الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Spécialité
COMMANDES ÉLECTRIQUES

Thème

Modélisation et Simulation d'un Transformateur Intelligent Utilisé Pour la Gestion du Transit d'Énergie Dans un Système Multi-Sources

Proposé et dirigé par .

Dr. Nadir Kabeche

Préparé et présenté par.

Mr. Tariq Zebiche

Mr. Badreddine Boumaza

Année Universitaire 2018-2019

Remerciement

Avant tout, Nous remercions ALLAH le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous remercions notre promoteur Le Docteur Kabeche pour sa patience, sa confiance, ses remarques, ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail, pour toutes leurs remarques et critiques constructives.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je dédie mon travail A mes chers parents, qui m'aident toujours par leurs prières qui ne cesse jamais,

A ma femme pour l'encouragement, le soutient, et son sacrifice pour que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mes professeurs ,mon Promoteur et mon binôme

Je vous Dédie ce Travail.

B.Boumaza

.

Dédicaces

Je dédie mon travail A mes chers parents, qui m'aident toujours par leurs prières qui ne cesse jamais,

A mes chers Sœurs et ma famille

A mes collègues des études

... A tous ceux qui veulent savoir ...

T.ZEBICHE

خلاصة :

في هذا العمل ، تمت دراسة محول ذكي (SST), يتكون أساسًا من محولات تعتمد على أجهزة إلكترونيات الطاقة.
العمل يحتوي على ثلاثة أجزاء. الأول يعطي المفاهيم العامة للمحولات الكلاسيكية والذكية ، والثاني يشرح طبولوجيا ونماذج المراحل المختلفة من (SST).
وأخيراً محاكاة حلقة مفتوحة للوظائف المختلفة لنظام .

Résumé

Dans ce travail, il a été procédé a l'étude d'un transformateur a semi conducteur (SST), appelé intelligent, composé essentiellement des convertisseurs a base des dispositifs d'électronique de puissance. le travail comporte trois parties. une première donne les concepts généraux des transformateurs classique et intelligent, une deuxième explicite les topologies et les modèles des différentes étages du SST et en fin, une simulation en boucle ouverte des différentes fonctionnalités d'un SST.

Abstract :

In this work, a semiconductor transformer (SST), called intelligent, consisting mainly of converters based on power electronics devices, has been studied. the work has three parts. a first gives the general concepts of classical and intelligent transformers, a second one explains the topologies and models of the different stages of the SST and finally, an open-loop simulation of the different functionalities of an SST.

Sommaire

Sommaire 01
Liste des figures 03
Liste des tableaux 05
Abréviations 06
Introduction Générale.....08

Chapitre 1
Généralités sur les transformateurs intelligent et classique

1.1 Introduction. 11
1.2 Réseaux-Intelligent et transformateurs intelligents 11
1.3 Transformateur classique 13
1.3.1 Structure de Transformateur Classique.....13
1.3.2 Fonctionnement du transformateur monophasé.....14
1.3.2.1 Fonctionnement à vide en régime équilibré.....14
1.3.2.2 Fonctionnement en charge.....15
1.3.2.3 Fonctionnement en régime déséquilibré.....15
1.3.3 Applications de transformateur de puissance.....15
1.3.4 Avantages et Inconvénients des transformateurs classiques.....17
1.4 Transformateur d'électronique de puissance : Solide State Transformateur 18
1.4.1 Structures d'un SST.....18
1.4.2 Topologies de base d'un SST.....19
1.4.3 Conception d'un SST à trois étages 21
1.4.4 Avantages et Inconvénients D'un SST.....22
1.4.5 Applications générales du SST 25
1.4.5.1 Locomotives et autres systèmes de traction 25
1.4.5.2 Production d'énergie en mer.....25
1.4.5.3 Réseaux intelligents 26
1.5 Conclusion.....27

Chapitre 2
Modélisation d'un SST à trois étages

2.1 Introduction.....29
2.2 Modélisation d'un SST à trois étages 29
2.2.1 Étage d'entrée . Configuration et control.....30

Sommaire

2.2.2 Étage d'isolement: configuration et contrôle.....35
2.2.2.1 MMC monophasé.....35
2.2.2.2 Transformateur haute fréquence.....36
2.2.2.3 Convertisseur monophasé à pont complet à deux niveaux.....39
2.2.3 Étage de sortie: configuration et contrôle.....39
2.2.3.1 Modélisation de l'onduleur triphasé.....39
2.2.3.2 Modulation de largeur d'impulsion Sinus-Triangle.....41
2.3 Conclusion.....42

Chapitre 3
Mise en œuvre du modèle du SST à trois étages dans l'environnement Matlab/Simulink

3.1 Introduction.....44
3.2 Modélisation du SST dans l'environnement Matlab/Simulink.....44
3.2.1 la mise en œuvre de l'étage d'entrée MV.....45
3.2.2 Mise en œuvre de l'étage d'isolement MV-LV.....47
3.2.2.1 MMC monophasé MV.....47
3.2.2.2 Modélisation du transformateur Haute Fréquence.....48
3.2.2.3 Pont redresseur monophasé LV.....49
3.2.3 la mise en œuvre de l'étage de sortie BT.....49
3.3 Résultats de la simulation.....50
3.4 Commande d'un SST en boucle fermée : Principe.....59
3.4.2 Objectifs de la commande.....59
3.5 Conclusion.....61

Conclusion Générale.....62
Bibliographie.....63

Liste Des Figures

Figure 1.1. Réseau intelligent.....10
Figure 1.2. Structure générale d'un transformateur 11
Figure 1.3. Transformateur Triphasé 12
Figure 1.4. Idée de base d'un SST 17
Figure 1.5. Structure de base d'un SST. 17
Figure 1.6. SST à un seul étage- type A 18
Figure 1.7. SST à deux étages- type B 18
Figure 1.8. SST à deux étages avec une sortie MVDC- type C 18
Figure 1.9. SST à trois étages- type D 19
Figure 1.10. Configuration d'un SST à 03 étages 20
Figure 1.11. SST appliqué sur Un locomotif 23
Figure 1.12. SST appliqué en mer 24
Figure 1.13. SST dans un réseau intelligent 24

Figure 2.1 : Configuration schématique de la conception SST en trois étapes. 27
Figure 2.2 : Configuration de l'étage d'entrée triphasé. 29
Figure 2.3 :Différents états de fonctionnement pour le demi - pont SM. 30
Figure 2.4 : Une configuration D'un bras de l'étage d'entrée MMC. 31
Figure 2.5 : Circuit équivalent d'une MMC [26]. 32
Figure 2.6 : Configuration de L'étage D'isolation 33
Figure 2.7.. Circuit Magnétique HFT 34
Figure 2.8 : Tensions et courants du transformateur 35
Figure 2.9 : Tension d'entrée et densité de flux magnétique du transformateur 36
Figure 2.10 : Configuration du convertisseur latéral basse tension. 37
Figure 2.11 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé 38
figure 2.12 : Génération des signaux de commande MLI sinus-triangle de l'onduleur. .40

Figure 3.1. Implémentation Matlab / Simulink du modèle SST en trois étages. 42
Figure 3.2. étage d'entrée configuration source 3ph. 43
Figure 3.3. étage d'entrée - Configuration MMC triphasée.....43
Figure 3.4. Etage d'entrée - Configuration des sous-modules de demi- pont (SM). 44
Figure 3.5. Etage d'isolement - Mise en œuvre de la console MMC monophasée MV. ...45

figure 3.6. paramètres de HFT 46
figure 3.7. Transformateur linéaire modèle sur simulink 46
Figure 3.8. Etage d'isolement - Configuration du commande Convertisseurs monophasé MV et LV 47
Figure 3.9. Topologie de Onduleur MLI triphasé. 48
figure 3.10. Tension source alternatif (alimentation SST) 51
figure 3.11. Courant source alternatif (alimentation SST) 51
figure 3.12. Tension a la sortie de Redresseur 3ph MV. .... .52
figure 3.13. Tension a L'entrée de HFT. 52
figure 3.14. Tension a La sortie de HFT. 53
figure 3.15. Tension a La sortie de HFT et après redressage. 53
figure 3.16. Tension a La sortie de Onduleur MLI 03 ph. 54
figure 3.17. Tension a La sortie de Onduleur MLI V1 (phase A). 54
figure 3.18. Tension a La sortie de Onduleur MLI V2 (phase B). 55
figure 3.19. Tension a La sortie de Onduleur MLI V3 (phase C). 55
Figure 3.20. Tension à la sortie de l'onduleur MLI (phase C– avec zoom). 56
Figure 3.21 : SST interfaçant une réseau rigide avec un réseau passif..... 57
Figure 3.22 : Schémas de control pour les trois étages SST.....58

