استخدام المبدل متعدد المستويات MMC في مرحلة التقويم للمحول الذكي عند ربطه مع شبكات الجهد المتوسط

طالب الدكتوراه : عبدالرحمن الحبال

كلية: الهمك – جامعة : البعث

الدكتور المشرف: رامي موسى + د. سامر ربيع

الملخص

تعد المحولات الذكية إحدى المكونات الأساسية للشبكات الذكية المستقبلية التي تضم بالإضافة لمنابع التوليد التقليدية منابع التوليد الموزع وتعد مصادر الطاقات المتجددة جزءاً أساسياً من التوليد الموزع. في هذه المحولات يجب أن يكون المبدل العامل كمقوَم على طرف الجهد المتوسط قادراً على التحكم بالاستطاعتين الفعالة والردية كما يجب أن يكون قادراً على تنظيم الجهد من أجل مرحلة التيار المستمر كما أنه يجب أن يكون قادراً على ضخ الاستطاعة الردية في شبكة الجهد المتوسط عند الحاجة.

يتميز المبدل (MMC) بالعديد من الميزات مثل: صغر حجم المرشحات اللازمة وانخفاض قيمة الجهود التي يجب أن تتحملها أنصاف النواقل المستخدمة ضمن بنيته والبنية المؤلفة من عدة وحدات منفصلة كما أن وجود منفذ تيار مستمر ذو جهد متوسط يعطيه أفضلية عند استخدامه ضمن بنية المحولات الذكية.

سنقوم في هذا البحث بدراسة استخدام المبدل متعدد المستويات (MMC) كمكون من مكونات المحول الذكي في مرحلة التقويم حيث سنقوم باختيار العناصر المكونة للمبدل (MMC) وتطبيق تقنية تعديل مناسبة كما سنقوم بتطبيق خوارزمية تحكم مناسبة لتنظيم الجهد المستمر على خرج المبدل ليكون جاهزاً للربط مع مرحلة تخفيض الجهد بالتردد العالي.

كلمات مفتاحية: مبدل متعدد المستويات، تعديل متعدد عرضاني للنبضة ، محول ذكي

Using Modular Multilevel Converter as rectifier in smart transformer when connected to medium voltage network

Abstract

Smart transformers, are considered as keyroles in the futuristic smart grids that contain renewables, which are essential part, of distributed generating sources. Rectifiers on medium voltage side in these transformers must have the ability of control active and reactive powers and must compensate reactive power in the network when needed.

Modular multilevel converter has many features such as small size filters and low voltage rating semiconductors and a modular structure as it use a medium voltage DC-Link that gives MMC the advantage of connecting to the renewables.

In this research, we will study the ability of using the Modular Multilevel converter as rectifier for the smart transformer as we will select its components using a suitable controlling technique to control the output DC voltage to be connected with the high frequency hight to low transformer

Key words: Modular Multi-level Converter, Multi-Carrier Pulse Width Modulation, smart transformer

1- مقدمة

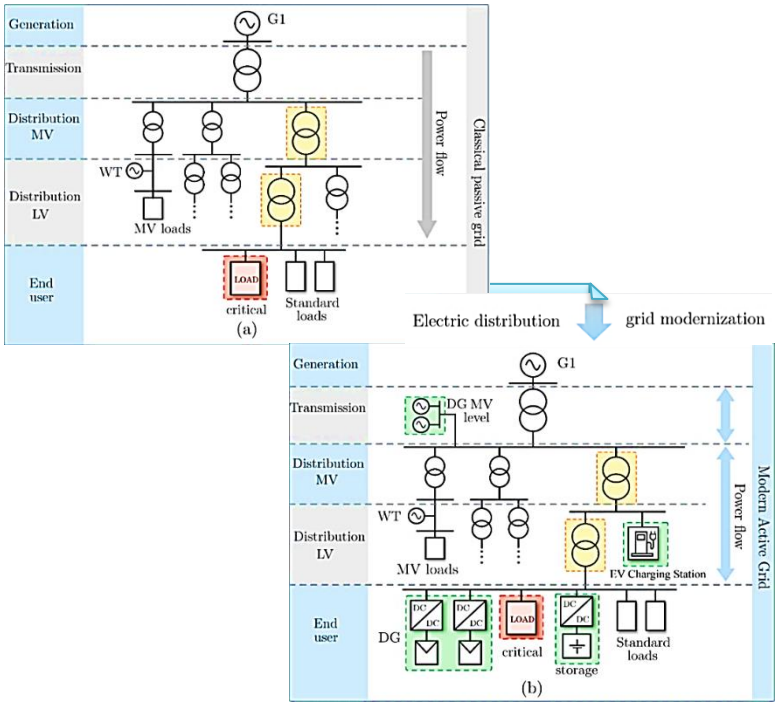
إن تطور التقنيات الحديثة والمعدات الكهربائية خلال القرن العشرين زاد الاهتمام في نظم القدرة الكهربائية. حيث تعتمد الحضارة البشرية على زيادة استخدام الآلات المعقدة ما يسبب تزايد الطلب على الطاقة بالتالي تتزايد أهمية الدراسات والأبحاث على توليد الطاقة وتوزيعها وتحويلها لعدة أشكال بما يتناسب مع التطبيقات المتعددة المترافقة مع تطور استخدامات البشر للتقنيات الحديثة.

كما أن الاهتمام المتزايد بالتغير المناخي جلب الاهتمام لاستخدام منابع الطاقة المتجددة لتوليد الطاقة الكهربائية مثل طاقة الرياح والخلايا الكهرو شمسية والتي من المتوقع تزايد الاعتماد عليها للحصول على الطاقة الكهربائية في السنوات القليلة المقبلة مما يستلزم تجديد البنى التحتية القديمة للشبكات الكهربائية التقليدية والتي تعتمد على الاتجاه الأحادي لنقل القدرة من محطات التوليد باتجاه المستخدم النهائي.

لسنوات عديدة مضت تم التعامل مع أنظمة توزيع الطاقة الكهربائية كعناصر غير فعالة وتم تحديد دور مجموعات التوليد والأحمال بشكل واضح. حيث يتم توليد الطاقة الكهربائية في محطات التوليد عند مستويات جهد معينة ثم يتم رفع هذه الجهود لمستويات مرتفعة تسمح بنقل الطاقة الكهربائية وتقليل الضياعات لمسافات كبيرة ومن ثم يتم توزيعها في شبكات التوزيع ذات الجهد المتوسط والجهد المنخفض للمستهلك. كان ومازال رفع وتخفيض الجهد يتم عن طريق المحولات العاملة على التردد المنخفض (تردد الشبكة). كما ظهر في السنوات القليلة الماضية مفهوم التوليد الموزع والذي يعتمد بشكل رئيسي على الطاقات المتجددة ودمجها ضمن شبكات التوزيع وبمستويات جهود مختلفة متوسطة أو منخفضة وتتوضع بشكل عام بالقرب من الأحمال ما يقلل من ضياعات النقل.

إلا أن اختراق منابع التوليد الموزع لشبكات التوزيع يؤثر على موثوقية الشبكة وجودة الطاقة وذلك بسبب عدم استقرار منابع الطاقات المتجددة. ما أدى في السنوات القليلة الماضية لظهور مصطلحات جديدة مثل الشبكات الذكية والتي تقوم أساساً على نقل الاستطاعة ثنائي الاتجاه من محطات التوليد المختلفة باتجاه الشبكات المحلية والتي تحتوي على منابع للتوليد الموزع وأيضاً نقل الاستطاعة من منابع التوليد الموزع المتواجدة في الشبكات الميكروية المحلية باتجاه شبكات التوزيع وإمكانية تكامل الشبكات فيما بينها للتخلص من المشاكل التقليدية مثل عدم انتظام الجهد وتعويض الاستطاعة الردية وغيرها من المشاكل وذلك بالاعتماد على منظومة اتصالات مترافقة مع الشبكات الكهربائية تكون أحد المكونات الرئيسية للشبكة الذكية. إن الشبكات الذكية تؤمن التحكم الكامل بتدفق الطاقة الكهربائية من قبل شركات الكهرباء الوطنية ما يسمح لها بالتدخل السريع في أوقات الذروة والحد من حصول الأعطال وإمكانية الوصول إلى أماكن الأعطال وتحديد مكانها بسرعة عند حدوثها.

