

دور المحولات الذكية في عزل الأحمال عن مشاكل شبكات التوزيع

اعداد : د. عبد الرحمن الحبال

ملخص

تعتبر المحولات الذكية من الحلول الواعدة للاستخدام في الشبكات الذكية مستقبلاً ولها عدد كبير من المزايا حيث يمكن أن تلعب دوراً حيوياً في التحكم بجريان الاستطاعة وتكامل منابع الطاقة المتجددة مع منظومات الطاقة الحالية كما يمكن أن تلعب دوراً هاماً في تلافي نتائج التقلبات التي من الممكن أن تحصل في جودة الطاقة الكهربائية Power Quality مثل تغيرات الجهد، كما يمكن لهذه المحولات أن تسهم في تحسين الموثوقية وذلك من خلال تقليل عدد الانقطاعات وزمنها وزيادة الكفاءة.

سنقوم في هذا البحث بتقديم نموذج لمحول ذكي يعتمد على المبدل متعدد المستويات من النوع MMC مع تقنيات التحكم اللازمة لقيادة كل مراحل المحول في بيئة Matlab/Simulink وتبيان الدور الهام للمحول الذكي القيام به في عزل الحمل عن أعطال شبكة التوزيع بالتالي أهمية المحول الذكي في زيادة الموثوقية.

كلمات مفتاحية: محول ذكي، مبدل متعدد المستويات من النوع MMC.

The Role of Smart Transformers in Decoupling Loads from Distribution Network Issues

Abstract

Smart transformers are considered to be one of the most promising solutions to be used within futuristic Smart Grids, and they have many advantages. ST can play a very vital role in bidirectional power flow control and renewable energy sources integration with power systems, also they can play a major role in avoiding power quality issues like voltage dips. ST can improve reliability by reducing the number of interruptions and their duration.

In this research a Modular Multilevel Converter based Smart Transformer is introduced accompanied by control techniques to control all stages Matlab/Simulink and its role in decoupling loads from distribution network issues, and the importance of smart transformers in increasing reliability.

Keywords: Smart Transformers, Modular Multilevel Converters

1. المقدمة

تعد المحولات أكثر أجزاء نظم القدرة أهمية، حيث تلعب دوراً رئيسياً في نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية [1]. وقد شكلت المحولات التقليدية موضوعاً بحثياً هاماً وتم تطويرها بحيث ترتفع كفاءتها وتكون عالية الموثوقية وذات مردود اقتصادي مرتفع كونها العمود الفقري لأنظمة توزيع الطاقة. إلا أن استخدامها لايزال يواجه بعض العوائق مثل ضياعات الطاقة وارتفاع درجة الحرارة بسبب وجود التوافقيات وإمكانية تأثير العطل على أحد أطرافها على الطرف الآخر وضعف التحكم بالجهد عند وصل الأحمال وحالات ارتفاع الجهد والتحميل الزائد. بالإضافة لما سبق نقص الحماية من الأعطال الداخلية التي تنشأ بسبب الانهيار الذي يحصل في القلب المغناطيسي وانتقال الخواص غير المرغوبة بين ملفات الأولي والثانوي مثل حالات هبوط الجهد التي من الممكن أن تحصل في طرف الخرج والجهود الحثية التي تبذل لتكامل منابع الطاقة المتجددة مع الشبكات الموجودة. بالإضافة للحجوم الكبيرة والأوزان الثقيلة التي تميز المحولات التقليدية فإنها تعاني أيضاً من نقصان إمكانية التحكم بها ولها آثار مضرّة بالبيئة نظراً للاستهلاك الكبير لزيوت المحولات [2]، والتي ساهمت بشكل أو بآخر بأزمات الطاقة التي نعيشها عالمياً في الوقت الحالي.

يجب التخلص من القيود التي تحدّد استخدام المحولات التقليدية لتمكين الشبكات الكهربائية من تلبية المتطلبات التكنولوجية المتنامية مثل التكامل مع منابع الطاقة المتجددة الموزعة، وتحديات استخدام التوليد الموزع، ومرافق تخزين الطاقة الموزعة، وتقنيات شحن المركبات الكهربائية وغيرها من التطبيقات الحديثة.

إن الاتجاه الحديث نحو التخلص من مركزية توليد الطاقة decentralization of power عن طريق تكامل منابع الطاقة المختلفة بسبب عدم التحكم بالجهد بالشكل المطلوب [3] ويؤدي لمشاكل تتعلق بجودة الطاقة [4,5] ويتسبب بحقق للتوافقيات [6] في نظم القدرة، تؤدي لغياب القدرة على التحكم بشكل يتوافق مع المقاييس العالمية. إن ما ذكر سابقاً يلقي الضوء على الحاجة الملحة

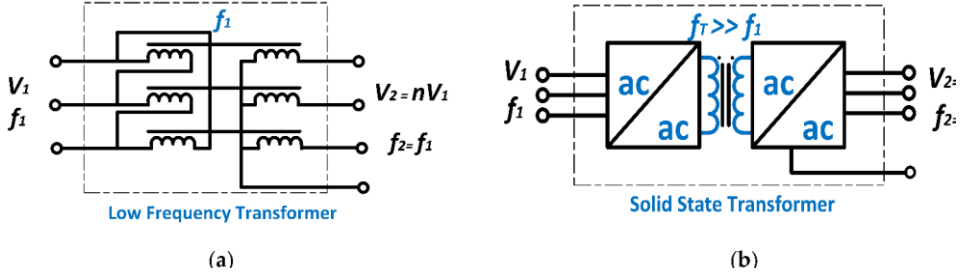
لاستخدام معدات ذكية تستخدم التقدم التكنولوجي للتغلب على حالات عدم التحكم بنظم الطاقة الكهربائية لتلبية الحاجة المتزايدة لها.

مع التقدم التكنولوجي الحاصل تزداد أهمية الاعتماد على المبدلات الإلكترونية ذات الاستطاعة العالية ودمجها ضمن نظم القدرة من خلال أبرز التطبيقات مثل تكامل منابع

الطاقات المتجددة مع شبكات الطاقة وإعطاء المبدلات الإلكترونية دوراً أكبر في حماية نظم نقل وتوزيع الطاقة [7,8]. إن استخدام إلكترونيات الحالة الثابتة Solid State electronics مكنت المبدلات الإلكترونية ذات الاستطاعات المرتفعة من التحكم بالطاقة الكهربائية وتحويلها، بالتالي أصبح من الأسهل دمج هذه المبدلات مع نظم القدرة كتقنيات ثورية في مجال الهندسة الكهربائية في العالم المعاصر.

في الآونة الأخيرة انتشر استخدام محولات الحالة الثابتة Solid-State Transformers والتي تدعى أيضاً بمحولات إلكترونيات القدرة أو المحولات ذات التردد العالي أو المحولات الذكية. وتعتبر البديل الأكثر ملاءمة للمحولات التقليدية للاستخدام في الشبكات الذكية المستقبلية وتمت دراستها بشكل كبير لاستخدامها في أنظمة النقل والتوزيع [9-15]. كونها ذات كفاءة طاقة مرتفعة يمكن اعتبارها تكنولوجية رائدة لمستقبل أنظمة الطاقة [16-18].

يبين الشكل (1a) محول تقليدي يعمل عند تردد f_i . يتغير الجهد عند الخرج إلا أن التردد يبقى ثابتاً، إلا أن المحول الذكي والمبين بالشكل (1b) يعمل عند تردد f_T أعلى بكثير من تردد عمل المحول التقليدي ولا يكون تردد الخرج بالضرورة مساوٍ لتردد الدخل حيث من الممكن لتردد الخرج f_2^* حتى أن يساوي الصفر أي أن يكون الخرج تيار مستمر.