Liste Des Tableaux

Tableau 1.1. Comparaison entre Thyristors et Transistors 24
Tableau 1.2. Comparaison entre Bipolaire, Mosfet et IGBT.....24
Tableau 3.1. Première étude de cas - paramètres SST.....50

Abréviations

SST - Transformateur à semi-conducteurs

ST- transformateur Intelligent

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

SM - sous-module

MT/BT - Moyen/basse tension

N1/N2 - nombre de spires primaire et secondaires

MVAC - moyen voltage alternatif courant

LVAC - bas voltage alternatif courant

U1L1 - tension composé phase 1

I1L1 - Courant dans la phase 1

1D - Un Dimensionnel

2D - Deux dimensions

3D - trois dimensions

AC - courant alternatif

DAB - Double pont actif

DC - Courant continu

DG - Génération distribuée

FBC - Convertisseur Full-Bridge

GTO - Thyristor à ouverture de porte

HF - Haute Fréquence

HFT - Transformateur haute fréquence

HV - Haute tension

IGBT - Transistor bipolaire à grille isolée

LF - Basse fréquence

LFT - Transformateur basse fréquence

BT - Basse tension

MF - Moyenne fréquence

MFT - Transformateur à moyenne fréquence

MOSFET - Transistor à effet de champ en oxyde métallique

MV - Moyenne tension

PWM - Modulation de largeur d'impulsion

RMS - Root Mean Square

SAB - Pont actif simple

SiC - Carbure de silicium

Introduction Générale

Les combustibles fossiles sont des sources d'énergie non renouvelables qui sont utilisées plus rapidement que le processus naturel par lequel la Terre peut les remplacer. Ces sources ne pourraient pas être reconstituées ou redéveloppées à une échelle comparable à leur consommation. Ainsi, les combustibles fossiles peuvent être qualifiés de "ressources non durables". Avec le développement de la technologie, la demande mondiale en énergie augmente sans cesse. L'intégration des sources d'énergie renouvelables joue un rôle important pour répondre à la demande. La technologie de réseau est une solution prometteuse pour intégrer une grande quantité d'énergie renouvelable et de systèmes de stockage d'énergie, ce qui nécessite des réseaux intelligents plus flexibles et plus contrôlables. C'est pourquoi l'une des technologies d'électronique de puissance la plus efficace qui ait trouvée son application dans le système de distribution est le transformateur intelligent « smart transformer » ou généralement appelé « Solid State Transformateur » (SST).
Le SST peut assumer un rôle de gestion important dans le futur système de réseau de distribution électrique et peut fournir de nombreux services dans les réseaux avancés par rapport au transformateur traditionnel. Le transformateur intelligent, c'est un transformateur de distribution basé sur l'électronique de puissance doté de fonctionnalités de contrôle avancées, peut exploiter la dépendance de la charge à la tension pour la fourniture de services aux réseaux de distribution et de transport.
Ce document présente une étude des transformateurs intelligents dans le monde et de leurs applications. Il vise à donner aux chercheurs et aux ingénieurs d'application concernés par la qualité de l'énergie une perspective globale sur l'état de la technologie des transformateurs intelligents [1].

Les SST ont récemment fait leur apparition dans les industries de l'électricité, où de nouvelles technologies telles que le réseau intelligent, les énergies renouvelables et les systèmes de distribution à courant continu. Un SST est un transformateur de puissance basé sur la technologie de l'électronique de puissance, de sorte que la tension et le courant des côtés primaire et secondaire puissent être activement compensés ou contrôlés, ce qui n'est pas réalisable dans les transformateurs de puissance traditionnels. Parmi les différentes étapes d'un système d'alimentation, y compris la

production, le transport et la sous-station, ainsi que les systèmes de distribution, les transformateurs de puissance dans les étapes de distribution sont de bons candidats pour être remplacés par des SST, car ils sont directement connectés aux charges et ont des entrées relativement plus faibles (Moyenne et basse tensions).

Le présent document est répartie sur trois chapitres :

Le premier chapitre, en plus d'un état d'art sur les transformateurs, il présente les définitions et les rôles de chaque partie des blocs SST, ainsi les différences entre un SST et un transformateur classique.

Le deuxième chapitre résume les étapes de modélisation des différents étages qui constitue le SST à trois étages.

Le Dernier chapitre présente une étude de simulation des différents étages de notre SST dans l'environnement Matlab/Simulink.

En dernier on trouve une conclusion résumant les résultats obtenus ainsi que les perspectifs envisagés.

Chapitre 1

Généralités sur les transformateurs intelligent et classique

1.1. Introduction

Comme nous le savons, les transformateurs sont les éléments essentiels du réseau électrique; ils convertissent l'électricité à haute tension fournie par les lignes électriques au niveau requis par les consommateurs et inversement aux centrales. Les transformateurs sont largement utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique pour remplir les fonctions principales, tels que la transformation de tension et l'isolation. Ils sont l'un des appareils les plus lourds et les plus coûteux d'un système électrique en raison des gros noyaux de fer et des enroulements de cuivre lourds dans la composition.

Actuellement, le transformateur ordinaire, par son rôle et son mode de fonctionnement classique, est devenu incapable de s'adapter avec les modifications et l'évolution éventuelles qu'a connue le réseau électrique. En premier lieu, avec l'accroissement de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique et vue les propriétés particulière concernant le niveau de la tension et la valeur de la fréquence, l'utilisation des transformateurs standards ne permet pas de rationnaliser l'intégration des énergies renouvelables. En deuxième lieu, la plus part des appareils de nos jours fonctionne en courant continu tels que les ordinateurs, les lampes LED, les voitures électriques, etc. En plus, certaines sources d'énergie renouvelable fournie de l'électricité en continu (panneaux photovoltaïques) ce qui exige des investissements supplémentaires pour injecter cette énergie dans le réseau électrique. Par conséquent, il était nécessaire d'examiner de nouvelles structures pour les transformateurs de puissance pour faire face à ces défis. En combinant les différents types de convertisseurs électroniques et les transformatrices hautes fréquences, les recherches ont donné naissance des transformateurs électroniques de puissance intelligents, souples et flexible appelés, généralement « solid-State transformer - SST ».

1.2. Réseaux-Intelligent et transformateurs intelligents

Le terme « Solid state transformer » (SST) est un abus de langage car ce n'est pas un transformateur au sens traditionnel du terme. C'est une collection de composants semi-conducteurs de haute puissance, transformateurs de puissance à haute fréquence (HF) et des circuits de commande utilisés pour fournir un niveau élevé de contrôle flexible et intelligent aux réseaux de distribution d'énergie. Avec l'évolution de l'électronique de puissance et l'importance de la production d'énergie renouvelable, le réseau électrique actuel dans les pays développés est apparaissant comme indiqué sur la (fig. 1.1), d'où le nom «Smart Grid» (réseau intelligent) qui lui est associé. [2]

Le futur réseau intelligent est conçu pour atténuer ou éviter les conséquences d'événements de qualité de l'énergie (par exemple, des creux de tension), améliorer les indices de fiabilité (en

réduisant le nombre et la durée des interruptions) et en augmentant l'efficacité (par exemple, en réduisant les pertes) [3-4].