بسبب الاختراق العميق للأنظمة سابقة الذكر في شبكات الخدمة تغيرت البنية التحتية لشبكات التوزيع الكهربائية وتزداد استخدامات أنظمة إلكترونيات القدرة فيها. كنتيجة لذلك لم يعد مفهوم – جريان الاستطاعة أحادي الاتجاه من شبكات الجهد المتوسط باتجاه شبكات الجهد المنخفض – مسلماً به وأصبح جريان الاستطاعة يتم بالاتجاهين بالتالي تم تقديم مفهوم الشبكات الفعالة كما في الشكل (1) الذي يبين تحديث مفهوم شبكة التوزيع من شبكة كلاسيكية غير فعالة إلى شبكة عصرية فعالة [1].



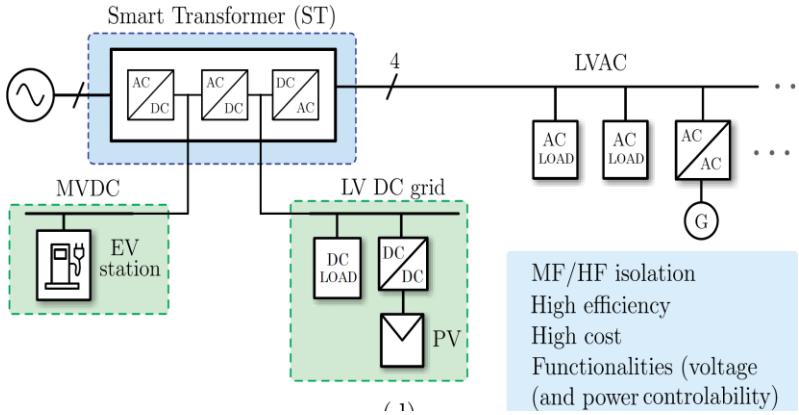
الشكل 1 الانتقال من الشبكة التقليدية غير الفعالة إلى الشبكة الفعالة

2- المحولات الذكية ودورها في الشبكات الذكية

بالرغم من التحديثات العديدة التي طالت الشبكات الكهربائية إلا أن أحد المكونات الحساسة لهذه الشبكات بقيت على حالها بدون أي تغيير أساسي في بنيتها وهي المحولات الكهربائية والتي تعتبر العمود الفقري للشبكات الكهربائية حيث تؤمن عمليات التحويل بكفاءات مرتفعة تصل لـ 98% وبعمر طويل نسبياً يمكن أن يصل لـ 20 عاماً.

إلا أن عدم إمكانية التحكم في المحولات التقليدية يجعل من الإلزامي استخدام معدات لتنظيم الجهد وبالتالي فإن تحديث بنية المحولات سيؤمن تنظيم الجهد بالشكل المطلوب ويؤدي لتحسين جودة الطاقة بدون الحاجة لأي معدات إضافية. ما أدى لظهور محولات الحالة الثابتة SST والتي تعرف بأنها نظام يعتمد على إلكترونيات القدرة من المفترض أن يحل محل المحولات الكهربائية ذات التردد المنخفض التقليدية. إلا أن معظم الأبحاث

المنشورة عن هذه المحولات ركزت على تحسين الكفاءة وتقليل الحجم وافتقرت لنظام تحكم بالجهد والتيار بالرغم من أنها من أهم مكونات هذه المحولات ما أدى لبروز مطلح المحولات الذكية والذي يمكن تعريفه بأنه محول حالة ثابتة مصحوب بخوارزميات تحكم واتصالات تهدف لزيادة وظائف هذه المحولات ولها القدرة على حل المشكلات المترافقة مع تحديث شبكات التوزيع. إن تعدد الوظائف التي يمكن للمحول الذكي القيام بها أدى لخلق ظروف عمل تختلف عن تلك المصاحبة لاستخدام المحولات التقليدية ما زاد من صعوبة مواكبة متطلبات الكفاءة والموثوقية إلا أن من أهم ميزات هذه المحولات إمكانية دمج شبكات الجهد المستمر بعدة مستويات من الجهود. يبين الشكل 2 دور المحول الذكي كمكون أساسي في الشبكات الذكية المستقبلية.

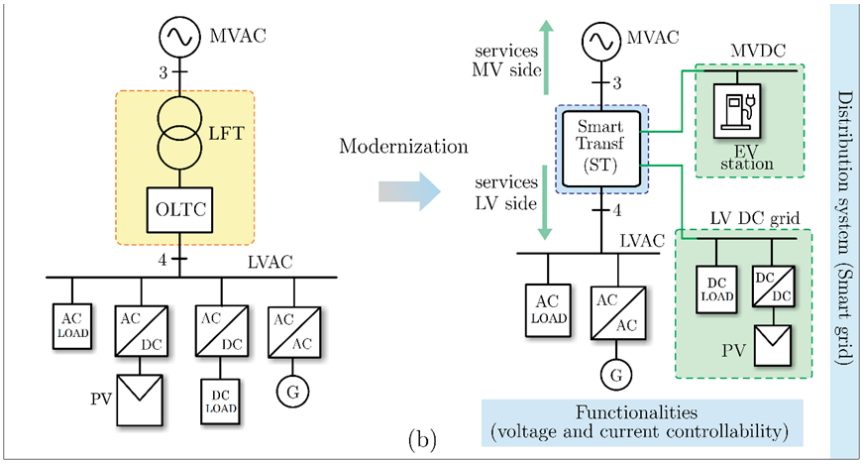


الشكل 2 بنية الشبكة الذكية والتي تعتمد بشكل رئيسي على المحولات الذكية

بالإضافة لاستبدال المحولات التقليدية فإن المحولات الذكية يمكن أن توفر خدمات إضافية للشبكة ما يجنب شركات الكهرباء الوطنية استخدام المعدات الإضافية اللازمة لدعم الشبكة. لهذا لا تسعى المحولات الذكية لمنافسة المحولات التقليدية من حيث الكلفة والفعالية والحجم إلا أن هذه المحولات يمكن أن تستبدل كامل منظومة المحولات المرفقة مع معدات تنظيم الجهد. بالنتيجة فإن المحولات الذكية تساعد على حل مشاكل شبكات التوزيع إلا أن تطبيقها واستخدامها هو تحد بحد ذاته.

ظهر مصطلح محولات الحالة الثابتة للمرة الأولى عام 1960 حيث كانت الفكرة العامة آنذاك هي استخدام إلكترونيات القدرة لتنظيم جهد الخرج للمحول ما يسهم بتخفيض الوزن والحجم إلا أنه لم يكن من الممكن تطبيق هذا المفهوم في ذلك الوقت وذلك بسبب محدودية أداء العناصر الإلكترونية. إلا أنه مع التطور السريع لتقنيات العناصر النصف ناقلة وظهور عناصر سريعة الإبدال بضياعات قليلة نسبياً أصبح بالإمكان الحصول على أنظمة تعمل بسرعات إبدال عالية ما تسبب بانخفاض حجم ووزن مبدلات القدرة وبالتالي أصبح من الممكن استخدام التطبيقات التي تتطلب كثافة طاقية عالية. مثل القطارات الكهربائية حيث أن الحلول التقليدية ثقيلة وذات حجم كبير بسبب المحولات ذات الترددات المنخفضة. بالتالي يمكن أن يؤمن استخدام المحول الذكي الجهد المستمر المناسب لقيادة هذه القطارات بسرعات مختلفة. مع انخفاض الحجم والوزن بنسبة تتراوح بين 20% و50% وتحسن الكفاءة من 93% إلى 96%.

