
- تتمتع هذه الجسور بمرونة عالية، أي يمكن إعادة التجميع في حالة حدوث عطل أسهل.

❖ مساوئ المعرجات الجسرية متعددة السويات H-Bridge:

- تحتاج إلى منابع تيار مستمر منفصلة لكل وحدة جسرية منفصلة.
- على الرغم من الجهود العكسية صغيرة، إلا أن توزيع التيار يكون غير متساوي على الجسور.

❖ مجالات استخدام المعرجات H-Bridge المتتالية متعددة السويات:

- في المعوضات الردية الساكنة VAR.
- ربط منابع مصادر الطاقات المتجددة إلى الشبكة.
- تستخدم في الأنظمة الحاوية على مدخرات.
- تم اقتراح استخدامها في السيارات الكهربائية الحاوية على مكثفات فائقة السعة.
- في المرشحات الفعالة.
- تمت المقارنة بين المعرجات التقليدية والمعرجات متعددة السويات كما هو موضح في الجدول (2-4).

الجدول (4-2) مقارنة بين المعرجات التقليدية والمعرجات متعددة السويات

	المعرجات التقليدية	المعرجات متعددة السويات
1	ذات توافقيات أعلى في جهد الخرج	ذات توافقيات أقل في جهد الخرج
2	غير قابل للاستخدام في تطبيقات الجهد العالي	قابل للاستخدام في تطبيقات الجهد العالي
3	تغييرات الجهد عالية وبالتالي التداخل الكهرومغناطيسي كبير	تغييرات الجهد منخفضة وبالتالي التداخل الكهرومغناطيسي صغير
4	هيكلية المعرج وآلية التحكم بسيطة	هيكلية المعرج وآلية التحكم تزداد تعقيداً بزيادة عدد السويات

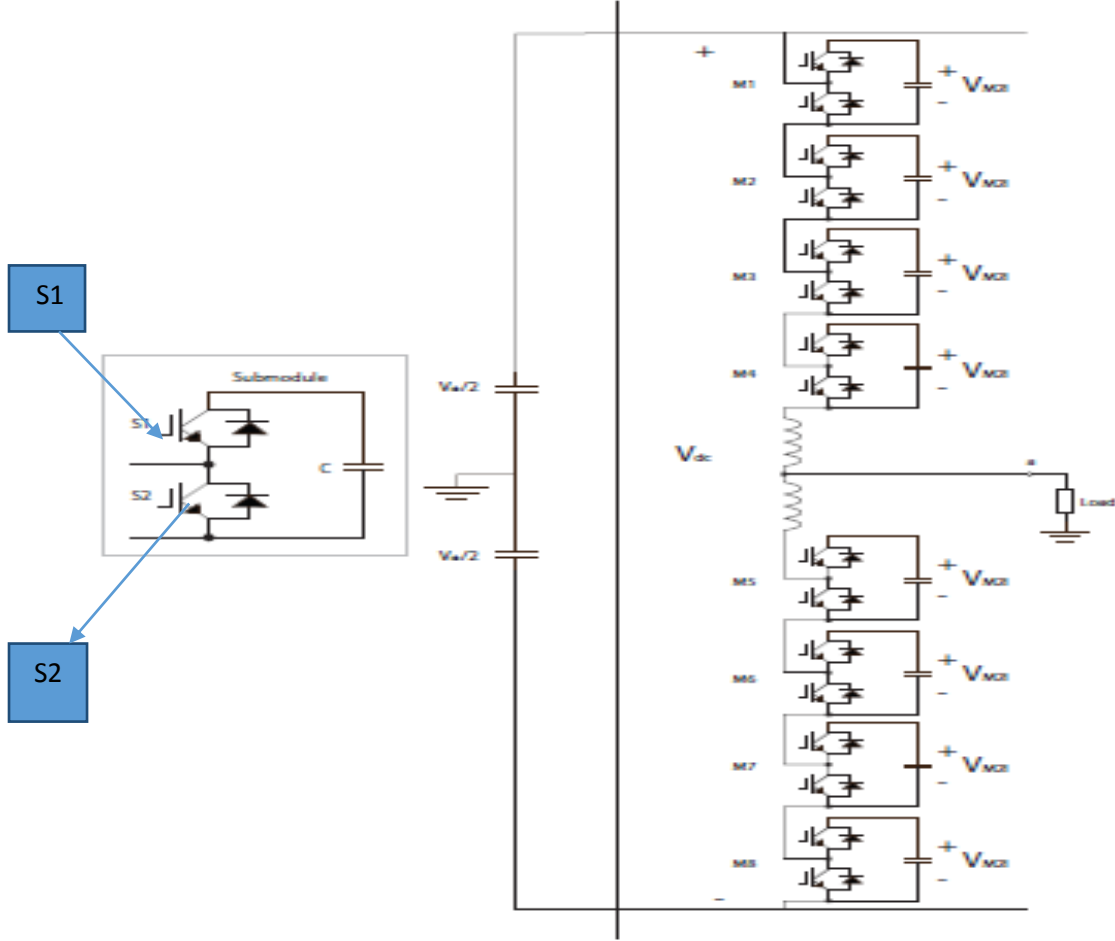
4-2-2 المعرجات الجسرية المتعاقبة النصف جسرية

يتكون هذا النوع من المعرجات من عدد من الوحدات الفرعية الموصولة على التسلسل لتوليد مستوى جهد خرج معين، حيث تتكون كل وحدة فرعية من ترانزستورين ومكثف موصول معها على التفرع، وكل طور يتكون من ذراعين ولكل ذراع عدد محدد من الوحدات الفرعية بالإضافة لمكثف الجهد المستمر المشحون ب

$$V_{m1} = V_{dc}/(m - 1)$$

لكل وحدة فرعية. كما مبين بالشكل (2-7) الذي يمثل نموذج المعرج النصف جسري خماسي السويات، يمكن لكل ذراع بعد ذلك توليد الحد الأقصى للجهد ($V_{dc} = n * V_{m1}$)، إذ توصل الوحدات في كلا الذراعين أو يتم إخراجها لإنشاء جهد الخرج المتناوب المطلوب. لذا يحتاج المعرج ذو m سوية جهد عدد سويات فرعية وفق العلاقة: إلى ($n = m - 1$) لكل ذراع. تعطي كل وحدة فرعية قيمتين للجهد هما ($v, 0$)، وهذا ما يفسر الحاجة لذراعين في كل مرحلة طور. وتقيد المفاعلة التحريضية كل ذراع مهمتها رفع الجهد الكهربائي عند تشغيل الوحدات وإخراجها. لتفعيل وحدة فرعية معينة في ذراع أحادي الطور يكون القاطع S_1 بحالة عمل والقاطع (S_2) في حالة حيز، وذلك لجعل منبع الجهد يسهم في جهد الخرج، وأما لتجاوز وحدة فرعية فيتم حيز القاطع (S_1) وتشغيل (S_2) في هذه الوحدة الفرعية، كما يحدد الذراع الذي سيوصل وحدة فرعية به إذا كان الجهد المطلوب موجباً أو سالباً، وأي وحدة فرعية في الذراع تحدد بواسطة تعديل الموازنة، إذ إن تعديل الموازنة هي البرنامج الذي يختار الوحدات التي ستعمل لكل حالة لتحقيق توازن الجهد في جميع الوحدات. ويمكن تغيير الترتيب الذي تعمل به الوحدات الفرعية مع بعضها البعض لإبقاء المنابع فيها متوازنة.

يجب أن يكون كل قاطع الكتروني في الوحدة الفرعية قادر على تحمل جهد مكثف وحدة فرعية على الأقل وكما أن الجهد الذي يجب على القاطع الالكتروني تحمله موصوفاً مع إجمالي الجهد المستمر هو $V_{dc}/(m-1)$ نظراً إلى أن الجهد الهابط على كلا الطرفين هو V_{dc} وإن عدد الوحدات الفرعية الموجودة في الذراعين هو $m-1$. [14]



الشكل (7-2) بنية المعرج النصف جسري (متعدد السويات، متعدد الوحدات)

5-2-2 آلية عمل المعرج النصف جسري:

يوضح الجدول (5-2) حالات التشغيل المختلفة للمعرج النصف جسري وآلية الحصول على قيم الجهود المختلفة وتراتبية عمل القواطع التي يجب أن تكون بحالة عمل للحصول على قيمة الجهد المطلوبة.

من أجل الحصول على قيمة التوتر الكلي يتم تشغيل القواطع الترانزستورية (S2) في الوحدات الفرعية M5, M6, M7, M8 في الذراع السفلية، وبالمقابل في الذراع العلوية يكون مرور التيار عن طريق الديودات وبالتالي شحن جميع المكثفات في الذراع العلوية، أي الحصول على قيمة التوتر الكلي. ومن أجل الحصول على نصف قيمة التوتر الكلي نقوم القواطع الترانزستورية (S2) في الوحدات الفرعية M1, M6, M7, M8 وبالمقابل

بالذراع العلوية يتم شحن المكثفات الموجودة في الوحدات الفرعية M2,M3,M4 والمكثف الموجود في الوحدة الفرعية M5 . وبنفس الطريقة من أجل باقي الوحدات كما هو موضح بالجدول (2-5).

الجدول (2-5) حالات عمل المعرج النصف جسري

Vload	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Vdc/2	0	0	0	0	1	1	1	1
Vdc/4	1	0	0	0	0	1	1	1
0	1	1	0	0	0	0	1	1
-vdc/4	1	1	1	0	0	0	0	1
-Vdc/2	1	1	1	1	0	0	0	0

❖ مزايا المعرج النصف جسري:

- تردد التقطيع الفعلي منخفض ولكنه فعال للغاية: حيث يؤدي ذلك إلى تقليل ضياعات الفصل والوصل.
- تغيير تدريجي في جهد الخرج مما يؤدي إلى تقليل التداخل الكهرومغناطيسي (EMI).
- بسبب المحتوى التوافقي المنخفض للتيار الناتج مما يتيح إمكانية الاستغناء عن المرشحات.
- يساعد تكرار بسبب الوحدات الإضافية التي يمكن توصيلها لاستبدال الوحدات المعطلة.
- بنية بسيطة مقارنة بالبنية الهندسية للمعرجات المتعددة السويات الأخرى.
- يتم استخدام المفاعلة للحد من التيار عند خطوات الجهد، أيضاً لترشيح التيار.

❖ مساوئ المعرج النصف جسري:

- عرضة للأعطال في DC-Link. لأن الديودات العكسية تكون بحالة انحياز أمامي.
- تحتاج إلى الحماية في حالة عطل بالقواطع الإلكترونية في الوحدات.
- هناك حاجة إلى تحكم إضافي في موازنة جهد مكثفات الوحدات.
- الحاجة إلى مراقبة جميع قيم جهد المكثفات والتيارات الأطوار (اعتماداً على طريقة موازنة الجهد).
- التيار الدائر في طرفي الطور يتكون بشكل أساسي من التوافقية الثالثة، مما يزيد من ضياعات العناصر.

- بالنسبة لتطبيقات التيار العالي، يمكن أن يكون انخفاض الجهد عبر مفاعلة الطور كبيراً ويمكن أن يتسبب بضياعات استطاعة فعلية إضافية.

❖ تطبيقات المعرج النصف جسري:

- إن تكرار عمل الوحدات في كل طور أو ذراع هو أمر مهم جداً للتجارب التي تعمل لفترات طويلة من الوقت ويصعب إيقاف المعرج في حالة حدوث عطل.
- انخفاض التكاليف في تطبيقات الجهد المتوسط بسبب انخفاض الجهود الاسمية للقواطع الإلكترونية.
- الأشكال الموجية الجيبية ذات المحتوى التوافقي المنخفض التي تنتج عند استخدام هذا النوع من المعرجات يقلل من حجم المرشحات المستخدمة في المعرج.
- تردد التقطيع منخفض، يصل عادةً إلى 20 مرة من التردد الاسمي.

2-6 تقنية تعديل عرض النبضة وأنواعها

هي طريقة للتحكم في متوسط الطاقة التي توفرها إشارة كهربائية. يتم التحكم في متوسط قيمة الجهد (والتيار) الذي يتم تغذيته للحمل، كلما طالت مدة تشغيل المفتاح، زادت الطاقة الإجمالية الموفرة للحمل.

الميزة الرئيسية لـ PWM هي أن ضياعات الاستطاعة في أجهزة التبديل منخفضة جداً. تعمل تقنية (PWM) أيضاً بشكل جيد مع عناصر التحكم الرقمية، والتي نظراً لطبيعة تشغيلها وإيقافها، يمكنها بسهولة تعيين دورة العمل المطلوبة.

2-6-1 تقنية تعديل عرض النبضة المستخدمة مع المعرجات:

المعرج هو جهاز يربط بين منبع التيار المستمر مثل الخلايا الكهروضوئية أو المدخرات، وشبكات التيار المتناوب. يوجد العديد من أنواع المعرجات المختلفة، ويتم تقييم أداء المعرجات من خلال المردود ويجب أن تكون إشارة الخرج منخفضة التشويه. تتكون بنية المعرج H-Bridge من قواطع إلكترونية، ويتم تشغيلها عن طريق نبضات قرح تعطى للقواطع الإلكترونية. يتم توليد هذه النبضات من خلال المقارنة بين موجتين: الأولى تسمى الموجة الحاملة، وهي مثلثية، والثانية هي وموجة مرجعية جيبية أو معدلة يكون ترددها هو التردد المطلوب. الهدف من تقنية تعديل عرض النبضة الحصول على تحكم في جهد خرج المعرج وتقليل محتواه التوافقي. إن إشارة الخرج في نظام تعديل عرض النبضة تساعد على تأمين الجهد على طرفي الحمل في نمط معين، ويكون شكل تيار الحمل متناوباً. يتم الحصول على موجة جيبية نقية بعد تمرير الإشارة عبر مرشح تمرير منخفض. تجد إشارات (PWM) تطبيقاً واسعاً في الإلكترونيات الحديثة. بعض هذه الأسباب هي:

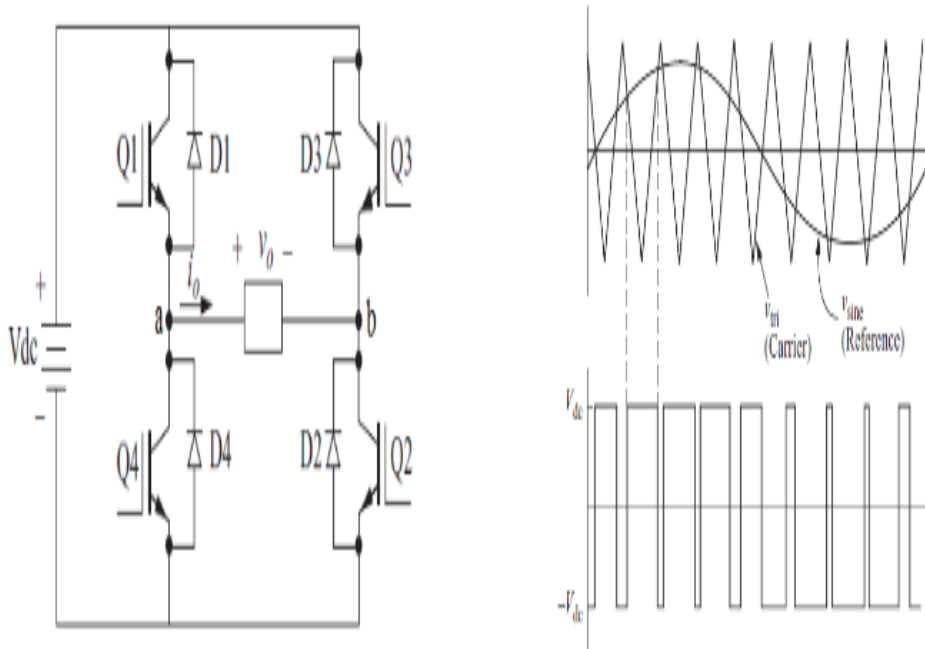
- انخفاض ضياعات الاستطاعة، حيث تستهلك دارات المعرج استطاعة أقل لأن القواطع الإلكترونية المستخدمة تكون في وضع إيقاف التشغيل لفترة ليست قصيرة (التيار المنخفض يعني الطاقة المنخفضة) أو صعب التشغيل (انخفاض الجهد المنخفض يعني انخفاض الطاقة).

