REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Alimentation d'une charge DC par une combinaison réseau électrique-source photovoltaïque Via un convertisseur de type MMC

Présentés par :

SEBAA MOUNIR

CHEREIT REDHA

Proposés et Dirigés par :

Dr. Kabache Nadir

Promotion 2022

REMERCIEMENTS :

Mes remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, santé, et la patience, qu'il ma données durant toutes ces années d'étude.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au soutient de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Nous voudrons tout d'abord adresser toute ma gratitude au directeur de ce mémoire, Docteur KABACHE NADIR, pour son patience, son disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Mes remerciements particuliers s'adressent aumembres de jury de ma soutenance. Nous désirons aussi remercier les enseignants qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Nous voudrons exprimer nos reconnaissance envers les amis et collègues qui nous avons apportés leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche on particulier le DR-NASSIM ZEMIRLINE.

Enfin, je tienne à témoigner toute mes gratitudes à mes parents pour leur confiance et leur support inestimable

DEDICACE

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères HASSAN ET HOUSSAM

A mes sœurs

A mes grandes familles CHERIET CHAKHCHOUKH

et

Aux chers amis surtouts

NASSIM(Z),ABD ELKRIM,ISELAM ,ISSA, MOHAMED(BRAH),KARIM, MOUNIR,AMINE(mst), ADEL,ABASS ,FATHI,OMAR,MOURAD,MILOUD,ABOU BAKER,

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études

REDHA CHERIET

DEDICACE

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères MOHAMED,ABDELHALIM ,HAITHEM

A mes sœurs

A mes grandes familles

et

Aux chers amis surtouts

NASSIM(Z),REDHA,MOHAMED,

TAHER.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études

MOUNIR SEBAA

ملخص :

مع تنوع موارد الطاقة الكهربائية ، ولاسيما منها المتجددة ، وظهور مفاهيم جديدة مثل الشبكات الذكية والشبكات الصغيرة ووسائل التخزين ، أصبح من الضروري إيجاد وسائل أكثر كفاءة لتنسيق أفضل بين المكونات المختلفة من نظام كهربائي.
هذا هو السبب في أن أحد أكثر تقنيات إلكترونيات الطاقة كفاءة والتي وجدت تطبيقها في نظام التوزيع هو محول الطاقة الذكي. يعتمد هذا المحول بشكل أساسي على محول معياري متعدد المستويات (MMC) ومحول طاقة عالي التردد. يمكن أن يلعب المحول الذكي دورًا إداريًا مهمًا في نظام شبكة توزيع الطاقة في المستقبل ، ويمكنه تقديم المزيد من الخدمات في الشبكات المتقدمة مقارنة بالمحول التقليدي.
لذلك ، يقترح العمل الحالي دراسة النمذجة والتحكم والمحاكاة لمحول MMC من أجل التكامل الفعال لمصدر الطاقة الكهربائية المتجددة. الهدف هو تزويد حمل التيار المستمر بمصدر طاقة مشترك: الشبكة الكهربائية - النظام الكهروضوئي (PV). في هذه الحالة ، يتم التحكم في المحول لاستخراج الحد الأقصى من الطاقة المتاحة على مستوى النظام الكهروضوئي ولتكملة باقي الطاقة المطلوبة بواسطة الحمل عبر الشبكة الكهربائية.
الكلمات الرئيسية: المحول الذكي ، المحول المعياري متعدد المستويات (MMC) ، النظام الكهروضوئي (PV)+9، التحكم الموجه نحو المتجهات

Résumé :

Avec la diversité des ressources d'énergie électrique, en particulier, renouvelables et avec l'apparition de nouveaux concepts tels que les réseaux intelligents, les micro-réseaux et les moyens de stockage, il est devenu indispensable de trouver des moyens plus efficaces pour une meilleur coordination entre les différents composants d'un système électrique. C'est pourquoi l'une des technologies d'électronique de puissance les plus efficaces qui a trouvé son application dans le système de distribution est le transformateur de puissance intelligent. Ce transformateur se base essentiellement sur un convertisseur modulaire multi niveau (MMC) et transformateur haute fréquence de puissance. Le transformateur intelligent peut jouer un rôle de gestion important dans le système de réseau de distribution d'énergie à l'avenir et peut fournir beaucoup plus de services dans les réseaux avancés par rapport au transformateur traditionnel.

Par conséquent, le présent travail propose une étude de modélisation, de commande et de simulation d'un convertisseur MMC pour une intégration efficace d'une source d'énergie électrique renouvelable. L'objectif est de fournir, à une charge DC, une alimentation combinée : réseau électrique – système photovoltaïque (PV). Dans ce cas, le convertisseur est commandé pour extraire le maximum de l'énergie disponible au niveau du système PV et de compléter le reste d'énergie demandée par la charge via le réseau électrique.

Mots clés : Transformateur Intelligent, Convertisseur Modulaire Multi -niveau (MMC), Système Photovoltaïque (PV), Commande Vectorielle Orientée.

Abstract:

With the diversity of electrical energy resources, in particular renewable sources and beside the new concepts such as smart grids, micro-grids and storage means, it has become important to find more efficient means for better coordination between different components of an electrical system. This is why the power electronics technologies has found its application in the electrical distribution system with the so called the Solid-State-Transformer - SST. This transformer is essentially based on a modular multi-level converter (MMC) and a high frequency power transformer. The smart transformer can play an important management role in the future power distribution network, and can provide much more services in advanced networks compared to the traditional transformer.

Therefore, the present work proposes a modelling, control and simulation study of an MMC converter for an efficient integration of a renewable electric energy source. The objective is to supply a DC load with a combined power supply: electrical network – photovoltaic (PV) system. In this case, the converter is controlled to extract the maximum of the energy available of the PV system and to supplement the rest of the energy requested by the load via the electrical network.

Keywords: Solid-State-Transformer – SST, Modular Multilevel Converter - MMC, Photovoltaic system (PV), Voltage Oriented Control - VOC.

SOMMAIR

REMERCIMENT

DEDICACES

RESUME

SOMMAIR

LISTE DES FIGUERES

LISTE DES TABLEAUX

ABREVIATIONS

<< Introduction générale >>

Introduction générale……..2

<< CHAPITRE I >>

<< Les moyens des productions d'énergie >>

1.1. Introduction……..5
1.2. Intégration des moyens de production dans le cadre de la gestion centralisée d'énergie électrique……..6
1.3. Intégration des moyens de production dans le cadre de la gestion décentralisée Ou distribuée d'énergie électrique……7
1.4. Transformateur intelligent……...9
1.5. Conclusion……11

<< CHAPITRE II >>

<< Modélisation et Simulation convertisseur MMC >>

2.1. Introduction……..13
2.2. Topologie de MMC……13
2.3. Modélisation et contrôle 'un MMC…….....15
2.3.1 Modèle du MMC dans le référentiel naturel triphasé……16
2.32 Modèle du MMC dans le référentiel biphasé…….....19
2.4. Commande du MMC triphasé……..19
2.4.1 Bloc PLL ……20

2.4.2 Bloc de commande… ……..20

2.4.3 Bloc MLI ……21

2.4.4 Bloc de l'algorithme d'équilibrage des tensions aux bornes des capacités des SM……...……..21

2.5. Réalisation du MMC triphasé et son circuit de commande dans l'environnement Matlab/Simulink……...21

2.6. Simulation du MMC avec la commande - sans charge……25

2.7. Conclusion……...28

<< CHAPITRE III >>

<< Intégration du system GPV pour alimenter une charge DC >>

3.1. Introduction……30

3.2. Principe de fonctionnement d'un système PV……30

3.3. Schéma proposé pour l'intégration du système PV via un MMC…….....32

3.4. Simulation et interprétation des résultats……...…….....35

3.5. Conclusion……...37

<< Conclusion général >>

Conclusion général……40

<< Référence >>

Référence

Liste de Figures

<< CHAPITRE I >>

<< Les moyens des productions d'énergie >>

Fig. 1.1. organisation du réseau électrique selon la gestion centralisé……..……..6

Fig. 1.2. Intégration distribuée des moyens de production d'énergie électrique……8

Fig. 1.3. Microgrid et Smartgrid…….9

Fig. 1.4. Configuration d'un SST à 03 étages……...10

<< CHAPITRE II >>

<< Modélisation et Simulation convertisseur MMC >>

Fig. 2.1 : Structure générale d'un MMC triphasé……14

Fig. 2.2 : Structure demi-pont du sous module d'un MMC……..14

Fig.2.3. Etats de fonctionnement des transistors du sous-module d'un MMC ……15

Fig. 2.4 : Schéma représentatif du bras d'un MMC triphasé ……...16

Fig. 2.5 : Circuit équivalent du bras d'un MMC……...18

Fig. 2.6 : Schéma de command par VOC d'un MMC……..……...20

Fig. 2.7 : Schéma global du travail réalisé dans l'environnement Matlab/Simulink……22

Fig. 2.8. Bloc d'alimentation triphasé du MMC ……....22

Fig. 2.9. Structure du MMC utilisé……...22

Fig. 2.10 : Structure d'un bloc SM……23

Fig. 2.11 : Bloc de la technique MLI pour le bras de phase A……..23

Fig. 2.12 : Schéma d'entrée-bloc de contrôle des tensions des références……...24

Fig. 2.13 : Schéma d'entrée-stratégie d'équilibrage des condensateurs……...24

Fig. 2.14 : Blocs PLL et bloc de transformation triphasé/biphasé……24

Fig. 2.15 : La tension continue à la sortie du MMC……26

Fig. 2.16 : Tensions aux bornes des condensateurs d'un demi-bras de la phase A……..26

Fig. 2.17 : L'évolution du courant de circulation pour la phase A……...27

Fig. 2.18 : Tensions triphasé coté réseau……..27

<< CHAPITRE III >>

<< Intégration du system GPV pour alimenter une charge DC >>

Fig. 3.1 : principe de l'effet photovoltaïque…….31

Fig. 3.2 : Système de production d'énergie électrique photovoltaïque connecté au réseau…..31

Fig. 3.3 : Schéma d'intégration du système PV avec le MMC triphas……33

Fig. 3.4 : Schéma de commande de l'association MMC-système PV…….....34

Fig. 3.5 : Prévu de changer la charge avec GPV……35

Fig. 3.6. Bilan de puissances à la sortie du MMC……35

Fig3.7. les courbes des tensions V……...36

Fig. 3.8. Tension des condensateurs du bras (phase A)……36

Liste des Tableaux

<< CHAPITRE II >>

<< Modélisation et Simulation convertisseur MMC >>

Table 2.1 – Les différents états d'un sous-module demi-pont……15

Liste Abréviations

SST - Transformateur à semi-conducteurs

ST- transformateur Intelligent

MMC - convertisseur multi-niveau modulaire (Modular Multi-level Converter)

SM - sous-module

MT - Moyen tension

BT - basse tension

HF- haute fréquence

AC - courant alternatif

DC - Courant continu

MV- Moyenne voltage

LV- basse voltage

u - Le demi -bras supérieur

l - Le demi -bras inférieur

MLI - Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation)

VOC - Contrôle orienté sur la tension (Voltage Oriented Control)

PLL - Boucle à verrouillage de phase (Phase Locked Loop)

CC - Courant continu

RL -Resistance l'inductance

PV -Photovoltaïque

$\mathbf{V_c}$- Tension de condensateur

Introduction générale

Introduction générale

Sans énergie, le monde n'aurait pas pu atteindre le niveau de développement actuel. En effet, l'homme, les machines et la nature en ont tous besoin. La production de cette énergie est donc un défi de grande importance pour le présent et l'avenir.

Dans ces dernières années, le monde à connu un développement des énergies renouvelables plus particulièrement l'énergie solaire. Les recherches scientifiques élaborées pour exploiter cette énergie ont connu une révolution sur le plan énergétique dans le monde entier. La production d'une énergie propre présente plusieurs avantages comme la propreté de l'environnement, l'augmentation de la durée de vie des réserves fossiles en minimisant la pollution atmosphérique causée par le dégagement des gaz toxiques à partir des centrales classiques. D'autre part, ces énergies renouvelables présentent des inconvénients en ce qui concerne leur intégration. En plus du problème de la stabilité du système énergétique, l'intégration nécessite des moyens et des composants supplémentaires pour atteindre les caractéristiques du réseau électrique en termes de fréquence et de niveau de tension.

D'autre part, avec la diversité des ressources d'énergie électrique, en particulier, renouvelables et avec l'apparition de nouveaux concepts tels que les réseaux intelligents, les micro-réseaux, les moyens de stockage il est devenu indispensable de trouver des moyens plus efficaces pour une meilleur coordination entre les différents composants d'un système électrique. C'est pourquoi l'une des technologies d'électronique de puissance les plus efficaces qui a trouvé son application dans le système de distribution est le transformateur de puissance intelligent. Ce transformateur se base essentiellement sur un convertisseur modulaire multi niveau (MMC) et transformateur haute fréquence de puissance [1].

Le transformateur intelligent peut jouer un rôle de gestion important dans le système de réseau de distribution d'énergie à l'avenir et peut fournir beaucoup plus de services dans les réseaux avancés par rapport au transformateur traditionnel [2].

Par conséquent, le présent travail propose une étude de modélisation, de commande et de simulation d'un convertisseur MMC pour une intégration efficace d'une source d'énergie électrique renouvelable. L'objectif est de fournir, à une charge DC, une alimentation combinée : réseau électrique – système photovoltaïque (PV). Dans ce cas, le convertisseur est commandé pour extraire le maximum de l'énergie disponible au niveau du système PV et de compléter le reste d'énergie demandée par la charge via le réseau électrique.

- Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres : Le premier chapitre présente les principes de la production d'électricité à base d'énergie renouvelable et non renouvelable.
- Le second chapitre présente la modélisation, la commande et la simulation d'un convertisseur MMC.
- Le troisième chapitre illustre un schéma de commande pour l'intégration d'un système PV pour alimenter une charge DC en combinaison avec un réseau électriques

CHAPITRE 1

Les moyens des productions d'énergie

1.1 Introduction

Depuis ses premières découvertes au dix-neuvième siècle jusqu'aujourd'hui, l'électricité a passé d'un simple prestige pour les endroits bourgeois à un élément de base qui entre dans tous les côtés de notre vie quotidienne. Actuellement, il existe plusieurs technologies de productions de l'énergie électrique. Celles-ci diffèrent de par leur gamme de puissance ou encore de par le type de carburant qu'elles utilisent comme le gaz naturel, le charbon, l'uranium, l'hydrogène, le diesel ou encore des énergies dites renouvelables comme le soleil ou le vent. D'une part, il y a les moyens de production à base d'alternateurs synchrone ou asynchrone directement connecté au réseau et, d'une autre part, celles utilisant des interfaces à base d'électronique de puissance comme le cas des éoliennes, des panneaux solaires ou des piles à combustibles.