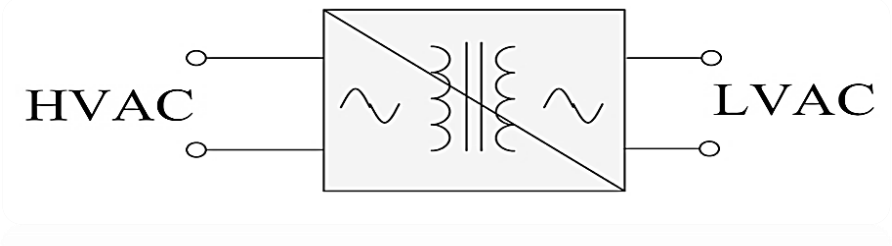
يمكن للمحولات الذكية القيام بوظائف إضافية عندما تترافق مع منظومة اتصالات وتحكم ملائمة بالتالي يمكن استخدامها كتقنية أساسية لتحقيق وتمكين وظائف الشبكات الذكية. وقد تم اعتبار المحولات الذكية واحدة من أهم التقنيات الواعدة من قبل المعهد التقني في ماساتشوستس (MIT) في عام 2010 من بين أهم الوظائف الممكنة لهذه المحولات التدفق العكسي للاستطاعة في شبكات التوزيع (أي جريان الاستطاعة من طرف الجهد المنخفض باتجاه طرف الجهد المتوسط) وأيضاً تكامل مرافق تخزين الطاقة مع الشبكة والتحكم والسيطرة على الشبكات الهجينة (التي تستخدم التيار المستمر والتيار المتناوب) وأيضاً تحسين جودة الطاقة. في هذه الحالة فإن هذه المحولات لن تقوم فقط باستبدال المحولات التقليدية كوسيلة ربط بين شبكات الجهد المتوسط وشبكات الجهد المنخفض إلا أنها أيضاً تؤمن شبكات تيار مستمر للجهود المنخفضة والمتوسطة كما يبين الشكل 3 [1]



الشكل 3 موقع المحول الذكي ضمن الشبكات الهجينة

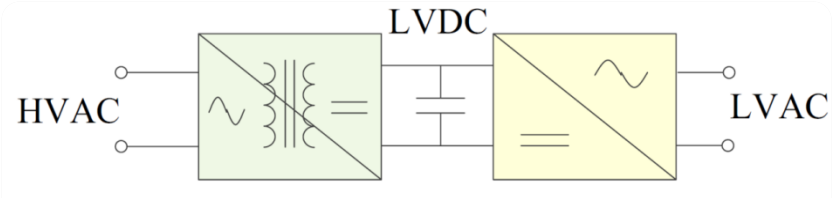
يمكن تصنيف المحولات الذكية حسب عدد مراحل تحويل الطاقة إلى [13]:

1) **المحولات ذات المرحلة الواحدة** يبين الشكل 4 محول ذو مرحلة واحدة عادة تستخدم المبدلات المصفوفية وتعتبر ذات كثافة طاقة عالية بسبب غياب وجود وصلة تيار مستمر إلا ان غياب العزل بين شبكتي الجهد المتوسط والمنخفض يحد من إمكانية التحكم بشكل مناسب.



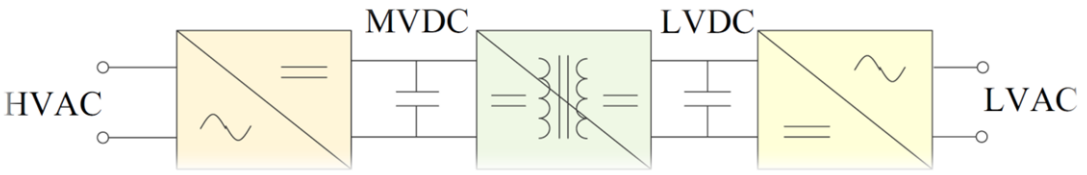
الشكل 4 بنية المحول الذكي ذو مرحلة واحدة

2) **المحولات ذات المرحلتين** يبين الشكل 5 وجود وصلة تيار مستمر واحدة ضمن بنية المحول ذو مرحلتين وبالتالي وجود مكثف في هذه الوصلة ما يحسن إمكانية التحكم إلا أنها محدودة الوظائف.



الشكل 5 بنية المحول الذكي ذو مرحلتين

3) **المحولات ذات ثلاث مراحل** كما يبين الشكل 6 يتألف من مقوم يحول الجهد المتوسط المتناوب إلى جهد متوسط مستمر ومبدل تيار مستمر من الجهد المتوسط إلى الجهد المنخفض والمرحلة الثالثة قالب من الجهد المستمر المنخفض إلى الجهد المنخفض المتناوب وتحوي هذه البنية عادة على وصلتي تيار مستمر واحدة منها على الأقل يمكن وصلها مع شبكة تيار مستمر حيث يؤمن العزل بين شبكتي الجهد المتوسط والمنخفض درجة عالية من الحرية للتحكم بالمنظومة ككل ويسمح باستخدام الوظائف المطلوبة. بالتالي فإن البنية المؤلفة من ثلاث مراحل هي البنية المفضلة لتكوين المحولات الذكية بالتالي سنعتمد في هذا البحث على المحول المؤلف من ثلاث مراحل.



الشكل 6 بنية المحول الذكي ذو 3 مراحل

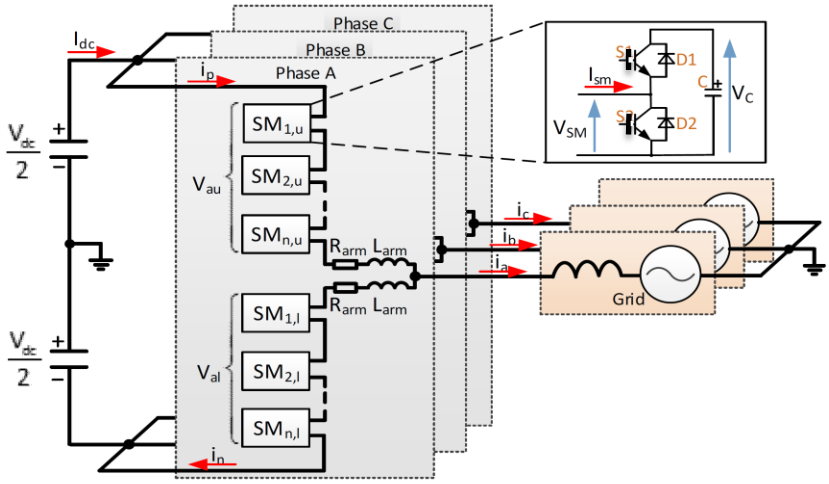
يقوم المبدل المستخدم في طرف الجهد المتوسط للمحول الذكي بتحويل الجهد المتوسط المتناوب للشبكة لجهد مستمر متوسط بالتالي فإنه يجب أن يتحكم بالاستطاعتين الفعالة والردية وأيضاً يجب أن يقوم بتنظيم الجهد للمرحلة التالية وهي مرحلة تحويل الجهد المستمر المتوسط إلى جهد مستمر منخفض. كما يقوم هذا المبدل بدعم شبكة الجهد المتوسط وذلك بتقديم استطاعة ردية لها عند الحاجة. بالتالي للتعامل مع الجهد المتوسط يعتبر المبدل متعدد المستويات ذو البنية المؤلفة من عدة وحدات فرعية (MMC) من الحلول المفضلة لهذه المرحلة بسبب تكوينه وخصائصه وقدرته على التعامل مع الجهود المتوسطة وفقاً لبنيته المؤلفة من عدة وحدات منفصلة ما يسمح باستخدام العناصر نصف الناقلة الحالية بدون أي وصل تسلسلي فيما بينها. إحدى الميزات المثيرة للاهتمام في المبدل (MMC) وجود وصلة تيار مستمر ذات جهد متوسط ما يعطي أفضلية أخرى لهذه المبدلات في المحولات الذكية.

3- المبدل متعدد المستويات من النوع MMC

إن تحويل الطاقة والتحكم بها يجب أن يتم بموثوقية وأمان لتلبية كافة المتطلبات ما استلزم تطوير المبدلات ذات منبع الجهد والتي أصبح استخدامها اعتيادياً في أنظمة النقل بالتيار المستمر عالي الجهد وبالأخص في المزارع الريحية البحرية حيث أبدت كفاءة عالية في نقل الاستطاعات العالية ولمسافات طويلة بالتالي ظهر عام 2003 المبدل متعدد المستويات ذو البنية المؤلفة من وحدات فرعية من قبل العالم ماركاردت حيث يتميز بأفضليات على المبدلات ذات منابع الجهد التقليدية مثل إمكانية العمل على مستويات جهود مرتفعة وبنيته المؤلفة من وحدات فرعية منفصلة يمكن تبديلها أو تحييدها في حال حصول أي أعطال ومتابعة العمل بدون توقف ما يسمح بطول فترة عملها بدون إجراء صيانة ويعطيها موثوقية أعلى، بالإضافة لانخفاض المحتوى التوافقي بسبب جهد الخرج الجيبي تقريباً ما يسمح بخفض حجم المرشحات اللازمة بالتالي تنخفض الكلفة

وتعقيد المنظومة ككل[22]. مثل العديد من المجالات الهندسية فإن البنى المؤلفة من وحدات منفصلة والموزعة تلبي متطلبات المشاريع الحديثة: حيث أن هذه البنية تعطي تشغيل ذو موثوقية عالية ويسهل عمليات تشخيص الأعطال والصيانة وأيضا يسمح بإعادة ضبط نظام التحكم وفق التطبيق المراد. كما تقوم خوارزمية بعزل الجزء الذي قد يحصل فيه عطل ما يسمح باستمرار العمل بشكل أقرب لطور العمل الطبيعي عند حدوث أعطال.