الشكل 1 بنية المحول التقليدي (b) بنية محول ذكي

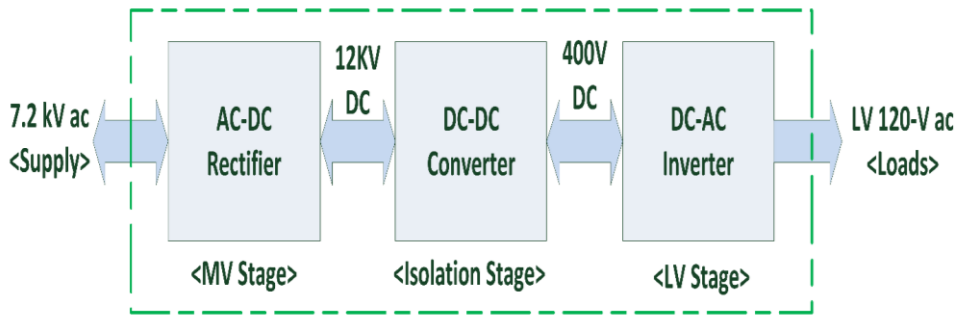
من الواضح من الشكل (1b) توافر عدة إمكانيات لوظائف يمكن أن تملكها المحولات الذكية لا تملكها المحولات التقليدية. حيث يسمح استخدام الربط عن طريق إلكترونيات القدرة بالعمل عند ترددات مرتفعة كما أن مرحلة التحويل الوسيطة DC-DC يمكن أن تقدم عدد كبير من الفوائد. لاستخدام المحولات الذكية عدد كبير من الفوائد مثل تعويض حالات هبوط الجهد والتحكم بجريان الاستطاعة وتعويض الاستطاعة الردية وعزل الأعطال والقدرة على توفير خرج تيار مستمر وغيرها. وقد توجهت العديد من المشاريع [9,12,16,19,20] لتحقيق تقدم في تكنولوجيا المحولات الذكية حيث تعتبر هذه المحولات حجر زاوية للشبكات الذكية المستقبلية. يسمح تطور المحولات الذكية بالجريان ثنائي الاتجاه للاستطاعة في شبكات التوزيع وتسمح بربط شبكات التيار المستمر وشبكات التيار المتناوب لتمكين تكامل منابع الطاقة المتجددة مثل المحطات الكهروضوئية وتسهيل التحكم بجريان الاستطاعة بين الشبكات الميكروية [11,21-24]. يؤدي تطور تكنولوجيا المحولات الذكية إلى اندماجها في سوق الطاقة لتلبية الطلب اللامتناهي للطاقة الكهربائية مستقبلاً حيث أنها تسهل تأمين التغذية الكهربائية بشكل فعال ومتحكم به بين الشبكات الرئيسية والشبكات الميكروية. مع تنامي دور الشبكات الميكروية كمساهم كبير لتلبية الطلب على الطاقة وفي دورة التغذية ستزداد حالات عدم ضبط الجهد وستظهر بشكل أكبر ظاهرة التخلص من مركزية توليد الطاقة في المستقبل [25]. سيكون من الضروري لضبط جريان الاستطاعة استخدام الأجهزة الذكية مثل المحولات الذكية.

كما أنه ستكون أكثر ملاءمة لتطبيقات مثل شبكات التوزيع والنقل بالترددات المرتفعة، زرع الشبكات الميكروية في البحار [26,27,28] تطبيقات التنقيب [29] استخدام مبدأ الدفع الموزع في المركبات الجوية وفي تطبيقات الجر حيث يمكن التخلص من حدود الوزن والحجم لدرجة كبيرة. بالرغم من أن للمحولات الذكية محاسن كبيرة إلا أن لها حدود ومشاكل لا بد من التغلب عليها قبل الاستخدام الفعلي لها. لا تزال المحولات التقليدية أكثر كفاءة من المحولات الذكية وموثوقية أعلى وأكثر اقتصادية ومتوافقة بشكل كبير مع أنظمة التوليد والتوزيع الحالية. في الوقت الحالي ما يزال من المفضل استخدام المحولات ذات التردد المنخفض إلا أن الاهتمام المتزايد بالقضايا البيئية يدفعنا للاهتمام بشكل أكبر بتكنولوجيا المحولات الذكية كبديل ملائم صديق للبيئة.

يقدم هذا البحث دراسة عن الدور الديناميكي الهام للمحولات الذكية والتقنيات المصاحبة لها في عزل الأحمال أو شبكات التوزيع المحلية عن المشاكل التي من الممكن أن تحصل في شبكات التوزيع ذات الجهد المتوسط. وقد تم تنظيم البحث بالشكل التالي: الفقرة 2 تدرس أسس ومبادئ المحولات الذكية. تتناول الفقرة 3 نمذجة المحولات الذكية ذات ثلاث مراحل وميزاتها ووظائفها المختلفة واستراتيجيات التحكم الخاصة بها. تستكشف الفقرة 4 أهمية وقدرة المحولات الذكية على عزل الأحمال عن بعض المشاكل التي من الممكن أن تحدث في شبكات الجهد المتوسط.

2. أسس المحولات الذكية

تستخدم المحولات الذكية المبدلات الإلكترونية ويمكن تصنيف المحولات الذكية وفقاً لبنيتها لعدة أقسام. لتوضيح المفاهيم الأساسية للمحولات الذكية سنقوم بشرح البنية المبينة بالشكل (2) وهي بنية المحولات الذكية ذات ثلاثة مراحل حيث أن هذه البنية تبسط تصميم خوارزميات التحكم وتؤدي جميع الوظائف المرجوة من المحولات الذكية.



SOLID STATE TRANSFORMER

الشكل 2 مراحل تحويل الطاقة ضمن المحول ذي ثلاث مراحل

يتألف المحول الذكي ذو ثلاث مراحل من:

(1) مرحلة الجهد المتوسط: وتتعامل مع الجهود الأعلى بين 1 كيلو فولط حتى 100 كيلو فولط. تكون تغذية هذه المرحلة جهد ثلاثي الطور بتردد 50/60 هرتز يتم تحويلها لتيار مستمر بواسطة مبدل إلكتروني ويمكن تسمية هذه المرحلة بمرحلة التقويم حيث يتعامل المبدل الإلكتروني في هذه المرحلة مع جهود مرتفعة على الطرفين المستمر والمتناوب مقارنة بالمقومات التقليدية ذات الجهود المنخفضة. تتعامل المحولات الذكية مع سويات مرتفعة من الاستطاعة تبعاً للتطبيقات المستخدمة مثل تطبيقات الجر والوصل مع الشبكات الميكروية لذلك يجب أن تكون المكونات نصف الناقل المكونة لها قادرة على التعامل مع سويات مرتفعة للجهود والتيار. أما في التطبيقات التي لا يلعب الوزن والحجم أهمية كبرى فيمكن للمحولات

الذكية أن تلعب دوراً في ترشيح الموجات عن طريق تقويم التيار المتناوب باستخدام تقنيات التعديل العرضاني للنبضة والتي سيزداد الاعتماد عليها في الشبكات الذكية المستقبلية.

(2) *مرحلة العزل:* تقوم هذه المرحلة بعزل مرحلة الجهد المرتفع عن مرحلة الجهد المنخفض باستخدام محول تردد مرتفع. في هذه المرحلة يتم تحويل الجهد المستمر المقوم في المرحلة السابقة إلى جهد متناوب ذو تردد عالٍ بين 100 هرتز وعدد من الكيلوهرتز ومن ثم تخفيضه بواسطة محول التردد العالي ومن ثم تقويم موجة الجهد المنخفض مرة أخرى. يسمح عمل المحول تحت ترددات مرتفعة بالاستخدام الكامل للخواص المغناطيسية للقلب [30].

يؤدي عمل محول العزل عند ترددات مرتفعة لتخفيض حجم ووزن المحول الذكي. عند نفس مستوى الاستطاعة المنقولة P ومع إبقاء كل من كثافة التيار J وكثافة الحقل المغناطيسي B_m عند قيم ثابتة فإن الحجم V كتابع للتردد f يعطى بالعلاقة (1)

$$A\omega \cdot Ac = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{P}{k_\omega B_m J f} \Rightarrow V \propto (A\omega \cdot Ac)^{\frac{3}{4}} \propto \frac{1}{f^{\frac{3}{4}}} \quad (1)$$

حيث k_ω معامل ملئ لف الثغرة الهوائية winding window filling factor، Ac مساحة المقطع العرضاني للقلب، $A\omega$ مساحة الثغرة الهوائية للف. من الواضح من العلاقة (1) أنه يمكن تقليل الأبعاد الفيزيائية للمحول بارتفاع التردد. إن عمل المحولات الذكية عند ترددات مرتفعة يجعلها ملائمة لتطبيقات خاصة مثل الجر حيث أن الحجم والوزن يعيق الوصول لكفاءات أعلى. وقد جذبت ميزة انخفاض حجم ووزن المحولات الذكية اهتمام المصنعين لأنها تمكنهم من تحسين أداء أدوات الجر [11,31-37]. بالإضافة لميزة الوزن والحجم فإن الخواص الأخرى للمحولات الذكية مثل القدرة على نقل الاستطاعة بكلا الاتجاهين وتعويض الاستطاعة الردية ووجود وصلة تيار مستمر DC link يجعلها مفضلة في العديد من التطبيقات. لذا

يتم اعتبار المحولات الذكية مكون حاسم لنظم الطاقة المستقبلية. يعتمد المحول الذكي على مبدلات القدرة للقيام بالعديد من الوظائف ويجب أن تعمل هذه المبدلات تحت ترددات إبدال مرتفعة. لذا مع ازدياد تردد العمل تزداد ضياعات الإبدال وهذا يعتبر أحد المعوقات الرئيسية لتحسين الكفاءة أثناء عملية التصميم.