Le transformateur à semi-conducteurs (SST) est un élément clé des futurs réseaux intelligents. Le SST offre de nouveaux moyens de contrôler le routage de l'électricité et ajoute de nouvelles fonctionnalités au réseau de distribution, telles que la compensation de puissance réactive, limitation des courants de court-circuit ou la compensation de chute de tension. Cependant, il convient de tenir compte du fait que toutes ces fonctionnalités seront réalisées au prix d'un système plus complexe et coûteux [6-7]. Le SST devrait jouer un rôle clé dans le remplacement des systèmes conventionnels de transformation (transformateurs à basse fréquence) [7-8].

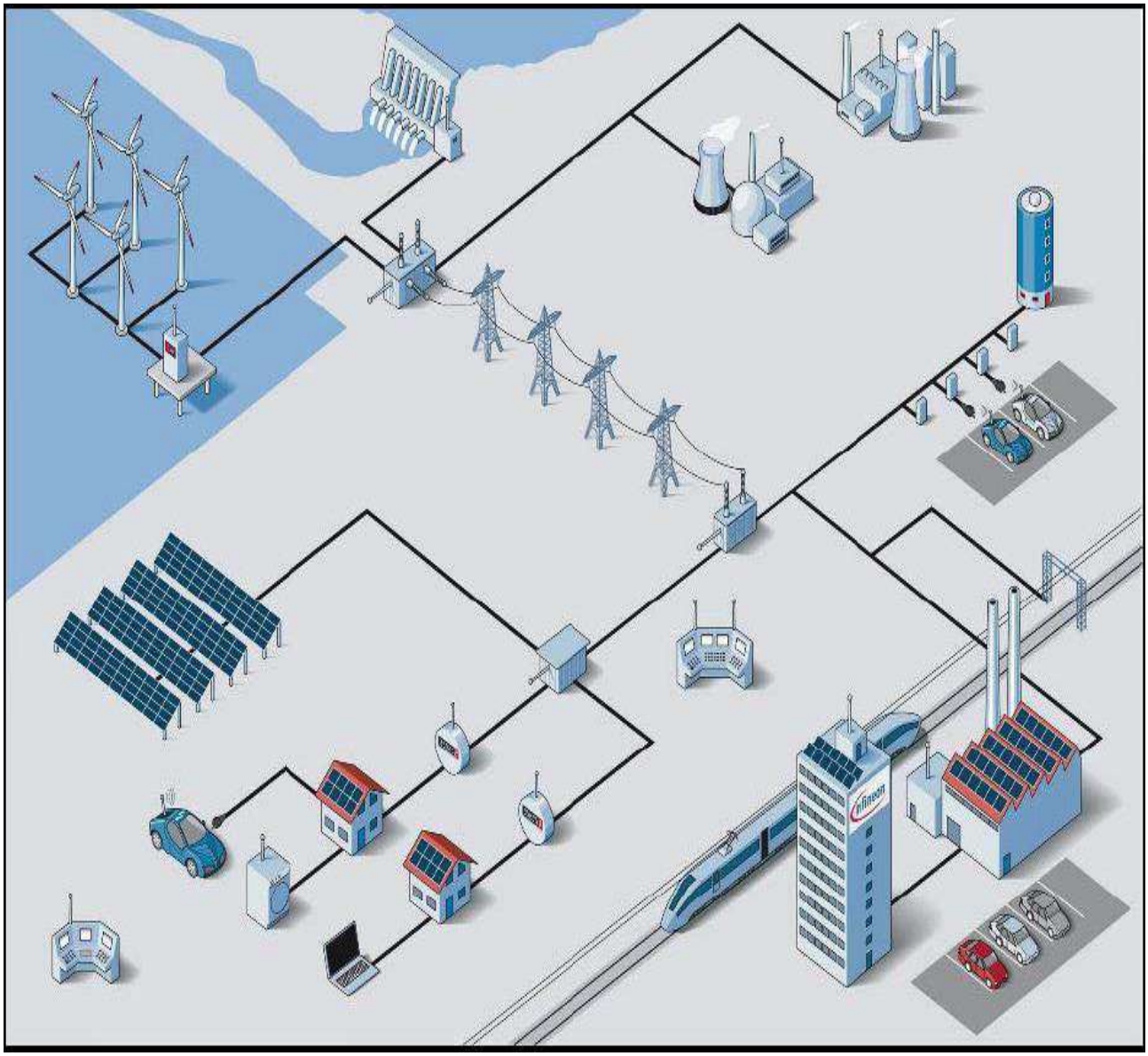


Figure 1.1.Réseau intelligent

1.3. Transformateur Classique

Les principes du transformateur ont été établis en 1831 par *Michæl Faraday*, mais ce dernier ne s'en servit que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique et n'en prévit les applications pratiques. *Lucien Gaulard*, jeune électricien français, présente à la Entreprise française des électriciens, en 1884, un «générateur secondaire», dénommé depuis transformateur. En 1883, *Lucien Gaulard* et *John Dixon Gibbs* réussissent à transmettre pour la première fois, sur une distance de 40 km, du courant alternatif sous une tension de 2 000 volts avec transformateurs avec un noyau en forme de barres.

1.3.1. Structure du Transformateur Classique

Le transformateur se constitue de deux parties principales, le circuit magnétique et les enroulements (Fig. 1.2).

Le circuit magnétique d'un transformateur est soumis à un champ magnétique variable en fréquence et en amplitude. Pour les transformateurs reliés au secteur de distribution, cette fréquence est de **50** ou **60** hertz. Le circuit magnétique est le plus souvent feuilleté pour diminuer les pertes par courants de Foucault, qui dépendent de l'amplitude du signal et de sa fréquence. Pour les transformateurs les plus courants, les tôles empilées ont la forme de E et de I, donnant la possibilité ainsi de glisser une bobine au sein des fenêtres du circuit magnétique ainsi constitué.

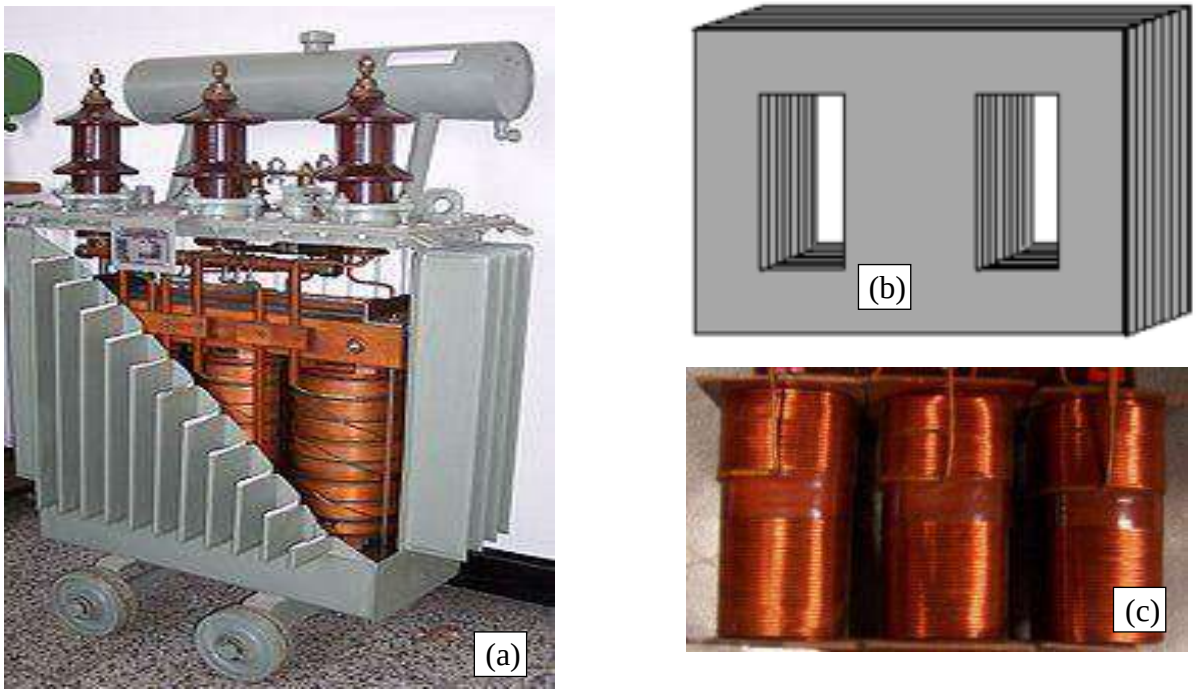


Figure 1.2. Structure générale d'un transformateur :
a - Vue en coupe d'un transformateur triphasé MT/BT
b – circuit magnétique
c - des enroulements d'un transformateur triphasé

Les circuits magnétiques des transformateurs «haut de gamme» ont la forme d'un tore. Le bobinage des tores étant plus délicat, le prix des transformateurs toroïdaux est nettement plus élevé.