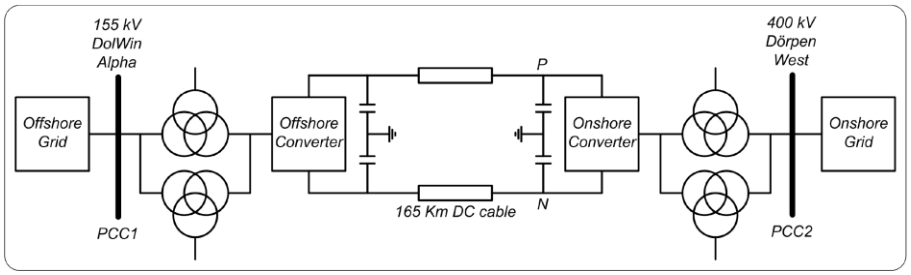
يبين الشكل 7 دارة المبدل الوحدوي متعدد المستويات ثلاثي الطور حيث يتألف كل طور من ذراعين علوية وسفلية كل منها مؤلف من عدة خلايا تقطيع نصف جسرية موصولة فيما بينها على التسلسل وموصولة مع ملف له مقاومة. نقطة التقاء الذراعين موصولة مع الخرج المتناوب لكل طور. كما يبين الشكل بنية الوحدات النصف جسرية المستخدمة التي تتألف كل منها من قاطعين إلكترونيين من نوع (IGBT) يعملان بالتناوب ومكثف يتم شحنه وتفريغه حسب وضعية القواطع الموافقة له وجهة التيار المارة بالوحدة.



الشكل 7 دارة المبدل الوحدوي متعدد المستويات ثلاثي الطور

يشار عادة لطرف التيار المستمر بالمصطلح (DC-link) وهو الطرف الموصول مع البارات الموجبة والسالبة لكل ساق (leg) من المبدل. الأطوار الثلاثة للطرف المتناوب للمبدل موصولة مع النقاط الوسطى لكل ساق (a,b,c) حيث تمثل كل ساق أحد الأطوار الثلاثة. كل ساق تتألف من ذراعين(arm)، يشار عادة للذراع الموصولة مع البار الموجب للطرف المستمر بالذراع العلوية بينما تسمى الذراع الموصولة مع البار السالب بالذراع السفلية. كل ذراع تحوي على عدد من الوحدات (Submodule) وملف (L). يكون ملف الذراع موصول على التسلسل مع كل مجموعة من الوحدات في مرحلة التشغيل لتحديد قيمة التيار الناتج عن فرق الجهد الآني الحاصل بين الذراعين.

يتم تركيب المبدلات متعددة المستويات من النوع MMC في خطوط النقل بواسطة التيار المستمر ذو الجهد العالي من قبل الشركات العملاقة مثل سيمينز وABB وAlstom وتستخدم هذه التقنية لربط شبكات التيار المتناوب فيما بينها أو لربط المزارع الريحية البحرية مع الشبكات العامة حيث في كلتا الحالتين يتم استخدام المبدل متعدد المستويات من النوع MMC للحصول على تيار مستمر ذو جهد عال. الغالبية العظمى من المزارع الريحية التي تم تنفيذها مؤخراً في ألمانيا وحتى المخطط تنفيذها في الفترة المقبلة تتم باستخدام هذه المبدلات كمقومات للجهود العالية بغية نقل الاستطاعة المتولدة عن هذه المزارع إلى شبكة التوزيع العامة في البر مثل المشروع DolWin1 والذي يعمل بجهد ±320كيلوفولط كما يبين الشكل8



الشكل 8 مخطط عام للمشروع DolWin1

يمكن استخدام المبدل متعدد المستويات من النوع MMC في بعض تطبيقات الجهد المنخفض أيضاً والتي تحتاج إلى موثوقية عالية وتتطلب أداء عالي الكفاءة وجودة طاقية

عالية وتتطلب الحد الأدنى للتداخل الكهرطيسي مثل محطات شحن السيارات الكهربائية وتطبيقات الطيران حيث يمكن استخدام وحدات أساسية مكونة من ترانزستورات من النوع MOSFETحيث أن استخدام هذه الترانزستورات يمكن أن يقلل ضياعات الإبدال.

في [3] تم استخدام المبدل متعدد المستويات من النوع MMC كواجهة لربط الشبكة العامة مع المنازل الذكية والتي تحوي على ألواح توليد كهرو شمسية مع مرافق تخزين والتي توصل مع بارات تيار مستمر وقد أظهر استخدام هذا المبدل والمؤلف من ترانزستورات من النوع MOSFET ميزات عدة مقارنة بالمبدلات التقليدية مثل انخفاض حجم المرشحات اللازمة وتخفيض الضياعات ما يجعلها أكثر ملاءمة للمنازل والمنشآت التي تحوي على ألواح كهر وشمسية يمكن أن تضخ الفائض من إنتاج الطاقة الكهربائية في الشبكات العامة.

3-1- بنية الوحدة الأساسية (Sm Sub-module)

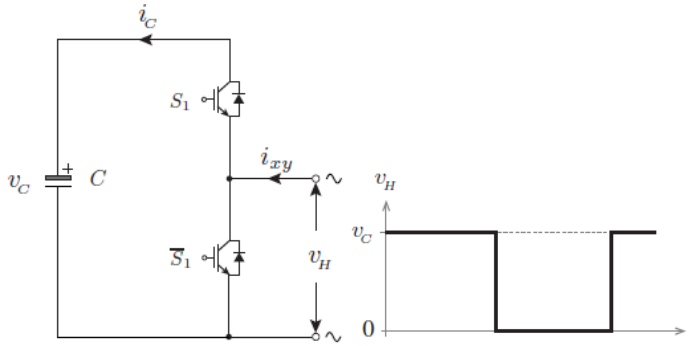
الوحدة هي عبارة عن دارة بسيطة لتحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب. عادة ما تتكون هذه الوحدات من قاطعين ومكثف. يتكون كل قاطع من ترانزستور ثنائي ذو بوابة معزولة IGBT بمستوى جهد يتراوح بين 1200 – 1700 فولط، مع ديود موصول على التضاد بحيث يكون القاطع قادر على تمرير التيار بالاتجاهين. هناك عدة بنى لهذه الوحدات تستخدم في المبدلات الوحدوية متعددة المستويات أهمها بحسب [21، 22]:

- الوحدة ذات البنية النصف جسرية (HB)
- الوحدة ذات البنية الجسرية (FB)
- الوحدة ذات البنية النصف جسرية المتتالية (CH)
- الوحدة ذات المكثف الحر (FC)

سنقتصر في شرحنا على الوحدة ذات البنية النصف جسرية كونها الوحدة التي سنستخدمها في النموذج المدروس لأنها تعتبر من أكثر أنواع الوحدات انتشاراً نظراً لأنها تمتاز بضياعات إبدال أقل و سهولة التحكم بها نسبياً و كلفة أقل مع أداء جيد. يشار عادة للوحدة النصف جسرية بخلية التقطيع، و يبين الشكل 9 دارة هذه الوحدة. حيث

تتألف من قاطعين إلكترونيين من نوع IGBT (S_1 و $\bar{S}_1$) و ومكثف واحد C. يعمل القاطعان بشكل متبادل لتنظيم قيمة جهد المكثف عند القيمة v_c.