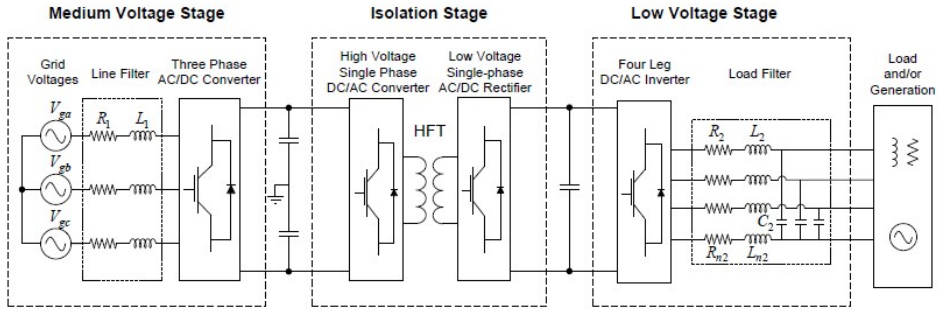
(3) مرحلة الجهد المنخفض: تعمل مرحلة الجهد المنخفض تحت جهود تتراوح بين 50 حتى 1000 فولط في هذه المرحلة يتم تحويل الجهد المستمر من خرج المرحلة السابقة لجهد متناوب لذا تدعى هذه المرحلة بمرحلة التعريج. ويكون تردد جهد هذه المرحلة 50/60 هرتز عادة. بعكس المحولات التقليدية تقدم المحولات الذكية إمكانية التحكم. حيث تسمح بالتحكم بجهود وتيارات الدخل والخرج والتحكم بجريان الاستطاعة خلال مبدلات القدرة ومحولات التردد العالي التي تكون المحول الذكي. كما أنها تسمح بالتحكم بتردد الخرج حيث من الممكن الحصول على أي قيمة مرغوبة للتردد في مرحلة التعريج. بالرغم من أن ميزة انخفاض الحجم والوزن تعطي المحولات الذكية أفضلية كبيرة، إلا أنه من الضروري الأخذ بعين الاعتبار المكونات الأخرى مثل مبدلات القدرة ودارات التبريد ودارات التحكم لأنها ضرورية لتخفيض الحجم الكلي. تعتمد كفاءة المحولات الذكية وقدرتها على التحكم بجريان الاستطاعة على بنى ودارات المبدلات المستخدمة وعلى عدد مراحلها المختلفة.

3. نمذجة محول ذكي يعتمد على المبدل متعدد المستويات MMC

في الآونة الأخيرة لفت المبدل متعدد المستويات من النوع MMC الانتباه للاستخدام في تطبيقات الجهد المتوسط. يمكن استخدام هذه المبدلات كدارة فعالة في طرف الجهد المتوسط للمحول الذكي بسبب ميزاته مثل البنية المؤلفة من وحدات منفصلة قابلة للاستبدال وإمكانية تطبيقه عند عدة مستويات جهد وذلك بالإضافة أو حتى تحييد عمل بعض الوحدات الأساسية. بالإضافة لذلك يمكن لدارة هذا المبدل أن تولد إشارات جهد وتيار بجودة عالية وكفاءة مرتفعة مع تخفيض حجم المرشحات غير الفعالة. هدف البحث الأساسي هو تنفيذ نموذج لمحول ذكي ذي ثلاث مراحل

يعتمد في عمله على المبدل متعدد المستويات من النوع MMC يعمل بكفاءة تحت شروط التشغيل المختلفة. يبين الشكل (3) مخطط محول ذكي ذي ثلاث مراحل: مرحلة الجهد المتوسط ومرحلة العزل ومرحلة الجهد المنخفض.

في المرحلة الأولى يتم تقويم الجهد المتوسط المتناوب للشبكة بواسطة مبدل قدرة ثلاثي الطور. في مرحلة العزل يتم تحويل الجهد المتوسط المقوم في المرحلة السابقة إلى جهد متوسط بتردد عالٍ



الشكل 3 مخطط تفصيلي لبنية محول ذكي ذي ثلاث مراحل

1kHz عن طريق مبدل قدرة أحادي الطور يتم تطبيقه على أولي محول تردد عالي يقوم بتخفيض الجهد المتوسط إلى جهد منخفض بتردد عالٍ ليقيم مقوم جسري يعتمد على التعديل العرضاني للنبضة بتقويم الجهد عالي التردد. في المرحلة الأخيرة يتم تحويل الجهد المستمر الناتج عن مرحلة العزل لجهد منخفض متناوب بالتردد المطلوب عن طريق مبدل قدرة ثلاثي الطور. يتم وصل طرف الجهد المتوسط والذي يمكن اعتباره دخل المحول مع شبكة توزيع ثلاثية الطور بينما يتم وصل مبدل الجهد المنخفض مع شبكة محلية يمكن أن تعتبر خرج المحول.

في هذا البحث سنستخدم مبدل متعدد المستويات من النوع MMC بخلايا نصف جسرية لمرحلة الدخل وسنقوم بتطبيق استراتيجية التحكم الموجه عن طريق الجهد (Voltage Oriented Control) لتوليد الإشارات المرجعية اللازمة كما سنستخدم تقنية التعديل العرضاني للنبضة ذات الانزياح الطوري لتوليد نبضات قذح ترانزستورات المبدل.

في مرحلة العزل سنستخدم دائرة جسر ثنائي فعال Dual Active Bridge مع مبدل متعدد المستويات أحادي الطور من النوع MMC مكون من خلايا من النوع T-Cell لتوليد جهد بتردد عالٍ 1kHz مقادة بواسطة التعديل العرضاني الهجين. ومبدل جسري يعتمد على التعديل العرضاني للنبضة لتقويم الجهد المنخفض عالي التردد وسنقوم بقيادة هذا المبدل عن طريق متحكم تناسبي رنيني PR controller.

سنستخدم مبدل ثنائي المستويات ثلاثي الطور ذي أربع سيقان لتوليد موجة الجهد المنخفض المتناوب عند خرج المحول وسنستخدم استراتيجية التحكم الموجه عن طريق الجهد (Voltage Oriented Control) لتوليد الإشارات المرجعية وتقنية التعديل الشعاعي الفضائي ثلاثي الأبعاد 3D-SVPWM لقيادة ترانزستورات هذا المبدل.

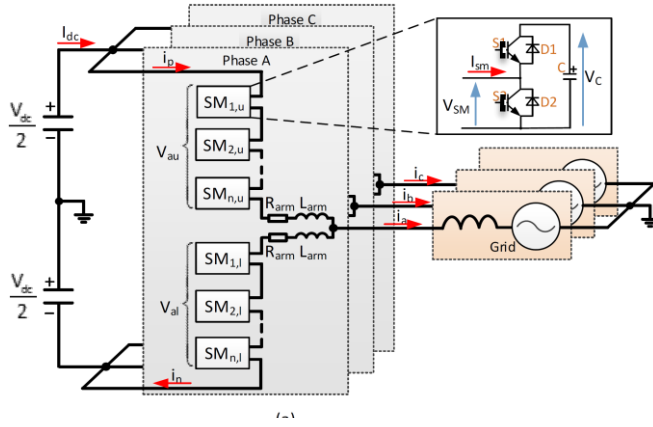
3. 1. مرحلة تقويم الجهد المتوسط:

تعد المبدلات متعددة المستويات من النوع (Modular Multilevel Converter) من الحلول الواعدة للتطبيقات الصناعية عالية الاستطاعة ذات الجهود المرتفعة. في هذه الفقرة سنقوم بشرح بنية المبدل، ومبدأ العمل.

- بنية المبدل متعدد المستويات ثلاثي الطور من النوع MMC:

يبين الشكل (4) البنية العامة للمبدل متعدد المستويات MMC. حيث 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 النقطة 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 الفرعية (Sub-module) وملف (L). ويكون ملف الذراع موصول على التسلسل مع كل مجموعة من الوحدات لتحديد قيمة التيار الناتج عن فرق الجهد الآتي الحاصل بين الذراعين.

• التحكم بمرحلة تقويم الجهد المتوسط:

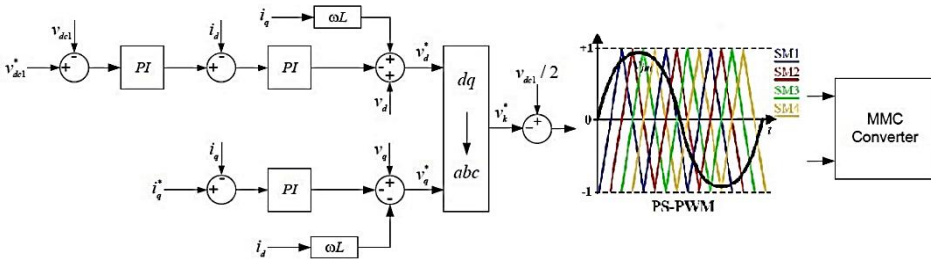


الشكل 4 بنية المبدل متعدد المستويات MMC

قمنا باختيار استراتيجية التحكم الموجه عن طريق الجهد لتوليد الإشارة المرجعية اللازمة لتقنية التعديل حيث قمنا باستخدام حلقة تحديد الطور (Phase-locked loop PLL) للحصول على النبض الخاص لجهد الشبكة وذلك لمزامنة نبضات قرح ترانزستورات المبدل متعدد المستويات من

النوع MMC ثلاثي الطور بحيث تتكون ذراع المبدل من أربع وحدات نصف جسرية، يمكن استخدامه كمقوم للجهد المتوسط بحسب.