Un autre critère qui caractérise un moyen de production, c'est le point et le mode de son raccordement au réseau électrique. Dans ce cas, on distingue plusieurs possibilités [3][4][5] :

- Des moyens qui entrent sous le couvert de ce qu'on appelle gestion centralisée d'énergie électrique.
- Des moyens qui entrent sous le couvert de ce qu'on appelle gestion décentralisée ou distribuée d'énergie électrique.
- Des moyens qui sont autonomes ou isolés

La première catégorie concerne les moyens de production classique important basés sur les ressources primaire fossiles ou fissiles, tandis que, les deux dernières catégories concernent, généralement, les moyen de production à base ressources primaires renouvelables. Pour ces deux dernières catégories, l'intégration dans le système électrique nécessite des moyens d'interfaçage spécifique, généralement à base d'électronique de puissance.

D'autre part, les dernières années ont marqué des tentatives pour remplacer le transformateur de puissance classique par un transformateur à base d'électronique de puissance. En plus du rôle principal, qu'est la fonction de transformation de la puissance, il est doté de plusieurs possibilités supplémentaires telles que le réglage de la tension, la combinaison de plusieurs sources d'énergie, alimentation des charge AC et CC en même temps, etc. à cause de ses possibilité, ce type de transformateur est appelé transformateur intelligent.

Le présent chapitre présent, en premier lieu, les différents modes d'intégration des moyens de production d'énergie électrique dans le réseau électrique. En deuxième lieu, il donne un petit aperçu sur le transformateur intelligent.

1.2. Intégration des moyens de production dans le cadre de la gestion centralisée d'énergie électrique

La gestion centralisée s'est imposée comme la façon la plus économique de mettre en concordance spatiale et temporelle des moyens de production diversifiés, dans leur nature comme dans leur localisation, avec des usages dispersés et variables. Elle exprime le principe de fonctionnement actuel du réseau électrique déjà installé [3].

La gestion centralisée est organisée sous la forme d'une pyramide de quatre niveaux (Fig. 1.1). L'intégration d'une source d'énergie s'effectue au niveau du réseau de transport. Par la suite, les actions et les protocoles de la gestion se propagent verticalement du sommet (production) vers les consommateurs finaux en passant par postes de transformation et les différents niveaux de réseau.

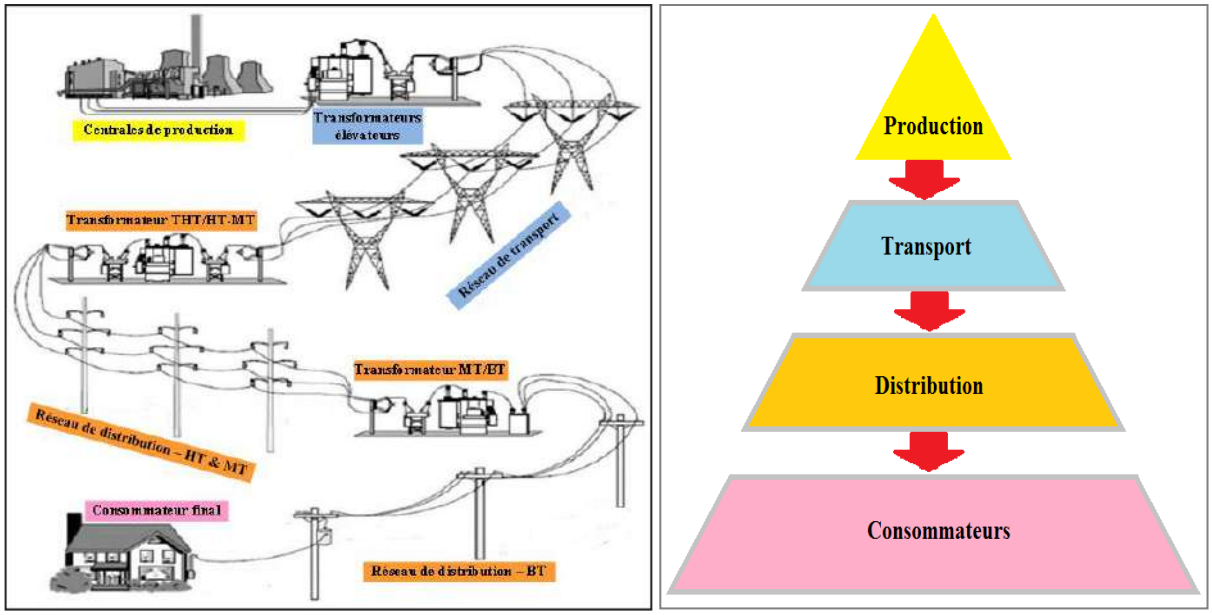


Fig. 1.1 : organisation du réseau électrique selon la gestion centralisée

Dans ce type de gestion, les sources à intégrer sont, principalement, les centrales de grande puissance. Ces unités de production sont installées en des emplacements bien sélectionnés pour un fonctionnement équilibré du réseau électrique. Les types de centrales utilisées sont :

- Les centrales nucléaires
- Les centrales thermiques (charbon, gaz)
- Les centrales hydroélectriques
- Les parcs éoliens de grande puissance

Dans le cadre de la gestion centralisée, les moyens de production centralisée représentent :

- Le lieu où le mécanisme de gestion agit pour équilibrer la production à la demande d'énergie électrique
- Le lieu où s'exécutent les actions principales pour contrôler la fréquence et la tension du réseau électrique.

1.3 Intégration des moyens de production dans le cadre de la gestion décentralisée ou distribuée d'énergie électrique

L'intégration décentralisée des moyens de production met l'accent sur l'utilisation localisée des moyens de production afin d'assurer une large répartition des actions du contrôle du flux d'énergie. Cette tendance et, contrairement à la gestion centralisée, favorise l'utilisation des moyens de production de faible puissance, en particulier, ceux basés sur les énergies renouvelables. Dans ce cas, deux modes d'intégration sont possibles (Fig. 1.2) :

- Une intégration centralisée pour les moyens de production d'énergie les plus importants
- Une intégration décentralisée locale ou distribuée pour les moyens de production d'énergie de faibles gammes de puissance tels que ceux basés sur les ressources renouvelables.

Ce mode d'intégration des moyens de production est devenu plus en plus répandue grâce à la diversité des systèmes de production et de stockage d'électricité à petite échelle. Une production décentralisée est utilisée là où elle est produite [3][4][5]. Contrairement au système traditionnel de lignes à haute tension unidirectionnelles, on utilise des systèmes multi-sources et multidirectionnels (Fig.1.2). Dans une tel architecture, le point d'intégration d'une unité de production dépend de la taille de la puissance offerte :

- Pour les moyens de grandes puissances, elles sont injectées dans le réseau de transport :
  - Les centrales électriques classiques (thermiques, nucléaires hydroélectriques)
  - Les grands parcs éoliens et solaires de puissance supérieure à 12MW
- Pour les moyens de moyennes puissances, elles sont injectées dans le réseau de répartition :
  - Les petites centrales électriques (hydroélectrique, turbines à gaz, etc.)
  - Les parcs éoliens et solaires de puissance entre 250KW et 12MW

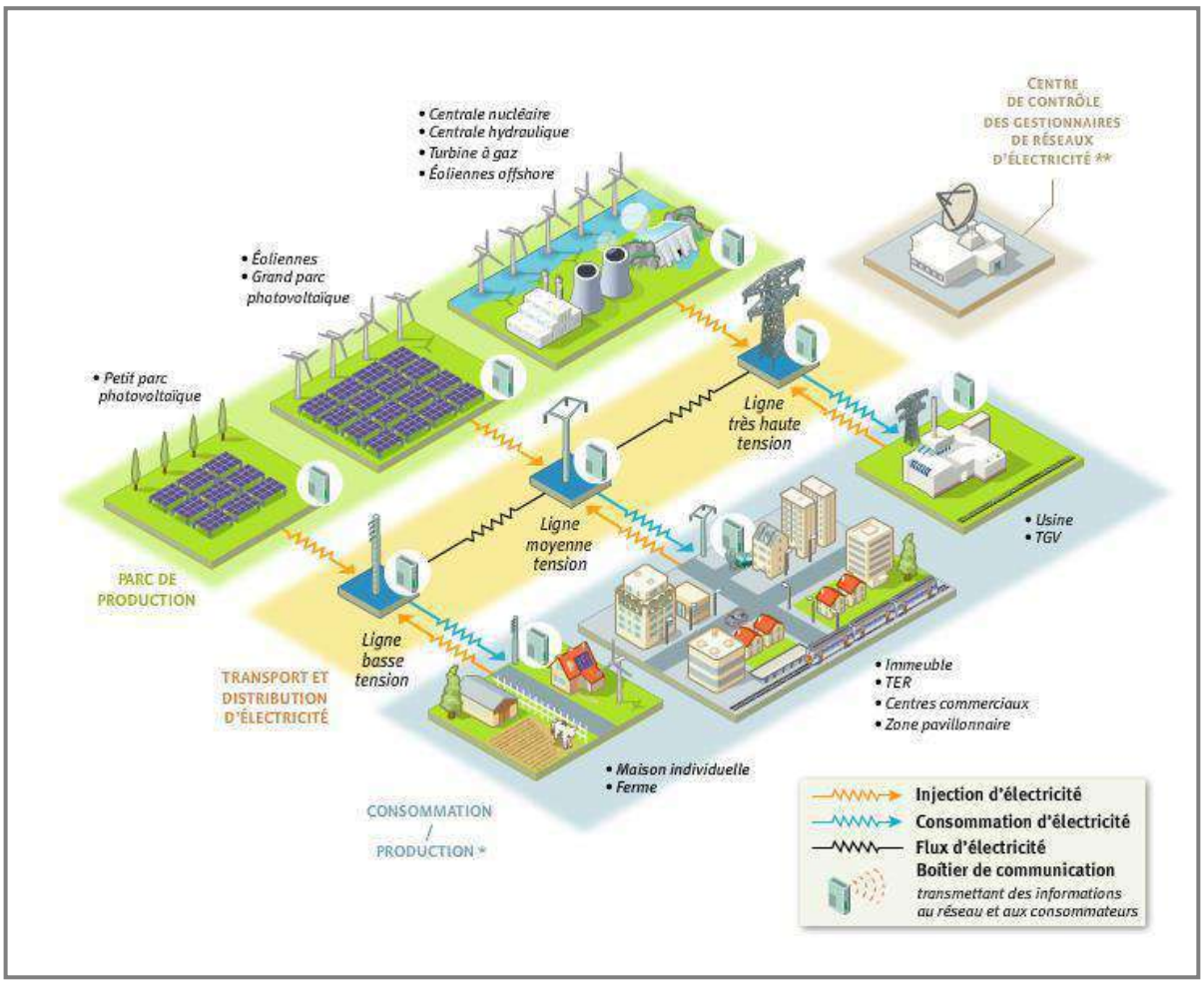


Fig. 1.2. Intégration distribuée des moyens de production d'énergie électrique

➲ Pour les moyens de faibles puissances (inférieure à 250KW), exploités de différentes manières :

- Elles sont Utilisées individuellement : par exemple, l'utilisation des panneaux photovoltaïques ou des petites éoliennes pour des maisons.
- Elles sont Utilisées collectivement : En alimentant certaines agglomérations isolées (Sahara, zone montagneuse, zone rurales, etc.) par des petites centrales solaires ou éoliennes
- Elles sont injectées dans les réseaux électriques au niveau des réseaux de distribution

Avec une telle intégration, de nouveau notions et systèmes ont été proposés pour une gestion flexible et optimale tels que les Micro-grids et les Smart-grids (Fig.1.3).

- Les Microgrids sont des réseaux intelligents de petite taille qui reposent sur des moyens locaux de production d'électricité et apportent un approvisionnement

électrique à un petit nombre de consommateurs afin de leur fournir une alternative, moins chère et plus fiable, aux réseaux électriques centralisés. La particularité des Micro-grids par rapport aux Smart-grids est que ces micro-réseaux intelligents peuvent fonctionner en synchronisation avec le réseau général ou en mode îloté grâce à des solutions de stockage et un système de contrôle intelligent.

- Les Smart-grids ou les réseaux intelligents sont des réseaux d'électricité qui, grâce à des technologies d'informatiques et de communication, ajustent les flux d'électricité entre fournisseurs et consommateurs. En collectant des informations sur l'état du réseau, les Smart-grids contribuent à une adéquation entre production, distribution et consommation.

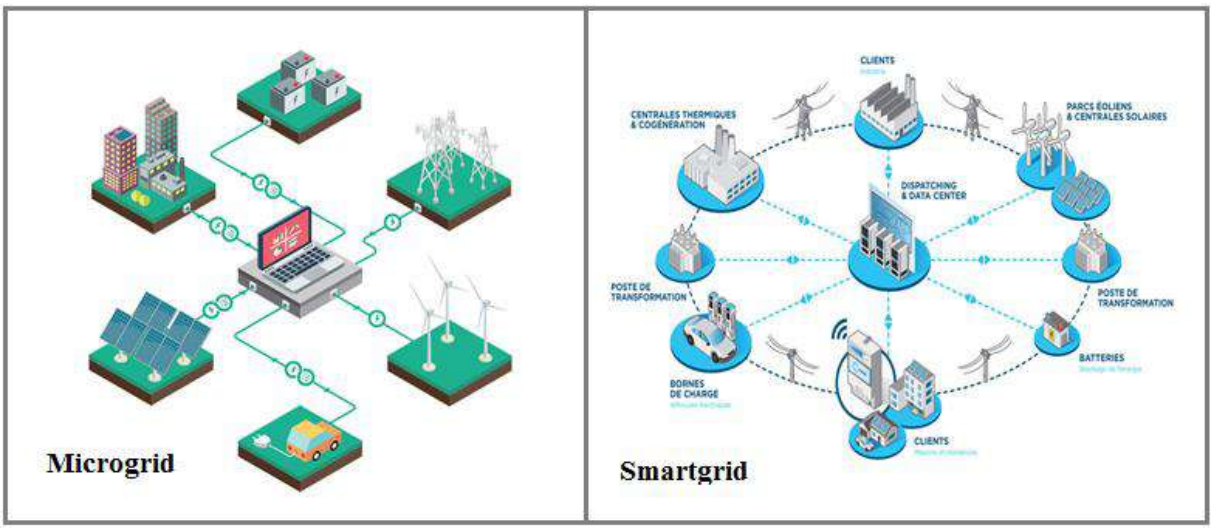


Fig. 1.3. Microgrid et Smartgrid

1.4 Transformateur intelligent :

Le transformateur intelligent, basé sur l'électronique de puissance, joue le même rôle que celui du transformateur conventionnel ou traditionnel, mais la structure et le mode de fonctionnement sont entièrement différents. En effet, la tension alternative entrante de basse fréquence (50 ou 60 Hz) est convertie en tension de haute fréquence via des convertisseurs à base d'électronique de puissance avant de l'appliquer sur le côté primaire d'un transformateur HF bien choisi. Cette tâche s'effectue en deux étapes : redressement de la tension et par la suite la découper pour avoir la tension HF. Le processus inverse s'effectue sur le côté secondaire du transformateur HF pour obtenir un courant alternatif et/ou tension continue pour la charge. Le transfert de puissance à plus haute fréquence aide à réduire le poids, ainsi que la taille du transformateur [6].