Pour les enroulements d'un transformateur, le choix du type du conducteur électrique à utiliser dépend des applications, mais le cuivre est le matériau de choix pour l'ensemble des applications à fortes puissances. Les fils électriques de chaque tour doivent être isolés les uns des autres pour que le courant circule dans chaque tour. Pour des petites puissances, il suffit d'utiliser des conducteurs magnétiques émaillés pour assurer cette isolation ; dans les applications à plus fortes puissances on entoure les conducteurs de papier diélectrique imprégné d'huile minérale. Pour les plus fortes puissances on utilise des conducteurs multibrins pour limiter l'effet de peau mais aussi les pertes par courants de Foucault.

Les enroulements du primaire ou du secondaire peuvent avoir des connexions externes, nommées prise, à des points intermédiaires de l'enroulement pour permettre une sélection de rapport de tension. Les prises peuvent être connectées à un changeur automatique de prises en charge pour le contrôle de la tension du circuit de distribution.

1.3.2. Fonctionnement du transformateur monophasé

1.3.2.1. Fonctionnement à vide en régime équilibré:

Soit un transformateur triphasé dont les enroulements présentent (fig. 1.3)

· par phase, N1 spires au primaire et N2 spires au secondaire

· des couplages quelconques (étoile ou triangle)

Appliquons respectivement aux bornes des phases du primaire les tensions sinusoïdales équilibrées U_1L1 [V]; U_1L2 [V]; U_1L3 [V]

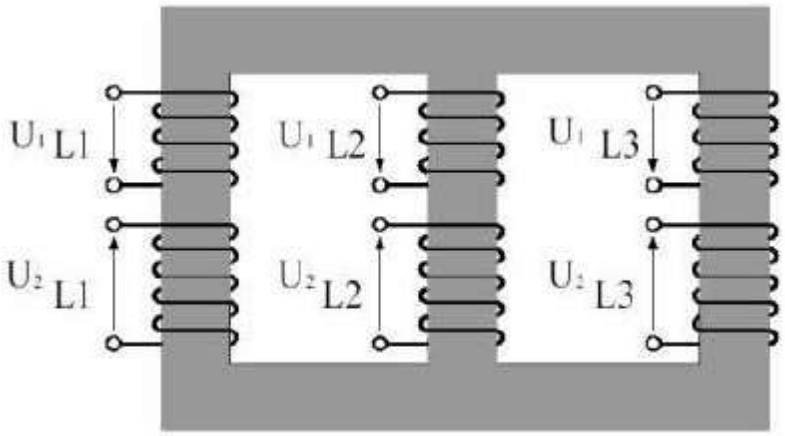


Figure 1.3. Transformateur Triphasé

Les flux magnétiques induisent dans les trois phases du secondaire des tensions sinusoïdales équilibrées, de sens opposé à celles du primaire.

1.3.2.2. Fonctionnement en charge:

On raccorde les 3 phases du secondaire sur 3 récepteurs identiques de facteur de puissance cos Phi.

- Soit I_1L1 [A] ; I_1L2 [A] ; I_1L3 [A] les courants dans les 3 phases du primaire.
- Soit I_2L1 [A] ; I_2L2 [A] ; I_2L3 [A] les courants dans les 3 phases du secondaire.

La première colonne fonctionne comme un transformateur monophasé parfait de rapport

$$m=\left(\frac{U2L1}{U1L1}\right)$$

Il en est de même pour les 2 autres colonnes, soit pour résumer :

$$m=\left(\frac{U2L1}{U1L1}\right)=\left(\frac{U2L2}{U1L2}\right)=\left(\frac{U2L3}{U1L3}\right)$$

En régime équilibré toute la théorie du transformateur monophasé est applicable à condition de raisonner « phase par phase », c'est-à-dire « à une phase du primaire correspond une phase du secondaire »

1.3.2.3. Fonctionnement en régime déséquilibré:

Le cas le plus fréquent du fonctionnement d'un transformateur triphasé en régime déséquilibré est celui des réseaux de distribution électrique. Il est nécessaire de savoir choisir le couplage des enroulements primaires et secondaires. Pour savoir quel couplage il convient d'adopter au primaire et au secondaire, il faut considérer un transformateur triphasé dont :

· Le primaire est alimenté par une ligne à 3 fils (les tensions sont équilibrées)

· Le secondaire a son neutre sorti.

Ce transformateur est soumis aux conditions limites suivantes :

· La phase du secondaire bobinée sur la 1ère colonne est chargée.

· Les 2 autres phases du secondaire sont à vide. [9]

1.3.3. Applications de transformateur de puissance

Les transformateurs de puissance peuvent changer d'une tension à l'autre à des niveaux de puissance élevés. Ces transformateurs sont utilisés dans divers circuits électroniques et sont également disponibles dans différents types et applications.

Les applications du transformateur de puissance incluent la transmission et la distribution de l'énergie électrique. Ces transformateurs sont largement utilisés par les centrales électriques , les installations industrielles et les entreprises de services publics d'électricité traditionnelles.

Les transformateurs de puissance sont utilisés dans le réseau de transport à haute tension pour augmenter et diminuer la tension. Ces transformateurs sont généralement utilisés pour la transmission de charges lourdes et ils sont de grande taille comparés aux transformateurs de distribution, utilisés dans les stations de production et les postes de transport. Les transformateurs de puissance sont utilisés dans la transmission. Ils ne se connectent donc pas directement aux consommateurs. Les fluctuations de charge du transformateur sont donc moindres.

Les transformateurs de puissance sont principalement conçus pour utiliser au maximum la partie centrale et fonctionneront très près du coude de la courbe BH. Cela enlève extrêmement la masse du noyau. Naturellement, les transformateurs de puissance subissent les pertes de cuivre et les pertes de fer correspondantes à des charges plus élevées.

On distingue différents gamme de transformateurs, à savoir :

- **Transformateur de puissance :** Les transformateurs de puissance sont de grande taille. Ils conviennent aux applications de transfert de puissance haute tension (supérieure à 33kV). Il a utilisé dans les centrales électriques et la sous-station de transport. Il a un haut niveau d'isolation.
- **Transformateur de distribution :** Ces transformateurs sont utilisés pour distribuer l'énergie générée par la centrale électrique vers des sites distants. Fondamentalement, il est utilisé pour la distribution d'énergie électrique à basse tension inférieure à 33 kV en utilisation industrielle et à 440V-220V en utilisation domestique.
- **Transformateur de Mesure :** Utilisé pour mesurer la quantité électrique telle que tension, courant, puissance, etc. Celles-ci sont classées comme transformateurs de potentiel, transformateurs de courant, etc.
- **Transformateur de Protection :** Ce type de transformateur est utilisé à des fins de protection des composants. La principale différence entre les transformateurs de mesure et les transformateurs de protection est la précision, ce qui signifie que les transformateurs de protection doivent être précis par rapport aux transformateurs de mesure.