يبين الشكل (5) مخطط عام لتقنية التحكم الموجه عن طريق الجهد التي تقوم بتوليد إشارة جهد مرجعية ثلاثية الطور متزامنة مع شبكة الجهد المتوسط وذلك لاستخدام هذه الإشارة مع تقنية



الشكل 5 المخطط العام للتحكم بمرحلة تقويم الجهد المتوسط

التعديل العرضاني للنبضة ذي الانزياح الطوري.

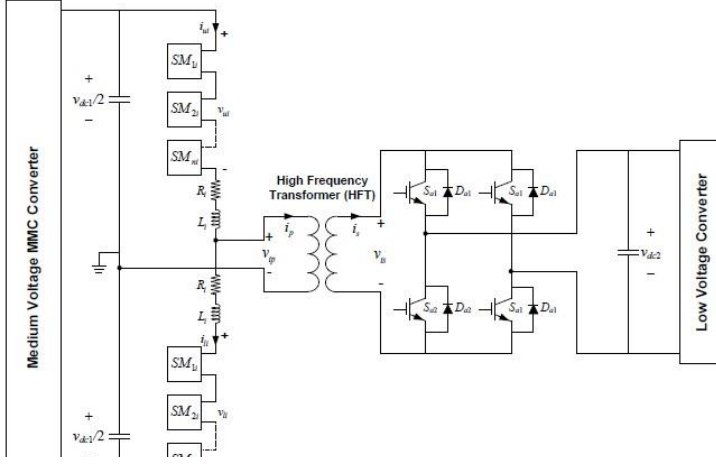
2.3. مرحلة العزل

يتألف نموذج مرحلة العزل المستخدم في هذا البحث من ثلاث أجزاء رئيسية كما يبين الشكل (6) وهي:

(1) مبدل متعدد المستويات أحادي الطور من النوع MMC يقوم بتحويل الجهد المقوم المتوسط الجهد في مرحلة التقويم لموجة جهد ذات تردد عالي بتردد 1kHz يتألف ذراع المبدل من وحدتين من النوع T-Cell

(2) محول تردد عال تمت نمذجته كمحول مثالي موصول على التسلسل مع ممانعة تسريب

(3) مقوم جسري مقاد عن طريق التعديل العرضاني للنبضة يتم التحكم به عن طريق متحكم تناسبي رنيني يقوم بتحويل الجهد المتناوب المنخفض ذي التردد العالي.



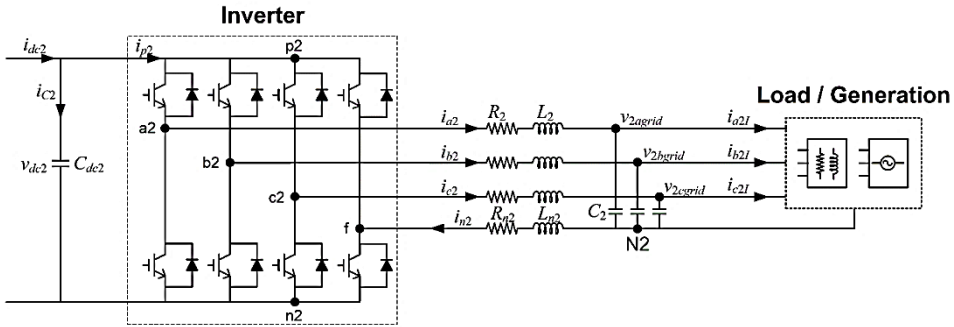
الشكل 6 مرحلة العزل ضمن بنية المحول الذكي

يقوم المحول عالي التردد بالعزل العلفاني بين طرف الجهد المتوسط وطرف الجهد المنخفض ويعتبر استخدام هذا المحول ضمن بنية المحول الذكي السبب الرئيسي في تخفيض الحجم والوزن مقارنة بالمحولات التقليدية لذا لتحقيق هذا الهدف بالشكل الأمثل يجب أن تصمم مبدلات القدرة على طرفي المحول بحيث تكون بحجم صغير قدر الإمكان مع تحقيق أفضل كفاءة وأعلى كثافة طاقة ممكنة.

3.3. مرحلة تعريج الجهد المنخفض:

يعتبر التعامل مع قيم مرتفعة للتيار وتصميم مرشحات التشويه الكهروضويسي من أهم التحديات التي تواجه المصمم عند تصميم المبدل المناسب للمرحلة الثالثة من المحول الذكي. كما أن إحدى المتطلبات الرئيسية لهذا المبدل هي توافر ناقل حيادي حيث من المحتمل أن يتم وصل هذه المرحلة مع أحمال غير خطية وأحمال غير متوازنة الأمر الذي يؤدي إلى نشوء تيارات تعاقب صفري يجب التعامل معها بشكل ملائم من قبل المبدل. لذا من الضروري استخدام مبدل ثلاثي الطور ذو أربع سيقان (ثلاثة سيقان للأطوار الثلاثة مع ساق إضافية للحيادي) وذلك لتأمين تحكم كامل بجهود الأطوار والحصول على جهود ذات نوعية جيدة.

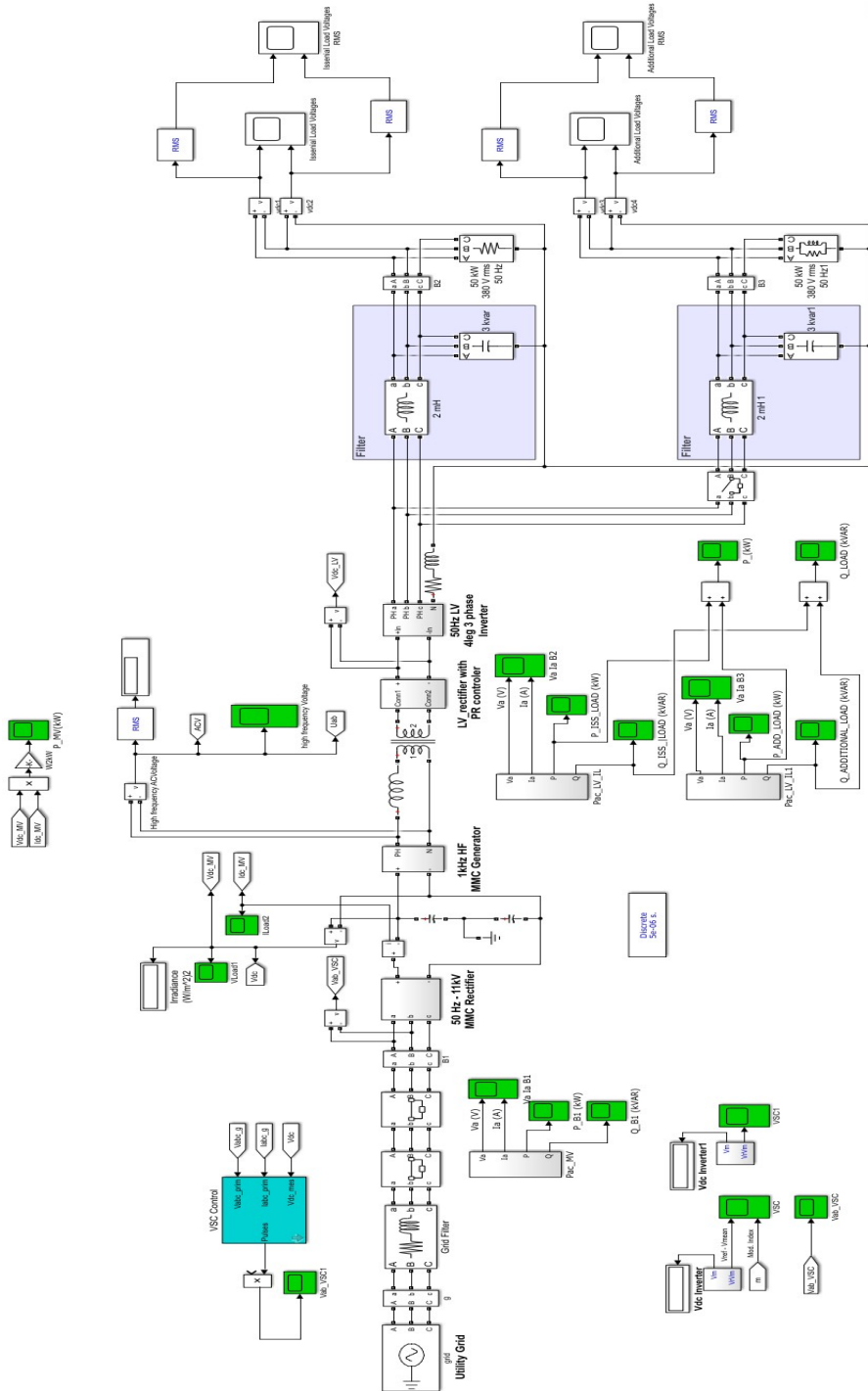
يبين الشكل (7) دارة المبدل ثنائي المستوى ثلاثي الطور ذو أربع سيقان والتي تعتبر خياراً فعالاً للتطبيقات التي تتطلب تحكم دقيق بتيار الحيادي حيث يؤدي إضافة ساق للمبدل إعطاء الدارة قدرة على التحكم بشكل أفضل مقارنة مع المبدلات التقليدية ذات ثلاث سيقان 3 legs [5-6].