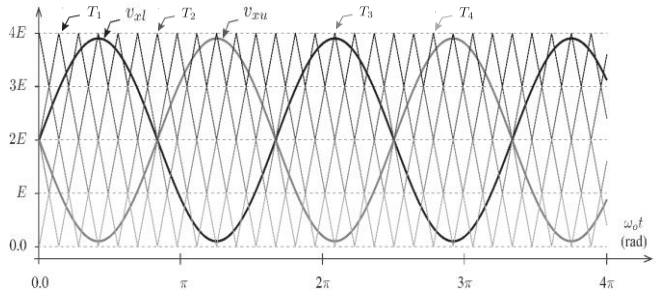
يبين الشكل (9) خرج خلية التقطيع وهو عبارة عن جهد ذو مستويين هما الـ 0 و $\boldsymbol{v_c}$ عندما يكون القاطع العلوي بحالة تمرير "ON" يكون جهد الطرف المتناوب للخلية مساوياً للقيمة $\boldsymbol{v_c}$، في هذه الحالة يزداد جهد المكثف عندما تكون جهة التيار موجبة أي من منبع الجهد المستمر باتجاه الطرف المتناوب للمبدل، و يتناقص عندما تكون جهة التيار سالبة أي من الطرف المتناوب باتجاه الطرف المستمر للمبدل. عندما يكون القاطع العلوي بحالة عدم تمرير "OFF" يكون جهد خرج خلية التقطيع مساوياً للصفر، في هذه الحالة يبقى جهد المكثف بدون تغيير مهما كانت جهة التيار المار بالمبدل حيث يتم في هذه الحالة تجاوز خلية التقطيع بمرور التيار خلال القاطع السفلي. تجب الإشارة إلى أن عمل القاطعين يجب أن يكون بالتناوب أي في كل لحظة يجب أن يكون أحدهما بحالة تمرير "ON" والآخر بحالة عدم تمرير "OFF" و لا يسمح أن يكون كلا القاطعين بحالة تمرير "ON" لتجنب وقوع قصر على طرفي المكثف. وفقط عند الإقلاع أو في حالة الأعطال يسمح أن يكون كلا القاطعين بحالة "OFF" [17].



الشكل 9 بنية الوحدة نصف الجسرية وموجة جهد الخرج

3-2- التعديل العرضاني للنبضة ذو الانزياح الطوري PS-PWM

للتحكم بالمبدلات ثنائية المستوى عادة ما يتم استخدام مخطط تعديل الإشارة الحاملة (Carrier modulation) والتي يشار إليها عادة بالتعديل الجيبي-المثلثي (sine-triangular modulation). تعتمد هذه التقنية على مقارنة إشارة التعديل (modulation signal) وهي إشارة جيبيه مع الإشارة الحاملة (Carrier signal) والتي تكون عادة إشارة مثلثية لتوليد إشارات قدح القواطع الإلكترونية. يمكن تعميم هذه الطريقة للتحكم بالمبدلات متعددة المستويات حيث تستخدم عدة إشارات حاملة مثلثية كل منها تستخدم لتوليد نبضات قدح قواطع إحدى الوحدات وتتم مقارنتها مع إشارة تعديل (إشارة مرجعية) جيبية لكل طور. إذا كان مطال الإشارة المرجعية أكبر من الإشارة الحاملة يتم تشغيل الوحدة الموافقة حسب جهة التيار (إما لشحن المكثف أو تفريغه عن طريق نبضات التعديل العرضاني) أما إذا كان مطال الإشارة المرجعية أصغر من الإشارة الحاملة يتم تجاهل الموديول وإبقائه بحالة عدم تشغيل. تسمى هذه التقنية مخطط التعديل ذو الحوامل المتعددة. تكون الإشارات الحاملة (المثلثية) في هذه التقنية متساوية المطال متوضعة بشكل أفقي بعضها بجانب بعض ويتم توليد نبضات قدح الوحدات بمقاطعة الإشارات الحاملة السابقة مع الإشارة الجيبية المرجعية ويبين الشكل 10 المخطط العام لهذه التقنية[17] .



الشكل 10 المخطط العام لتقنية التعديل العرضاني للنبضة ذو الانزياح الطوري

3-3- التحكم الموجه عن طريق الجهد (Voltage-Oriented Control)

تعد طريقة التحكم الموجه عن طريق الجهد(Voltage-Oriented Control) من أشهر طرق التحكم بالمبدلات الوحدوية لربطها مع الشبكات، إذ يتم تطبيق هذه الطريقة بشكلٍ عام عن طريق تحويل كلارك وتحويل بارك (Clarke transformation & Park transformation) إذ يتم تحويل الإشارة من المحاور الثابتة للأطوار الثلاثة a, b, c إلى محورين تزامنيين d, q يدوران بشكلٍ متزامن مع جهد الشبكة. يظهر الشكل 11 المخطط الصندوقي لربط المبدل متعدد المستويات من النوع MMC مع الشبكة، إذ يتم ذلك أولاً عن طريق قياس جهد الشبكة والحصول على زاوية جهد الشبكة في كل لحظة θ_g باستخدام حلقة تحديد الطور (Phase-locked loop PLL) بحيث تستخدم زاوية جهد الشبكة في كل لحظة θ_g لتحويل جهود وتيارات الأطوار الثلاثة a, b, c إلى جهود وتيارات في المحاور التزامنية d, q وهي قيم مستمرة يسهل التحكم بها بوساطة متحكمات تناسبية تكاملية، تقوم هذه المتحكمات بتوليد إشارات التعديل المرجعية الثلاثة اللازمة لقيادة قواطع المبدل الوحدوي متعدد المستويات من خلال تقنية التعديل العرضاني للنبضة[18].

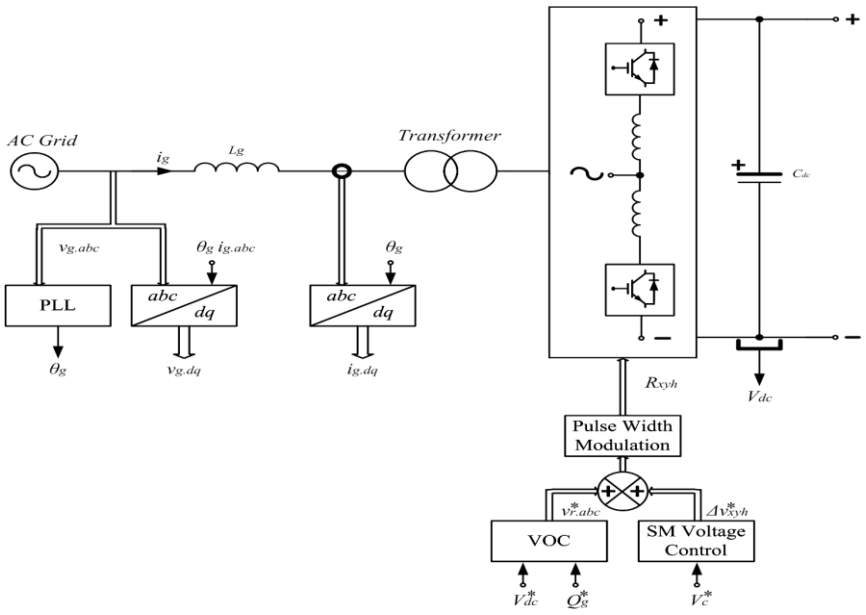
تعطى الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية بالنسبة للمحاور الدوارة التزامنية d, q بالعلاقتين[18] :

$$P_g = 1.5\left(v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg}\right) \qquad (1)$$

$$Q_g = 1.5\left(v_{qg}i_{dg} - v_{dg}i_{qg}\right) \qquad (2)$$

حيث v_{dg} وv_{qg} مركبتي جهد الشبكة على المحاور التزامنية، i_{dg} وi_{qg} مركبتي تيار الشبكة على المحاور التزامنية، ومن الواضح أن كلا الاستطاعتين تتعلقان بمركبتي تيار الشبكة على المحاور شعاع جهد الشبكة منطبق على المحور التزامني d، وتدعى هذه العملية بتوجيه الجهد وبذا تصبح المركبة v_{qg} مساوية للصفر والمركبة v_{dg} ذات قيمة ثابتة وتساوي $|v_g|$. بالتالي يصبح لدينا:

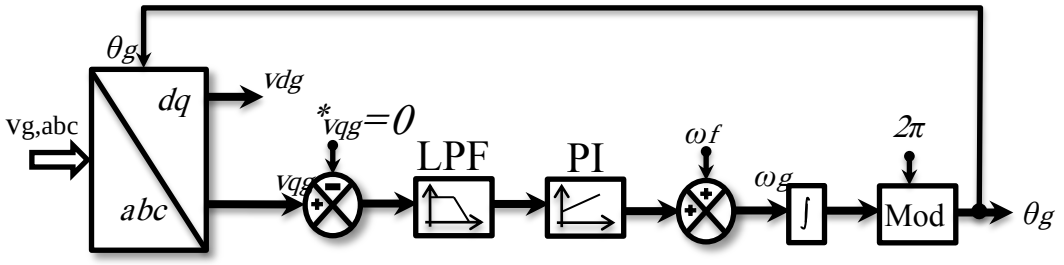
$$P_g = +1.5v_{dg}i_{dg} \qquad (3)$$



الشكل 11 المخطط الصندوقي لربط المبدل متعدد المستويات مع الشبكة

$$Q_g = -1.5 v_{dg} i_{qg} \qquad (4)$$

وبذلك من أجل v_{dg} ذات القيمة الثابتة تكون العلاقة بين P_g وi_{dg} علاقة خطية وكذلك العلاقة بينQ_g وi_{qg} بالتالي للحصول على عامل استطاعة مساوٍ للواحد يمكن استخدام $i^*_q=0$ إشارة مرجعية لمركبة التيار على المحور التزامني q. وللحصول على مركبتي الجهد ومركبتي التيار على المحاور التزامنية نحتاج إلى زاوية جهد الشبكة في كل لحظة θ_g وذلك للحصول على تطابق تام بين جهد الشبكة v_g والمحور التزامني d، إن زاوية جهد الشبكة في كل لحظة θ_g تلعب الدور المحوري في عملية تحويل بارك للحصول على مركبتي الجهد ومركبتي التيار على المحاور التزامنية من المركبات ثلاثية الطور يتم الحصول على النبض الخاص لجهد الشبكة باستخدام حلقة تحديد الطور (Phase-locked loop PLL) يبين الشكل 12 المخطط الصندوقي لحلقة تحديد الطور[1]، إذ يتم تحويل جهد الشبكة ثلاثي الطور المقاس إلى المركبتين التزامنيتين باستخدام خط التغذية العكسية زاوية جهد الشبكة في كل لحظة θ_g ، من ثم يتم استخدام فلتر من نوع (Low-pass filter) وذلك لترشيح ارتياب الجهد، وفي المرحلة التالية يتم استخدام متحكم تناسبي تكاملي لجعل قيمة مركبة الجهد على المحور التزامني q تساوي الصفر vqg=0. يتم إضافة القيمة ωf بوصفها تغذية أمامية لخرج المتحكم للحصول على النبض الخاص للشبكة ωg الذي يتم تحويله لزاوية جهد الشبكة في كل لحظة θg باستخدام صندوق تكامل تتراوح قيمة θg في هذه المرحلة بين -π و+π يتم تحويلها إلى المجال بين 0 و2π.



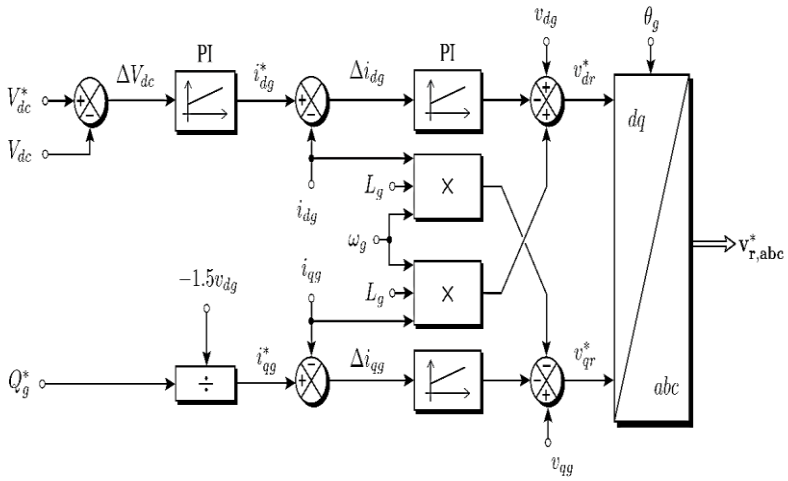
الشكل 12 المخطط الصندوقي لحلقة تحديد الطور

للقيام بتحويل بارك للحصول على مركبتي المحاور التزامنية لجهد الشبكة ومركبتي المحاور التزامنية للتيار يمكن استخدام المعادلات الآتية:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

تتألف طريقة التحكم الموجه عن طريق الجهد (Voltage-Oriented Control) كما يبين الشكل 13 من حلقتين داخليتين للتحكم بالتيار وذلك لضمان التحكم الدقيق بمركبتي التيار على المحاور التزامنية وحلقة خارجية واحدة للتحكم بجهد الطرف المستمر إذ يتم تحويل المركبات الثلاثية الطور لتيار الشبكة للمركبتين التزامنيتين للتيار i_{dg} و i_{qg}باستخدام زاوية جهد الشبكةθ_g . تمثل المركبة التزامنية i_{dg} المركبة الفعالة لتيار الشبكة ثلاثي الطور، بينما تمثل المركبة التزامنية i_{qg} المركبة الردية لتيار الشبكة ثلاثي الطور، يتيح التحكم المستقل لهاتين المركبتين التحكم بكل من الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية بشكل منفصل[18].



الشكل 13 المخطط الصندوقي طريقة التحكم الموجه عن طريق الجهد

3-4- اختيار سعة مكثف الوحدة

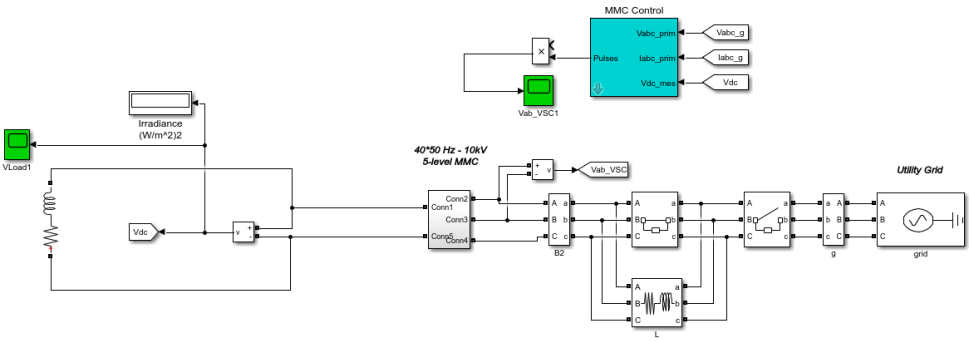
يمكن حساب سعة مكثف الوحدة الفرعية للمبدل وفقاً لتغيرات الطاقة ضمن ذراع المبدل والمتعلق بتردد الشبكة [1] بالتالي يمكن اختيار سعة مكثف الوحدة بالعلاقة

$$C_{(MMC)} = \frac{S}{3\omega N_{mod} V_C \Delta V_C}$$

$$C_{(MMC)} = \frac{1000000}{3 * \omega * 4 * 4375 * 100} = 5{,}5mF$$

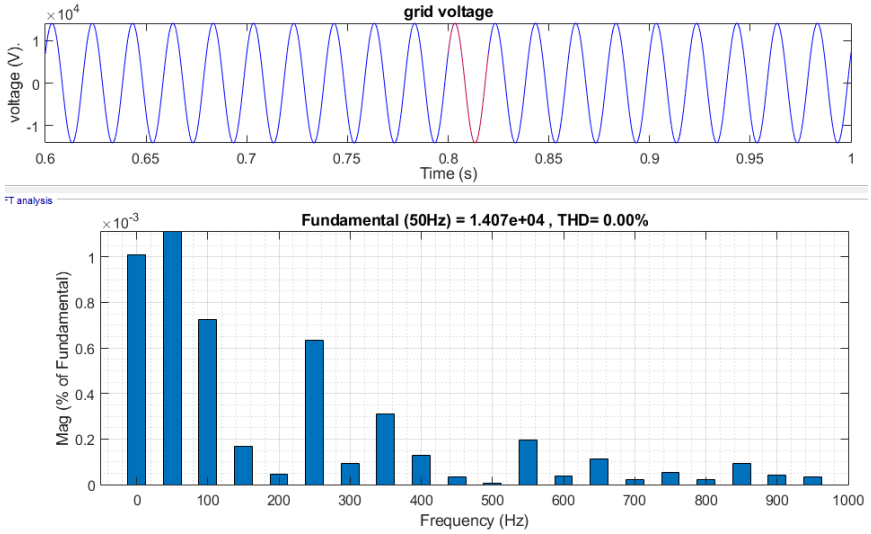
4- نمذجة عمل المبدل متعدد المستويات من النوع MMC