La structures de base de ce type de transformateur (appelé Solide-State-Transformer - SST) est illustrée sur les figures (1.4). Cette structure comprend les étages suivants :

- Redresseur alternatif haute tension à base de semi-conducteurs, il se base généralement sur un convertisseur modulaire multiniveau ou MMC ;
- Convertisseur CC haute tension-haute fréquence à base de semi-conducteurs
- Transformateurs haute fréquence
- Redresseur coté base tension pour avoir l'énergie en DC
- Un onduleur pour obtenir l'énergie en AC

Pour le principe de fonctionnement, le convertisseur MMC est connecté au côté MT du réseau électrique, il transforme la tension alternative triphasée (courant), d'une fréquence de 50 ou 60 Hz, à une tension (courant) continue dans le circuit intermédiaire. La tension continue est ensuite reconvertie en courant alternatif, mais avec une fréquence plus élevée, par la seconde partie du pont convertisseur MT. Grâce à la fréquence élevée de la tension résultante, les propriétés magnétiques du noyau du transformateur sont mieux utilisées et le transformateur peut donc être fabriqué considérablement plus petit tout en maintenant la même capacité de puissance. Du côté basse tension, un second pont de convertisseur transforme la tension alternative haute fréquence en une autre continue. Ensuite, on revient à la tension alternative avec une fréquence standard à l'aide d'un onduleur triphasé. A noter, que les tensions continues MT et BT peuvent être utilisées directement pour alimenter des charge continues.

En plus de la tache de transformation de la tension, la structure du SST et, via la commande de ses différents blocs, différentes autres taches peuvent êtres ciblées telles que le filtrage et l'amélioration de la qualité d'énergie, le contrôle du flux de puissance [7], etc.

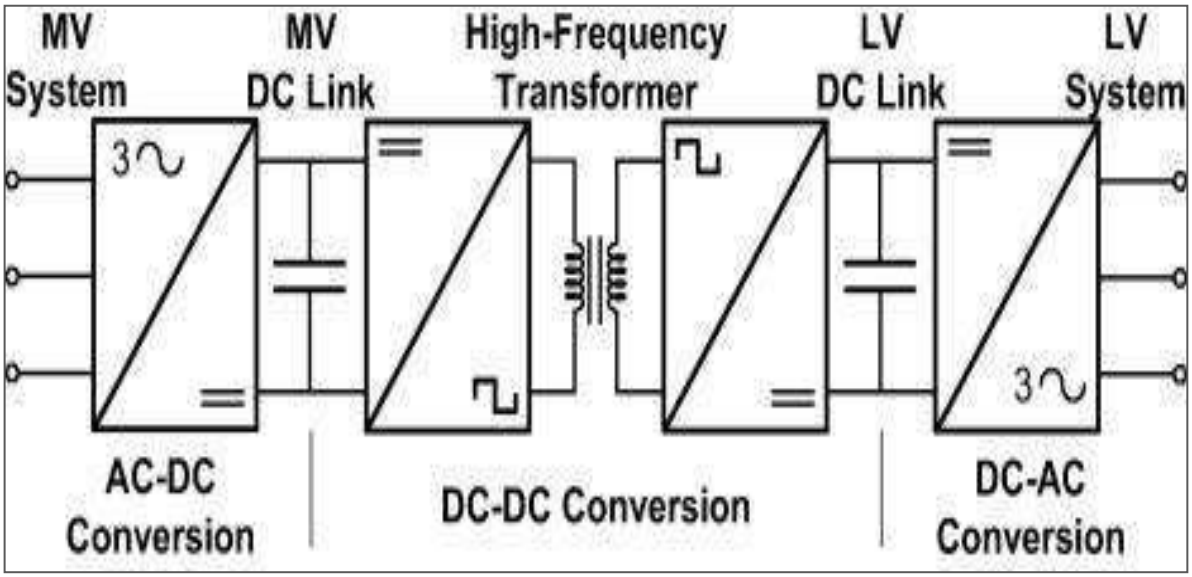


Fig. 1.4 : Configuration d'un SST à 03 étages

1.5 Conclusion

Nous avons illustré dans ce chapitre les différentes manières d'intégration des sources d'énergie électrique dans le système électrique. On distingue deux modes, intégration centralisée et intégration décentralisé. Pour l'intégration décentralisée ou distribuée, elle nécessite certain interface à base d'électronique de puissance et algorithme de contrôle. En plus, nous avons donné un aperçu sur le transformateur intelligent dont la structure et le principe de fonctionnement peut offrir une solution intéressante pour une intégration efficace des sources à base des énergies renouvelables dans le réseau électrique. Justement, c'est ce point qui sera abordé dans les chapitres qui suivent.

CHAPITRE 2

Modélisation et Simulation convertisseur MMC

2.1. Introduction

Ces dernières années, les convertisseurs modulaires multi niveaux (MMC) ont reçu une attention croissante, car ils sont considérés comme une solution viable pour les applications à haute puissance. Un MMC est caractérisé par une structure de bras modulaire, composée d'une connexion en cascade d'un grand nombre de cellules AC/DC simples avec des condensateurs flottants. Ces cellules peuvent être facilement assemblées dans un convertisseur pour les systèmes de conversion de puissance haute ou moyenne tension.

Un convertisseur multi-niveaux - ou convertisseur modulaire multi-niveaux est un élément d'électronique de puissance qui, par rajout de cellules de commutations, offre des degrés de liberté supplémentaires pour la commande du nombre de niveaux de la tension de sortie des convertisseurs. Un niveau en électronique de puissance est défini comme l'ensemble des tensions accessibles en sortie des éléments permettant de piloter le convertisseur, généralement la tension aux bômes des demi-cellules de commutation du convertisseur [8].

2.2 Topologie de MMC

La structure générale d'un MMC est constituée de trois bras, chacun d'eux se compose de deux demi -bras par phase-jambe, un demi -bras supérieur et un demi-bras inférieur. Le demi -bras supérieur et le demi -bras inférieur sont respectivement désignés par les sous-indices "u" et "p". Chaque bras comprend n sous-modules nominalement identiques (SM_s) connectés en série avec un ensemble résistance-inductance, comme illustré sur la figure 1. A l'intérieur des bras, chaque sous-module est contrôlable individuellement. Le convertisseur peut donc agir comme une source de tension contrôlable, avec un grand nombre d'échelons de tension discrets disponibles. Alors que les SM_s de chaque bras sont contrôlés pour générer la tension de phase requise, l'inductance du bras filtre les composants hauts fréquence dans le courant de bras et est principalement utilisé en cas de court-circuit continu pour limiter la pente du courant continu [9][10].

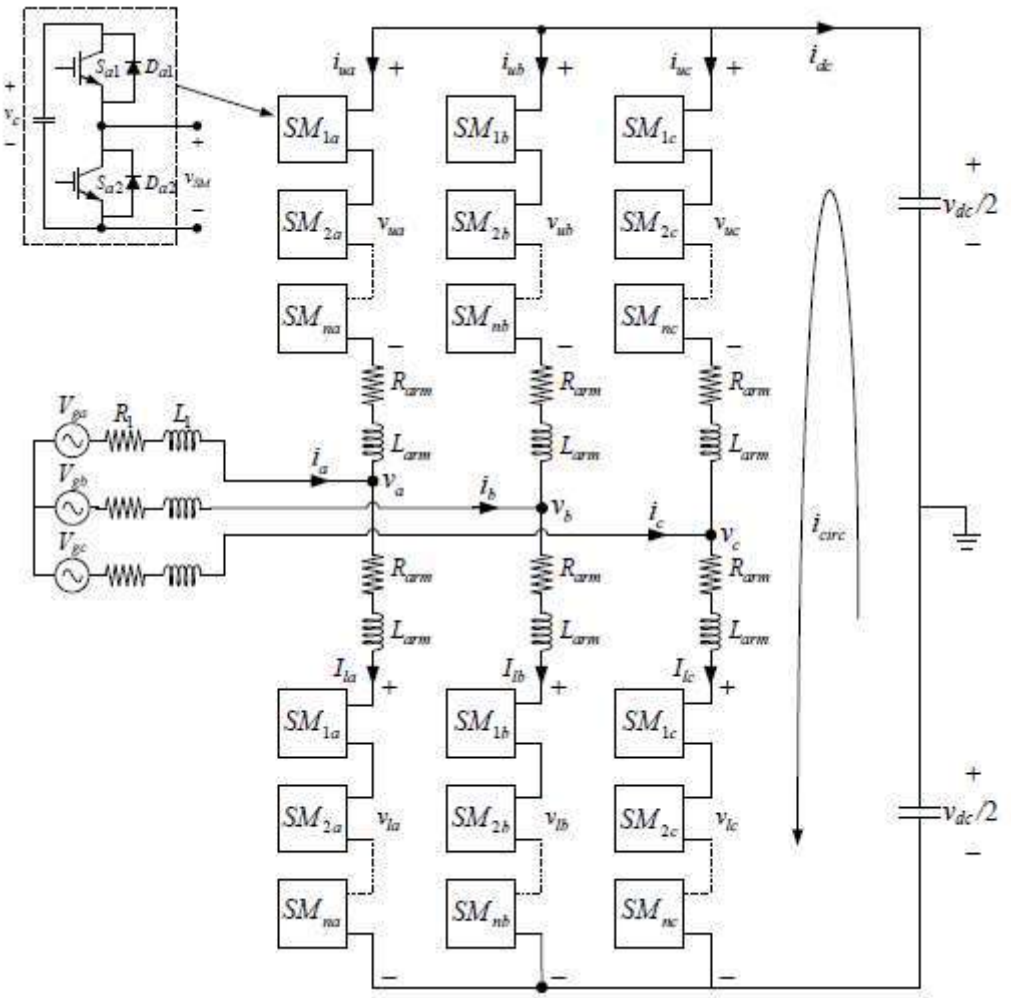


Fig. 2.1 : Structure générale d'un MMC triphasé

Pour les sous modules SM, généralement, la structure à demi-pont est largement utilisée (Fig.2). Cela est dû à la présence de deux commutateurs seulement dans le SM, ce qui réduit le nombre de composants et une plus grande efficacité pour le MMC.

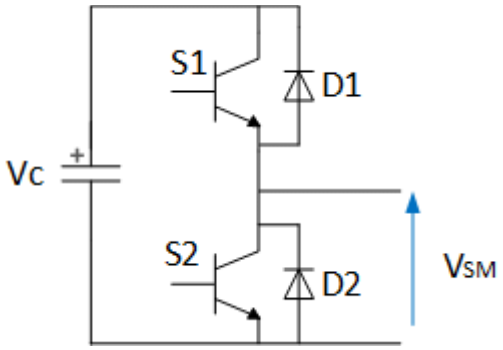


Fig. 2.2 : Structure demi -pont du sous module d'un MMC [11].

Pour le fonctionnement d'un SM demi -pont, Lorsque l'interrupteur S1, est fermé, la tension de SM est égale à Vc, et on dit que le SM est inséré. Lorsque l'interrupteur S2 est fermé, la

tension de SM est égale à zéro et on dit que le SM est contourné. De plus, lorsque le courant s'insère à partir de la polarité positive du condensateur, le condensateur est chargé et lorsque le courant s'insère à partir de la polarité négative du condensateur, le condensateur est déchargé. La figure (2.3), illustre les différents modes de fonctionnement d'u SM en fonction des états des deux transistors qui le composent. Le tableau 2.1 illustrent les 4 états du sous-module en fonction du sens du courant [12] [13].

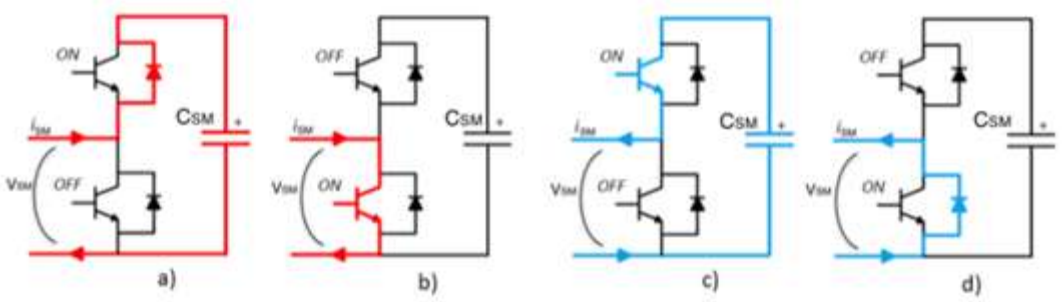


Fig. 2.3 : Etats de fonctionnement des transistors du sous-module d'un MMC [12].

Etats des interrupteurs		Tension de sortie V_{SM}	Polarité de i_{sm}	Statut de C_{SM}
S1	S2			
On	off	V_c	+	Chargement
Off	On	0	+	Contournée
On	Off	V_c	-	Déchargement
Off	On	0	+	Contournée
On	On	Capacité court-circuitée		
Off	Off	Etats bloqué		

Table 2.1 – Les différents états d'un sous-module demi -pont.

2.3 Modélisation et contrôle d'un MMC.

Le MMC agit comme un redresseur qui convertit la tension alternative du réseau en une tension continue. En cas d'inversion du flux de puissance, la MMC passe pour agir comme un onduleur qui faisant passer la tension continue de l'étage d'entrée en tension alternative à la fréquence du réseau électrique.