الشكل 7 بنية المبدل ثلاثي الطور ذو أربع سيقان ضمن المرحلة الثالثة للمحول الذكي تناولت العديد من الدراسات تقنية 2D SVPWM لقيادة المبدلات ذات منبع الجهد ثلاثية الطور ذات ثلاث سيقان، وقد قامت هذه الدراسات بشرح هذه التقنية بشكل دقيق. إلا أن أهمية تغذية الأحمال غير المتوازنة والأحمال غير الخطية في تطبيقات مثل مرشحات القدرة الفعالة التسلسلية والتفرعية تتطلب تقنية SVPWM مطورة قادرة على التحكم بالتتالي الصفري المرافق لها وجريان التيار في سلك الحيادي. لذلك قمنا في هذا البحث باستخدام تقنية 3D SVPWM للمبدل ذي أربع أسلاك.

يبين الشكل (8) النموذج العام (المستوى الأعلى) للمحول الذكي المستخدم في هذا البحث المؤلف من ثلاث مراحل والذي يعتمد بشكل أساسي على المبدل متعدد المستويات المؤلف من وحدات قابلة للاستبدال من النوع MMC في بيئة Matlab/Simulink.

دور المحولات الذكية في عزل الأحمال عن مشاكل شبكات التوزيع



الشكل 8 النموذج العام للمحول ذي ثلاث مراحل في بيئة Matlab/Simulink

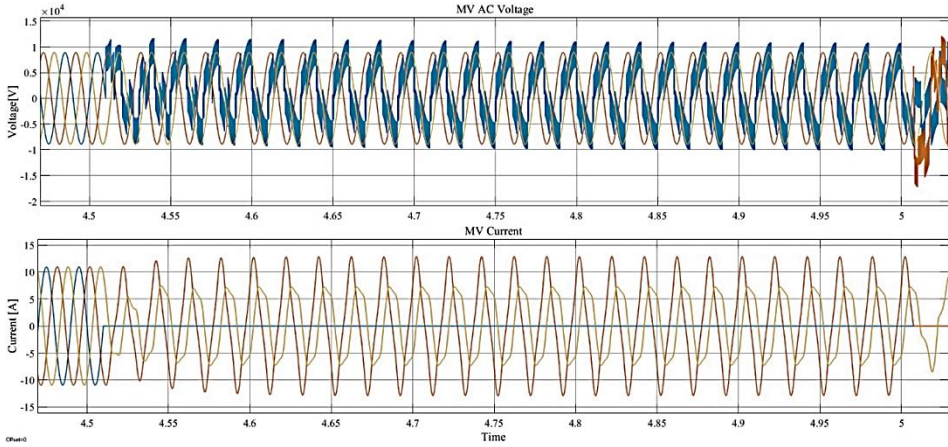
4. نتائج النمذجة

قمنا بصنع نموذج لمحول ذكي بثلاث مراحل في بيئة Matlab/Simulink مع الأخذ بالاعتبار البارامترات الموجودة بالجدول التالي سنقوم بتقييم أداء نموذج المحول الذكي تحت التغيرات الديناميكية التي من الممكن أن تحصل في الشبكة.

البارامتر	القيمة
القيمة الفعالة للجهد بين طورين لشبكة الجهد المتوسط	11kV
مقاومة مرشح الشبكة R1	0.1Ω
محارضة مرشح الشبكة L1	10mH
عدد وحدات ذراع مقوم الجهد المتوسط MMC1	4
اتساعية مكثف الوحدة الفرعية للمبدل MMC1	0.4mF
مقاومة ذراع مقوم الجهد المتوسط MMC1	0.2Ω
ذاتية ملف ذراع مقوم الجهد المتوسط MMC1	5mH
تردد إبدال ترانزستورات مقوم الجهد المتوسط MMC1	10kHz
اتساعية مكثف وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط	1mF
مقاومة ذراع مولد الجهد ذو التردد العالي MMC2	0.001Ω
ذاتية ملف مولد الجهد ذو التردد العالي MMC2	0.1mH
تردد إبدال ترانزستورات مولد الجهد ذو التردد العالي MMC2	10kHz
تردد عمل المحول ذي التردد المرتفع	1kHz
مكثف وصلة التيار المستمر ذو الجهد المنخفض	3mF
مقاومة مرشح طرف الجهد المنخفض	0.01Ω
ذاتية ملف مرشح طرف الجهد المنخفض	0.9mH
مكثف مرشح طرف الجهد المنخفض	200μF
مقاومة الحيادي	0.01Ω
ذاتية ملف الحيادي	0.3mH

1.4 : حالة انقطاع أحد أطوار الشبكة

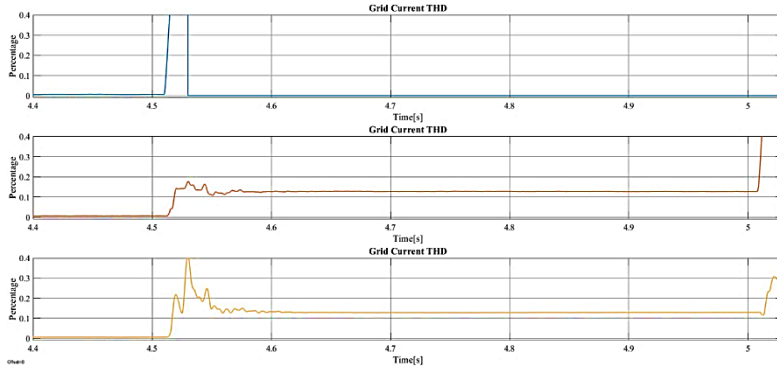
لدراسة هذه الحالة قمنا بقطع أحد أطوار الشبكة في اللحظة 4.5 وبيين الشكل (9) تيارات وجهود الشبكة لحظة انقطاع أحد أطوار الشبكة حيث من الملاحظ انعدام تيار الطور المقطوع واختلال



تياري الطورين الآخرين.

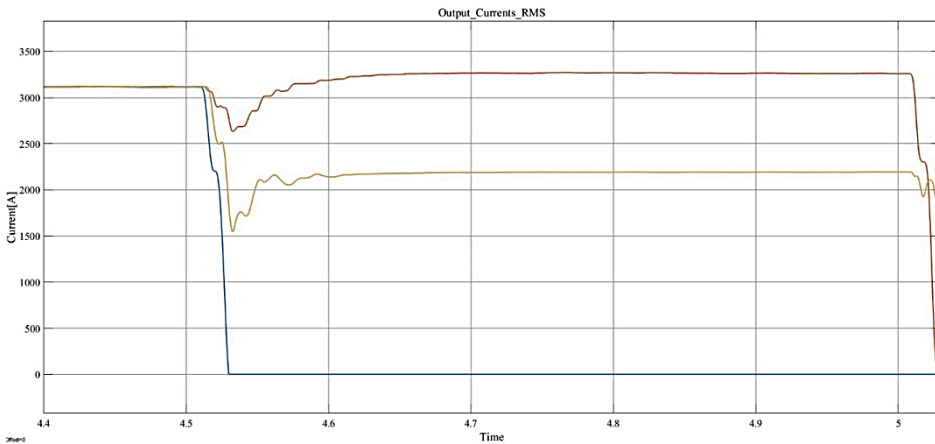
الشكل 9 تيارات وجهود الشبكة لحظة انقطاع أحد أطوار الشبكة

الأمر الذي يظهر بوضوح في الشكل (10) الذي يبين القيم الفعالة لتيارات أطوار الشبكة.



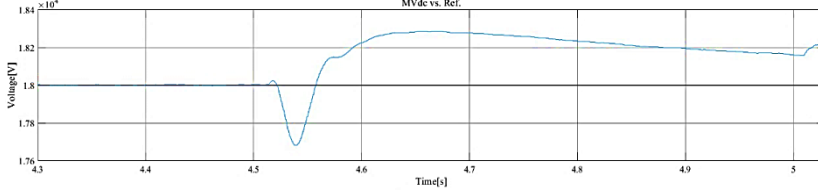
الشكل 10 القيم الفعالة لتيارات الشبكة

يبين الشكل (11) التشوه التوافقي لتيارات أطوار الشبكة حيث ترتفع نسبة التوافقيات لنسبة تفوق 10% بعد انقطاع الطور.