◀ سهولة توليد الإشارات: من السهل جداً توليد نبضات القدر (PWM) ، تشتمل العديد من المتحكمات الدقيقة الحديثة على أجهزة (PWM) داخل الشريحة، يمكن تشغيل المعالج بسهولة دون التدخل في تنفيذ التعليمات البرمجية.

◀ التحويل الرقمي إلى التناظري: يمكن التحكم بنبضات القدر (PWM) بدقة عن طريق إجراءات العد البسيطة، وهي أحد أسباب هذه التقنية (PWM) لإنجاز التحويل الرقمي إلى التناظري.

2-6-2 تقنية تعديل عرض النبضة الثنائية

يتم في هذه الطريقة مقارنة إشارة جيبية تمثل الموجة المرجعية مع موجة سن منشار تمثل الإشارة الحاملة. يبين الشكل (8-2) تقنية التعديل ثنائية القطبية لدائرة معرج H BRIDGE ، حيث يعمل القاطعان العلوي والسفلي في نفس ساق المعرج بطريقة تكميلية مع تشغيل أحد القواطع وإيقاف تشغيل الآخر. وبالتالي هناك حاجة إلى النظر في إشارتين مستقلتين فقط من إشارات البوابات Q_1 و Q_3 اللتين تم توليدهما عن طريق مقارنة الموجة الجيبية المعدلة V_m والموجة الحاملة المثلثية V_{cr} . يتم الحصول على الجهد على طرفي المعرج بواسطة V_{AN} و V_{BN} والجهد الناتج للمعرج $V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$. نظراً لأن الشكل الموجي لقواطع V_{AB} بين قيمة الجهد الموجبة وقيمة الجهد السالبة يُطلق على هذا المخطط اسم تقنية تعديل عرض النبضة الثنائية. [31]



الشكل (8-2) توضيح تقنية التعديل ثنائية القطبية لدائرة معرج H BRIDGE

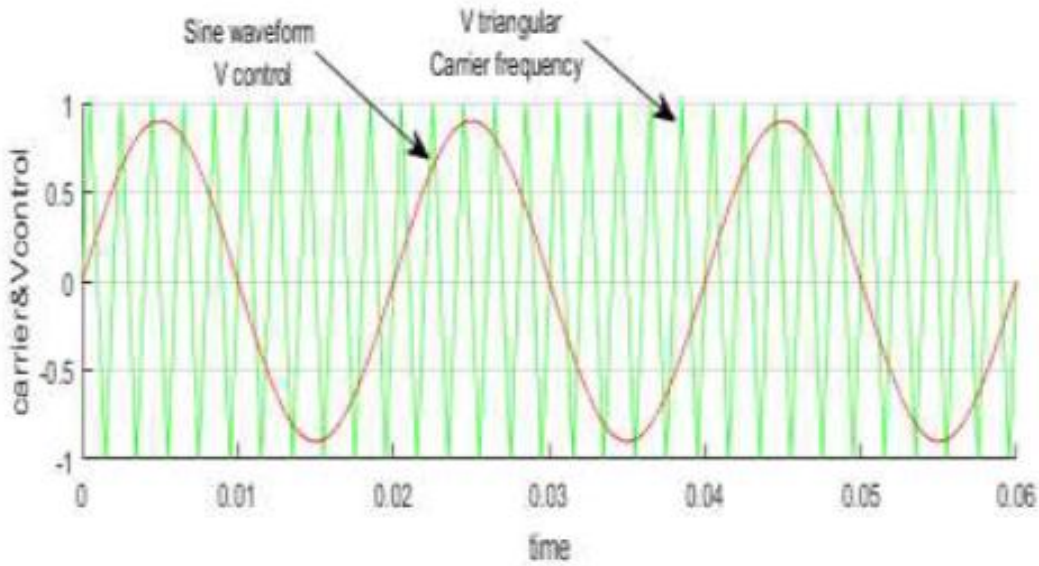
آلية العمل:

عندما تكون قيمة الإشارة الجيبية أكبر من قيمة الإشارة الحاملة المثلثية فإننا نحصل على قيمة جهد الخرج الموجبة

$$V_0 = +V_{dc} \quad , \quad V_{sin} > V_{tri}$$

$$V_0 = -V_{dc} \quad , \quad V_{sin} < V_{tri}$$

يوضح الشكل (9-2) آلية الحصول على نبضات القذح للعناصر الترانزستورية باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة التناثية.



الشكل (9-2) تقنية تعديل عرض النبضة التناثية [35]

3-6-2 طريقة تعديل عرض النبضة أحادي القطب

يوضح الشكل (10-2) عملية تنفيذ مخطط PWM أحادي القطب لجسر كامل.

للحصول على مخطط PWM أحادي القطب، يتم تبديل الإخراج بين ثلاثة مستويات:

$V_{dc} +$ ، 0، أو $-V_{dc}$. في مخطط أحادي القطب، يعتمد جهد الخرج أيضاً على اللحظية

القيم المرجعية اللحظية وإشارات الموجة الحاملة، تكون مفاتيح التحكم كما يلي:

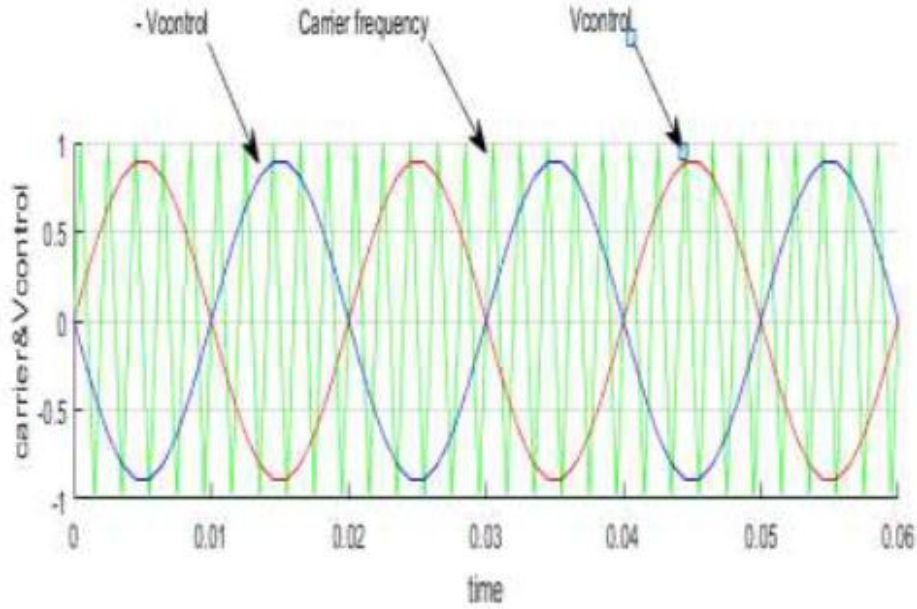
Q1 قيد التشغيل عندما $V_{sin} > V_{tri}$

Q2 قيد التشغيل عندما $V_{sin} < -V_{tri}$

يتم تشغيل Q3 عندما $V_{sin} > -V_{tri}$

Q4 قيد التشغيل عند $V_{sine} < v_{tri}$

في المخطط أحادي القطب، تكون أزواج المفاتيح (Q1، Q4) و (Q2، Q3) مكاملة، والجهد الناتج بالتناوب بين $V_{dc} +$ والصفر، أو بين $V_{dc}-$ وصفر. من الملاحظ في مخطط أحادي القطب أن تردد تبديل إشارة الخرج هو ضعف إشارة تردد الموجة الحاملة [31]



الشكل (2-10) تقنية تعديل عرض النبضة أحادي الطور [35]

4-6-2 طريقة تعديل عرض النبضة متعددة الحوامل

وتقسم إلى:

◀ Phase shifted (PWM) تقنية تعديل عرض النبضة بطور مزاح

◀ Level shifted (PWM) تقنية تعديل عرض النبضة بسوية مزاحة

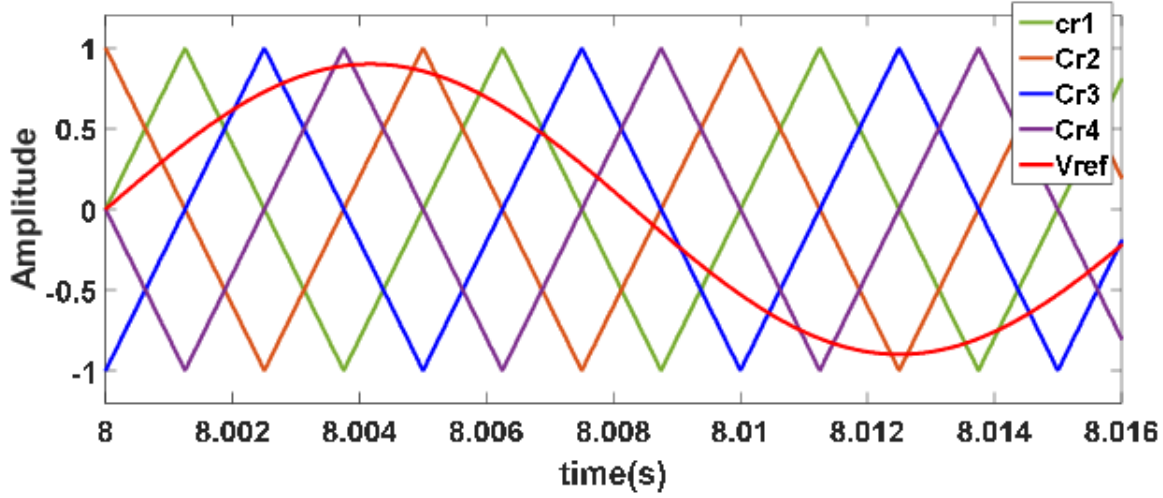
• طريقة تعديل عرض النبضة بطور مزاح (Phase shifted (PWM):

يحتاج كل زوج من القواطع لموجة حاملة مستقلة. فالمعرج متعدد السويات ذو m سوية يتطلب $(m-1)$ موجة حاملة، وكل الأمواج الحاملة لها نفس التردد ونفس المطال من قمة لقمة، ولكن يوجد إزاحة بالطور بين أي موجتين حاملتين متجاورتين، تعطى بالعلاقة:

$$\theta = 360 / (m-1)$$

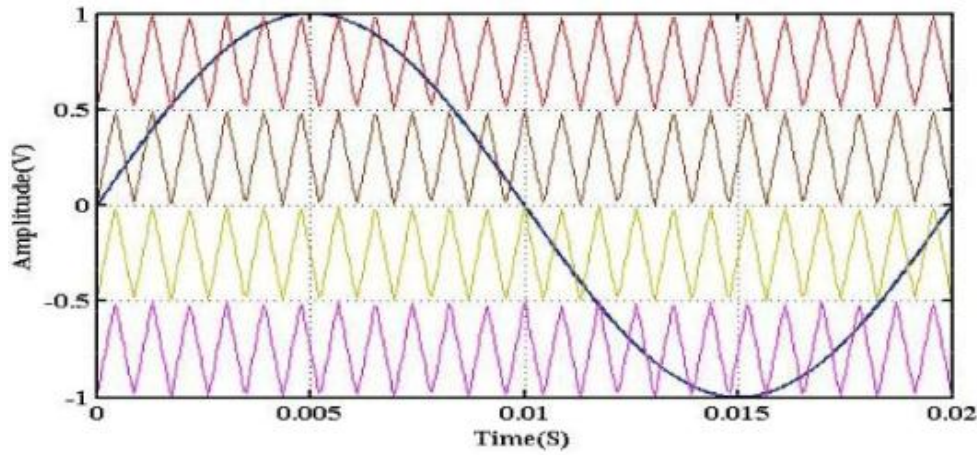
من أجل المعرج متعدد السويات نحتاج ل 4 أمواج حاملة كل موجة حاملة مزاحة عن الأخرى بمقدار 90 درجة. يوضح الشكل (2-11) تقنية تعديل عرض النبضة المزاحة بالطور لمعرج خماسي السويات حيث يتكون من أربع أمواج حاملة مزاحة عن بعضها بمقدار 90 درجة تتقاطع

مع موجة جيبية مرجعية، وهذه التقاطعات ينتج عنها نبضات القذح للعناصر الترانزستورية التي ستعطي شكل الخرج النهائي.



الشكل (2-11) تعديل عرض النبضة بطريقة إزاحة الطور [37]

- طريقة تعديل عرض النبضة بسوية مزاحة Level shifted multi carrier modulation يحتاج كل زوج من القواطع في هذا النوع لموجة حاملة واحدة. المعرج متعدد السويات ب (m) مستوى يحتاج ل (m-1) موجة حاملة. كل الأمواج الحاملة لها نفس التردد ونفس المطال من قمة لقمة، ولكن الأمواج الحاملة تتوضع بشكل رأسي بحيث تكون النطاقات التي تشغلها متجاورة. يوضح الشكل (2-12) تقنية تعديل عرض النبضة متغير المستوى.

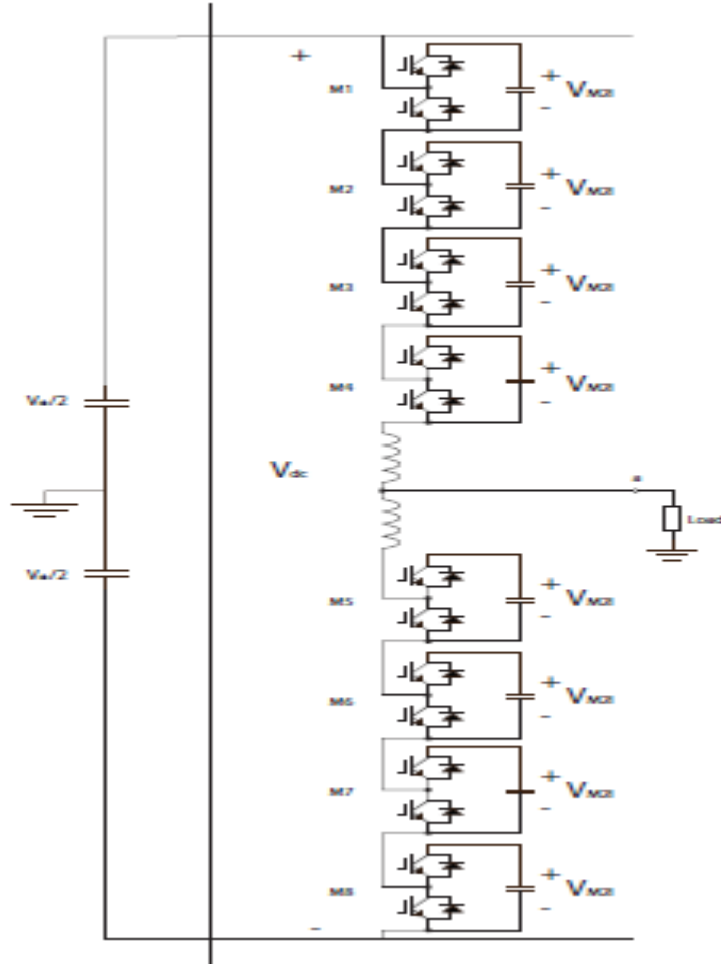


الشكل (2-12) تقنية تعديل عرض النبضة بسوية مزاحة [36]

إن الفرق الرئيسي بين المعرج النصف جسري والجسري هو القيمة الأعظمية لجهد الخرج، في المعرج النصف جسري، تكون القيمة العظمى هي نصف جهد الدخل المستمر، بينما في المعرج الجسري فإن القيمة العظمى لجهد الخرج تساوي جهد منبع الدخل المستمر.. تعتمد هذه التقنية على مقارنة إشارة جيبية مرجعية مع عدد من الأمواج الحاملة (مثلثية) وعددها أقل من عدد السويات بمقدار واحد، من خلال تقاطعات الإشارة المرجعية مع إشارة سن المنشار تنتج لدينا نبضات القدرح للترانزستورات. بمقارنة القيمة الآنية لكل إشارة حاملة مع قيمة الإشارة المرجعية، تتولد النبضات. وهكذا يختلف عرض هذه النبضات. يتم استخدام هذه النبضات لقيادة الترانزستورات/التايرستورات الخاصة بالمعرج، وبالتالي تغيير القيمة اللحظية لجهد (جهد) الخرج. اعتماداً على كيفية ارتباط إشارات الأمواج الحاملة المختلفة ببعضها البعض، يمكن تقسيم تقنيات مخططات (MC PWM) إلى (PWM) متغير المستوى (حيث يتم إزاحة الأمواج الحاملة رأسياً في أشكال الموجة الخاصة بها، أي في السعة أو القيمة الآنية و (PWM) المزاحة بالطور (حيث يتم إزاحة الأمواج الحاملة أفقياً في أشكالها الموجية، أي في الوقت المناسب. في (PWM) المتغير المستوى.