Pour mieux analyser le modèle de la MMC côté moyen tension, considérant un seul bras correspondant à une seule phase, figure (2.4), (le comportement est identique pour les autres phases). Chaque demi-bras comporte un nombre N de SM. Le nombre des SM est défini en

fonction de la tension du réseau d'entrée, la tension supporté par les transistors du SM et par le nombre de niveaux de tension voulu. La valeur de tension au borne du condensateur d'un SM est donnée, en fonction de la tension continue à la sortie du MMC et le nombre des SM d'un demi -bras [14], comme suivant :

$$V_{cSM} = \frac{V_{dc}}{N}$$

2.3.1. Modèle du MMC dans le référentiel naturel triphasé.

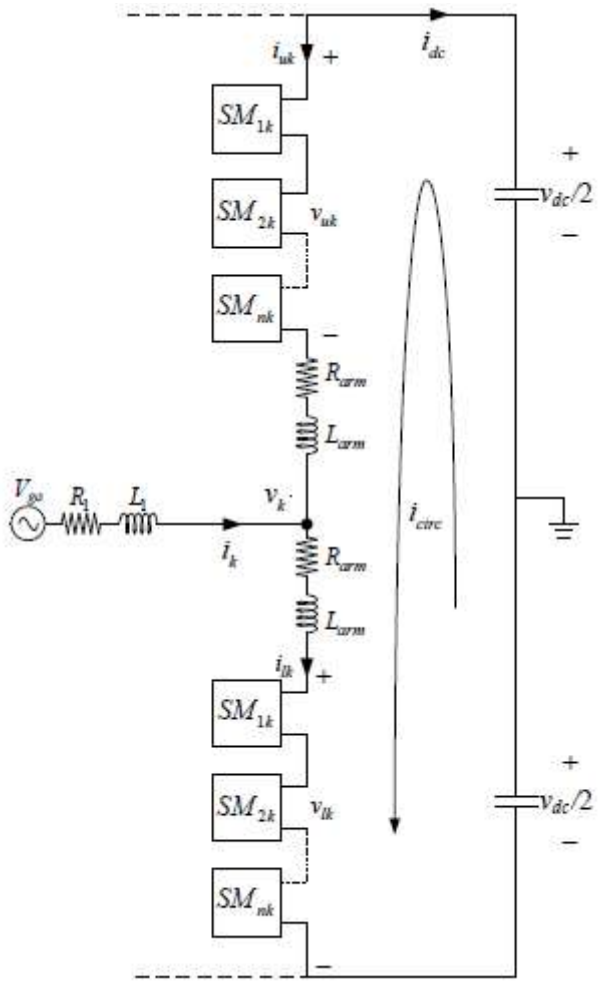


Fig. 2.4 : Schéma représentatif du bras d'un MMC triphasé.

En considérant le schéma du bras du MMC (Fig. 2.4), l'application des lois des mailles donne les équations caractérisant le comportement du MMC comme suit [15]. [16].

Pour les courants des demi-bras supérieur et inférieur, ils s'expriment par :

$$i_{uk} = i_{circ} - \frac{i_k}{2} \quad (2.1)$$

$$i_{lk} = i_{circ} + \frac{i_k}{2} \quad (2.2)$$

Avec :

- i_{uk} et i_{lk} : Sont, respectivement, les courants des demi-bras supérieur et inférieur de la phase k ($k = a, b, c$).
- i_k : C'est le courant de la phase k coté réseau donné par :

$$i_k = i_{lk} - i_{uk} \tag{2.3}$$

- i_{circ} : C'est le courant de circulation qui peut être obtenu en additionnant (2.1) et (2.2) :

$$i_{circ} = \frac{i_{uk}+i_{lk}}{2} \tag{2.4}$$

Pour les différentes tensions, caractérisant le bras du MMC, ils s'expriment par :

$$\begin{cases} V_{uk} + R_{arm} i_{uk} + L_{arm} \frac{di_{uk}}{dt} + V_K + \frac{V_{dc}}{2} = 0 \\ V_{lk} - R_{arm} i_{uk} - L_{arm} \frac{di_{lk}}{dt} - V_K + \frac{V_{dc}}{2} = 0 \end{cases} \tag{2.5}$$

Donc :

$$V_{uk} = \frac{V_{dc}}{2} - V_K - R_{arm} i_{uk} - L_{arm} \frac{di_{uk}}{dt} \tag{2.6}$$

$$V_{lk} = \frac{V_{dc}}{2} - V_K - R_{arm} i_{uk} - L_{arm} \frac{di_{lk}}{dt} \tag{2.7}$$

Avec :

- V_k : c'est la tension de la phase k du côté réseau
- V_{uk} , V_{lk} : Sont les tensions au niveau des demi-bras supérieur et inférieur, respectivement
- V_{dc} : C'est la tension coté DC du MMC
- R_{arm} et L_{arm} : Sont respectivement la résistance et l'inductance du demi-bras du MMC.

En soustrayant (2.7) de (2.6) et en utilisant les équations des courant (2.2) et (2.3), on obtient la forme suivante pour V_k :

$$\mathrm{V_k} = \frac{V_{lk}-V_{uk}}{2} + \frac{\mathrm{R_{arm}}\, i_k}{2} + \frac{\mathrm{L_{arm}}}{2} \frac{di_k}{dt} \tag{2.8}$$

En posant $e_K = \frac{V_{lk}-V_{uk}}{2}$, l'expression (2.8) devient :

$$\mathrm{V_k} = e_K + \frac{\mathrm{R_{arm}}\, i_k}{2} + \frac{\mathrm{L_{arm}}}{2} \frac{di_k}{dt} \tag{2.9}$$

Avec e_k représente la force électromotrice interne générée dans la phase k. Elle exprime la tension de sortie souhaitée à la borne du milieu (la tension de référence). A partir de (2.9), cette tension est déduite comme suivant :

$$e_k = V_K - \frac{\mathrm{R_{arm}}\, i_k}{2} - \frac{\mathrm{L_{arm}}}{2}\frac{di_k}{dt} \tag{2.10}$$

Pour les trois phases, on obtient :

$$\begin{cases} \mathrm{e_a} = \mathrm{V_a} - \frac{\mathrm{R_{arm}}\, i_a}{2} - \frac{\mathrm{L_{arm}}}{2}\frac{di_a}{dt} \\ \mathrm{e_b} = \mathrm{V_b} - \frac{\mathrm{R_{arm}}\, i_b}{2} - \frac{\mathrm{L_{arm}}}{2}\frac{di_b}{dt} \\ \mathrm{e_c} = \mathrm{V_c} - \frac{\mathrm{R_{arm}}\, i_c}{2} - \frac{\mathrm{L_{arm}}}{2}\frac{di_c}{dt} \end{cases} \tag{2.11}$$

Finalement, la tension d'entrée du réseau est exprimée par :

$$V_{gk} = V_k + R_1 i_k + L_1 \frac{di_k}{dt} \tag{2.12}$$

Où R_1 et L_1 sont la résistance et l'inductance des filtres d'entrée. En remplaçant (2.9) dans (2.12) l'équation suivante est obtenue :

$$V_{gk} = e_k + \frac{R_{arm} i_k}{2} + \frac{L_{arm}}{2}\frac{di_k}{dt} + R_f i_k + L_f \frac{di_k}{dt} \tag{2.13}$$

En considérant la désignation suivante [17]. :

$$R_{eq} = R_1 + \frac{R_{arm}}{2} \tag{2.14}$$

$$L_{eq} = L_1 + \frac{L_{arm}}{2} \tag{2.15}$$

L'équation (2.13) devient :

$$V_{gk} = e_k + R_{eq} i_k + L_{eq} \frac{di_k}{dt} \tag{2.16}$$

La figure (2.5) illustre le circuit équivalent du bras du MMC pouvant être dérivée de 2.16).

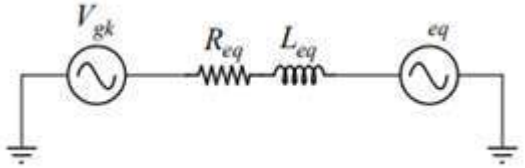


Fig. 2.5 : Circuit équivalent du bras d'un MMC[17].

2.3.2. Modèle du MMC dans le référentiel biphasé.

Pour les besoins de commande, il est nécessaire de transformer le modèle du MMC au référentiel biphasé. La transformation de Park offre une possibilité pour ce passage. La matrice de passage (P) se définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Le passage inverse s'effectue par la matrice inverse (P^{-1}) donnée par :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Le passage des variable $X_{a,b,c}$ aux variables $X_{d,q}$et inversement s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)]\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1}\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

En appliquer la transformation de Park (2.19) sur le système triphasé (2.16), on a

$$\begin{cases} V_d = e_d - R_{eq} i_d - L_{eq}\frac{di_d}{dt} - \omega L_{eq} i_q \\ V_q = e_q - R_{eq} i_q - L_{eq}\frac{di_q}{dt} + \omega L_{eq} i_d \end{cases} \quad (2.21)$$

2.4. Commande du MMC triphasé

Pour un fonctionnement efficace du MMC, la forme de la puissance et la tension délivrée par ce dernier doivent être bien contrôlée. Dans le présent travail, la commande orientée de la tension (Voltage Oriented Control – VOC) est utilisée. Cette stratégie de commande est utilisée avec la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour générer les impulsions de commande des SMs du MMC [18] [19].

Le schéma de commande se compose de différents blocs.

2.4.1 Bloc PLL :

Pour extraire l'angle permettant le passage au référentiel biphasé à travers la transformation de Park, une boucle à phase asservie ou boucle à verrouillage de phase (phase-locked loop PLL) est utilisée. Dans ce cas, les trois tensions du réseau sont utilisées avec le PLL pour extraire la fréquence et la phase réelle du réseau. Les sorties du bloc PLL sont exploitées avec la transformation de Park pour passer les tensions et les courants du référentiel triphasé au référentiel biphasé.

2.4.2. Bloc de commande :

Pour le fonctionnement du MLI, il faut générer les signaux de référence pour les tensions commandée. Pour ce faire, le système d'équations (2.21) est utilisé pour la commande vectorielle de tension. Un réarrangement du système (2.21) donne :

$$\begin{cases} V_d - e_d + \omega L_{eq} i_q = -R_{eq} i_d - L_{eq} \frac{di_d}{dt} \\ V_q - e_q - \omega L_{eq} i_d = -R_{eq} i_q - L_{eq} \frac{di_q}{dt} \end{cases} \tag{2.22}$$

Pour établir le circuit de commande, les termes de couplages $(\omega L_{eq} i_q,\ \omega L_{eq} i_{qd})$ sont éliminés puis ajoutés à la fin. La figure (2.6) illustre le schéma de commande qui permet de générer les tensions de référence dans le référentiel biphasé [20][21].

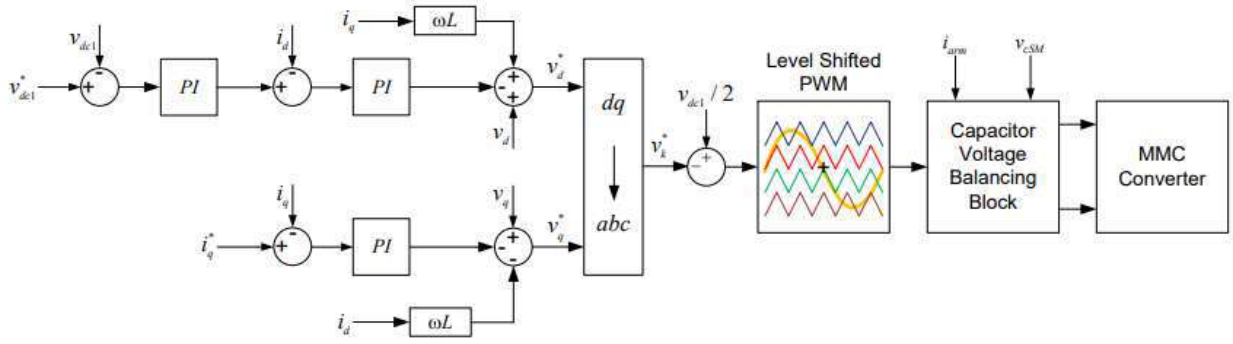


Fig. 2.6 : Schéma de command par VOC d'un MMC.

A partir des équations (2.6) et (2.7) et en négligeant la chute de tension aux bornes de l'impédance du bras, les tensions de référence pour les bras supérieur et inférieur de la phase k, s'obtienne comme suit :

$$V_{uk}^* = \frac{V_{dc1}}{2} - V_k^* \tag{2.23}$$

$$V_{lk}^* = \frac{V_{dc1}}{2} - V_k^* \tag{2.24}$$

2.4.3. Bloc MLI :

Les tensions de référence générées pour chaque bras sont comparées à n porteuses triangulaires pour générer les (n+ 1) niveaux de tension de sortie souhaités. Pour le présent travail, la stratégie MLI à décalage de niveau est utilisée (Fig. 2.6). Dans cette technique de modulation et selon le principe de fonctionnement du MMC, le nombre de SMS insérés dans les demi-bras supérieurs et inférieurs (n_u et n_l) est toujours contrôlé de sorte que n SM_s soient insérés dans chaque bras à tout instant[22], donc, $n_l + n_u = n$

2.4.4. Bloc de l'algorithme d'équilibrage des tensions aux bornes des capacités des SM :

Dans des conditions pratiques, la tension d'une capacité SM change en raison des états de charge/décharge, de la variation des valeurs de courant et des différents temps de conduction des commutateurs. Cela peut entraîner des conséquences indésirables telles que des tensions déséquilibrées et une distorsion harmonique plus élevée. Par conséquent, un algorithme pour un équilibrage de tension de capacité approprié doit être utilisé pour maintenir la tension de chaque bras au niveau souhaité [22][23].

Le bloc d'équilibrage a trois entrées :

- Les tensions des condensateurs : Elles sont mesurées pour chaque SM du bras d'un MMC et triées par ordre décroissant.
- Les courants à travers les demi-bras inférieur et supérieur : Les courants sont mesurés pour déterminer la direction du courant de chaque bras MMC. Si le courant, à travers un SM, est positif alors la capacité se charge et la tension augment. Si le courant est négatif, la capacité se décharge et la tension diminue.
- Les impulsions provenant du bloc MLI.

L'affectation des impulsions au différents SM se base sur les valeurs des tensions et les sens des courants :

- Les SM à contourner : L'algorithme contourne les SM ayant des capacités avec des tensions importantes aux bornes et un sens positif pour courant ou ayant des tensions faibles avec un sens négatif pour le courant.
- Les SM à insérer : L'algorithme insère les SM ayant des capacités avec des tensions importantes aux bornes et un sens négatif pour le courant ou ayant des tensions faibles avec un sens positif pour le courant.