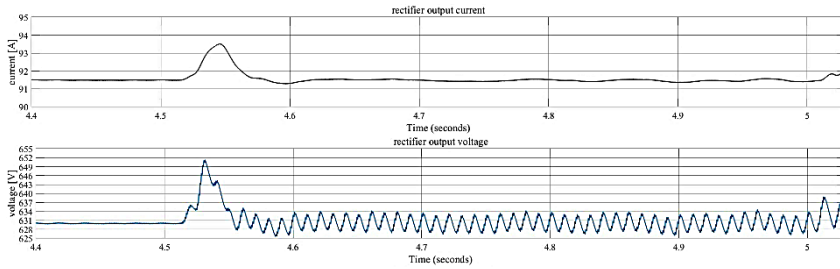
الشكل 11 التشوه التوافقي لتيارات أطوار الشبكة

يبين الشكل (12) جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط بعد انقطاع أحد أطوار الشبكة الذي أدى لابتعاد الجهد عن النقطة الهدف إلا أن الملاحظ أن استراتيجية التحكم تعمل على إرجاع الجهد للنقطة الهدف.



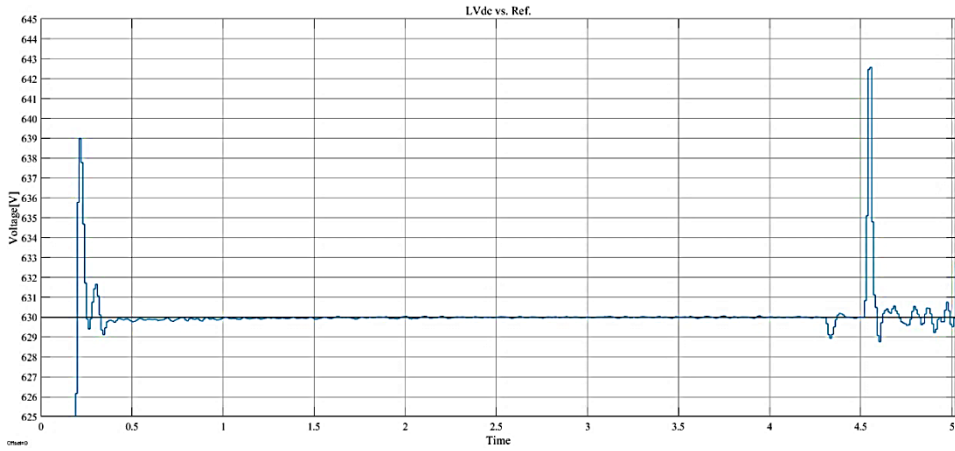
الشكل 12 جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط بعد انقطاع أحد أطوار الشبكة

يبين الشكل (13) جهد وتيار وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض حيث من الواضح زيادة تذبذب جهد الوصلة عند انقطاع أحد أطوار الشبكة بمقدار 6 V وبنسبة أقل من 1% من جهد الوصلة.



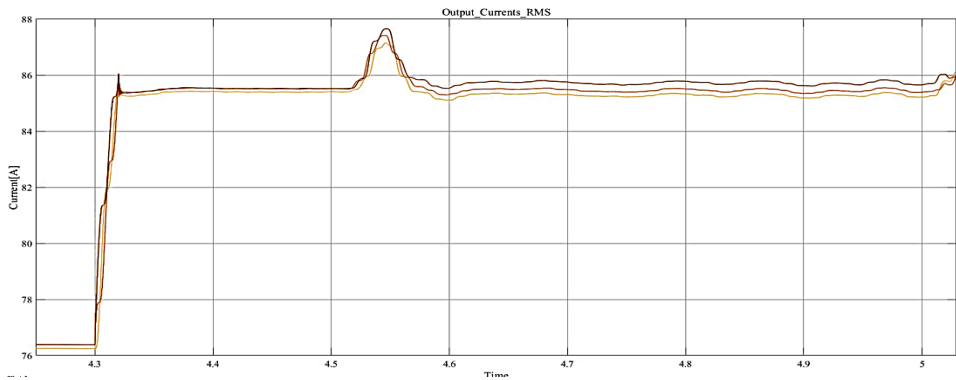
الشكل 13 جهد وتيار وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض

يبين الشكل (14) ملاحقة جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض لنقطة الهدف حيث من الملاحظ اضطراب هذا الجهد بحوالي 15V إلا أن تقنية التحكم المستخدمة أعادت الجهد لنقطة الهدف خلال فترة 0.1s



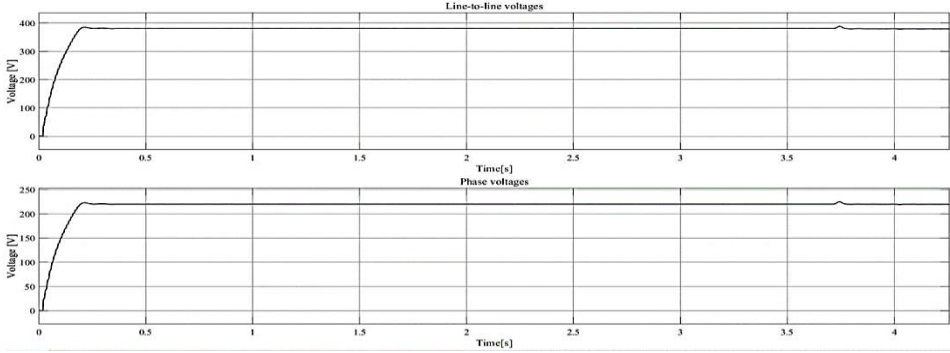
الشكل 14 ملاحقة جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض لنقطة الهدف

يبين الشكل (15) القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل حيث من الواضح حدوث اضطراب صغير ولفترة محدودة عند انقطاع أحد أطوار الشبكة



الشكل 15 القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل

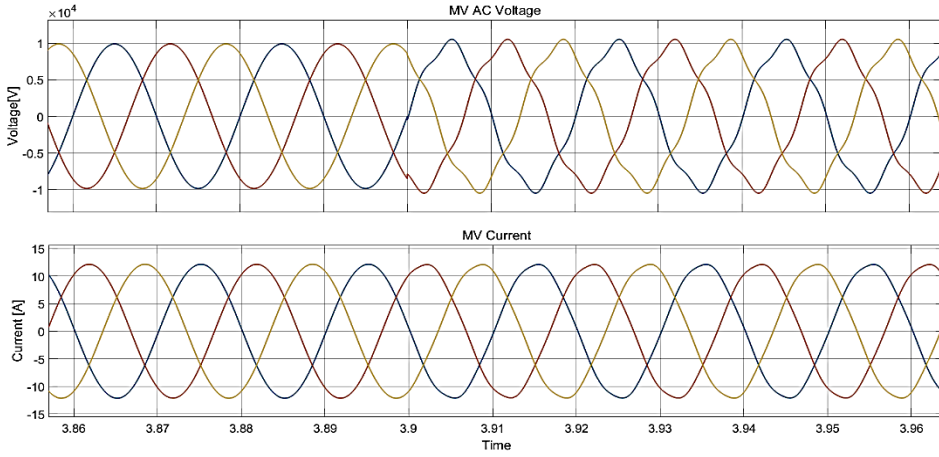
يبين الشكل (16) القيم الفعالة لتيارات أطوار الحمل حيث من الملاحظ اختلال التوازن بنسبة طفيفة بعد لحظة انقطاع أحد أطوار الشبكة بالرغم من توازن الأطوار قبل الانقطاع.



الشكل 16 القيم الفعالة لتيارات أطوار الحمل

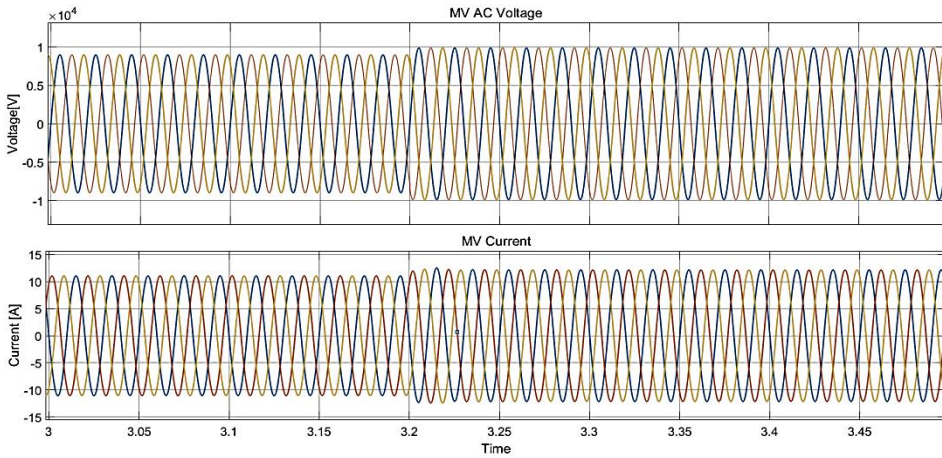
2.4 حالة الارتفاع المفاجئ لجهد الشبكة مع ظهور توافقيات

لدراسة هذه الحالة قمنا بالتنسب بارتفاع مفاجئ لجهد الشبكة في اللحظة 3.2 ثانية بنسبة 10% ويبين الشكل (17) تيارات وجهود الشبكة لحظة ارتفاع الجهد حيث من الملاحظ انعدام تيار الطور المقطوع واختلال تباري الطورين الآخرين.