قمنا باستخدام بيئة Matlab/Simulink لنمذجة عمل المبدل متعدد المستويات من النوع MMC وقمنا بوصله مع شبكة جهد متوسط 10kV وتطبيق خوارزمية تحكم موجه عن طريق الجهد وباستخدام طريقة التعديل العرضاني للنبضة ذو الانزياح الطوري PS-PWM ويبين الشكل 14 النموذج المذكور

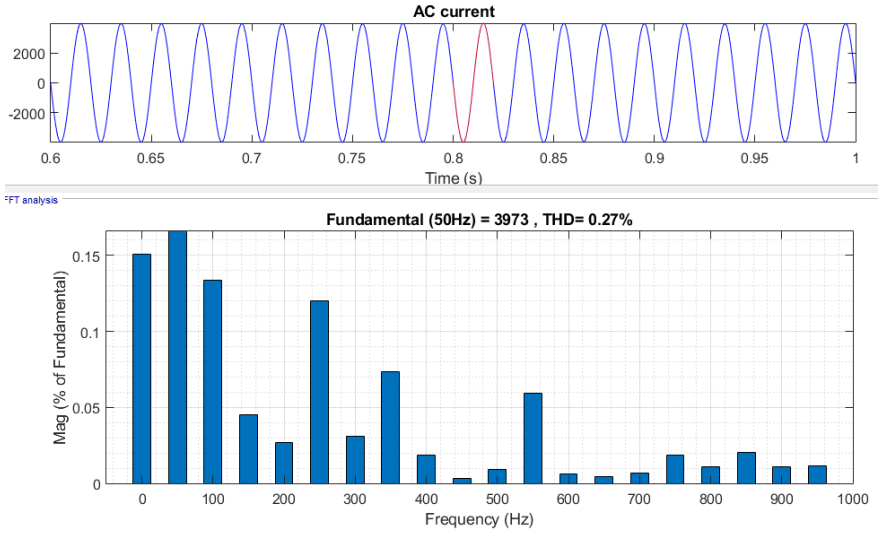


الشكل 14 نموذج لمبدل متعدد المستويات من النوعMMC موصول مع شبكة 10كيلوفولط

اعتبرنا أن جهد الشبكة جيبي بدون أي تشوهات كما يبين الشكل 15 كما أن موجة التيار هي أيضا موجة جيبية بتشوه شبه معدوم كما يبين الشكل 16 مع العلم أننا لدراسة سلوك المبدل قمنا بوصل خرج المبدل في طرف الجهد المستمر مع حمل تحريضي أومي.

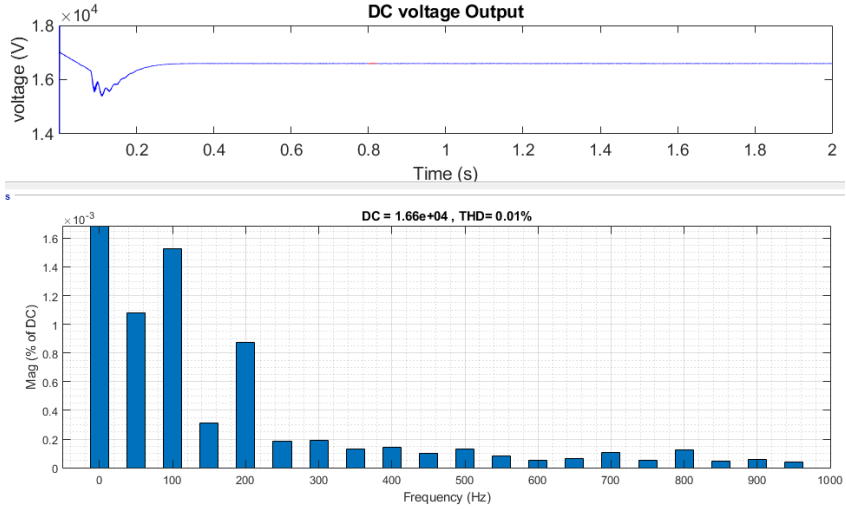


الشكل 15 تحليل فورييه لجهد الشبكة



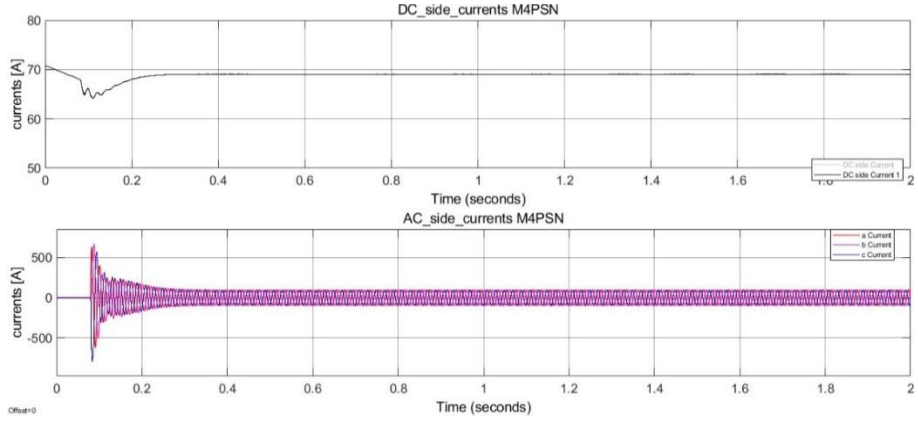
الشكل 16 تحليل فورييه لتيار الطرف المتناوب للمبدل

عند وصل الطرف المتناوب للمبدل مع الشبكة يكون الجهد في الطرف المستمر بقيمة 16.6 كيلوفولط وبتذبذب شبه معدوم كما يبين الشكل 17 كما أن الجهد يستقر عند قيمته خلال أقل من 0.3 ثانية



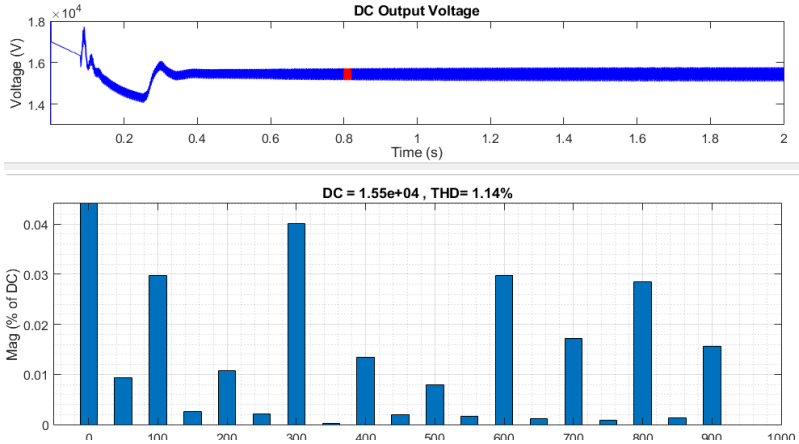
الشكل 17 جهد الطرف المستمر عند خرج المبدل

يبين الشكل 18 تيار الحمل الموصول عند الطرف المستمر للمبدل وأيضاً نلاحظ أن التيار يستقر عند القيمة 69 أمبير بتذبذب شبه معدوم خلال أقل من 0.3 ثانية