2.5. Réalisation du MMC triphasé et son circuit de commande dans l'environnement Matlab/Simulink

La figure 2.7 représente le schéma global de la commande réalisée dans l'environnement Matlab/Simulink. Le schéma réalisé se compose des blocs suivants :

- Le bloc d'alimentation : Il offre l'image d'un réseau électrique triphasé réel (Fig. 2.8).

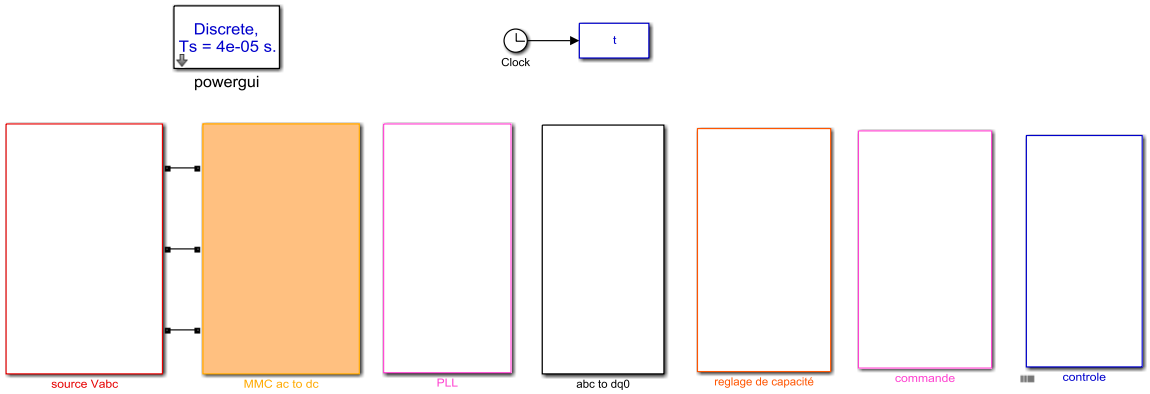


Fig. 2.7 : Schéma global du travail réalisé dans l'environnement Matlab/Simulink.

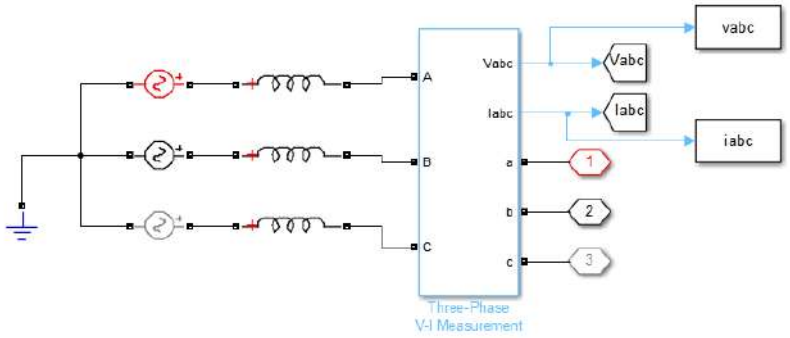


Fig. 2.8. Bloc d'alimentation triphasé du MMC.

- Le bloc représentant le modèle du MMC triphasé utilisé : Le MMC comporte huit SM à demi-pont par bras donc 16 IGBT par phase (Fig. 2.9). la structure de chaque sous-module (SM) est illustrée sur la figure (2.10).

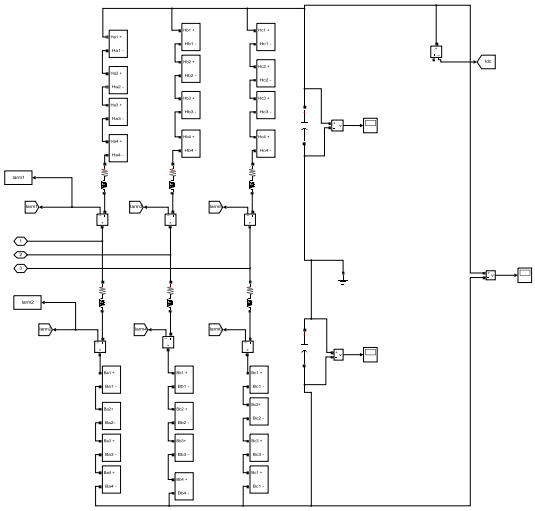


Fig. 2.9. Structure du MMC utilisé.

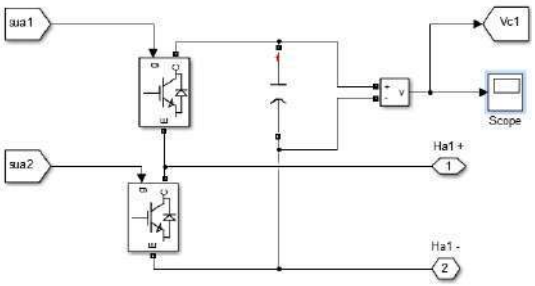


Fig. 2.10 : Structure d'un bloc SM.

- Le bloc MLI : Il représente le mécanisme de génération des impulsions par comparaison des tensions de référence fournies par le circuit de commande et les signaux triangulaires (Fig. 2.11).

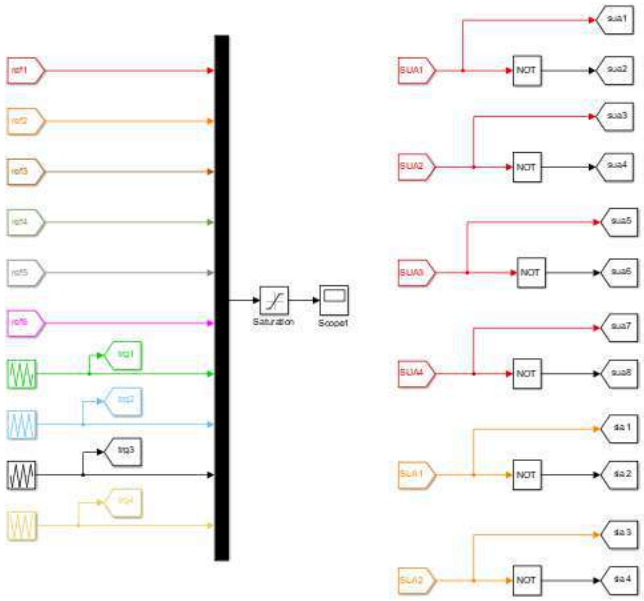


Fig. 2.11 : Bloc de la technique MLI pour le bras de phase A.

- Le bloc de commande (fig. 2.12) : En se basant sur le système d'équations (2.22), ce bloc génère les tensions de référence pour le bloc MLI.
- Le bloc d'équilibrage des tensions (fig. 2.13) : il est utilisé avec le bloc de commande principal pour améliorer la forme de la tension de sortie du MMC et minimiser les fluctuations, la technique de l'algorithme de tri est mise en œuvre pour équilibrer et maintenir la tension des condensateurs à une valeur convenable.
- Bloc PLL (Fig. 2.14) : Il permet de fournir l'angle nécessaire pour la transformation triphasé/biphasé.
- Bloc de transformation triphasé/biphasé (Fig. 2.14) : Il permet de passer du référentiel triphasé au référentiel biphasé et inversement.

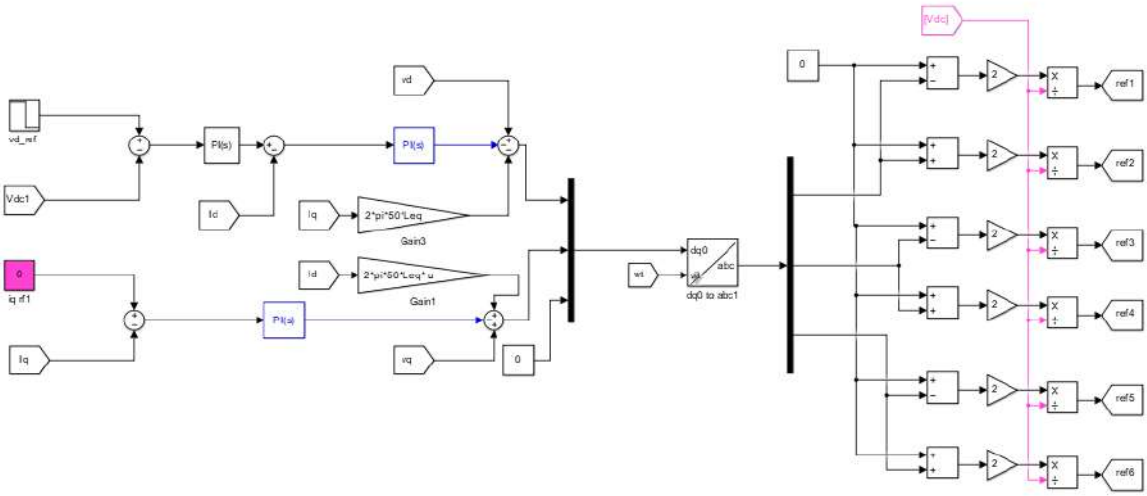


Fig. 2.12 : Schéma d'entrée-bloc de contrôle des tensions des références.

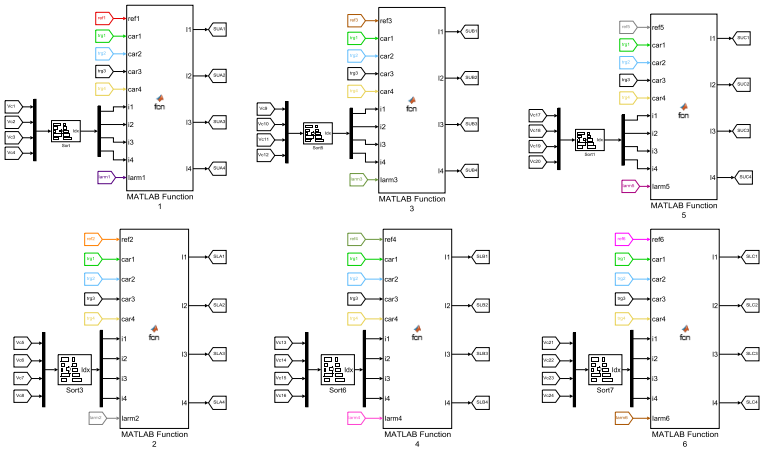


Fig. 2.13 : Schéma d'entrée-stratégie d'équilibrage des condensateurs.

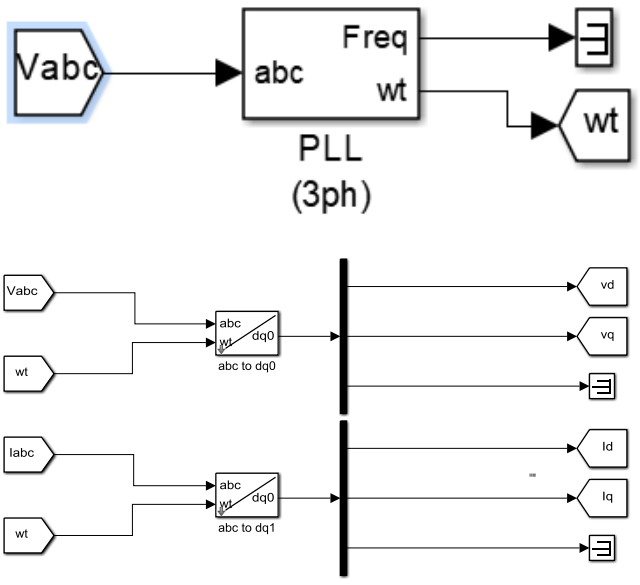


Fig. 2.14 : Blocs PLL et bloc de transformation triphasé/biphasé.

2.6. Simulation du MMC avec la commande - sans charge

Le schéma de commande développé et réalisé, dans l'environnement Matlab/Simulink, a été simulé en utilisant une alimentation triphasé équilibré ($V_{max} = 1000V$, $f = 50HZ$).

Les résultats obtenus, montre la validité du schéma de commande réalisé. Pour la tension continue à la sortie du MMC triphasé, il est clair qu'après un petit régime transitoire, la tension suit parfaitement sa valeur de référence (Fig. 2.15). D'autre part, l'algorithme d'équilibrage permet de maintenir les tensions aux bornes des condensateurs des différents SM son équilibrées autour de la valeur de référence $\left(V_{SMref=\frac{V_{dcref}}{n=4}\approx 580V}\right)$ avec une faible marge de fluctuation (Fig. 2.16). Pour le courants de circulation, la figure (2.17) montre que l'algorithme de commande à permet de réduire ses valeurs à des valeurs proches d'une valeur nulle. Pour les tensions, coté réseau, la figure (2.18) montre que ces dernières sont sinusoïdales et équilibrées avec la présence de certaines fluctuations dues aux commutations dans les SM et les fluctuations dans les tensions aux bornes des condensateurs des SM.

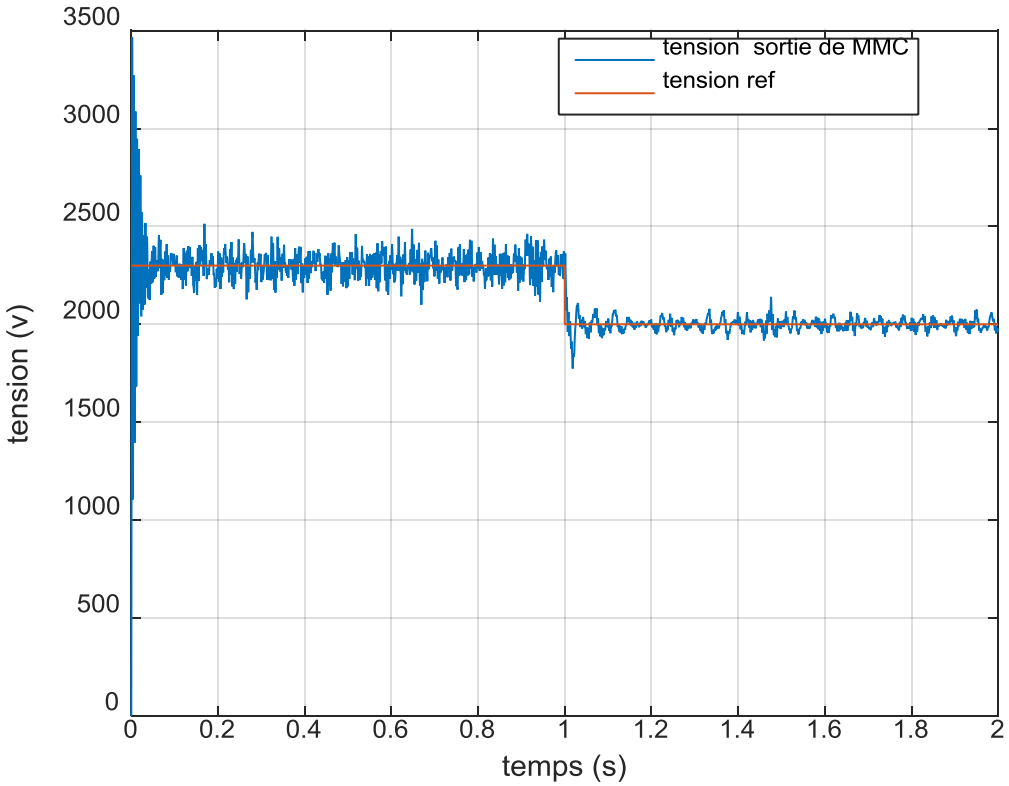


Fig. 2.15 : La tension continue à la sortie du MMC.