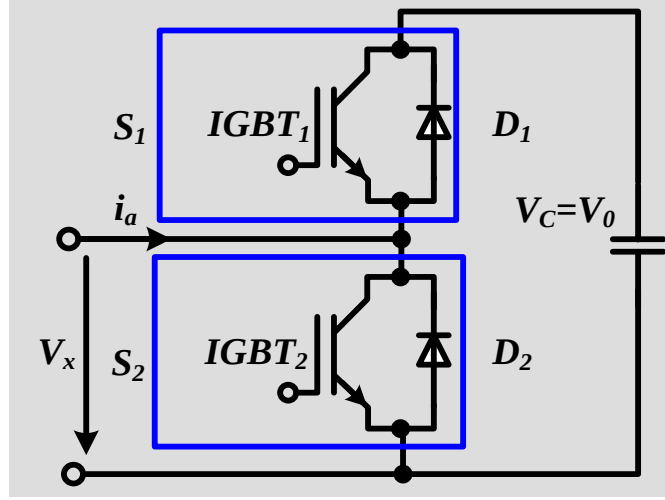
النموذج الرياضي المستخدم في تطبيقات المعرج النصف الجسري:

يتألف نظام المعرج من عدد من الموديولات الجزئية المتماثلة التي تعد المتطلب الأساسي في هذا المعرج، وذلك للحصول على نموذج معرج قابل للتنفيذ. يبين الشكل (2-13) الدارة المقترحة لتحقيق ذلك. حيث يتم خلال حالة العمل المستقرة التحكم بالجهد.



الشكل (2-13) دائرة المعرج النصف جسري

يتألف كل طور من عدد $2n$ متماثل من الوحدات (معرج نصف جسري) لكل طور، ويبين الشكل (2-14) أحد هذه الوحدات المؤلفة من قاطعين ترانزستوريين من النوع (IGBT) مربوط مع كل منهما على التوازي ديود حر، ومنبع جهد مستمر وهو عبارة عن مكثفة C مشحونة. وبالتالي يمكن اعتبار هذه الوحدة أو المعرج نصف الجسري عبارة عن معرج جهد مستمر ($V_{x,i}$) متحكم به، وذلك بغض النظر عن إشارة التيار $i_{a,i}$ ، مع العلم أن هذا الجهد يساوي جهد المكثفة المشحونة C أي (V_c). لتبسيط فهم مبدأ العمل، يعتبر الجهد V_c لكل السعات متساو ويساوي V_0 . بتوصيل عدد من الموديولات الفرعية بالجزء العلوي أو السفلي يمكن ضبط أو تعيير الجهد المستمر V_d . وبطريقة مشابهة يمكن ضبط جهد الخرج المتناوب V_{AC} إلى القيمة المرغوبة. [3]



الشكل (2-14) دائرة أحد الوحدات الفرعية في المعرج النصف جسري [3]

تبيين المعادلات التالية حدود كل من الجهد $V_d(t)$ ، $V_{AC}(t)$ تبعاً لعدد الموديولات الفرعية

بكل طور (ذراع): [3]

$$V_d(t) + |2 \times V_{AC}(t)| \leq 2 \times n \times V_0 \quad \text{المعادلة (2-1)}$$

إذا اخترنا $V_d = \text{const}$ أي ثابت وكان $V_d = n \times V_0$

فإن مطال جهد خرج محدد بالمعادلة:

$$|V_{AC}| < n \times V_0 \quad \text{المعادلة (2-2)}$$

يبين الجدول (2-5) حالات العمل المختلفة لأحد الوحدات الفرعية، وذلك في حالة العمل الصحيحة بدون خطأ. عندما يكون القاطع S_2 بحالة توصيل يكون جهد خرج المعرج النصف جسري مساوياً للصفر. لتطبيق جهد السعة المساوي V_c على نهايتي خرج المعرج النصف جسري، تعطي نبضة قدح للقاطع S_1 وتحجز نبضة القدح عن القاطع S_2 ، وبذلك يصبح جهد الخرج مساوياً لجهد المكثفة بغض النظر عن جهة التيار. [3], [33]

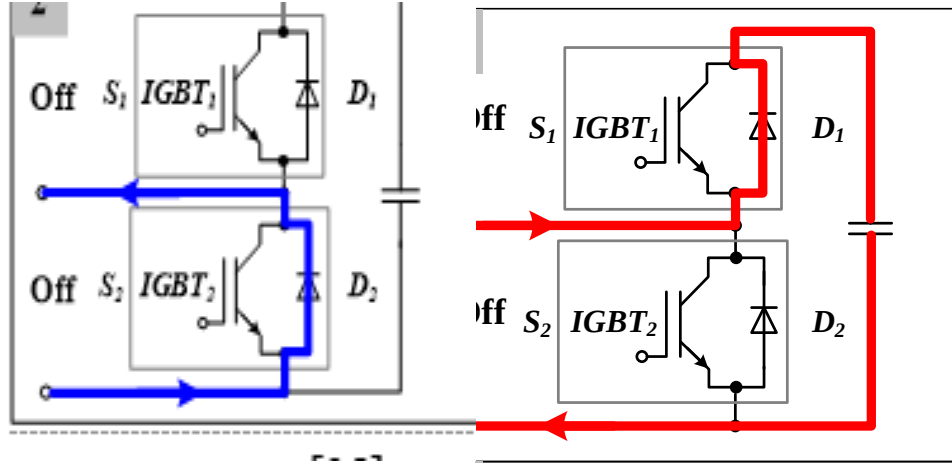
الجدول (5-2) حالات العمل المختلفة للقواطع الإلكترونية.

حالة التشغيل	S ₂	S ₁	i_a	V_c	dV_c/dt
1	Off	On	> 0	V_c	> 0
2	Off	On	< 0	V_c	< 0
3	On	Off	> 0	0	0
4	On	Off	< 0	0	0

يمكن تقسيم حالات التشغيل الممكنة إلى ما يلي: [3], [34]

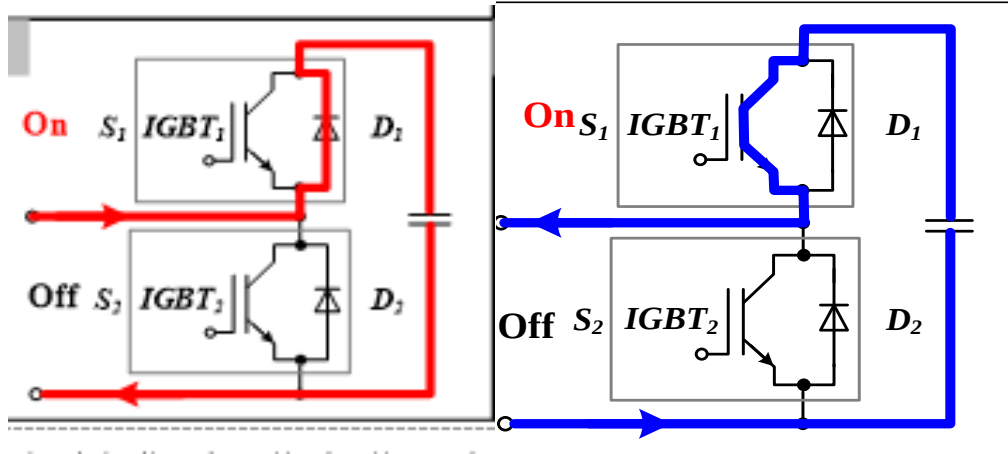
الحالة الأولى: القاطعان $IGBT_1$, $IGBT_2$ في حالة الفصل:

تحدث هذه الحالة في حالة وقوع عطل لكل الوحدات الفرعية في المعرج (أي المعرج خارج عن العمل). في حال جريان التيار من القطب الموجب باتجاه طرفي الجهد المتناوب، سوف يمر هذا التيار من خلال المكثفة في الوحدات الفرعية أي أنها سوف تتشحن. وعندما يمر التيار بالاتجاه المعاكس سوف يمر التيار في الديود D_2 . كما هو موضح بالشكل (2-15).



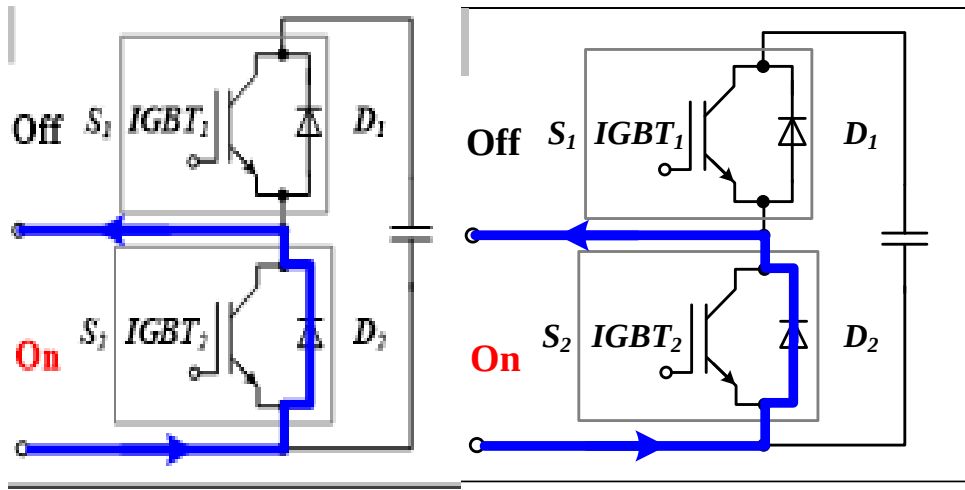
الشكل (15-2) إحدى حالات عمل المعرج [3]

الحالة الثانية: القاطع IGBT1 في حالة وصل والقاطع IGBT2 في حال فصل:
سوف يطبق جهد المكثف على طرفي الوحدة الفرعية في المعرج. واعتماداً على جهة مرور التيار والذي سيمر إما في الديود D_1 ويعمل على شحن المكثفة، أو من خلال القاطع IGBT1 وبناء على ذلك يعمل على تفريغ المكثفة. كما هو موضح بالشكل (16-2).



الشكل (16-2) إحدى حالات عمل المعرج [3]

الحالة الثالثة: القاطع IGBT2 في حالة وصل والقاطع IGBT1 في حال فصل:
سوف يمر التيار إما من خلال القاطع IGBT2 أو من خلال الديود D_2 ، وذلك اعتماداً على جهة التيار، والذي سيؤكد أن الجهد المطبق على نهايات وحدة المعرج الفرعية مساوٍ للصفر (فيما عدا الجهد الأمامي على العنصر النصف ناقل). يبقى الجهد على طرفي المكثفة ثابتاً. كما هو موضح بالشكل (17-2).



الشكل (17-2) إحدى حالات عمل المعرج [3]

من أجل المحافظة على الجهود نفسها لكافة الساعات وللتأكيد على أن العناصر الإلكترونية تتعرض لنفس الجهد يجب اتباع الخطوات التالية: [3]

- يتم قياس جهود المكثفات بشكل دوري وذلك بأخذ عينة ضمن مجال زمني من مرتبة الميلي ثانية. وفقاً لجهود هذه الساعات فإنها تقسم (توزع) باستخدام البرمجيات.
- عندما يكون التيار موجباً، يحدد عدد الموديولات (الوحدات الفرعية) المطلوبة عن طريق عنصر التحكم بالخرج، بحيث تكون أصغر الجهود بحالة توصيل. بناءً على ذلك، فإن الساعات التي تم اختيارها سوف تشحن. عندما يكون التيار في الطور المرافق سالباً، يتم اختيار الموديولات الفرعية ذات الجهود الأعلى بحيث تصبح بحالة توصيل. بهذه الطريقة يتم ضمان حدوث توازن دائم لجهود المكثفات.
- يدعم هذا المفهوم الاستخدام الأمثل للطاقة المخزنة وبنفس الوقت ضياعات القدرة الموزعة للعناصر الإلكترونية المركبة. بالإضافة لذلك يمكن المحافظة على سوية منخفضة لضياعات القدرة بحيث وذلك بتشغيل الموديولات الجزئية فقط عندما يكون هناك تغير مطلوب على جهد الخرج.

تعتمد المعرجات متعددة السويات، مثل المعرج المعياري متعدد السويات (MMC)، على المكثفات المشحونة في خلاياها لتوليد شكل موجة الجهد والتيار المتناوب. على الرغم من أهمية تغير جهد وحدة المكثف، إلا أن عمليات الفصل والوصل تبديل لكل وحدة تجعل من الصعب التنبؤ بتغيرات هذا الجهد. ومع ذلك، من خلال النظر إلى إجمالي الطاقة المخزنة في المعرج. تحدد المعادلات التالية كيفية الانتقال من الطاقة إلى الجهد، باستخدام N_{cell} كعدد الخلايا لكل

مجموعة، و C_{cell} مثل السعة لمكثف لكل وحدة و $V_{cell}(t)$ باعتباره قيمة متوسطة لجهد كل مجموعة.

توتر مكثف الوحدة والطاقة المخزنة في المكثفات: [3]

يمكن كتابة الطاقة المخزنة في مكثفات المعرج، كما هو مبين في المعادلة (3-2)، حيث تعبر عن العلاقة بين توتر مكثف كل خلية، والطاقة المخزنة في المعرج وعدد الخلايا كما يلي:

$$E_{stack}(t) = N_{cell} \frac{C_{cell}}{2} V_{Cell}^2(t) \quad (3-2)$$

حيث:

$E_{Stack}(t)$: الطاقة المخزنة في المكثف.

N_{Cell} : عدد الخلايا.

C_{Cell} : سعة كل خلية. V_{Cell} : توتر الخلية.

كما يمكن أن يعبر عن تغير التوتر ΔV بالقيمة الواحدة في المعرج بالنسبة للتوتر الاسمي لكل خلية ($V_{Cell-nominal}$)، حيث تصل الطاقة المخزنة في المكثفات إلى قيمتها العظمى ($\Delta E_{stack-max}$)، والفرق بينها وبين الطاقة الأصغرية المخزنة في المكثفات ($\Delta E_{stack-min}$)، كما في المعادلة (4-2).

$$E_{stack_{nominal}} = \frac{\Delta E_{stack}}{4\Delta V} \quad (4-2)$$

حيث ΔE : تغير الطاقة الأعظمي في المعرج.

ΔV : تغير التوتر في المعرج.

من المعادلات السابقة، يمكن حساب سعة كل وحدة، كما في المعادلة (5-2).

$$C_{cell} = \frac{\Delta E_{stack}}{2N_{cell} V_{Cell_{nom}}^2 \Delta V} \quad (5-2)$$

ΔE_{stack} : تغير الطاقة الأعظمي في المعرج.

ΔV : تغير التوتر في المعرج.

تبين المعادلات (6-2) التالية، علاقة التوتر والتيار من جهة الشبكة، كما يلي:

$$\begin{aligned} V_{AC}(t) &= k_{Ac} \hat{V}_{AC} \sin(\omega t) \\ I_{AC}(t) &= \frac{\hat{I}_{AC}}{k_{Ac}} \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (6-2)$$

حيث:

$V_{AC}(t)$: المعادلة الزمنية لتوتر الخرج المتناوب.

$I_{AC}(t)$: المعادلة الزمنية لتيار الخرج المتناوب.

k_{AC} : تغير توتر الشبكة في الشروط عند الشروط الطبيعية.

$\hat{V}_{AC}$: القيمة العظمى للتوتر المتناوب.

$\hat{I}_{AC}$: القيمة العظمى للتيار المتناوب.