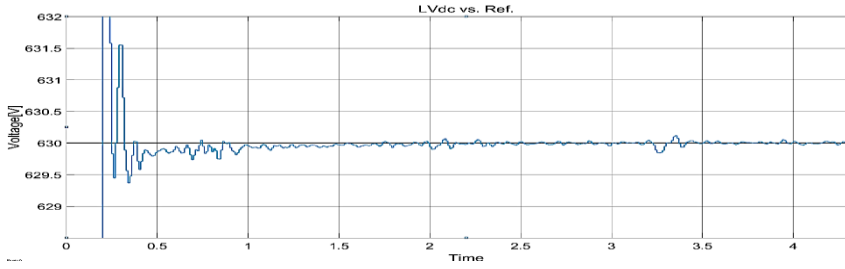
الشكل 17 جهود وتيارات الشبكة لحظة الارتفاع المفاجئ للجهود

قمنا بحقن توافقيات في جهد الشبكة عند اللحظة 3.9 ثانية كما يبين الشكل (18).

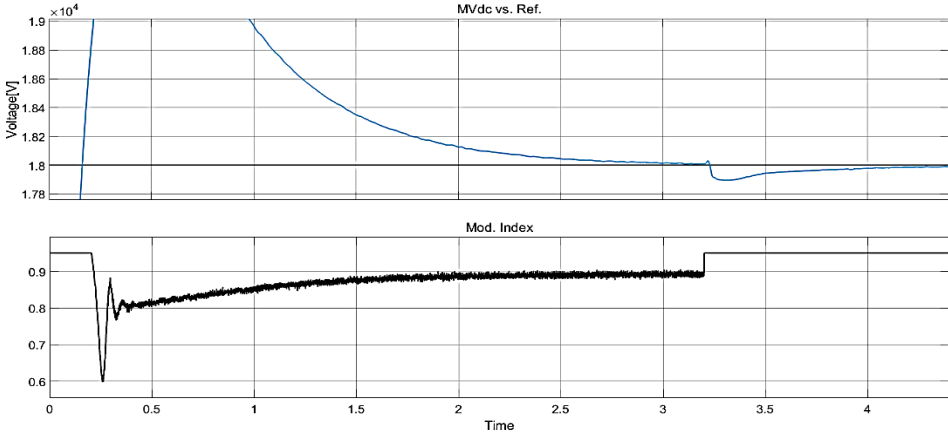


الشكل 18 جهود وتيارات الشبكة لحظة حقن التوافقيات في موجة جهد الشبكة

يبين الشكل (19) جهد وصلة التيار المستمر DC-Link ذات الجهد العالي حيث من الملاحظ ابتعاد الجهد عن نقطة الهدف بحوالي 100 فولط فقط أي حوالي 0.5% ولمدة لا تتجاوز 0.2 ثانية قامت بعدها خوارزمية التحكم المرفقة بإعادة جهد الوصلة بشكل تدريجي بدون أي تأثير يذكر لحقن التوافقيات عند اللحظة 3.9 ثانية.



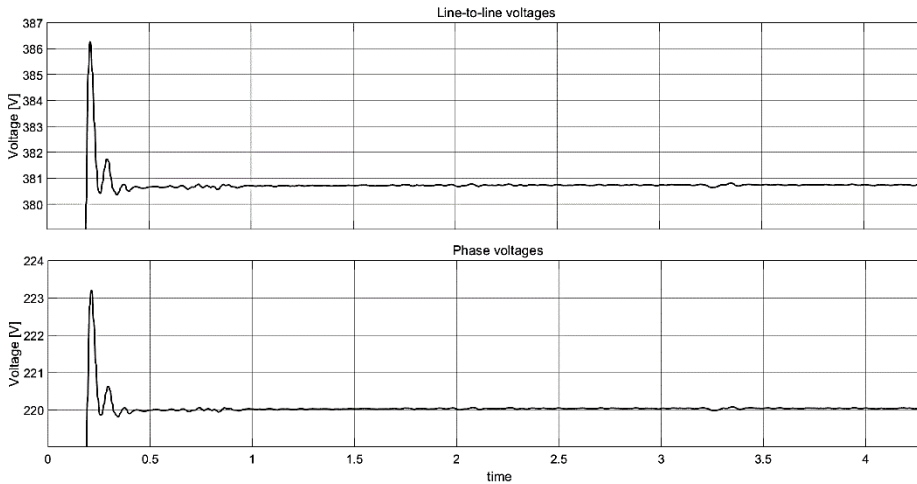
الشكل 19 جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد العالي مع تغيرات دليل تعديل المبدل من النوع MMC



الشكل 20 جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض

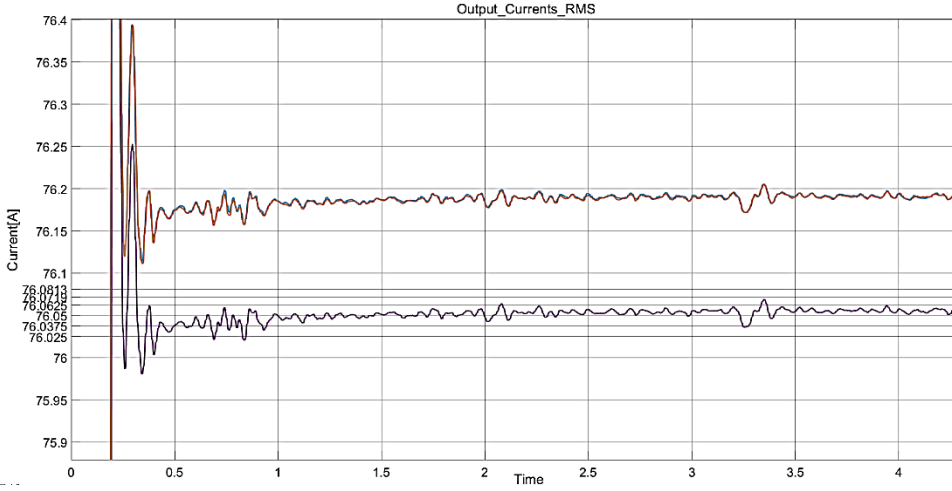
يبين الشكل (20) جهد وصلة التيار المستمر DC-Link ذات الجهد المنخفض حيث من الملاحظ أن الارتفاع المفاجئ لجهد الشبكة عند اللحظة 3.2 ثانية لم سبب ابتعاد الجهد عن نقطة الهدف بحوالي 0.3 فولت فقط أي بما لا يتجاوز 0.05% ولمدة لا تتجاوز 0.2 ثانية قامت بعدها خوارزمية التحكم المرفقة بإعادة جهد الوصلة بشكل تدريجي بدون أي تأثير يذكر لحقن التوافقيات عند اللحظة 3.9 ثانية.

يبين الشكل (21) القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل حيث من الواضح نجاح المحول الذكي بعزل الحمل عن الإضرابات الحاصلة على طرف الجهد العالي سواء الارتفاع المفاجئ للجهد عند اللحظة 3.2 ثانية أو حقن التوافقيات عند اللحظة 3.9 ثانية.



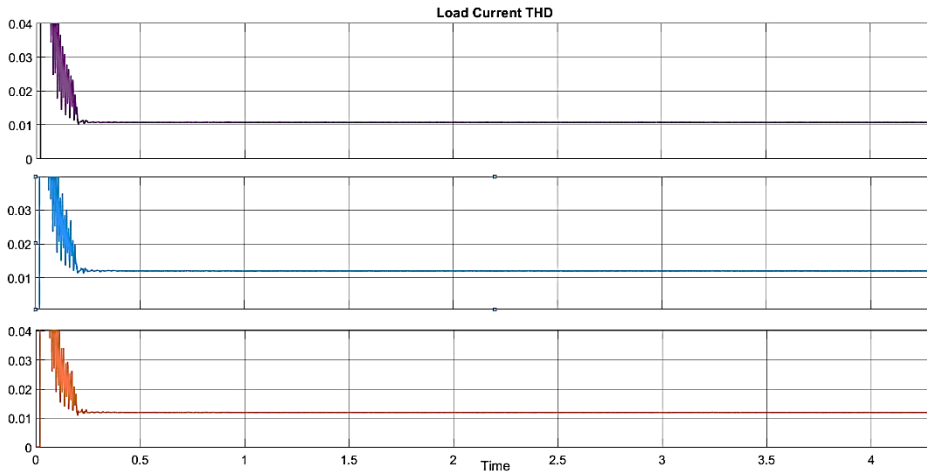
الشكل 21 القيم الفعالة للجهد بين طورين والجهد الطوري للحمل

يبين الشكل (22) القيم الفعالة لتيارات أطوار الحمل حيث من الملاحظ عدم تأثر تيار الحمل



باطرابات الشبكة.

الشكل 22 القيم الفعالة لتيار الحمل



الشكل 23 التشوه التوافقي لتيار الحمل

يبين الشكل (23) التشوه التوافقي لتيارات أطوار الحمل حيث لم تتجاوز نسبة التوافقيات 1.1% خلال طيلة فترة النمذجة بغض النظر عن اضطرابات الشبكة.