1.3.4. Avantages et Inconvénients des transformateurs classiques

Le transformateur représente un élément de base pour les réseaux électriques, ces avantages sont multiples, entre autres :

- Très robuste
- Très fiable
- Très efficace (98,5% à 99,5%)
- Structure simple à étudier et à modéliser
- Relativement peu coûteux

Malgré ces avantages, il existe pas mal de contrainte qui empêchent le transformateur de puissance, avec sa forme classique, de s'adapter avec les notions modernes attribué aux réseaux électriques tel que le réglage affine des tensions, intégration souple des sources d'énergies renouvelable avec des coûts raisonnables, gestion intelligente, etc. Les principaux inconvénients des transformateurs classiques en fer et en cuivre sont come suivant [10, 11]:

- Aucune possibilité de régulation de tension / fréquence
- Harmoniques couplées et autres perturbations
- Difficile de contrôler le flux de puissance
- Pas de port DC
- Pas convivial pour l'intégration des énergies renouvelables, des véhicules électriques et du stockage d'énergie
- Grand poids / volume
- des problèmes environnementaux surviennent en cas de fuite d'huile minérale,
- chute de tension sous charge,
- incapacité à atténuer le scintillement,
- performances limitées en cas de déséquilibre de charge en décalage CC,
- impossibilité de convertir le service monophasé en triphasé pour alimenter certains types d'équipement,
- caractéristiques de tension non désirées (p. ex. fléchissements de tension, occurrence de défaut) d'un côté sont propagés de l'autre côté,
- les pertes des transformateurs conventionnels sont relativement élevées au niveau de charge moyen :transformateurs présentent leur efficacité maximale à leur charge nominale, tandis que le niveau de charge moyen du transformateur de distribution est d'environ 30%.

- la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du courant de sortie, et rien ne permet de la réguler ou de compenser les problèmes de qualité de l'alimentation tels que les harmoniques de charge, le facteur de puissance
- Les pertes associées à la mise sous tension du noyau sont présentes à tout moment et sont indépendantes de la charge.
- Les gains en efficacité approcheront zéro pour les très petites charges et atteindront leur maximum en fournissant environ 50% de la plaque signalétique

1.4. Transformateur électronique de puissance-Solide State Transformateur (SST)

Le SST 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.

1.4.1. Structures d'un SST

Les structures de base d'un SST sont illustrées sur les (fig. 1.4) et (fig. 1.5). Cette structure comprend les étages suivants :

- Redresseur alternatif haute tension à base de semi-conducteurs (Fig. 1.5-A)
- Convertisseur CC haute tension-haute fréquence à base de semi-conducteurs (Fig. 1.5-B)
- Transformateurs haute fréquence (Fig. 1.5-C)
- Redresseur coté base tension pour avoir l'énergie en DC, un onduleur pour obtenir l'énergie en AC et un circuit de commande (Fig. 1.5-D).

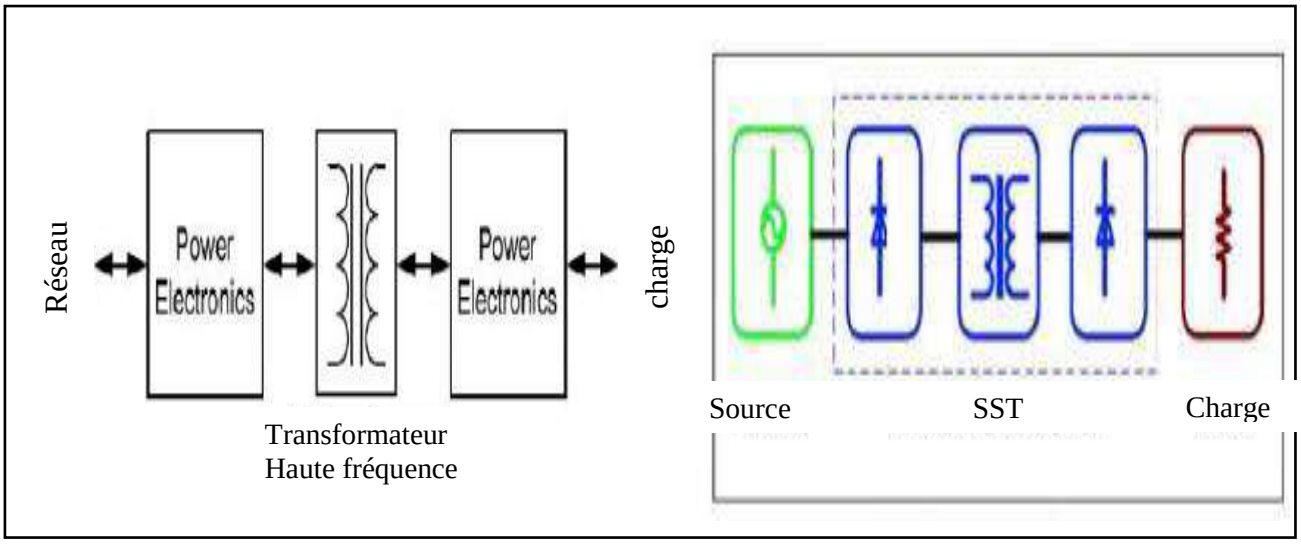


Figure 1.4: Idée de base d'un SST

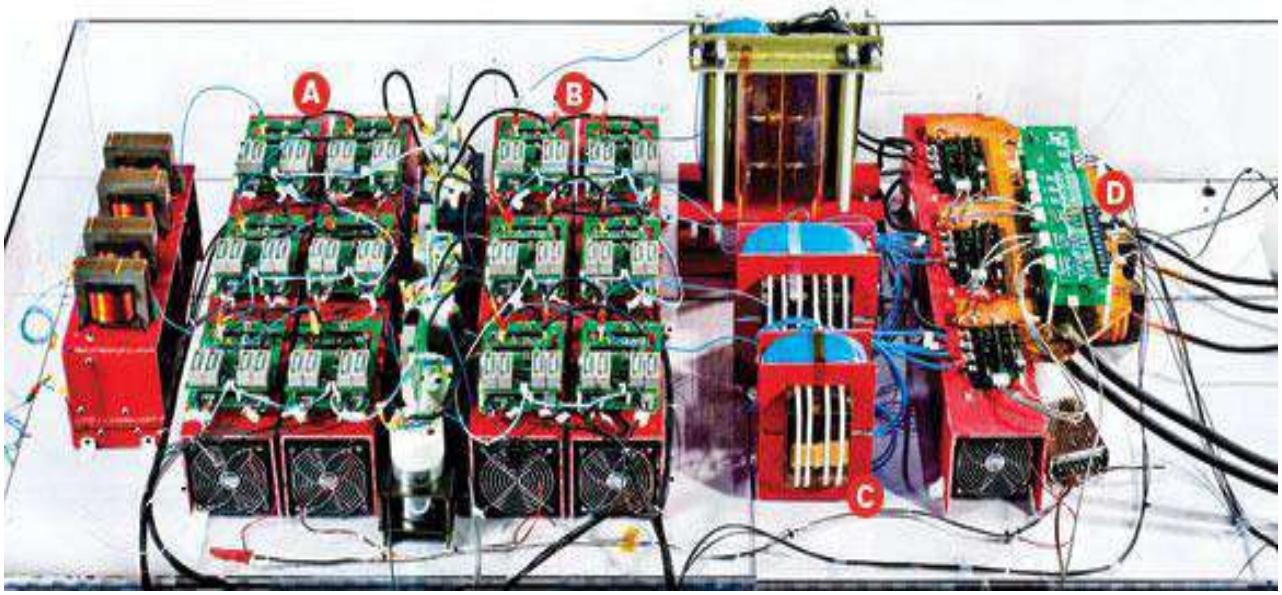


Figure 1.5. Structure de base d'un SST.