من المعادلات السابقة، تحسب الاستطاعة الظاهرية بدلالة التوتر والتيار من جهة الشبكة، كما في المعادلة (7-2)، وكذلك الاستطاعة الفعلية والتيار المستمر على دخل المعرج.

$$\begin{aligned} |\bar{S}| &= \frac{3}{2} \hat{V}_{ACnom} \hat{I}_{AC}(t) \\ P &= \frac{3}{2} \hat{V}_{ACnom} \hat{I}_{AC}(t) \cos(\phi) = V_{DC} I_{DC} \\ I_{DC} &= \frac{3}{2} \frac{\hat{V}_{ACnom} \hat{I}_{AC}}{V_{DC}} \cos(\phi) \end{aligned} \quad (7-2)$$

$|\bar{S}|$: الاستطاعة الظاهرية للمعرج.

f: الزاوية بين التيار والتوتر.

يحسب التوتر الأعظمي المتناوب بدلالة التوتر المستمر (V_{DC}) والعامل (k_{AC})، كما في حالة المعرج النصف جسري، المعادلة (8-2)، وبذلك تعطي المعادلة (9-2) عدد الوحدات في المعرج بدلالة التوتر المستمر (V_{DC}) وتوتر كل وحدة أو خلية ($V_{Cell=Nominal}$).

$$\hat{V}_{ACnom} = \frac{1}{k_{AC}} \frac{V_{DC}}{2} \quad (8-2)$$

$$N_{cell} = \frac{V_{DC}}{V_{cell-nom}} \quad (9-2)$$

مع الأخذ بعين الاعتبار بالنسبة للمعادلة (5-2)، وبإجراء بعض التقريبات العددية المتعلقة بعمل المعرج، يمكن كتابة علاقة قيمة سعة مكثف كل وحدة بالمعادلة (10-2) التالية.

$$C_{cell} \geq \frac{2.44|\bar{S}|}{3\omega 2 N_{cell} V_{cell}^2 \Delta V} \quad (10-2)$$

$$C_{cell} \geq \frac{1.22|\bar{S}|}{3\omega N_{cell} V_{cell}^2 \Delta V}$$

الملخص:

تم في هذا الفصل التعريف بالمعرجات وأنواعها وشرح آلية العمل والتطبيقات التي تعتمد في عملها عليها وكذلك تم شرح الفرق بين المعرج الجسري والمعرج النصف جسري وتم شرح تقنيات تعديل عرض النبضة المستخدمة مع هذه المعرجات.

الفصل الثالث

النمذجة والمحاكاة ونتائجها

1-3 مقدمة:

تم إجراء نمذجة ومحاكاة للمعرج متعدد السويات متعدد الوحدات (ذي الخمس مستويات) وتقييم أدائه، ويتكون من ثماني وحدات فرعية، أربع وحدات فرعية في الجزء العلوي من الساق أربع وحدات فرعية في الجزء السفلي من الساق. يتم توفير إشارة القيادة لبوابات الترانزستور من خلال تقنية (PWM). نموذج محاكاة مكون من خمسة مستويات معيارية متعددة السويات يتم تغذيتها من خلال بطاريات v_{12} .

استخدم برنامج الماتلاب لبناء نموذج المعرج ثم دراسة أداء هذا المعرج. ولا بد من نمذجة كافة عناصر التحكم المطلوبة (دارات توليد النبضات، والوحدات المعرج...)، للحصول على النتائج المطلوبة، ثم مقارنتها لاحقاً بالنتائج العملية.

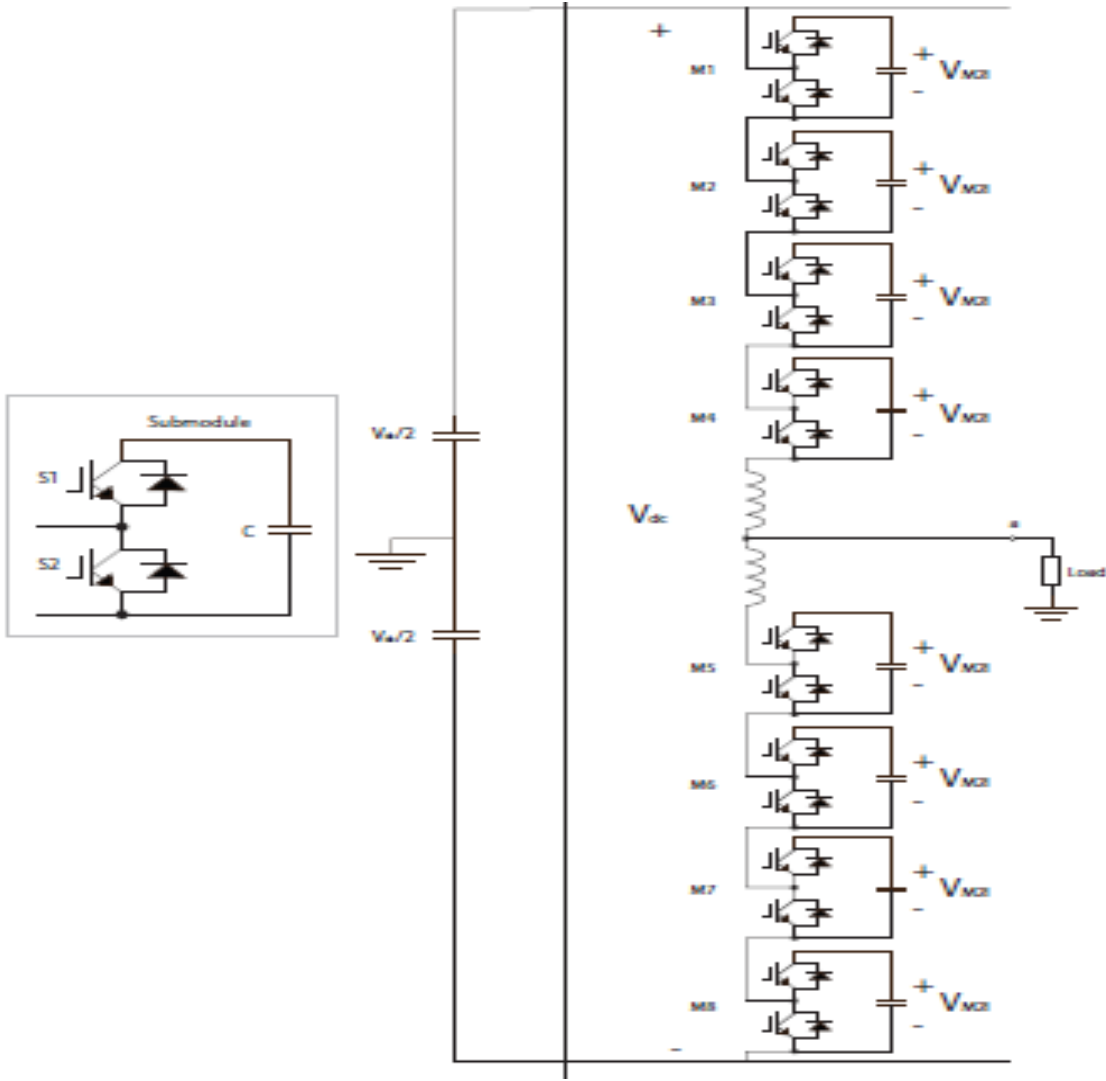
2-3 نموذج المعرج متعدد السويات باستخدام البيئة البرمجية

تمتاز البيئة البرمجية MATLAB/SIMULINK بإمكانية القيام بعملية النمذجة والمحاكاة لكل عناصر المعرج بما في ذلك معرج عرض النبضة المطلوب. يبين الشكل (1-3) مخطط صندوقي لدارة المعرج باستخدام عناصر البيئة البرمجية المذكورة. مع العلم أن هذه الدراسة ستتم للمعرج المدروس وذلك عند مستويات جهد مساوية لخمس مستويات. يبين عنصر الترانزستور المستخدم حيث يتم اختيار محدداته المبينة بما فيها مقاومته الداخلية وهبوط الجهد الأمامي وأزمنة الفصل والوصل وعناصر دارة الإخماد الضرورية لحمايته أثناء عمليات الفصل والوصل من خلال صندوق الحوار الخاص به. بالنسبة لتوصيف عناصر دارة القيادة المستخدمة في MATLAB/SIMULINK:

- الدارة المكافئة للقاطع الترانزستوري تحتوي على ديود حر.

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

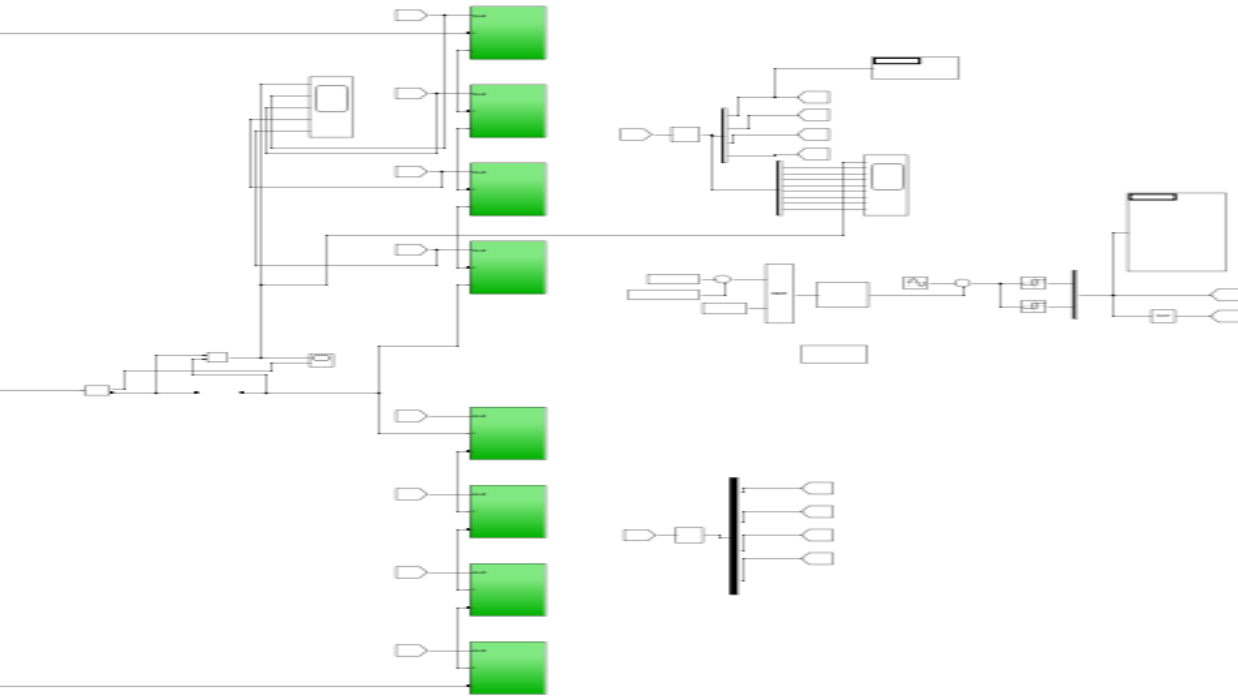
يوضح الشكل (1-3) نموذج المعرج النصف جسري التي تمت نمذجته باستخدام برنامج الماتلاب حيث يتكون من أربع وحدات فرعية في الذراع العلوي وأربع وحدات فرعية في الذراع السفلية.



الشكل (3-1) دائرة المعرج النصف جسري

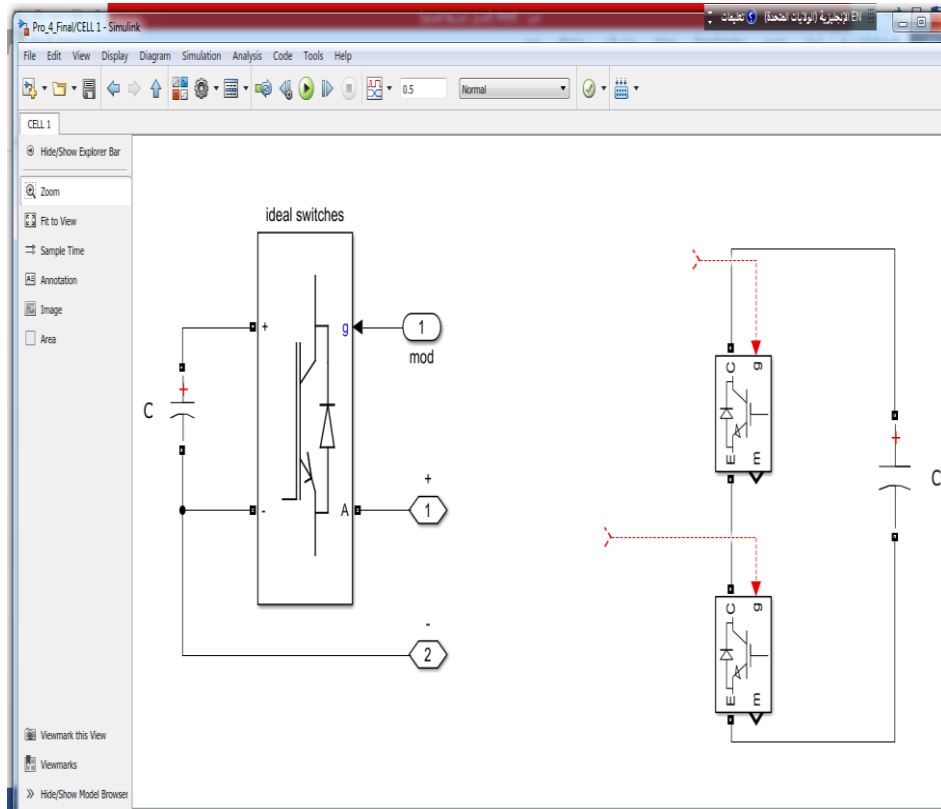
يوضح الشكل (3-2) الشكل عند نمذجته باستخدام برنامج الماتلاب والبلوكات التي تم استخدامها.

حيث يتكون النموذج من ثماني وحدات فرعية، أربع وحدات فرعية في الذراع العلوية المسؤولة عن إعطاء الجزء الموجب من الخرج، وأربع وحدات فرعية في الذراع السفلية المسؤولة عن إعطاء الجزء السالب من الخرج. يتم وصل الوحدات إلى راسم إشارة من أجل مشاهدة خرجها.