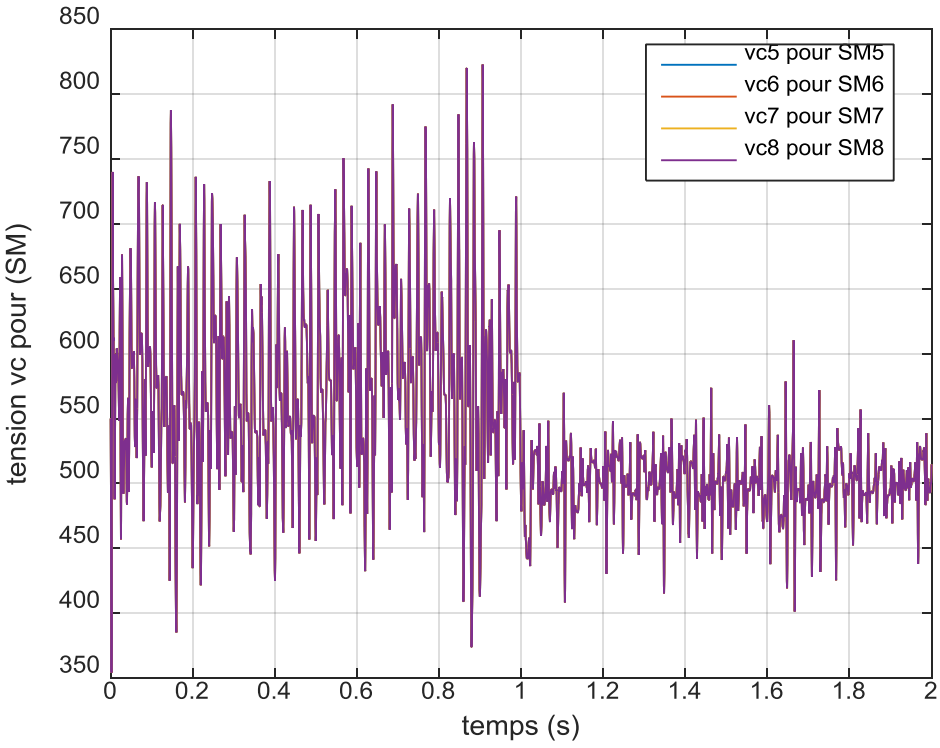


Fig. 2.16 : Tensions aux bornes des condensateurs d'un demi-bras de la phase A.

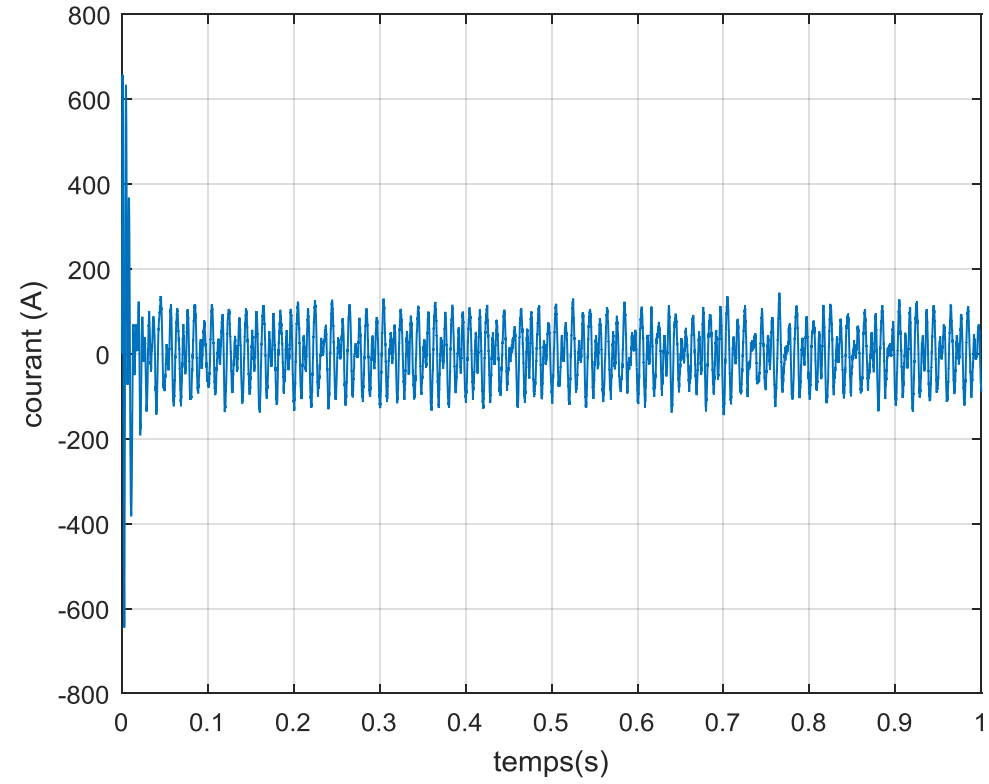


Fig. 2.17 : L'évolution du courant de circulation pour la phase A.

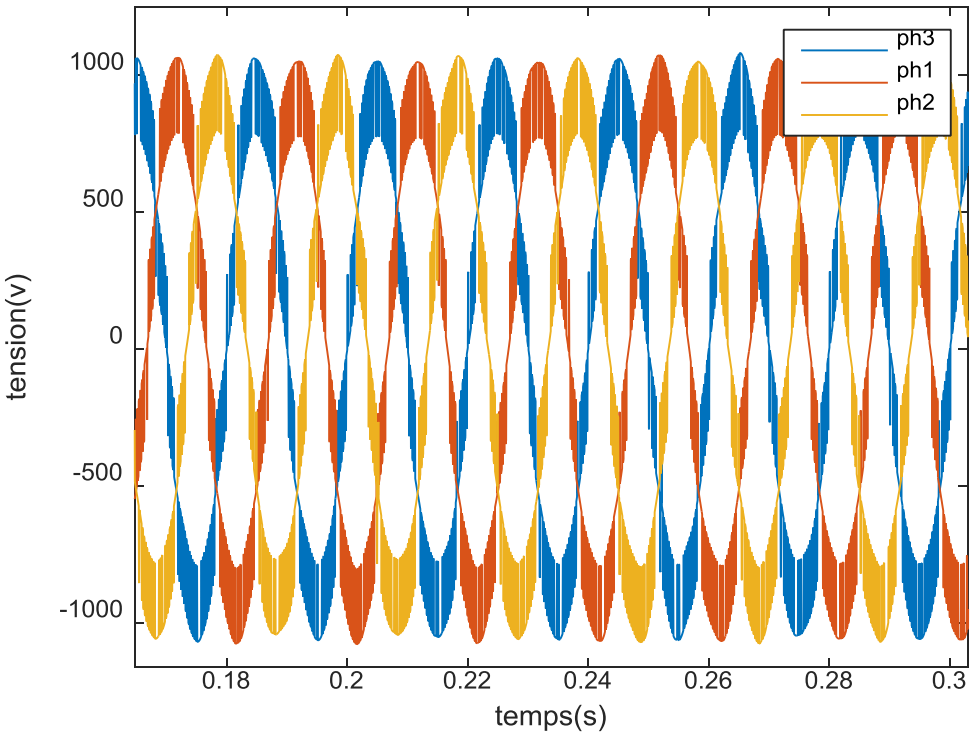


Fig. 2.18 : Tensions triphasé coté réseau

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation (Sant charge) avec Matlab/Simulink d'un MMC triphasé. La première section a traité la structure et le principe de fonctionnement du MMC. Ensuite, le MMC a été modélisé dans les référentiels triphasé et biphasé. La modèle obtenu est utilisé pour établir un schéma de commande pour le MMC en utilisant le principe de la commande par orientation de tension (VOC). Le schéma de commande comporte un bloc pour la commande de la tension cc à la sortie du MMC, un bloc pour l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs des SM et un bloc le réglage du courant de circulation. Les résultats de simulation obtenus prouvent la validité de la modélisation et les schémas de commande développés pour le MMC. Les schémas développés seront utilisés, dans le chapitre suivant, pour l'intégration d'une source d'alimentation DC en parallèle avec le réseau électrique pour l'alimentation d'une charge.

CHAPITRE 3

Intégration du system GPV pour alimenter une charge DC

3.1 Introduction

Le système photovoltaïque est nécessaire pour réduire la pollution des gaz toxique émis à partir des centrales classiques et préserver les réserves fossiles. C'est dans ce but que réside l'importance d'intégrer les sources photovoltaïques dans le réseau, mais jusqu'à maintenant cette intégration a des impacts sur la stabilité du réseau électrique et sur le coût d'investissement des centrales à photovoltaïques.

Vue la particularité de l'énergie électrique produite par les sources d'énergie renouvelable, notamment les sources photovoltaïques, elle n'est pas directement utilisable. L'énergie fournie par un système photovoltaïque, qui est sous forme continue, doit être traitée avant de l'intégrer dans le réseau ou de l'utiliser par des particuliers. Par conséquent, des onduleurs sont utilisés pour transformer cette énergie en énergie alternative pour une exploitation finale.

Pour améliorer l'opération d'intégration des systèmes PV dans le réseau électrique, le transformateur intelligent, à base d'électronique de puissance, offre une solution prometteuse. En effet ce type de transformateur offre trois possibilités pour intégrer le système PV [24]:

- Au côté MT du transformateur intelligent à la sortie du MMC triphasé (redresseur). Dans ce cas, l'énergie du système PV peut être utilisée directement pour alimenter une charge cc MT. L'inconvénient de cette structure est la difficulté d'injecter le plus de l'énergie du système PV dans le réseau
- Au côté BT du transformateur intelligent à la sortie du redresseur BT. Dans ce cas, l'énergie du système PV peut être utilisée directement pour alimenter une charge cc BT ou pour alimenter une charge alternative via l'onduleur qui se trouve à la sortie du transformateur. L'avantage est qu'il est possible de faire une exploitation bidirectionnelle de l'énergie du système PV.

Dans ce chapitre, on va exploiter la possibilité d'intégrer un système PV à la sortie du MMC d'entrée d'un transformateur intelligent pour alimenter une charge CC.

3.2 Principe de fonctionnement d'un système PV

Un système PV se base essentiellement sur les cellules photovoltaïques. Le fonctionnement se base sur les propriétés des matériaux semi conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique en utilisant l'effet photovoltaïque (fig. 3.1). Les cellules photovoltaïques sont connectées en série pour augmenter la tension de sortie et en parallèle pour augmenter le courant [25].

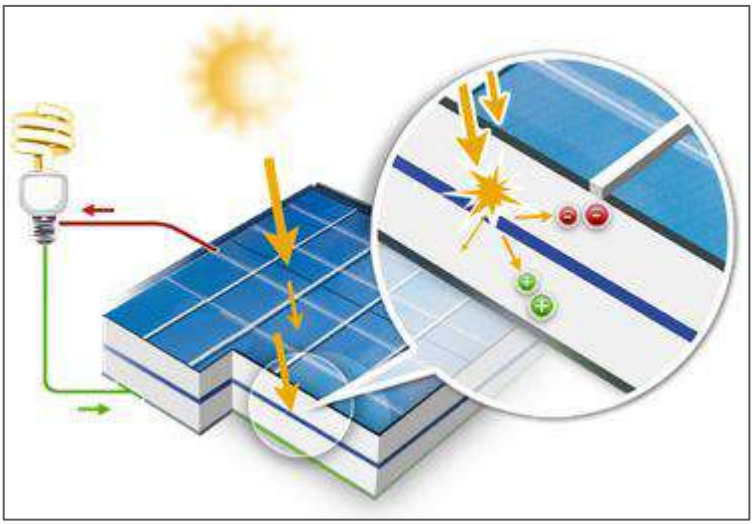


Fig. 3.1 : principe de l'effet photovoltaïque.

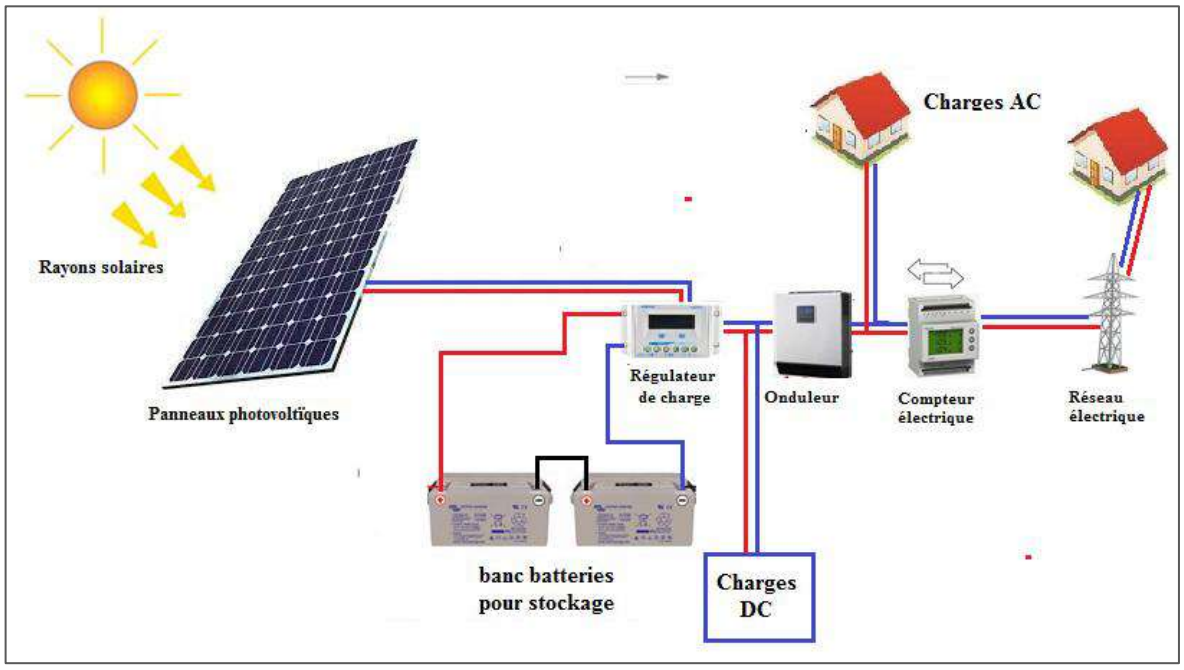


Fig. 3.2 : Système de production d'énergie électrique photovoltaïque connecté au réseau.