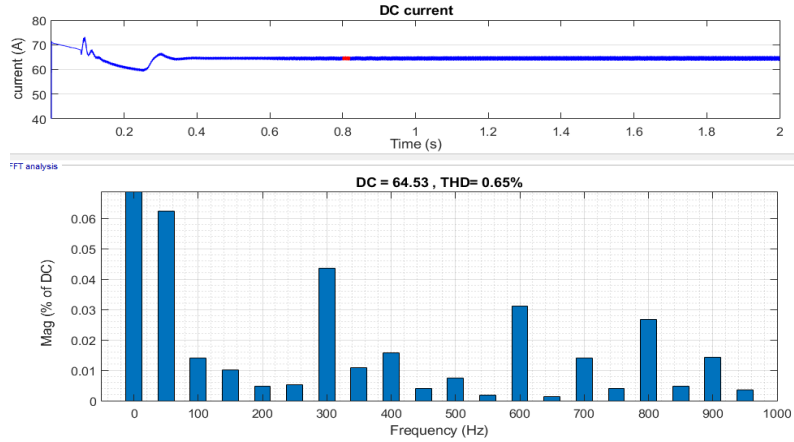


الشكل 18 تيار الحمل عند الطرف المستمر

تمكننا خوارزمية التحكم المستخدمة من تثبيت قيمة الجهد عند قيمة أقل من القيمة الاسمية وقد قمنا بوضع نقطة هدف لحلقة التحكم عند القيمة 15.5 كيلوفولط وقد قام المبدل بتثبيت قيمة الجهد عند هذه القيمة لكن يلاحظ زيادة التذبذب في موجة الجهد المستمر عند خرج المبدل لـ 1.14% في هذه الحالة كما أن الوصول لهذه القيمة استغرق وقتاً أطول كما يبين الشكل 19 إلا أن موجة تيار الحمل كانت أكثر استقراراً وبتذبذب 0.65% كما يبين الشكل 20

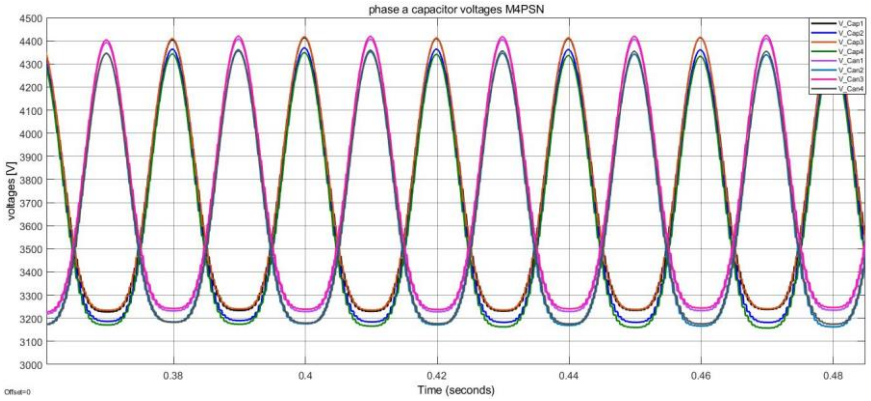


الشكل 19 جهد الطرف المستمر عند خرج المبدل عند وضع نقطة هدف للجهد



الشكل 20 تيار الحمل عند وضع نقطة هدف للجهد

من الجدير بالذكر أن تقنية التحكم حافظت على جهود المكثفات موازنة بشكل مقبول كما يبين الشكل 21



الشكل 21 جهود مكثفات أحد أطوار المبدل

4- النتائج

بالتالي يعد استخدام المبدل متعدد المستويات MMC كمقوم لموجة الجهد مع تطبيق طريقة التحكم الموجه عن طريق الجهد خياراً جيداً ضمن بنية المحولات الذكية حيث أنه:

I. يمكن الحصول على جهد مستمر مستقر ومتحكم به
II. يمكن الحصول على موجة تيار مستمر بحد مقبول من التذبذب.
III. مع المحافظة على توازن مقبول لجهود مكثفات الوحدات
IV. وقيم منخفضة للتيارات الدوارة

المراجع

1. LEVY FERREIRA COSTA "Modular Power Converters for Smart Transformer Architectures Doctoral Thesis, Technische Fakult Christian-Albrechts-Universit zu Kiel, 2019
2. M. Ebrahim Adabi and Juan A. Martinez-Velasco, "Solid state transformer technologies and applications: A bibliographical survey" AIMS Energy, 6(2): 291–338. 2018.
3. Xu She, Xunwei Yu, FeiWang and Alex Q. Huang, "Design and Demonstration of a 3.6-kV–120-V/10-kVA Solid-State Transformer for Smart Grid Application" IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 29, NO. 8, AUGUST 2014
4. Angel James, "SMART GRID-SMART TRANSFORMERS" DEPARTMENT OF EEE, SAINTGITS
5. A. Shiri, "A solid state transformer for interconnection between the medium and the low voltage grid design," Master Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, October 2013.
6. JUN WANG, ALEX Q. HUANG,WOONGJE SUNG, YU LIU, and B. JAYANT BALIGA "Development of 15-kV SiC IGBTs and Their Impact on Utility Applications, 2009
7. Vijayakrishna Satyamsetti, Andreas Michealides, Antonis Hadjiantonis "Forecasting on Solid State Transformer Applications" the International Conference on Intelligent Sustainable Systems 2017
8. Dražen Dujić, Frederick Kieferndorf, and Francisco Canales "Power Electronic Transformer Technology for Traction Applications – An Overview" ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 1, JUNE 2012
9. Yuqing Cui, Yu Chen, Yingzhuo Chen and Yong Kang Canales "DC-DC Modular Multilevel Converter with High Frequency Transformer for Transportation Applications"2014
10. Salvador Alepuza, Francisco González-Molinab, Jacinto Martin-Arnedoc,Juan A. Martinez-Velascod, "Development and testing of

a bidirectional distribution electronicpower transformer model " Electric Power Systems Research 107 (2014) 230– 239

11. Juan A. Martinez-Velascoa,∗, Salvador Alepuzb, Francisco González-Molinac,Jacinto Martin-Arnedo , "Dynamic average modeling of a bidirectional solid state transformerfor feasibility studies and real-time implementationJuan " Electric Power Systems Research 117 (2014) 143–153 .
12. Francisco González, and Jacinto Martin-Arnedo, Salvador Alepuz, and Juan A. " EMTP Model of a Bidirectional Multilevel Solid State Transformer for Distribution System Studies" 2015
13. Mohammad Ebrahim Adabi Firouzjaee, "Advanced Modular Power Converters for Smart Transformer Architectures Doctoral Thesis, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA Barcelona, January 2018
14. Wim Willems, Tine L. Vandoorn, Jeroen D. M. De Kooning and Lieven Vandevelde Ni "Development of a Smart Transformer to Control the Power Exchange of a Microgrid" s funded by the Special Research Fund (BOF) of Ghent University (Belgium) 2014
15. Giovanni De Carne, Zhixiang Zou, Giampaolo Buticchi, Marco Liserre and Costas Vournas "Overload Control in Smart Transformer-Fed Grid" Appl. Sci. 2017, 7, 208
16. A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen, G. D. Demetriades Vournas "Modular Multilevel Converters for HVDC Applications: Review on Converter Cells and Functionalities" IEEE Transactions on Power Electronics 2013
17. عبدالرحمن الحبال "دراسة وتحسين إشارة خرج المبدلات الوحدوية متعددة المستويات عند استخدامها في تطبيقات الطاقة الشمسية" رسالة ماجستير في جامعة البعث حمص حزيران 2020
18. Sixing Du, Apparao Dekka, Bin Wu, Navid Zargari, "Modular Multilevel Converters: Analysis, Control, And Applications" IEEE Press Wiley 2018.
19. M. Perez, S. Bernet, J. Rodriguez, S. Kouro, and R. Lizana, "Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications

of modular multilevel converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 1, pp. 4–17, Jan 2015.

20. S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 1, pp. 37–53, Jan 2015.
21. A. Nami, J. Liang, F. Dijkhuizen, and G. Demetriades, "Modular multilevel converters for hvdc applications: Review on converter cells and functionalities," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 1, pp. 18–36, Jan 2015.
22. Lesnicar, R. Marquardt, "An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range," Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, vol.3, no.6, pp. 23-26, June 2003.