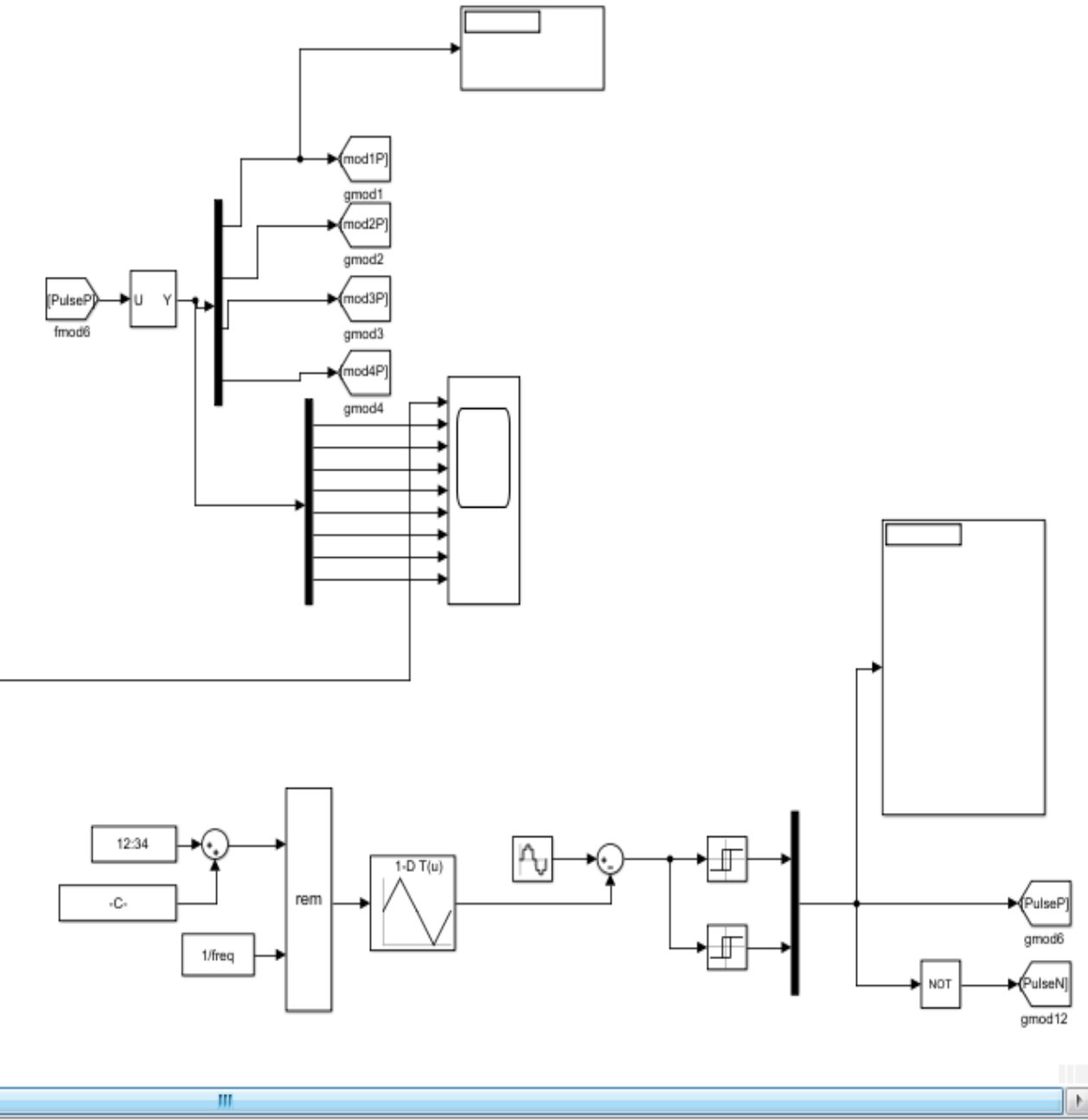
الشكل (2-3) نموذج المعرج النصف جسري على الماتلاب

الشكل (3-3) يوضح شكل الوحدة الفرعية من المعرج المكونة من قاطعين ترانزستوريين ومكثف موصول معها على التفرع.



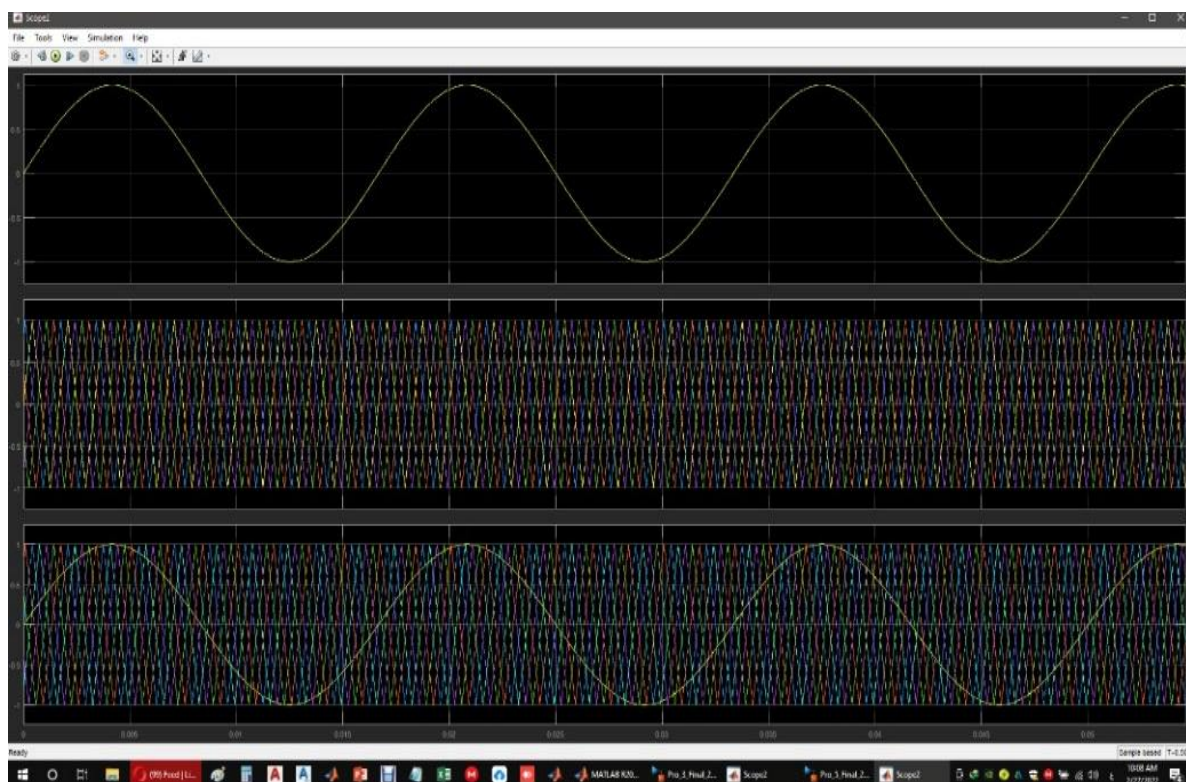
الشكل (3-3) نموذج وحدة فرعية من المعرج النصف جسري

الشكل (3-4) يوضح آلية إعطاء نبضات القذح للعناصر الالكترونية حيث لدينا عادة إشارة جيبية مرجعية أساسية تتم مقارنتها منطقيا مع موجة سن المنشار التي تم توليدها من موجة مربعة ذات تردد معين ثم تؤخذ هذه الإشارة إلى مكبر ثم عنصر مكاملة وفي النهاية مقارنتها مع الموجة الجيبية المرجعية للحصول على نبضات القيادة التي تطبق على بوابة القاطع الإلكتروني.



الشكل (3-4) آلية إعطاء نبضات القذح للمعرج النصف جسري

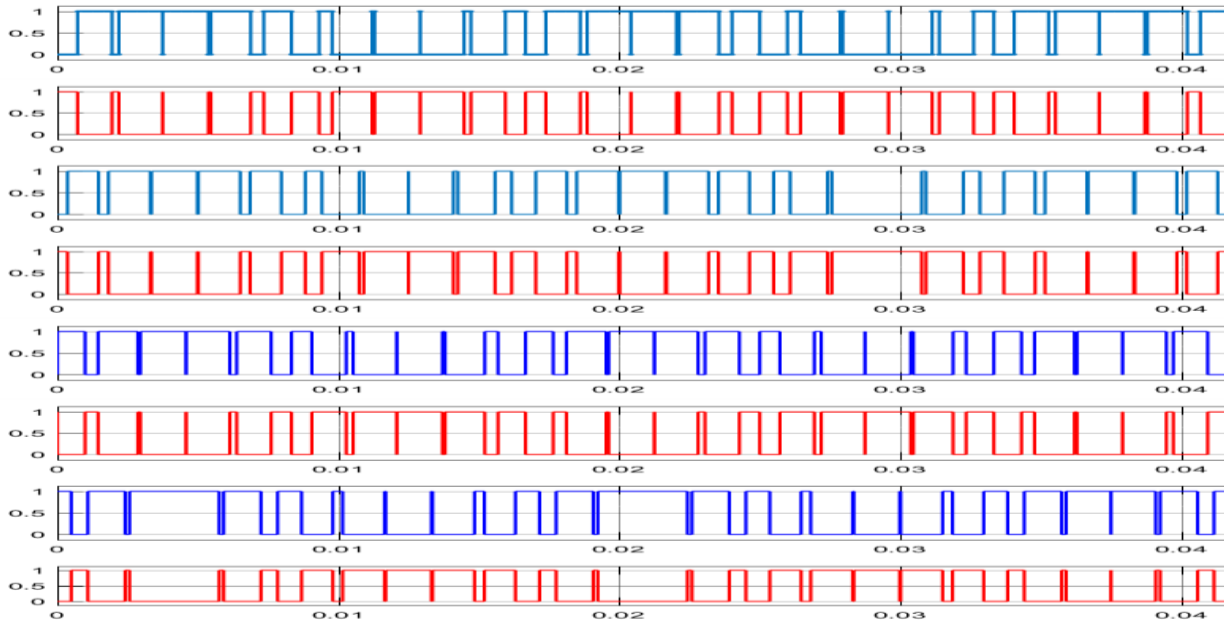
يبين الشكل (3-5) نبضات القذح الواجب تطبيقها على القواطع الإلكترونية لقيادة المعرج المذكور. النتائج من تقاطع الموجة الجيبية مع إشارات سن المنشار وذلك لنصف الجسر الموجب، مع العلم أن للنصف السالب نفس الآلية في قيادة قواطعه الإلكترونية.



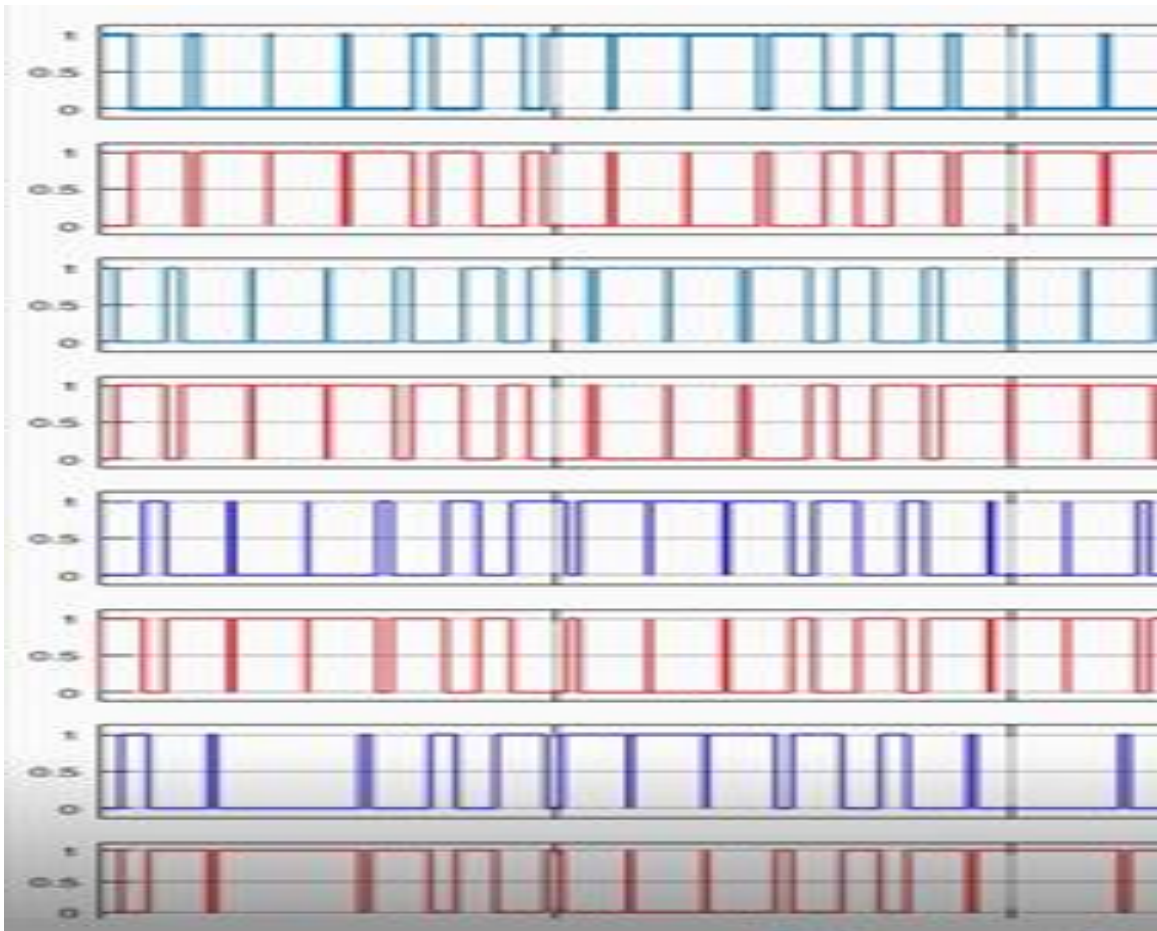
الشكل (3-5) تقنية تعديل عرض النبضة المستخدمة

3-3 نتائج المحاكاة:

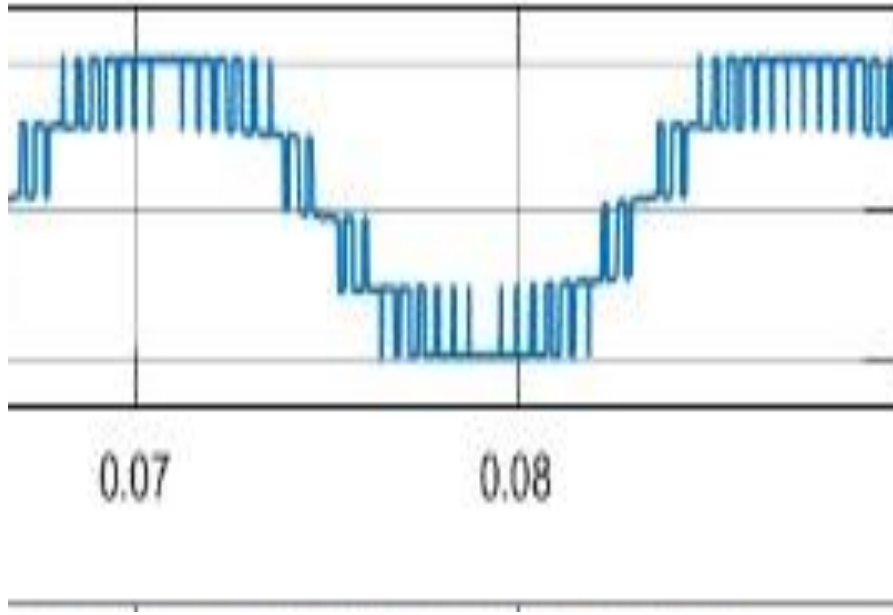
تبين الأشكال التالية نتائج النمذجة التي حصلنا عليها باستخدام الماتلاب، حيث يمثل الشكل (3-6) و الشكل (3-7) نبضات القذح المطبقة على الترانزستورات في كل وحدة فرعية ، حيث يمثل الشكل (3-7) نبضات القذح المطبقة على الذراع العلوية والشكل (3-8) نبضات القذح المطبقة على ترانزستورات الذراع السفلية



الشكل (3-6) نبضات القذح للذراع العلوي



الشكل (3-7) نبضات القذح للذراع السفلية



الشكل (8-3) شكل موجة الجهد للمعرج النصف جسري

يمثل الشكل (8-3) شكل موجة جهد الخرج التي حصلنا عليها من النمذجة حيث وكما مبين بالشكل تم الحصول على موجة جهد بخمس سويات.

تم في هذا الفصل نمذجة المعرج النصف جسري والحصول على أشكال الجهد والتيار لهذا المعرج من أجل مقارنتها مع النتائج التي حصلنا عليها عند التطبيق العملي.

الفصل الرابع

القسم العملي - التنفيذ

4-1 مقدمة

بعد الدراسة النظرية، وإجراء نمذجة ومحاكاة للمعرج المدروس، تم تنفيذ المعرج عملياً. وفيما يلي خطوات العمل.

4-2 التصميم الإلكتروني للمعرج

تتكون دائرة المعرج من المكونات التالية:

4-2-1 دائرة التحكم والقيادة

تتألف دائرة القيادة والتحكم من العناصر التالية :

أ- المعالج

هو عبارة عن شريحة معالج أصغري تتم برمجته حسب متطلبات العمل. سنقدم نظرة عن العناصر التي تم استخدامها في هذا المشروع

ب- دائرة قيادة الترانزستور (TLP250)

يحتوي TLP250 ، مثل أي مشغل ، على مرحلة إدخال ومرحلة إخراج ووصلة مصدر طاقة. ما يميز TLP250 هو أن TLP250 هو محرك معزول بصرياً، مما يعني أن المدخلات والمخرجات "معزولة بصرياً". تكون العزلة بصرية -مرحلة الإدخال عبارة عن مصباح LED ومرحلة الإخراج المستقبلية حساسة للضوء (فكر في "جهاز الكشف الضوئي").