La figure (3.2) montre le mode d'intégration couramment adopté pour un système PV. L'architecture se compose des éléments suivant [26] :

- **Les panneaux solaires** : Ils sont installés en rangées et reliés entre eux en série et parallèle dont le nombre est selon la puissance et la tension demandée
- **Un régulateur de charge** : Le rôle principal d'un régulateur de charge/décharge est de contrôler la charge et la décharge des batteries (système de stockage d'EE) pour les protéger et améliorer la durée de vie de la batterie.

- Banc de batteries : C'est des moyens de stockage pour récupérer l'excès d'énergie fournie par le système photovoltaïque, en particulier, si l'installation n'est pas raccordée au réseau (site isolé).
- **Un onduleur** : C'est un convertisseur (continu/alternatif) qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie à courant alternatif compatible avec le réseau pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à basse et moyenne tension.
- **Un compteur d'énergie** : C'est un moyen de mesure bidirectionnel permettant d'enregistrer la quantité d'énergie électrique injectée ou importer du réseau électrique.

3.3 Schéma proposé pour l'intégration du système PV via un MMC :

Dans le présent travail, nous proposons d'intégrer un système PV à la sortie du MMC triphasé est en série avec lui (Fig. 3.3). Dans ce cas, la tension continue de sortie sera la somme des deux tensions ; la tension redressée du réseau et la tension du système PV. Le premier avantage de ce montage est que le système PV sera exploité directement sans passer par un système de traitement pour l'adapter avec l'application.

La combinaison réseau électrique-système PV est utilisée pour alimenter une charge résistive. En effet, le système proposé doit exploiter le maximum de la puissance délivrée par le système PV pour alimenter la charge. S'il cette puissance est insuffisante, les reste de la puissance sera extraite du réseau électrique.

Pour atteindre cet objectif, le schéma de commande, développé dans le chapitre précédent, est un peu modifié. La puissance extraite du réseau via le MMC est commander en tenant compte de la puissance demandée par la charge et la puissance assurée par le système PV. Pour varier la puissance fournie par le réseau, le courant à la sortie du MMC est commandé tout en maintenant la tension continue fixe. Les valeurs de référence pour le circuit de commande sont calculées en fonction de la puissance demandée par la charge et celle du système PV. Pour le reste du schéma de commande, il est identique à celui développé précédemment. La figure (3.4) illustre le circuit de commande pour le système d'alimentation proposé.

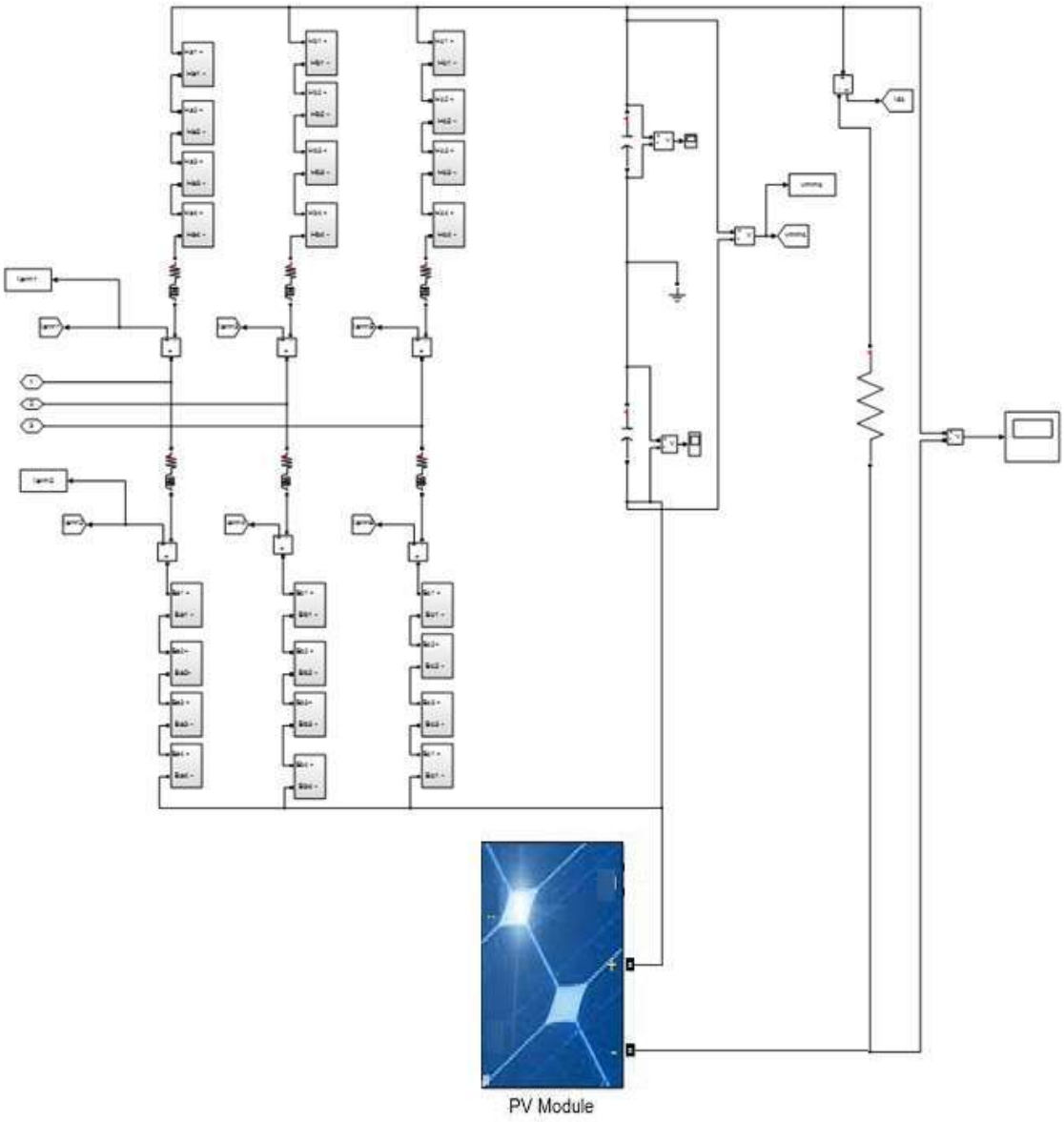


Fig. 3.3 : Schéma d'intégration du système PV avec le MMC triphasé

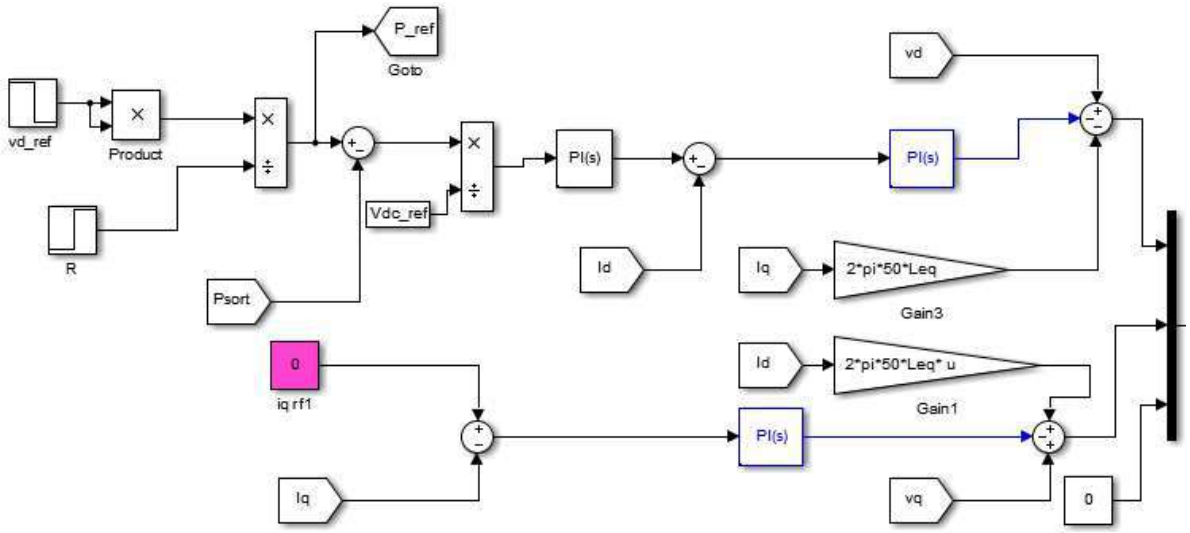


Fig. 3.4 : Schéma de commande de l'association MMC-système PV.

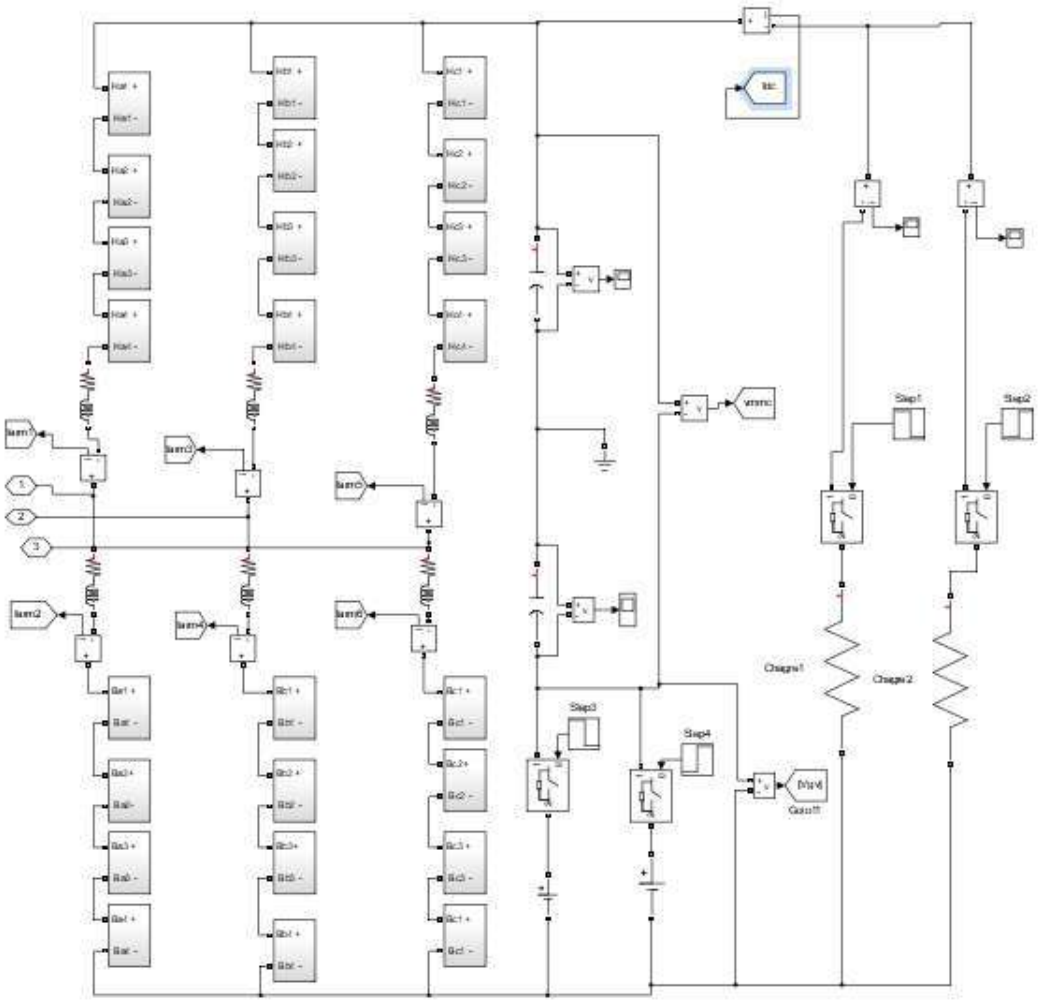


Fig. 3.5 : Prévu de changer la charge avec GPV.

3.4 Simulation et interprétation des résultats :

Pour valider le schéma proposé, pour l'intégration du système PV, il a été testé pour une charge résistive correspondant à une résistance de $R_{ch} = 100\Omega$. La puissance de référence demandée par la charge prend la valeur donc de $P_{ref} = \frac{V_{dcref}^2}{R_{ch}}$. Une partie de cette puissance est délivrée par le module PV, tandis que le reste est complété à travers le réseau. L'objectif de la commande développée (Fig. 3.4) est de forcer le réseau à fournir la différence de puissances : demandée par la charge et fournie par le module PV.

La figure (3.5) présente le bilan de puissances à la sortie du MMC. Nous pouvons constater que la somme de la puissance fournie par le module PV et celle fournie par le réseau correspond bien la puissance demandée par la charge. Cela démontre la capacité du schéma de commande proposé. La même chose est constatée pour le bilan des tensions à la sortie du MMC où la tension globale correspond bien à la somme des tensions du système PV et du MMC (Fig. 3.6). D'autre part, la figure (3.7) montre que l'algorithme d'équilibrage permet maintenir les tensions aux bornes des condensateurs des SM équilibrées avec une marge de différence acceptable par rapport à la valeur de référence. Il est à noter que, avec comparaison des résultats du deuxième chapitre, l'algorithme d'équilibrage fonctionne mieux avec charge qu'à sans charge

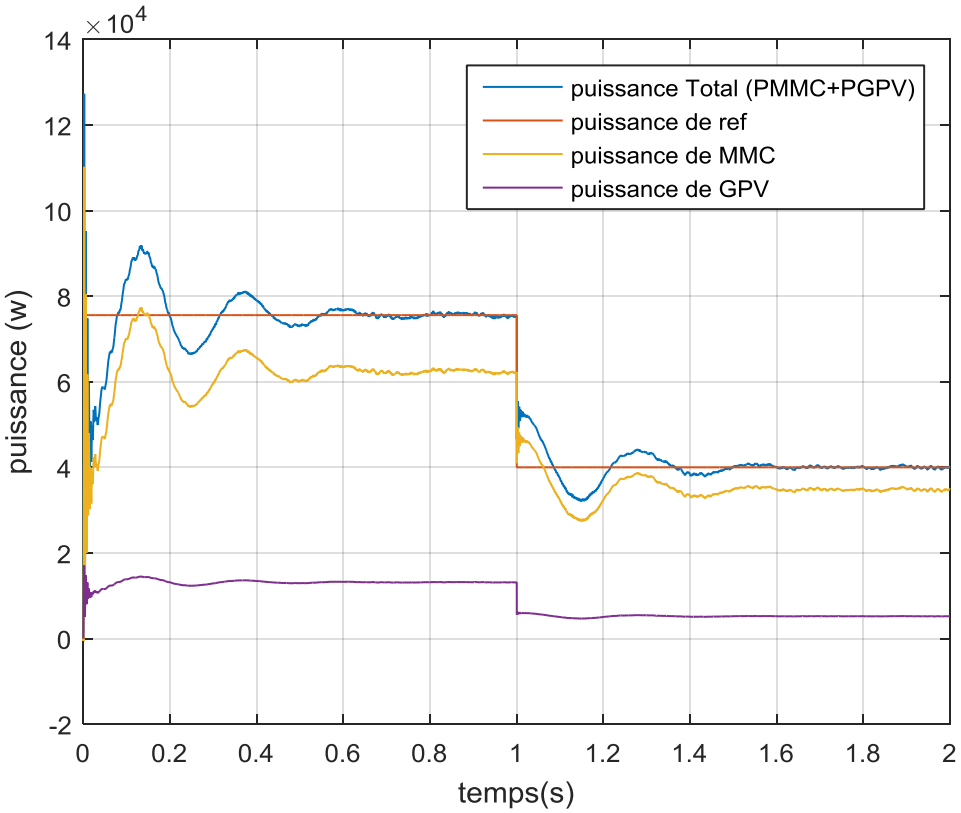


Fig. 3.6. Bilan de puissances à la sortie du MMC.