1.4.2. Topologies de base d'un SST:

Avant d'arriver à une structure optimale et efficace, au cours de son historique, le SST à connue différente configurations. Parmi d'autres, on peut distinguer quatre configurations principales [12, 13]:

1. SST à un étage (sans capacités de liaison CC): convertit directement la moyenne tension alternative (MVAC) en une basse tension alternative (LVAV) avec un transformateur HF comme circuit d'isolation (Fig. 1.6).

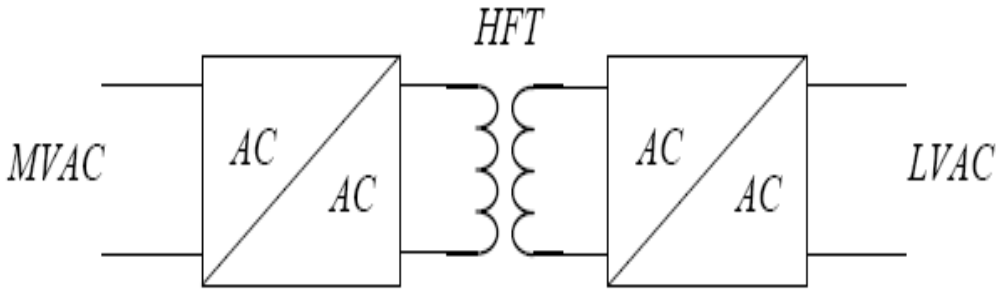


Figure 1.6. SST à un seul étage- type A

2. SST à deux étages (avec liaison CC du côté BT): le MVAC est converti en LVDC au premier étage, puis le LVDC est converti en LVAC par un onduleur (Fig. 1.7).

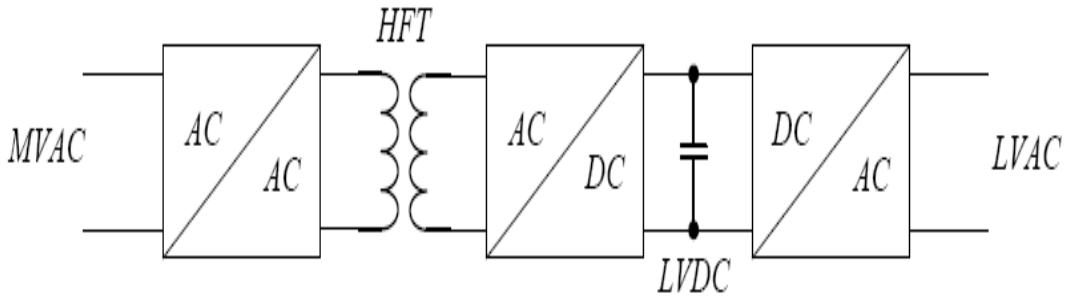


Figure 1.7. SST à deux étages- type B

3. SST à deux étages (avec liaison CC du côté MT): au premier étage, le convertisseur MVAC est converti à MVDC par le redresseur AC / DC, puis au deuxième étage, le MVDC est converti en LVAC sans utiliser la capacité du circuit intermédiaire basse tension (Fig. 1.8).

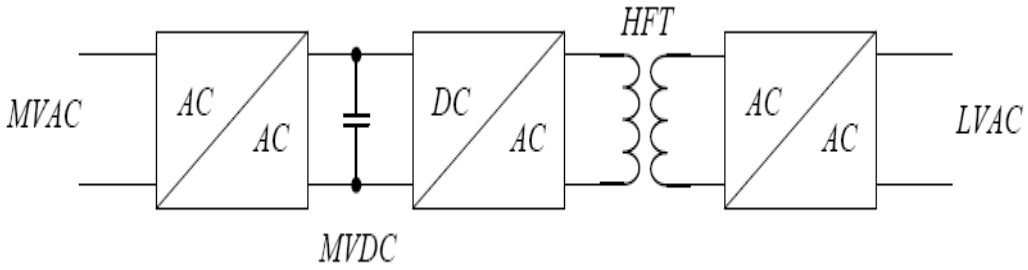


Figure 1.8. SST à deux étages avec une sortie MVDC- type C

4. SST à trois étages: le MVAC est converti en MVDC dans la première étape, le MVDC est converti en LVDC via un double pont actif (DAB) dans la seconde étape, et enfin la LVDC est convertie en LVAC à la troisième étape (Fig. 1.9).

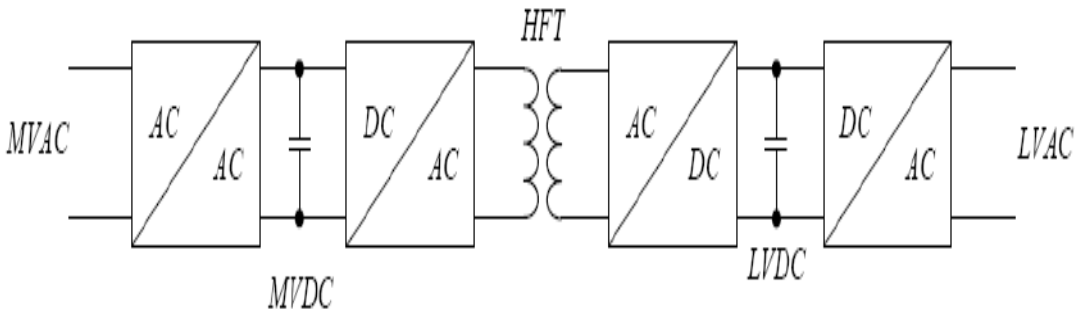


Figure 1.9. SST à trois étages- type D

La plupart des configurations SST conçues pour une application sur le terrain ont adopté le quatrième type SST à trois étages, (Fig. 1.9) puisque de nombreuses topologies appropriées peuvent être choisies pour chaque étape, ce qui permet d'optimiser ses performances.

1.4.3. Conception d'un SST à trois étages :

La conception du SST à trois étages peut être schématisée comme dans la (Fig. 1.10). Il utilise deux ponts convertisseurs semi-conducteurs et un transformateur entre les deux.

Le premier convertisseur est connecté au côté MT, 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 la tension continue, coté basse tension, peut être utilisée directement pour alimenter des charge continues.

Les SST utilisent des convertisseurs électroniques de puissance avec transformateur haute fréquence pour convertir une moyenne ou haute tension coté entrée en basse tension côté sortie du SST. Le résultat est un produit qui donne aux utilitaires une contrôlabilité améliorée

de la transaction d'énergie électrique dans le réseau tout en assurant une taille et un poids considérablement réduits.

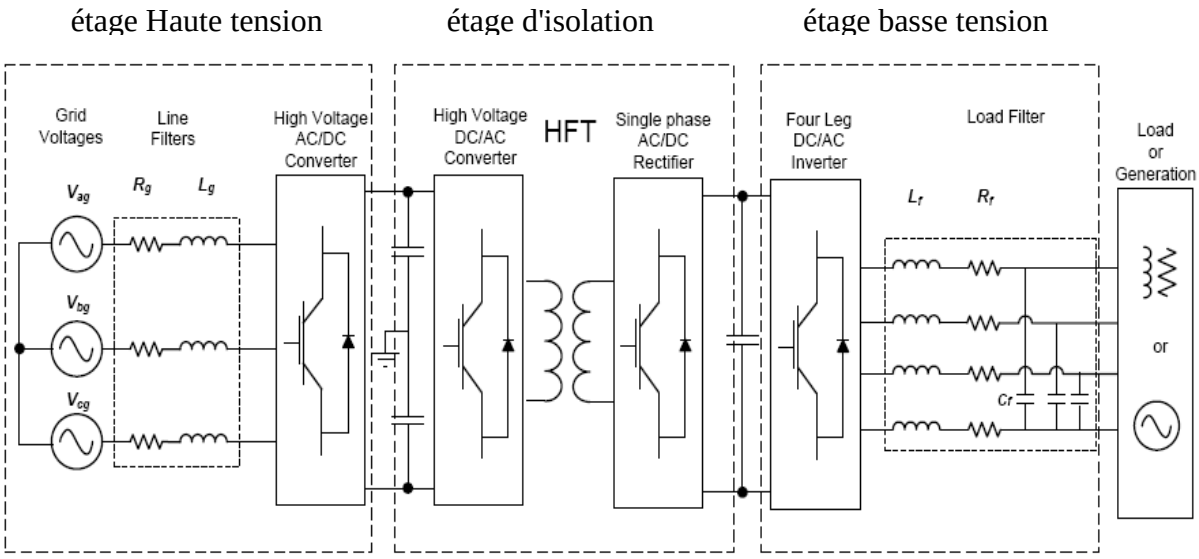


Figure 1.10. Configuration d'un SST à 03 étages

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, etc.