Pin 8 هو VCC العرض الإيجابي. الدبوس 5 هو GND .

ج-المحولة

تستخدم المحولة من أجل رفع الجهد لقيمة 220 فولط المناسب للاستخدام مع التجهيزات الكهربائية.

د-متحكم الأردوينو[16]

أردوينو : Adriano عبارة عن لوحة تطوير إلكترونية مفتوحة المصدر تتكون من دائرة إلكترونية مع

متحكم على لوحة واحدة يتم برمجتها عن طريق الكمبيوتر وهي مصممة لجعل عملية استخدام

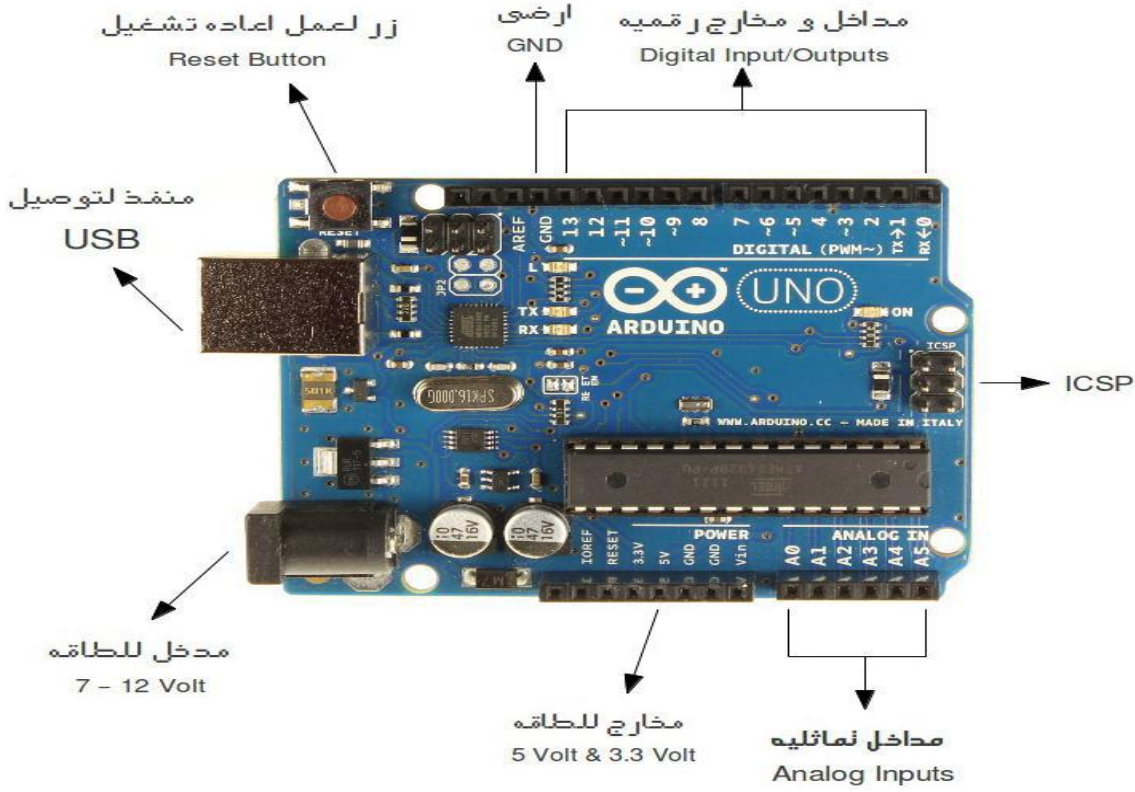
الإلكترونيات التفاعلية في مشاريع متعددة التخصصات أكثر سهولة.

ويستخدم أردوينو بصفه أساسيه في تصميم المشاريع الإلكترونية التفاعلية أو المشاريع التي تستهدف بناء

حساسات بيئية مختلفة (مثل درجات الحرارة، الرياح، الضغط...الخ) ويمكن توصيل أردوينو ببرامج مختلفة

علي الحاسب الشخصي.

وتعتمد الأردوينو في برمجتها علي لغة البرمجة مفتوحة المصدر بروسينج، وتتميز الأكواد البرمجية الخاصة بلغة اردوينو أنها تشبهه لغة سي (c programming language) وتعتبر من أسهل لغات البرمجة المستخدمة في كتابه برامج المتحكمات الدقيقة.[16]



الشكل (4-1) بطاقة الأردوينو

USB PORT

يؤمن مدخل ال USB توصيل الأردوينو بالحاسوب الشخصي، أو تزويده بالطاقة الكهربائية.

DC power jack

منفذ توصيل الأردوينو بمصدر طاقة خارجي وقد يكون البطارية في حالة لم يتم استخدام ال USB لتشغيله. وينصح بالرجوع الي كتيب التشغيل لمعرفة التيار وفرق الجهد المناسب لتشغيل الأردوينو.

Power pins

هي منافذ تزويد الأردوينو بالطاقة وتتراوح ما بين 5 فولت و 3.3 فولت، بالإضافة لمنافذ توصيل الأرضي، GND، ومنفذ Vin الذي يستخدم لتزويده بالطاقة إن أردت

Analog pins

تستخدم لإدخال الإشارات التماثلية, Analog, وعددها 6 في الأردوينو Uno

Digital I/O pins

تستخدم لإدخال أو إخراج إشارات رقمية, Digital, وتكون قيمة الإشارة الرقمية 1 أو 0، وبإسم آخر High و Low أو True, False.

RESET

ويستخدم لإعادة تشغيل البرنامج المحمل على المتحكم. Micro Controller

LED

تضيء عند عمل الأردوينو.

Pins منافذ التوصيل

يتواصل الأردوينو مع الأجهزة والعناصر الالكترونية او الحساسات عن طريق منافذ توصيل تسمى Pins، والهدف منها توفير أماكن توصيل مدخلات او مخرجات أو اي اشارات الي الأردوينو عن طريق اسلاك التوصيل. وهذه الإشارات ربما تكون اشارات رقمية Digital أو اشارات تناظرية Analog، كما تستخدم الـ Pins أيضاً لتوصيل مصادر الطاقة "الجهد" من والي الأردوينو.

المتحكم Micro Controller

المتحكم "Micro-controller" هو عبارة عن حاسوب مصغر موجود على لوحة الأردوينو وهو المسؤول عن التحكم في دائرة الأردوينو كاملة، ويتألف من معالج صغير وذاكره صغيرة بالإضافة الي ملحقات للإدخال وإخراج البيانات، وكذلك يحتوي على مؤقت لتشغيل ساعة المعالج، وقد يحتوي أيضاً على محول رقمي محول تماثلي

الترانزستورات:

فيما يلي جدول مقارنة بين الترانزستورات من نوع ال IGBT و ال MOSFET

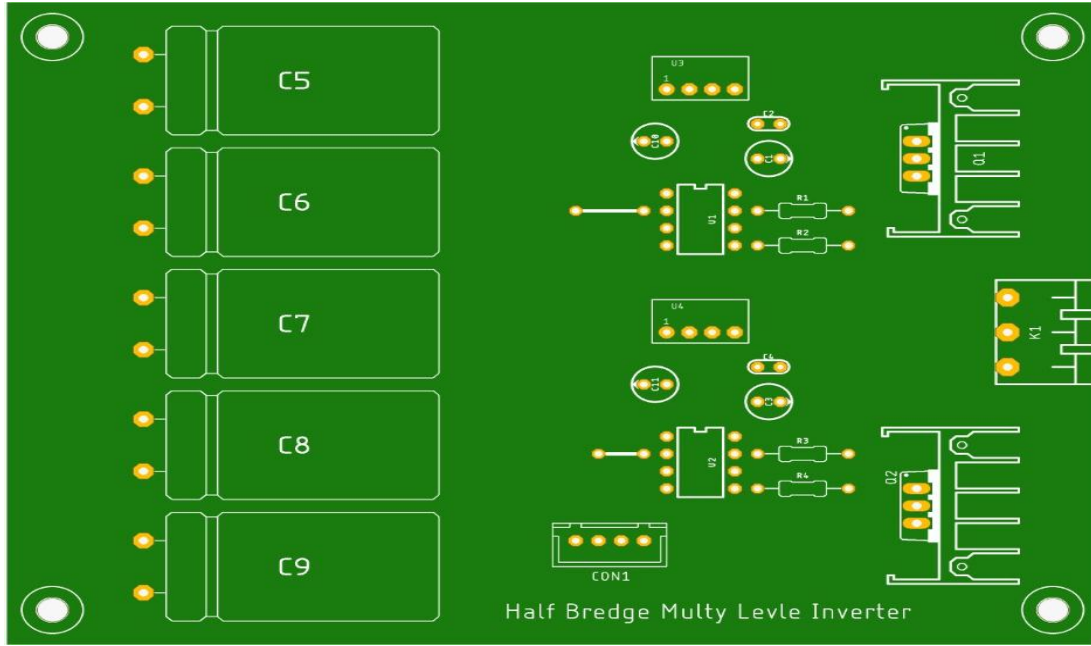
جدول (1-4) مقارنة بين الترانزستورات من نوع ال IGBT و ال MOSFET

MOSFET	IGBT	المحدد
مناسب للتوصيل والتحكم بالتيار المنخفض إلى المتوسط	مناسب للتوصيل والتحكم بالتيار المتوسط إلى العالي	الملاءمة
يمكن استخدام ال MOSFET لتطبيقات الترددات العالية جداً (من رتبة ال MHz)	لا يمكن استخدام ال IGBT إلا للترددات المنخفضة نسبياً	تردد العمل
يكون وقت الفصل أصغر من ال IGBT	يكون وقت الفصل أكبر من ال MOSFET	زمن الفصل
تكلفة منخفضة نسبياً	تكلفة كبيرة	التكلفة
تستخدم في تطبيقات التوتر المستمر منخفض الطاقة.	يستخدم على نطاق واسع في تطبيقات التيار المتردد عالي الطاقة.	التطبيقات

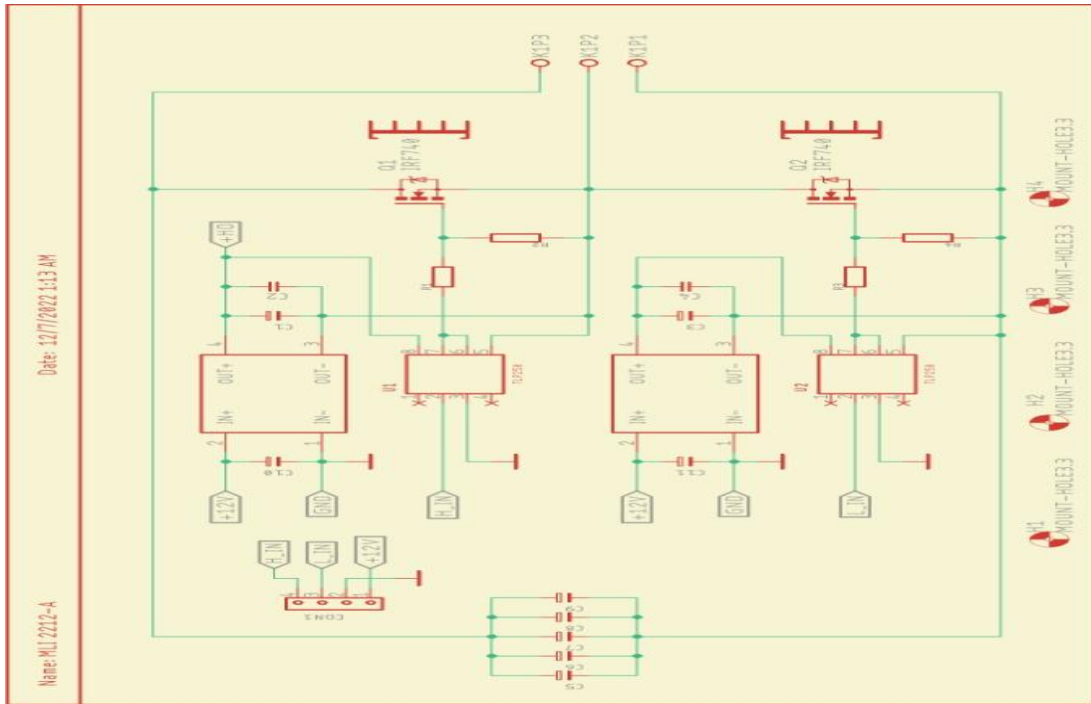
نلاحظ من الجدول أن العناصر الأكثر ملاءمة للاستخدام في المعرجات هي ال MOSFET وذلك لكونها ملائمة من حيث الاستطاعة للمعرج وبما أن النموذج المقترح تصميمه هو نموذج مخبري لذلك لابد من استخدام عناصر كتلك التي تستخدم من أجل الاستطاعة العالية.

3-4 التنفيذ العملي للدائرة

تم في هذه الخطوة رسم الدارات المطبوعة على برنامج Eagle، ويبين الشكل (2-4) الدارة المطبوعة للمعرج، ويعطي صورة لها كمظهر خارجي، ويظهر الشكل (3-4) الدارة الكهربائية للمعرج.