3.4 مناقشة النتائج

1. بالنظر للحالة المدروسة يمكن للمحول الذكي عزل الأعطال والاضطرابات الحاصلة في طرف الشبكة من الانتقال لطرف الحمل بالتالي تأمين استمرارية عمل الأحمال الهامة عند حدوث حالة طارئة في شبكة التوزيع ولو لفترة كافية لاتخاذ الإجراء اللازم لتحديد العطل وتأمين استمرار تغذية الحمل.
2. نلاحظ أن المحول الذكي حافظ بشكل مقبول على جهود وصلتي التيار المستمر وأبدى استجابة سريعة لأي تغير يحدث وعمل بسرعة على إعادة جهدي الوصلتين للقيم المرغوبة الأمر الذي يجعله حل فعال لمكاملة مرافق التخزين ومنابع الطاقات المتجددة عند وصلة التيار المستمر ذات الجهد المنخفض ويعطي امكانية لاستعمال وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط في تطبيقات نقل التيار المستمر ذو الجهد العالي.
3. أدى انقطاع أحد أطوار الشبكة لارتفاع جهد وصلة التيار المستمر ذات الجهد المتوسط لفترة طويلة نسبياً، إلا أن الاضطراب المرافق الذي حصل في طرف الجهد المنخفض كان شبه آني واستمر لفترة قصيرة (حوالي 0.1s)، بينما أدى الارتفاع المفاجئ لجهد الشبكة لاضطراب محدود في جهد وصلة التيار المستمر لم يتجاوز 0.5% من نقطة الهدف ولفترة لم تتجاوز 0.2 ثانية بالتالي استطاع المحول الذكي في كلا الحالتين بالاستمرار بتغذية الحمل.

المراجع

- [1] Saniya Khan, Khaliqur Rahman, Mohd Tariq, Salman Hameed, Basem Alamri. Solid-State Transformers: Fundamentals, Topologies, Applications, and Future Challenges. *Mdpi/Sustainability* 2021, 14, 319
- [2] Brooks, J.L. Solid state transformer concept development. In *Naval Material Command; Civil Eng. Lab., Naval Construction Battalion Center: Port Hueneme, CA, USA*, 1980.
- [3] McMurray, W. Multipurpose power converter circuits. U.S. Patent 3 487 289, 30 December 1969.
- [4] McMurray, W. The thyristor electronic transformer: A power converter using a high-frequency link. *IEEE Trans. Ind. Gen. Appl.* 1971, IGA-7, 451–457. [CrossRef]
- [5] McMurray, W. Fast response stepped-wave switching power converter circuit. U.S. Patent 3 581 212, 25 May 1971.
- [6] Chen, H.; Prasai, A.; Divan, D. Dyna-C: A Minimal Topology for Bidirectional Solid-State Transformers. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 995–1005. [CrossRef]
- [7] Masoum, A.S.; Hashemnia, N.; Abu-Siada, A.; Masoum, M.A.S.; Islam, S.M. Online Transformer Internal Fault Detection Based on Instantaneous Voltage and Current Measurements Considering Impact of Harmonics. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2017, 32, 587–598. [CrossRef]
- [8] Sabahi, M.; Hosseini, S.H.; Sharifian, M.B.; Goharrizi, A.Y.; Gharehpetian, G.B. Bi-directional power electronic transformer with maximum power-point tracking capability for induction heating applications. *IET Power Electron.* 2010, 3, 724–731. [CrossRef]
- [9] Chen, H.; Divan, D. Soft-switching solid state transformer (S4T). *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE)* 2017, 33, 2933–2947.
- [10] Liu, Y.; Liu, Y.; Ge, B.; Abu-Rub, H. Interactive grid interfacing system by matrix-converter based solid state transformer with model predictive control. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2017, 16, 2533–2541. [CrossRef]

- [11] Sun, X.; Wang, H.; Qi, L.; Liu, F. Research on Single-Stage High-Frequency-Link SST Topology and Its Optimization Control. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020, 35, 8701–8711. [CrossRef]
- [12] Sabahi, M.; Hosseini, S.H.; Sharifian, M.B.; Goharrizi, A.Y.; Gharehpetian, G.B. Zero-voltage switching bi-directional power electronic transformer. *IET Power Electron.* 2010, 3, 818–828. [CrossRef]
- [13] Mostafa, M.A.; Abdou, A.F.; El-Gawad, A.F.A.; El-kholy, E.E. Comparison of multi-carrier and SHE-PWM for a nine levels cascaded H bridge inverter. In *Proceedings of the 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, 19–21 December 2017; pp. 1483–1491.
- [14] Falcones, S.; Mao, X.; Ayyanar, R. Topology comparison for Solid State Transformer implementation. In *Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 25–29 July 2010*; pp. 1–8.
- [15] Qin, H.; Kimball, J.W. A comparative efficiency study of silicon-based solid state transformers. In *Proceedings of the 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, GA, USA, 12–16 September 2010*; pp. 1458–1463.
- [16] Zhang, J.; Wang, Z.; Shao, S. A three-phase modular multilevel DC–DC converter for power electronic transformer applications. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2017, 5, 140–150. [CrossRef]
- [17] Zhang, C.; Wang, H.; Peng, J.; Yu, J. Control of Three-Stage AC-AC Solid State Transformer for Power Exchange Between Grids. In *Proceedings of the 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Macao, China, 1–4 December 2019; pp. 1–5. [CrossRef]
- [18] Abu-Siada, A.; Budiri, J.; Abdou, A.F. Solid State Transformers Topologies, Controllers, and Applications: State-of-the-Art Literature Review. *Electronics* 2018, 7, 298. [CrossRef]
- [19] Zhang, J.; Liu, J.; Zhong, S.; Yang, J.; Zhao, N.; Zheng, T.Q. A Power Electronic Traction Transformer Configuration with Low-Voltage IGBTs for Onboard Traction Application. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019, 34, 8453–8467. [CrossRef]

- [20] Pacheco, J.D.O.; Honório, D.D.A.; Oliveira, D.D.S. An AC–DC Isolated MMC-Based Structure Suitable for MV SST Traction Applications. *IEEE Access* 2019, 7, 106395–106406. [CrossRef]
- [21] Frutos, P.; Briz, F.; Sánchez, A.; Guerrero, J.M. Quad-Active-Bridge as the basic cell of a MMC Based SST for DER and DESS Integration. In *Proceedings of the 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Vancouver, BC, Canada, 12–14 June 2019; pp. 2349–2355. [CrossRef]
- [22] Madhusoodhanan, S.; Tripathi, A.; Mainali, K.; Patel, D.; Kadavelugu, A.; Bhattacharya, S. Distributed Energy Storage Device integration with three phase distribution grid using a Transformerless Intelligent Power Substation. In *Proceedings of the 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte, NC, USA, 15–19 March 2015; pp. 670–677.
- [23] Tudorache, T.; Marinescu, A.; Dumbrava, I. On-road Charging System Demonstrator for EVs. In *Proceedings of the 2019 Electric Vehicles International Conference (EV)*, Bucharest, Romania, 3–4 October 2019; pp. 1–4. [CrossRef]
- [24] Verma, N.; Singh, N.; Yadav, S.; Gupta, S. Reactive Power Compensation of Solid State Transformer for WECS. In *Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)*, Kolkata, India, 4–5 May 2018; pp. 1–6. [CrossRef]
- [25] She, X.; Huang, A.Q.; Wang, F.; Burgos, R. Wind Energy System with Integrated Functions of Active Power Transfer, Reactive Power Compensation, and Voltage Conversion. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 4512–4524. [CrossRef]
- [26] Gorla, N.B.Y.; Kolluri, S.; Chauhan, P.J.; Panda, S.K. A fault tolerant control approach for a three-stage cascaded multi-level solid state transformer. In *Proceedings of the 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Stanford, CA, USA, 9–12 July 2017; pp. 1–6. [CrossRef]

- [27] Maharjan, M.; Tamrakar, U.; Bajagain, S.; Hansen, T.M.; Tonkoski, R. A steady-state equivalent model of solid state transformers for voltage regulation studies. In Proceedings of the 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 16–20 July 2017; pp. 1–5. [CrossRef]
- [28] Liu, X.; Liu, Y.; Liu, J.; Zhang, X. Coordinating voltage regulation for an AC–DC hybrid distribution network with multiple SSTs. *J. Eng.* 2019, 2019, 1368–1372. [CrossRef]
- [29] Zhao, H.; Yang, B. A Novel Conception for HVDC Transmission Capacity Expansion and Its Control Strategy. In Proceedings of the 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shenzhen, China, 4–7 November 2018; pp. 1–6. [CrossRef]
- [30] Kimura, N.; Morizane, T.; Iyoda, I.; Nakao, K.; Yokoyama, T. Application of Solid-State Transformer for HVDC Transmission from Offshore Windfarm. In Proceedings of the 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France, 14–17 October 2018; pp. 902–907. [CrossRef]
- [31]