1.4.4. Avantages et Inconvénients D'un SST.

Les principaux avantages des SST par rapport aux transformateurs classiques sont les suivants:

- taille et poids plus petits,
- contrôle rapide du flux de puissance active bi-directionnellement,
- Amélioration de la qualité de l'alimentation,
- intégration facile des ressources distribuées,
- correction du facteur de puissance,
- contrôle de la puissance réactive des deux côtés du SST,
- auto-équilibrage et fréquence variable,
- régulation instantanée de la tension,
- compensation d'affaissement de tension,
- compensation harmonique,
- isolation des pannes entre les côtés primaire et secondaire.

Cependant, le SST présente également certains inconvénients devant le transformateur conventionnel, ils peuvent inclure, entre autres, les suivants:

- Le coût d'un SST dépasse un peu celui de son homologue, le transformateur conventionnel. Le besoin de semi-conducteurs de haute tension fiables et bon marchés pour être compétitif avec le transformateur conventionnel est donc évident.
- Le SST a un rendement inférieur au transformateur conventionnel en raison des pertes dans semi-conducteurs.
- Le SST a une conception plus sophistiquée (par exemple, nécessite plus de périphériques et composants de conception) que le transformateur conventionnel, ce qui ajoute un peu de risques en termes de fiabilité.

Au cours des dernières années, les dispositifs électroniques hauts puissance de faibles pertes sont disponibles à un prix moins cher. Les avantages des SST combinés à des dispositifs électroniques de puissance moins chère soutiennent la faisabilité économique du SST pour remplacer les transformateurs classiques [10].

D'autre part, La combinaison de tous ces aspects avec les capacités et les avantages offerts par Ce dispositif a également favorisé une recherche importante sur le développement et l'application des SST [11].

Il est clair que la structure d'un SST se compose essentiellement de composants ou de commutateurs d'électronique de puissance, par conséquent un choix convenable doit être effectué pour sélectionner le composant le mieux adapté pour l'application envisagée. En le choix doit se port soit sur le thyristor soit sur le transistor et la question c'est lequel d'eux est le plus convenable ? En effet, tandis que le thyristor n'est pas adapté à l'application haute fréquence, le transistor n'est pas adapté à l'application haute puissance. Par conséquent, pour les applications haute fréquence, nous devrions utiliser un transistor en raison de son faible temps d'activation et de désactivation. Par contre, pour les applications à forte puissance, le thyristor doit être utilisé en raison de sa capacité de transport de courant élevée. A noté que, l'utilisation d'un thyristor pour une application haute fréquence, Il en résultera une faible efficacité du circuit résultant. Par conséquent, nous ne pouvons utiliser les appareils dans une application appropriée que lorsque nous connaissons les différences qui les séparent. Le tableau (1.1), explicitent les point communs et les point de différence entre un transistor et un thyristor.

Pour le transistor, il faut choisir le IGBT et le MOSET, le tableau (1.2) résume une comparaison entre les deux types. En effet, le choix du type du commutateur dépend de plusieurs paramètres, à savoir :

- Le niveau de la tension à l'entrée du SST
- La valeur de la puissance à transmettre
- La valeur du courant à faire circuler
- La valeur de la fréquence coté HF
- La fréquence de commutation du composant
- Etc.

PARAMÈTRES	THYRISTOR	TRANSISTOR
Définition	Le thyristor est un dispositif semi-conducteur à quatre couches utilisé pour la rectification et la commutation.	Le transistor est un dispositif semi-conducteur à trois couches qui est principalement utilisé pour l'amplification et la commutation.
Puissance admissible	Plus par rapport au transistor.	Moins comparé aux thyristors.
Intensité et tension nominales	Courant et tension nominaux élevés.	Courant et tension nominaux faibles
Pertes internes	Moins comparé aux transistors.	Plus par rapport aux thyristors.
Temps de mise en marche et d'arrêt	Nécessite plus de temps pour allumer et éteindre.	Prend très moins de temps pour allumer et éteindre.
Coût	C'est coûteux.	Il est bon marché et donc économique d'utiliser plusieurs applications.
Poids	C'est encombrant.	Il est léger.
Procédure de déclenchement	Il suffit d'une seule impulsion pour passer en état de conduction.	Il a besoin de courant continuellement pour le maintenir dans un état de conduction.
Application haute fréquence	Ne convient pas.	Adapté
Application haute puissance	Convient aux applications à forte puissance.	Ne convient pas aux applications à forte puissance.

Tableau 1.1. Comparaison entre Thyristors et Transistors

Caractéristique de l'appareil	Bipolaire de puissance	Mosfet de puissance	IGBT
Tension nominale	élevé < 1kV	élevé < 1kV	Trés élevé > 1kV
Courant nominale	élevé < 500 A	faible < 200 A	élevé > 500 A
lecteur d'entrée a gâchette	Courant 20-200 Hfe	Tension Vgs 3-10 V	Tension Vge 4_8 V
Impédance d'entrée	faible	élevé	élevé
Impédance de sortie	faible	moyenne	faible
Vitesse de commutation	Lente	Rapide	moyenne
Coût	Bas	Moyen	élevé

Tableau 1.2 : Comparaison entre Bipolaire, Mosfet et IGBT

Hfe : H correspond à **H**ybrid (paramètre) **F** signifie **F**orward (amplification actuelle) et E à configuration commune de l'**é**metteur.
Vgs : **g**ate-**s**ource **v**oltage (tension de grille)
Vge : **g**ate-to-**e**mitter threshold **v**oltage (tension de seuil porte à émetteur)

1.4.5. Applications générales du SST

Actuellement, un SST peut être utilisé à la place d'un transformateur conventionnel de moyenne ou de basse tension dans n'importe quel système électrique. Cependant en raison de ses avantages et fonctions supplémentaires, son utilisation dans certains domaines est beaucoup plus attrayante. Voici des exemples de ces applications [14-15-16] :

1.4.5.1. Locomotives et autres systèmes de traction

Le transformateur utilisé dans les véhicules de locomotive actuels est de 16,7 Hz et représente ± 15% du poids total de la locomotive. Le SST peut permettre une réduction de poids significative (Fig. 1.11). De plus, le SST est également capable d'améliorer l'efficacité et de réduire les émissions CEM, harmoniques et acoustiques [17].

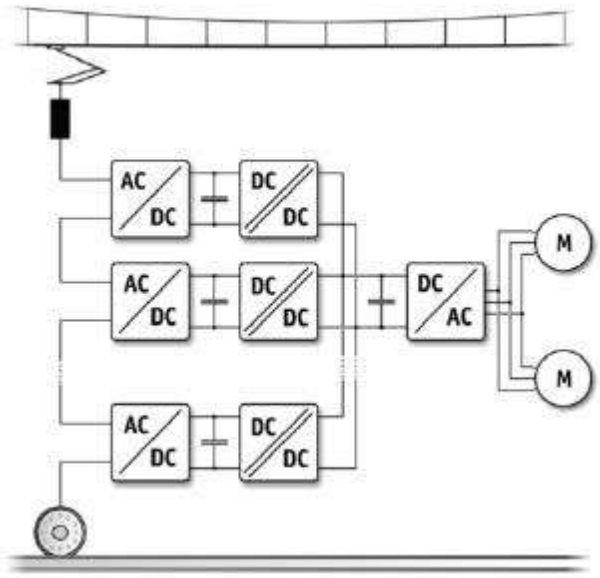


Figure 1.11. SST appliqué sur Un locomotif

1.4.5.2. Production d'énergie en mer

La production en mer, qu'elle soit éolienne, marémotrice ou de toute autre source, peut bénéficier de la réduction de poids et de taille (Fig. 1.12). Cette réduction conduit à des plateformes offshore plus petites et donc moins chères. Un autre avantage est que le SST peut atteindre un facteur de puissance unitaire, augmentant ainsi la transmission de puissance.