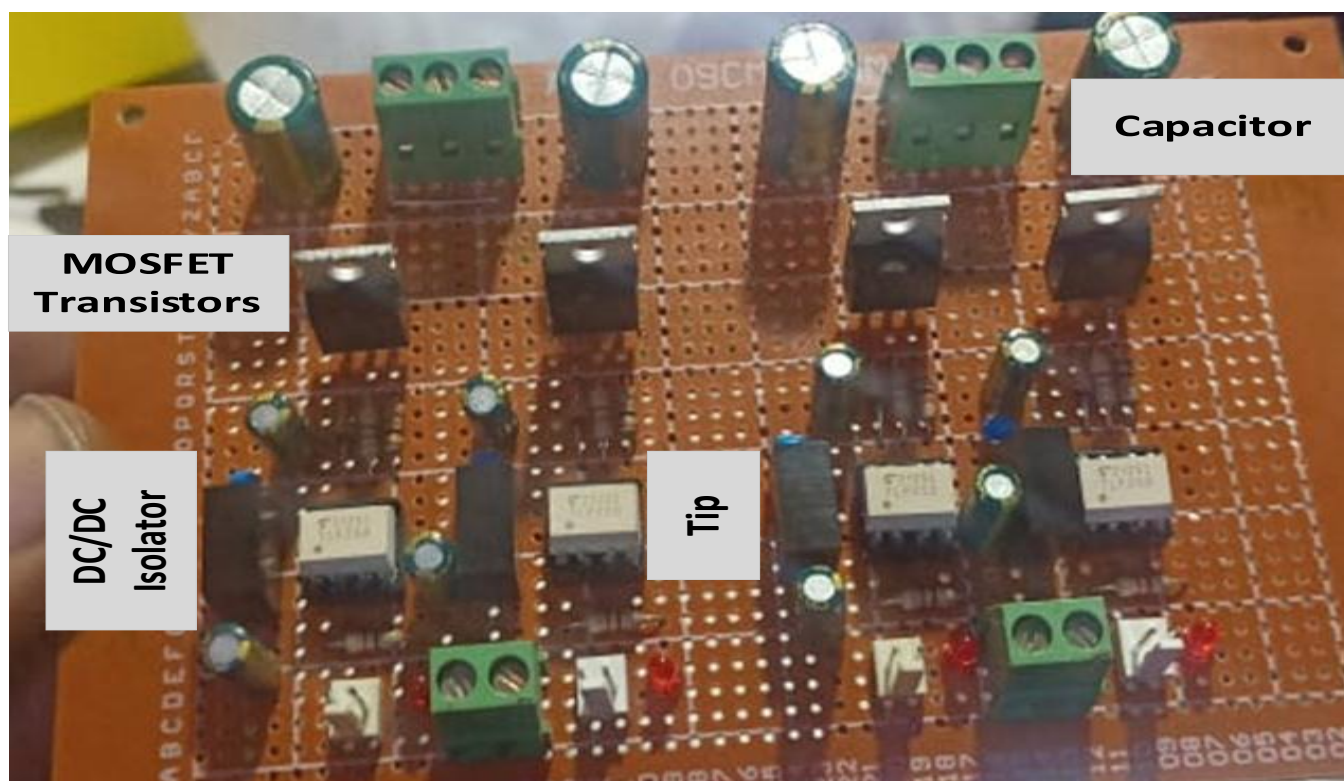


الشكل (2-4) دائرة مطبوعة للمعرج

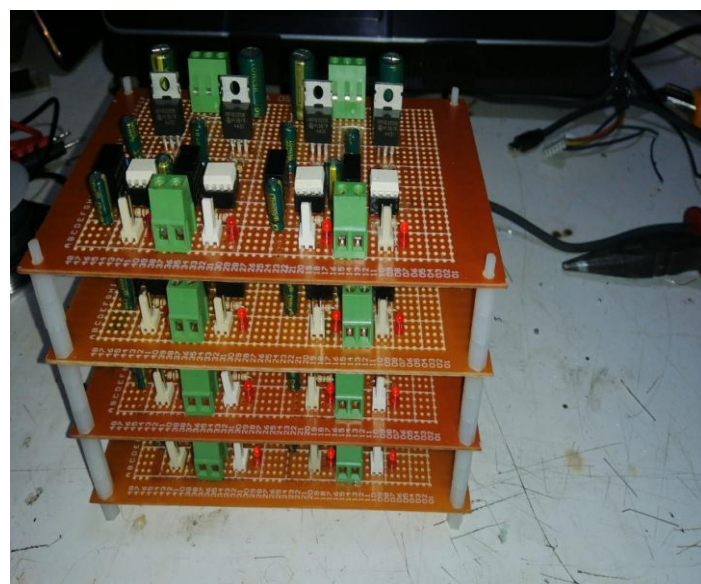
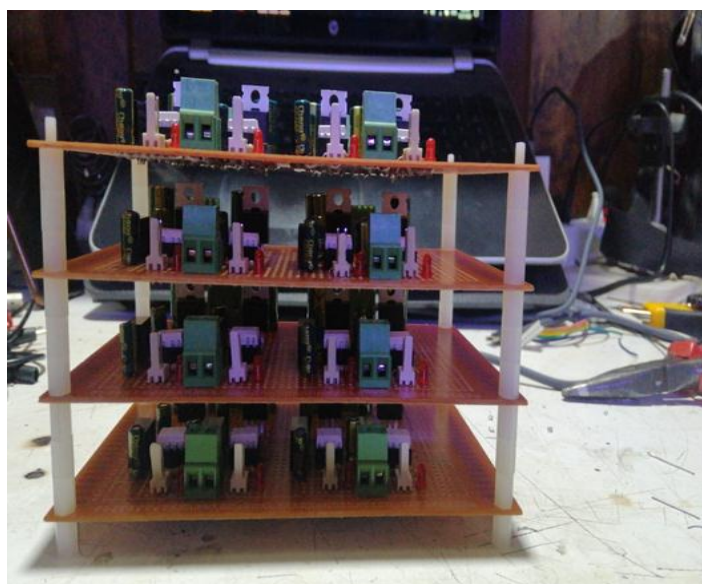


الشكل (3-4) دائرة المخطط الكهربائي للمعرج

يبين الشكل (4-4) أحد البوردرات الفرعية المكونة للانفرتر، حيث يتكون الانفرتر من أربع بوردرات مماثلة لهذا البورد وكل بورد يحوي على وحدتين فرعيتين، وحدة موجودة بالذراع العلوية ووحدة موجودة بالذراع السفلية، ولذلك لدينا أربع بوردرات تمثل ثمانى وحدات فرعيتين.



الشكل (4-4) أحد بوردرات المعرج المنفذ
يظهر الشكل (4-5) الشكل النهائي للبوردرات المنفذة من أجل الحصول على معرج متعدد السويات.



الشكل (4-5) بوردرات المعرج المنفذ
تم استخدام بطاقة الأردوينو لقيادة الترانزستورات وتأمين نبضات القذح المناسبة، حيث تمت كتابة كود برمجي تم من خلاله تضمين مكتبة الزمن لأننا سنستخدم تأخير زمني من أجل قذح الترانزستورات بترانبيه معينة وتم تعريف متغيرات تمثل مخارج الأردوينو التي من خلالها ستؤخذ

نبضات القذح لبوابات الترانزستور. وبما أن منافذ الأردوينو يمكن أن تستخدم كدخل أو خرج حسب الكود البرمجي فإننا سنعرفها على أنها مخارج. والكود التالي هو جزء من الكود البرمجي:

```
#include<util/delay.h>

#include<math.h>

const int Q1=2;

const int Q2=3;

const int Q3=4;

const int Q4=5;

const int Q5=6;

const int Q6=7;

void setup()

{pinMode(Q1,OUTPUT);

pinMode(Q2,OUTPUT);

pinMode(Q3,OUTPUT);

pinMode(Q4,OUTPUT);

pinMode(Q5,OUTPUT);

pinMode(Q6,OUTPUT);

}

void loop()

{PORTD=B01101000;////1

_delay_us(2900);

PORTD=B01011000;
```

```

_delay_us(4550);

PORTD=B10011000;

_delay_us(1100);

PORTD=B10010100;

_delay_us(5250);

PORTD=B01010100;

_delay_us(400);

PORTD=B01100100;

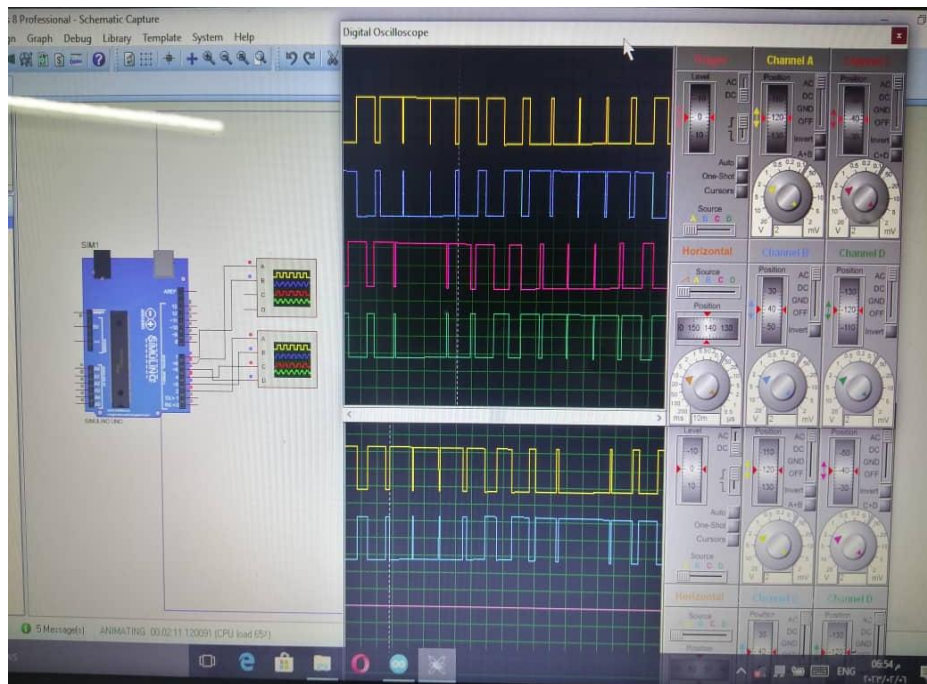
_delay_us(4550);

PORTD=B01010100;

}

```

تم محاكاة بطاقة الأردوينو على برنامج البروتوس ونتيجة المحاكاة موضحة بالشكل (4-6)

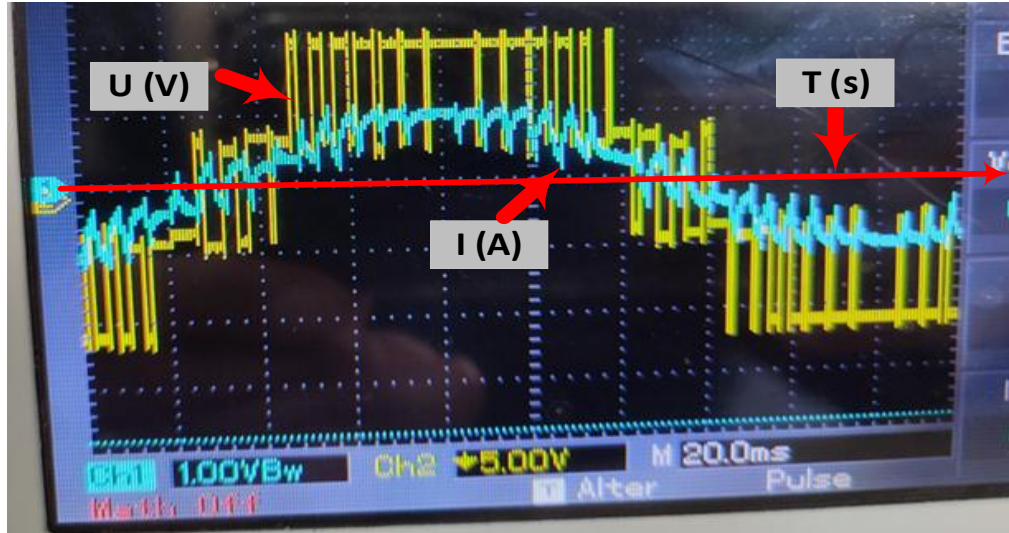


الشكل (4-6) محاكاة الأردوينو على البروتوس

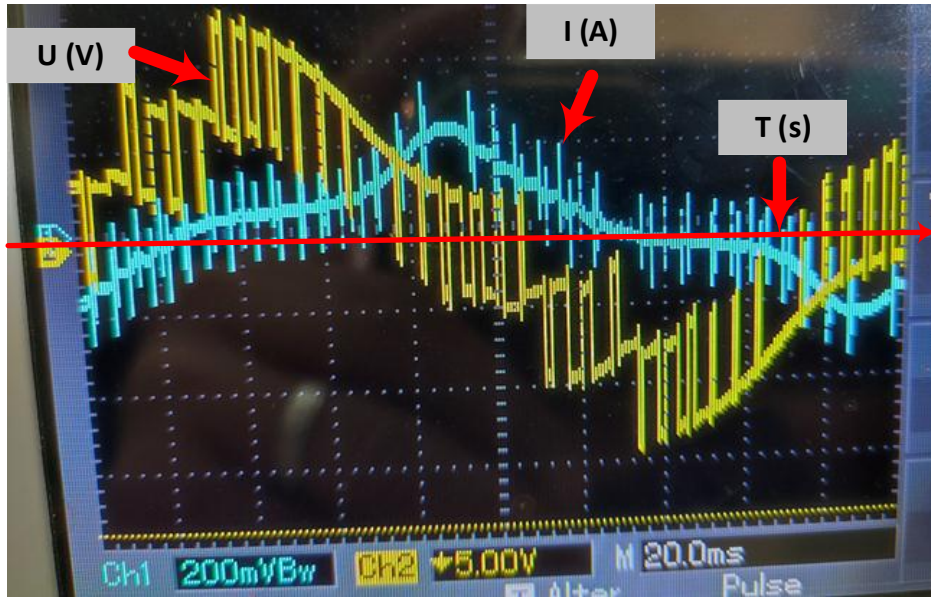
عند الانتقال للتجريب العملي وربط المعرج مع راسم الإشارة كانت النتائج كما موضحة في الأشكال (7-4) و (8-4) و (9-4)، حيث تمت التجارب بحالة جهد الاحمل وحالة الحمل الأومي وحالة الحمل التحريضي.



الشكل (7-4) شكل جهد الخرج للمعرج المنفذ بحالة الاحمل
 الشكل (7-4) يوضح شكل جهد الخرج الذي حصلنا عليه بحالة الاحمل حيث حصلنا على جهد خرج بأربع سويات والتيار قيمته مساوية للصفر.



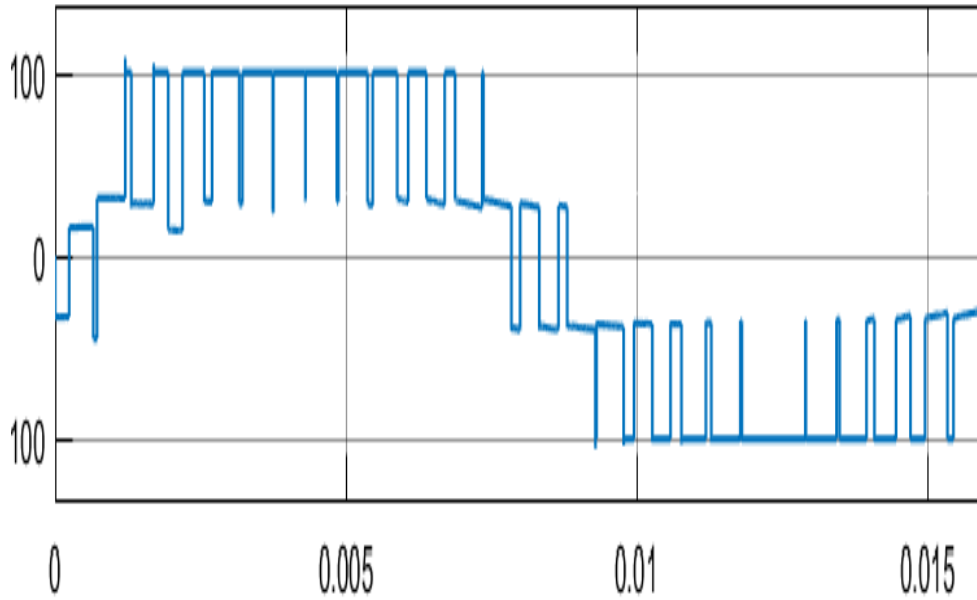
الشكل (8-4) شكل جهد والتيار للمعرج المنفذ بحالة الحمل الأومي
 الشكل (8-4) يمثل جهد الخرج بحالة الحمل الأومي حيث حصلنا على جهد خرج بأربع سويات مع وجود توافقيات بالموجة وكذلك حصلنا على قيمة للتيار مع وجود تشوه أيضاً بشكل الموجة.



الشكل (9-4) شكل جهد وتيار الخرج للمعرج المنفذ بحالة الحمل التحريضي
 يبين الشكل (9-4) شكل جهد وتيار الخرج بحالة اللاحمل، حيث نلاحظ أن التشوه ملحوظ في شكل
 الموجة وذلك لأننا لم نستخدم مرشحات بالخرج.

وعند المقارنة بين النتائج التي حصلنا عليها باستخدام النمذجة على الماتلاب مع النتائج التي حصلنا
 عليها عند ربط المعرج المنفذ مع راسم الإشارة من أجل الحصول على أشكال أمواج الجهد والتيار.
 تبين تطابق النتيجةين.