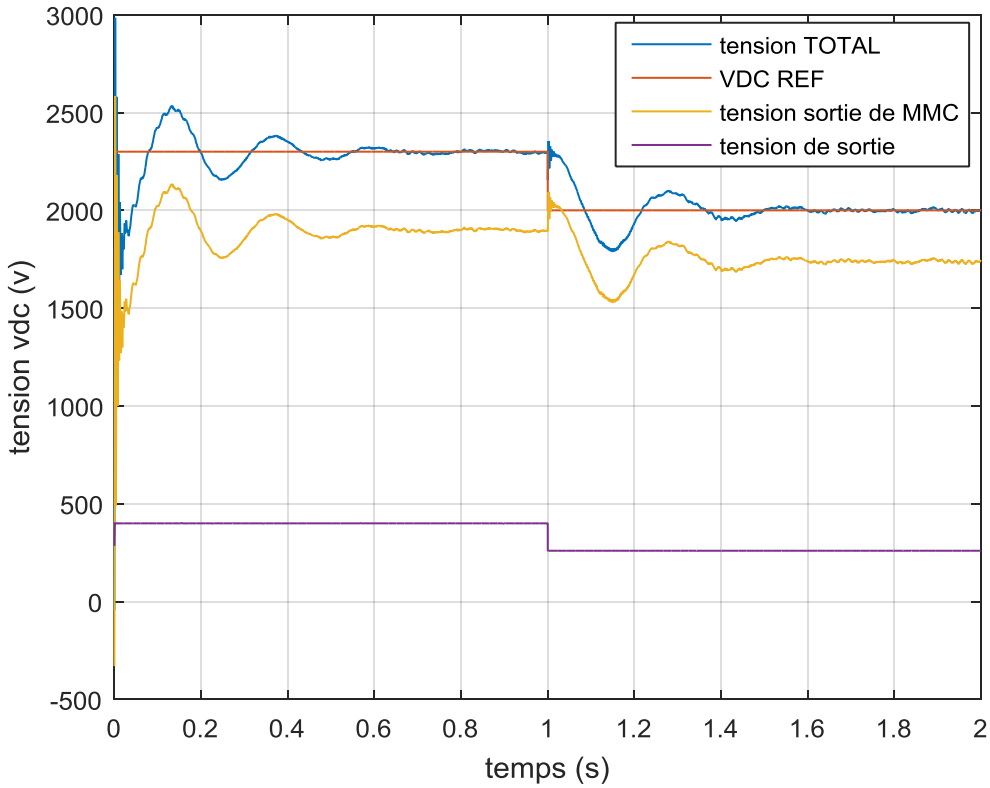


Fig3.7. les courbes des tensions V.

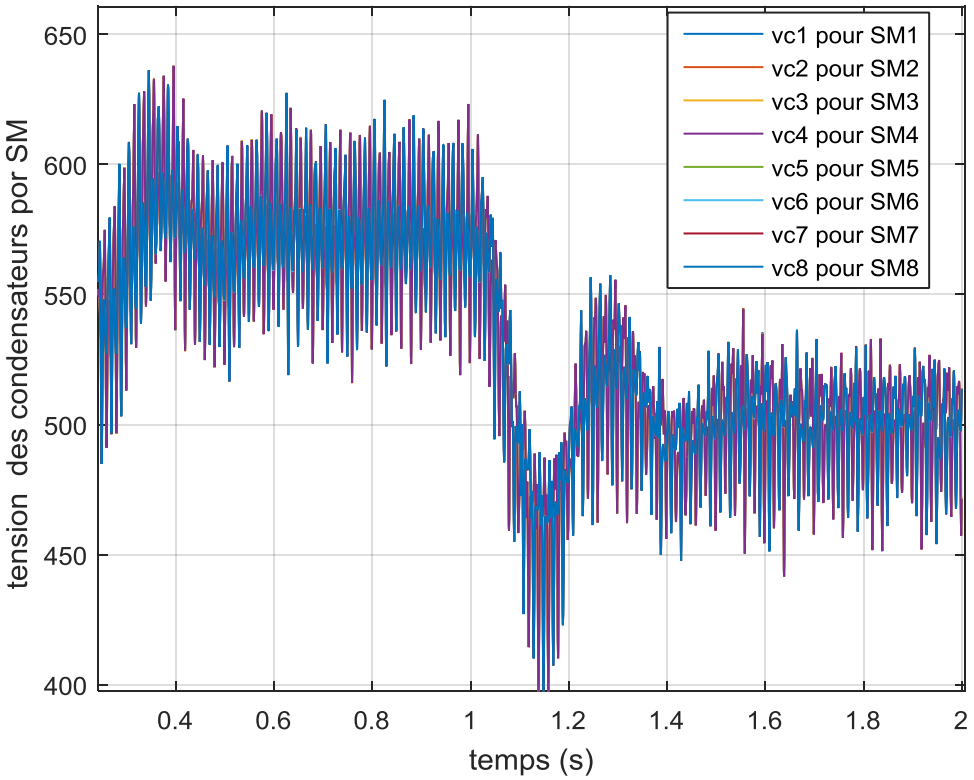


Fig. 3.8. Tension des condensateurs du bras (phase A).

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la possibilité d'associer un module PV avec un réseau électrique, à travers à un MMC, pour alimenter une charge résistive. Le schéma de commande proposé à permet de réaliser un partage exacte de puissance entre le système PV et le réseau électrique. Pour satisfaire la demande de la charge, le modèle PV a été exploité entièrement et le reste de puissance a été extrait du réseau via le MMC à l'aide de la commande développée. En effet, pleinement d'objectifs ont été atteint tels que :

- L'intégration souple et efficace d'une source d'énergie renouvelable dans le système électrique.
- L'amélioration de la transaction d'énergie entre différentes sources.
- L'´équilibrage des tensions des condensateurs.

Conclusion général

Conclusion générale

Avec la tendance mondiale à produire de l'énergie électrique propre, la pénétration des sources d'énergie renouvelables dans les infrastructures électriques existantes ainsi que les exigences spécifiques des clients devrait augmenter considérablement au cours des prochaines années. Alors C'est un défi très important nécessite une gestion intelligente et des technologies très moderne basés sur l'électronique de puissance. Dans ce contexte, le présent travail a été consacré à l'étude d'un système d'alimentation d'une charge CC par l'association réseau électrique – système photovoltaïque via un convertisseur de type (MMC). En effet, le redresseur MMC représente le bloc d'entrée pour le transformateur intelligent qui est considéré comme une solution prometteuse pour la gestion intelligente d'un système électrique multi-sources.

Dans la première partie, nous avons exposé en premier lieu les principales solutions utilisées pour l'intégration des différentes sources de production d'énergie électrique dans le système électrique. Ensuite, quelques concepts sur l'architecture et le mode de fonctionnement du transformateur intelligent à base d'électronique puissance ont été donnée.

La deuxième partie du mémoire port sur la modélisation et la commande du bloc d'entrée du transformateur intelligent qui est le redresseur triphasé de type MMC. Dans ce cas, l'objectif de la commande développée est d'exploité la puissance maximale du système PV et de compléter le reste de la puissance demandée par la charge à partir du réseau. Les résultats de simulation obtenus montrent clairement que le MMC, doté de la commande développée, permet une intégration efficace du système PV dans l'alimentation d'une charge CC.

Dans la dernière partie, nous avons étudié la faisabilité de faire une association entre le réseau électrique et un système photovoltaïque pour alimenter un charge DC à travers un MMC. fin et concernent la dernière partie intégration d'un système photovoltaïque pour alimenter une charge DC dans Matlab / Simulink, et son comportement a été testé en réalisant plusieurs études de cas dans différentes conditions de fonctionnement. Les résultats de la simulation soutiennent la faisabilité du MMC et ses avantages par rapport au transformateur conventionnel.

Finalement, les résultats obtenus dans la présente étude prouvent l'importance du transformateur intelligent en générale, et le bloc MMC en particulier, dans la gestion des

réseaux électriques multi-sources. Pour la continuité de ce travail, diférents perspectifs peuvent être tracés, entre autres ::

- Etablir la commande du MMC en considérant différentes types de charges
- Etablit une étude pour intégrer différentes sources d'énergie avec un seule MMC.
- Une régulation adéquate pour avoir des conditions d'intégration optimale.
- Etudier la possibilité du fonctionnement du MMC en sens inverse, c'est-à-dire, réinjecter l'excès de la puissance fournie par le système PV dans le réseau électrique

REFERENCE

[1]https://www.researchgate.net/publication/319214564_Smart_Transformers_for_Integration_of_Renewable_Energy_S ources, Conference: The Seventh International Symposium on Energy, At Manchester, United Kingdom August 2017,

[2] M. D. E. M. En, "Modélisation et Simulation d' un Transformateur Intelligent Utilisé Pour la Gestion du Transit d ' Énergie Dans un Système Multi-Sources," 2019 univ medea.

[3]britta klagge et tobias brocke,'la transition énergétique à l'échelle locale : la production décentralisée d'électricité et le rôle des entreprises municipales et des fournisseurs régionaux ' ,énergies renouvelable et territoires, vol.55/ N° 1-2 2015.|

[4]A.algieri, p. Morrone, D.perrone,S . Bova,T. Castiglion ,'analysis of multi –source energy system for small –scale domestic applications. Integration of biodiesel, solar and wind energy Reports, Vol. 06, 2020 , pp :652 -659 ,

[5]B.yang ,J. Heli,J.Jari,'Hybrid , Multi –Suorce, and Integrated Energy Harverters ' ,frontier in Materials , Vol . 05 , 2018 .

[6] S.D. Falcones Zambrano, "A DC-DC multiport converter based solid state transformer integrating distributed generation and storage", PhD Thesis, Arizona State University, August 2011.

[7] X. She, A.Q. Huang, and R. Burgos, "Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol.1, no.3, pp. 186-198, September 2013.

[8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_multi-niveaux.

[9] M.A. Perez, S. Bernet, J. Rodriguez, S. Kouro, R. Lizana, "Circuit topologies, modelling, control schemes and applications of modular multilevel converters," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 30, no.1, pp.4-17, 2015

[10]A. Shojaei and G. Joos, "A topology for three-stage solid state transformer," IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, July 2013.

[11]Udana Niranga Gnanarathna. Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs. PhD thesis, 2014.

[12]Artjoms Timofejevs Daniel Gamboa. Control of MMC in HVDC Applications. PhD thesis, 2013.

[13]Elisabeth N. Abildgaard. Exploring the Properties of a Modular Multilevel Converter Based HVDC Link. PhD thesis, 2012.

[14]X.Guillaud J.Rimez A.van der Meer D.Van Hertem J.Beerten, O.Gomis-Bellmunt. Modeling and control of hvdc grids : a key challenge for the future power system. Power Systems Computation Conference.

[15]S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 30, no.1, pp. 37-53, January 2015.

[16]M. Guan, H. Chen, and Z. Xu, "Control and modulation strategies for modular multilevel converter based HVDC system," 37th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Melbourne, Australia, November 2011.

[17]A. Hassanpoor, L. Ängquist, S. Norrga, K. Ilves, and H. P. Nee, "Tolerance band modulation methods for modular multilevel converters," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 30, no.1, pp.311-326, January 2015.

[18] A. Yazdani and R. Iravani, "A unified dynamic model and control for the voltagesourced converter under unbalanced grid conditions," IEEE Trans. on Power Del., vol. 21, no.3, pp. 1620–1629, July 2006.

[19]L. Xu, B. Andersen, and P. Cartwright, "VSC transmission operating under unbalanced AC conditions-Analysis and control design," IEEE Trans. on Power Del., vol. 20, pp. 427–434, Jan. 2005.

[20]M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and experiment of pulse width modulated modular multilevel converters," IEEE Trans. on Power Electron., vol. 24, no. 7, pp. 1737-1746, July 2009.

[21]M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, M. F. Akorede, S. Zabihi, and J. P. S. Catalao, "FunctionBased Modulation Control for Modular Multilevel Converter Under Varying Loading and Parameters Conditions," IET Generation, Transmission & Distribution, (DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.1028)

[22]M. Saeedifard, and R. Iravani, “Dynamic performance of a modular multilevel back-toback HVDC System,” IEEE Trans. on Power Electron., vol. 25, no.4, pp.2903-2912, October 2010.

[23]A. K. Sahoo, R. Leon, and N. Mohan, “Review of modular multilevel converters for teaching a graduate-level course of power electronics in power systems”, North American Power Symposium (NAPS), Manhattan, USA, November 2013.
[24].https://www.researchgate.net/publication/319214564_Smart_Transformers_for_Integration_of_Renewable_Energy_Sources, Conference: The Seventh International Symposium on Energy, At Manchester, United Kingdom August 2017,

[25] .Y. Pankow, « Etude de l’intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension». Thèse de doctorat de l’école National supérieure d’Art et Métiers, décembre 2004.

[26] http://thesis.univ-biskra.dz/1151/4/2emechapitre.pdf