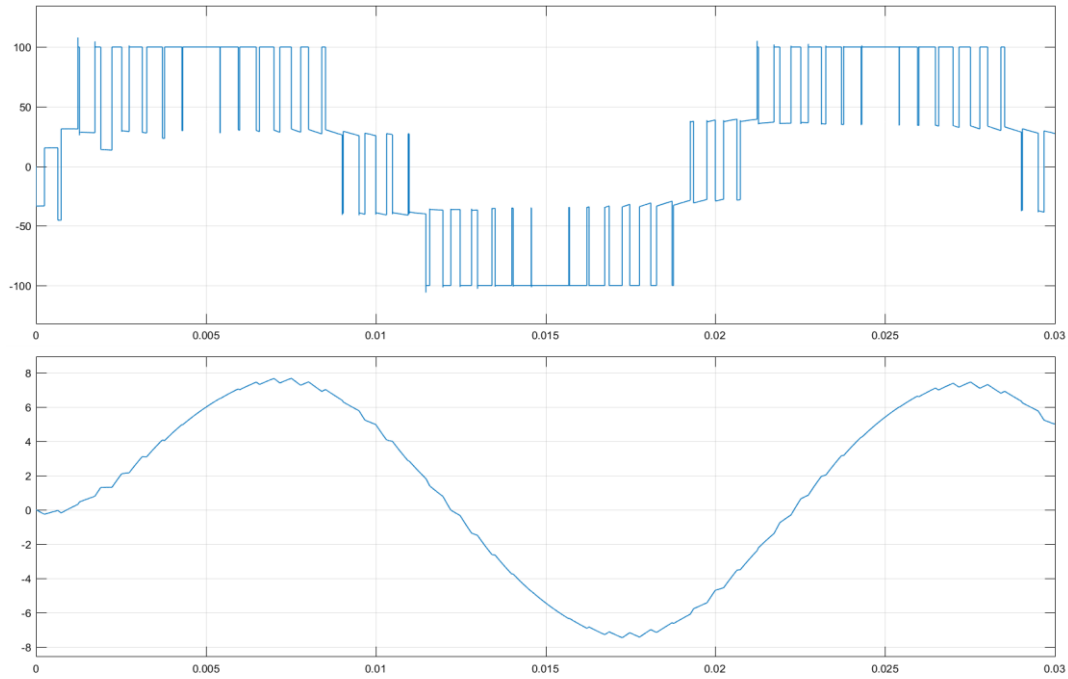
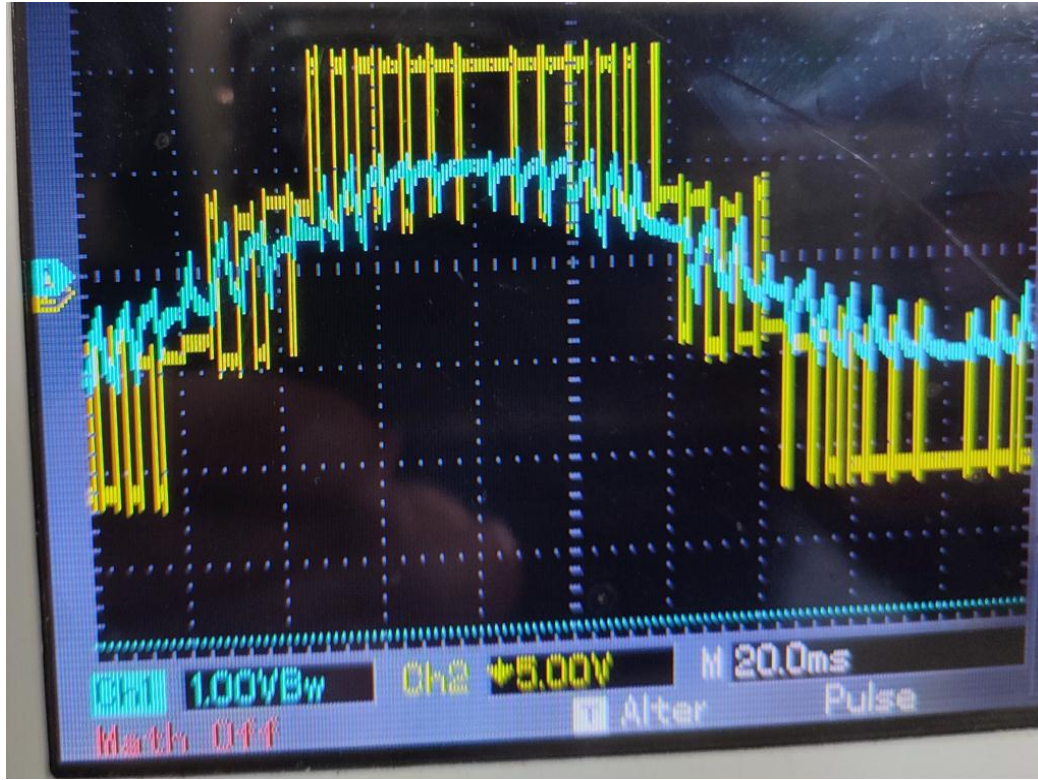
يظهر الشكل (10-4) المقارنة بين موجة الجهد والتيار الناتجة من ربط المعرج المنفذ مع راسم
 الإشارة ونتائج النمذجة بحالة اللاحمل.



الشكل (4-10) خرج المعرج بحالة اللاحمل

نلاحظ بأننا حصلنا على نتيجتين متطابقتين.

ويظهر الشكل (4-11) والذي يمثل حالة تيار وجهد الخرج بحالة الحمل الأومي عند التطبيق على برنامج الماتلاب وعند التنفيذ العملي والاختبار على راسم الإشارة، نلاحظ بأننا حصلنا على نتيجتين متطابقتين، مع الأخذ بعين الاعتبار التشوه في الموجة عند التنفيذ العملي.



الشكل (4-11) خرج المعرج بحالة الحمل الأومي

يجب التنويه أن المعرج المصمم لخمس سويات جهد ولكن عند التنفيذ العملي وبسبب تلف عنصر ال dc/dc isolator وعدم توفره في السوق المحلية تم التنفيذ والتجريب على أساس أربع سويات جهد، مع العلم أنه في حال توفر القطع يمكن الحصول على الجهد بخمس سويات.

يوضح الشكل (4-12) الشكل النهائي للمعرج المنفذ.



الشكل (4-12) المعرج المنفذ

خاتمة:

تم في هذا الفصل تنفيذ نموذج معرج متعدد السويات -الوحدات، والحصول على نتائج متطابقة إلى حد كبير مع نتائج النمذجة والمحاكاة. يمتاز هذ المعرج بخرجه المتعدد السويات، حيث سينخفض عامل التشويه التوافقي (THD) الكلي بشكل كبير، ومن جهة أخرى، سيحسن أي فلتر (ملف ترشيح) شكل التوتر والتيار للحمل. لا يتوفر في الأسواق المحلية مثل هذا المعرج، وكافة المعرجات المتوفرة ثلاثية المستويات. يصلح هذا المعرج لاستخدام بشكل فعال في النظم الكهروضوئية، ويسمح بزيادة عدد الألواح التسلسلية، ويساهم ذلك برفع توتر المعرج الشمسي دون تعرض العناصر للتوترات العالية، حيث سيكون دخل المعرج عبارة عن مجموع سلسلتين. وبذلك تزداد استطاعة المعرج على حساب التوتر أيضاً، وتزداد عدد ساعات عمل المعرج اليومية.

النتائج والتوصيات:

النتائج:

- بينت الدراسة أن استخدام دائرة المعرج يؤدي إلى تخفيض عدد العناصر الالكترونية المستخدمة.
- تقليل التشوهات والتوافقيات الموجودة في موجة الخرج.
- يتم تصنيع السلاسل النصف الجسرية Half-Bridges على شكل وحدات مدمجة منفصلة. يمكن ذلك من إجراء عملية التصنيع بسرعة أكبر وبتكلفة منخفضة.
- تتميز الخصائص الهندسية لهذه الجسور بالمرونة عالية وبالتالي فهي أكثر ملاءمة لإعادة التجميع في حالة حدوث خطأ.

التوصيات:

فيما يلي أهم التوصيات:

- بإعادة تنفيذ انفيرتر باستطاعات كبيرة ومقارنة أدائه مع المعرجات المتوفرة.
- دراسة المعرج ال (AAC Alternative Arm Converter محول الذراع البديل) الذي يعتمد على دائرة مؤلفة من أربع قواطع الكترونية ومكثف ودراسة مزاياه ومقارنته مع المعرج النصف جسري.
- إضافة متتبع نقطة الاستطاعة العظمى وذلك من أجل الاستفادة القصوى من الطاقة التي نحصل عليها.
- زيادة عدد السويات في المعرج وذلك من أجل تأمين شكل موجة قريبة جداً من الشكل الموجي ومقارنة النتائج مع المعرج المنفذ.

- 1-M. DERAKHSHANFAR, Analysis different topologies of multilevel inverters, Göteborg: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2010.
- 2-E. Najafi and A. H. M. Yatim, "Design and Implementation of a New Multilevel Inverter Topology," IEEE, vol. 59, p. 7, 2012.
- 3- للتيار العالي الجهد خطوط في المستخدمة الجهد معرجات , الناصير. ج ، ه .عابدين
المستمر
2016. , دمشق جامعة : دمشق
- 4-Michaël M. C. Merlin, Tim C. Green, Department of EEE, Imperial College, London, UK
- 5-Munch, P., Gorges, D., Izak, M., Liu, S.: 'Integrated current control, energy control and energy balancing of modular multilevel converters'. IECON 2010 – 36th Annual Conf. on IEEE Industrial
- 6-M. Zygmanski, B. Grzesik, and R. Nalepa, "Capacitance and inductance selection of the modular multilevel converter," in Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on. IEEE, 2013, pp. 1-10.
- 7-G.Swapna, V.HimaBindu, M. P.M.Sarma "Hardware Implementation of a Single Phase Inverter", International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 4 Issue 8– August 2013 Hyderabad, India
- 8-Martinez.F,Ramirez.D,Rey.B.A,Pablo.S "Moduler Multilevel Converter:Control and Applications"
- 9-L.M. Tolbert, F.Z. Peng "Multilevel Converter as a Utility Interface for Renewable Energy System"

10-P.Sheeba, M.Nivedha "Design and Implementation of Photovoltaic Power Conversion Using Modular Multilevel Converter(PPCMMC)

11-Subhashree. Choudhury, .Taraprasanna .D ash,Salah.

Kamel,Francisco.Jurado "Multilevel Inverter :A Survey on Classical and Advanced Topologies :Control Schemes, Applications to Power Systems and Future Prospects"

12-Pingyang .Sun,Yumeng Tian ,Josep Pou-Georgios Konstantinou "Beyond the MMC: Extended Modular Multilevel Converter Topologies and Applications"

13-Rashed. Muhammad Power Electronics Handbook

14-Abdul-Kareem-Rami "Multi-Level Inverter In Grid Connected Photo- Voltic Systems",2022

15 - HASSANPOOR. ARMAN "Modulation of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission"

16-أردوينو ببساطة.عبدالله.علي

17- Kaliannan. Thenmalar, Albert . Johny Renoald, Begam . Muhamadha,

" Power Quality Improvement in Modular Multilevel Inverter Using for Different Multicarrier PWM ",EUROPEAN Journal Of Electrical Engineering ,Computer Science,2021

18- _ Agnihotri. Anmo , Bind. Shiva, Kumar. Sanjiv.

Published in: 2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)

19 – Nademi. Hamed , Das. Anandarup , Burgos. Rolando , Norum. Lars E" .A New Circuit Performance of Modular Multilevel Inverter Suitable for Photovoltaic Conversion Plants "

Published in: IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics (Volume: 4, Issue: 2, June 2016).

20– Ayob .Shahrin Bin Md, Iqbal. Atif , Mohamad Nordin. Norjulia, Bin Arif. M. Saad, Gore. Sheetal ." New Asymmetrical Modular Multilevel Inverter Topology With Reduced Number of Switches"

Published in: IEEE Access , Date of Publication: 05 February 2021

21– Elsanabary. Ahmed Ibrahim ; Konstantinou. Georgios; Mekhilef. Saad; Townsend. Christopher David; Christopher David , Seyed. Mehdi.

"Medium Voltage Large–Scale Grid–Connected Photovoltaic Systems "Using Cascaded H–Bridge and Modular Multilevel Converters: A Review.

Published in: IEEE Access, 15 December 2020

22– Adam. Grain Philip, Finney .Stephen, Williams. Barry, and Mohammed Abba. Abdelaziz Yousif.

Full–bridge Modular Multilevel Converter (FB–MMC) with Extended Control Rang"

by GP Adam · 2015.

23– DAULA SIDDIQUE .MARIF, MEKHILEF .SAAD, RAWA .MUHYADDIN, WAHYUDIE .ADDY CHOKAEV. , BEKKHAN AND SALAMOV. ISLAM.

" Extended Multilevel Inverter Topology With Reduced Switch Count and Voltage Stress"

date of publication September 24, 2020,/IEEE.

24– Zouein. Eliane ; Ajemian. Vana; Rayess. Wissam; Mendalek. Nassar.

"Modeling, Control and Simulation of a Modular Multilevel Converter"

Published in: 2019 Fourth International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)

25– Seo. Byuong–Jun; Park. Kwon–Sik; Jo. Kwang–Rae; Jin–Yong . Heo; Nho. Eui–Cheol; Han .Byung–Moon.

" Half–Bridge Submodule Test Circuit for MMC–based Voltage Sourced HVDC System"

Published in: 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)

26– Saad.Hani; Jacobs. Keijo; Lin. Weixing; Jovcic. Dragan.

" Modelling of MMC including half–bridge and Full–bridge submodules for EMT study"

Published in: 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)

27– Hohmann. Fabian;. Bakran. Mark–M; Schuster. Dominik.

" Measures to increase the efficiency of a half–bridge MMC"

Published in: PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Managemen/ Date Added to IEEE Xplore: 26 August 2020.

28– Viatkin. Aleksandr; Ricco. Mattia; Mandrioli. Riccardo; Kerekes. Tamás; Teodorescu. Remus; Grandi. Gabriele.

" A Novel Modular Multilevel Converter Based on Interleaved Half–Bridge"

Published in: IEEE Transactions on Industrial Electronics (Volume: 70, Issue: 1, January 2023) .

29– Viatkin. Aleksandr; Ricco. Mattia; Mandrioli. Riccardo; Kerekes. Tamás; Teodorescu. **Remus**.

" Modular Multilevel Converters Based on Interleaved Half–Bridge Submodules"

Published in: 2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT).

30– Leterme. Willem; Beerten. Jef; Hertem. Dirk Van.

" Equivalent circuit for half–bridge MMC dc fault current contribution"

Published in: 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)

31– Attia. Hussain , Che. Hang Seng, Suan Freddy. Tan Kheng, and Elkhateb. Ahmad

"Bipolar and Unipolar Schemes for Confined Band Variable Switching

Frequency PWM Based Inverte"

Published in: International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)/
October 2021

32– Hashim W., Power Electronic², Electric Power Department, Faculty of
Mech. & Elec. Engineering, Damascus University, 2009

33–A. 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.

34– www.ptd.siemens.de/Presentation_EN_Benefits_of_MMC_ENR_12-07_V_1b

35– Abd El Salam. Mohammed Abd El–Rahman , "Control Techniques of
Induction Motor Drive for Solar Powered Electric Vehicle"

– A THESIS Submitted of Electrical Department, Sohag University

Sohag, Egypt, 2018

36– Booma Nagarajan, S. Joseph Sam Immanuel and G. Boobalan¹

“Phase Disposition PWM Multicarrier Based 5 Level Modular Multilevel Inverter for PV Applications”

Middle–East Journal of Scientific Research 24 (S1): 26–32, 2016

37– Saeed Arazm, H. Vahedi, K. Al–haddad

“ Phase–shift modulation technique for 5–level packed U–cell (PUC5) inverter”

Published 1 April 2018, 018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE–POWERENG 2018)

38– Arumugam. andhakumar , Suresh. Mugilraj ,and Dharmalinga. Mohanrajan N

“Design and Simulation of Modular Multilevel Inverter Using PW”

IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1084 (2021) 012099

Abstract

The use of inverters has become an urgent necessity at the present time, due to the great tendency to use renewable energy sources in order to preserve the environment and to find an alternative energy source for fossil fuels, and since the voltage resulting from some of these sources is DC voltage, it was necessary to use energy conversion systems (Inverters) to convert the DC voltage into an AC suitable voltage for the electrical network.

There are different types of inverters, including the diode-clamp, floating capacitor, H-bridge, and also, 2-level, three-level or multi-level inverters. This dissertation will focus on the modular multi-level inverter, because of its advantages such as low cut-off frequency, less power switching dissipation, in addition to the gradual change in the output voltage, which reduces electromagnetic interference (EMI), and because of the low harmonic content of the output current, we can use it without filters in the alternating current side, thus will reduce the total cost.

These inverters are also characterized by great flexibility in the event of malfunctions, as they are separate units from each other, so that when a malfunction occurs in one of the units, we can replace it without affecting the rest of the units.

A modular multi-level inverter (five-level) was modeled, designed, and implemented in this dissertation. The results of the modeling were consistent with the obtained practical results.

Keywords: modular multi-level inverter, photovoltaic system, renewable energies.



Syrian Arab Republic

Damascus university

Faculty of Electrical and Mechanical Engineering

Power Electrical Engineering

Development of a Multi-Level Inverter of a Photovoltaic System

A thesis submitted to obtain a master's degree in electrical power engineering

By

Eng. Amany Hasson

Supervisors:

Prof.Jamal Alnasser

Ass.prof.Moaz Alnahar