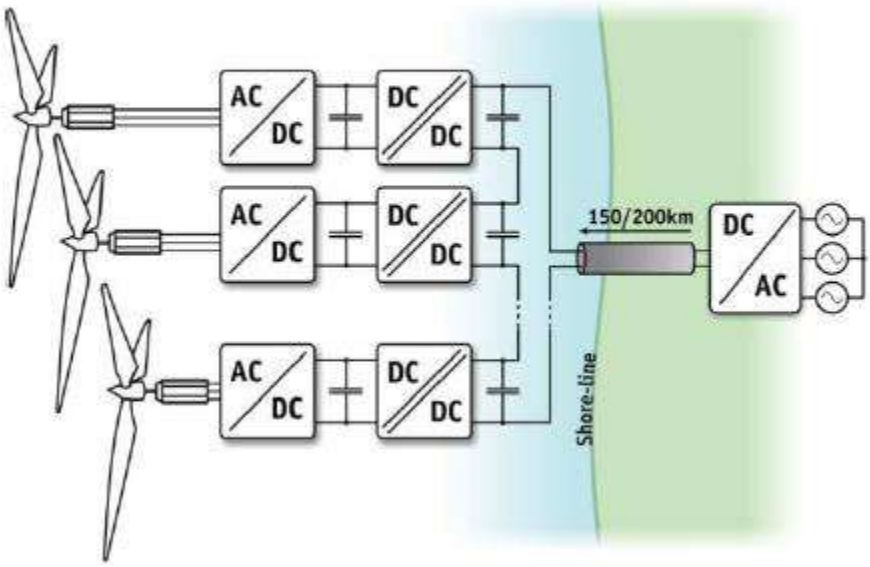


Figure 1.12. SST appliqué en mer

1.4.5.3. Réseaux intelligent

Dans les futurs systèmes électriques, l'utilisation de la production d'énergie renouvelable devrait augmenter et nécessitera un système de gestion de l'énergie fondamentalement différent des méthodes classiques. Pour une gestion rapide et efficace des modifications de différentes charges et sources, le SST peut être utilisé pour ajuster de manière dynamique la distribution d'énergie dans le réseau (Fig. 1.13) La fonction du SST décrite dans ce scénario est similaire à celle d'un routeur, mais au lieu de gérer les données, le SST gérera le flux d'énergie. Pour cette raison, le SST est parfois aussi appelé routeur d'énergie. [18].

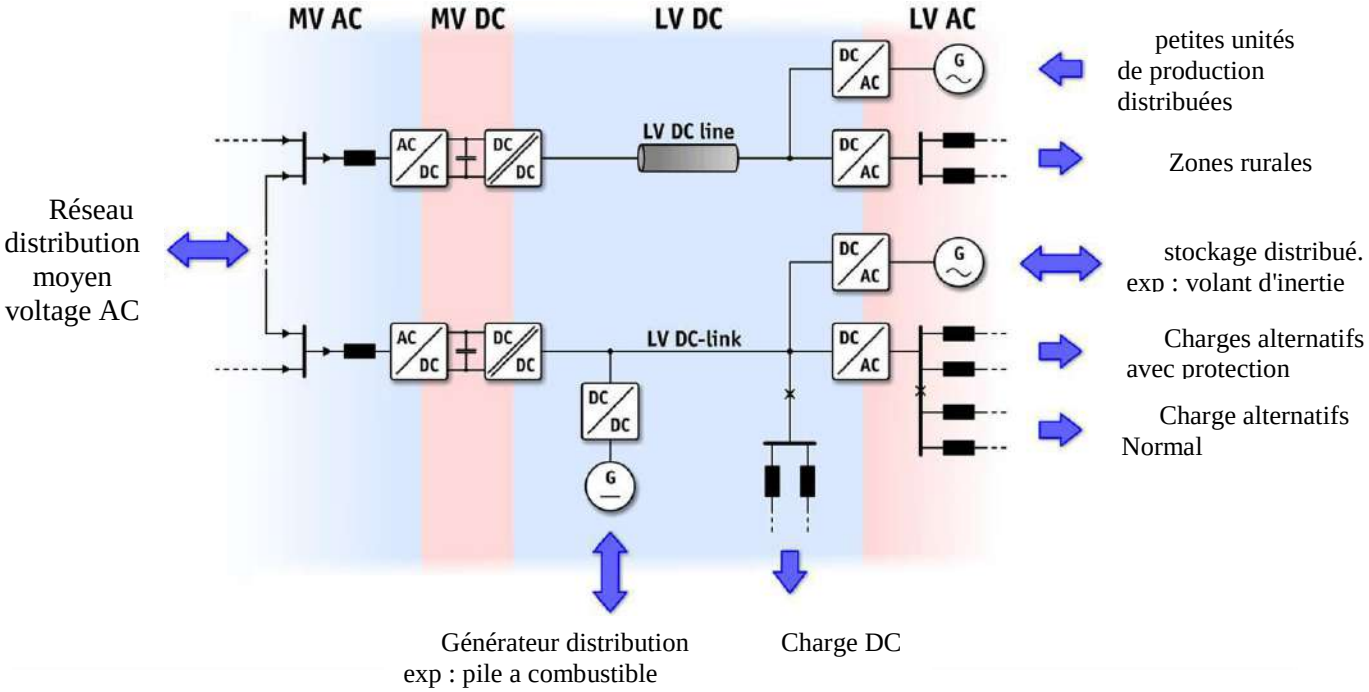


Figure 1.13. SST dans un réseau intelligent

1.5. CONCLUSION

Un grand nombre d'avantages des transformateurs à semi-conducteurs proviennent de la réduction de leur taille. Aujourd'hui, planter un transformateur n'est pas une tâche facile. Des considérations telles que le transport, la préparation du site, l'installation et les coûts de transmission contribuent au budget. En revanche, des transformateurs SST plus petits et moins chers pourraient être relativement faciles à planter pour des réseaux de moyenne tension, dans de petits champs solaires ou des modules de stockage. La vitesse de commutation plus rapide des périphériques à semi-conducteurs aiderait un utilitaire à gérer plusieurs sources d'alimentation alimentant le réseau, car davantage de transformateurs permettraient de contrôler et d'ajuster la qualité de l'alimentation. Par conséquent, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la simulation du SST à trois étages avec sa commande.

Chapitre 2

Modélisation d'un SST à trois étages

2.1. Introduction

Récemment, les topologies de convertisseur multi-niveau modulaire (*Modular Multi-level Converter*-MMC) ont attiré l'attention pour les applications haute ou moyenne tension [19-20]. Ces convertisseurs peuvent fournir une topologie efficace pour le côté MT du SST. Leurs principaux avantages sont la modularité et l'évolutivité, le niveau de tension souhaité peut être facilement atteint par une connexion en série de sous-modules MMC (SM). En outre, une topologie MMC peut fournir une qualité et une efficacité d'alimentation élevées avec une taille réduite des filtres passifs. Ces caractéristiques ont fait de l'option MMC une topologie intéressante pour les SST dans les applications à moyenne tension [21-22]. L'objectif principal de ce mémoire est de développer et d'implémenter dans Matlab / Simulink le modèle d'une SST bidirectionnelle à base de MMC à trois étages, capable de fournir des performances efficaces dans diverses conditions de fonctionnement.

2.2. Modélisation d'un SST à trois étages

La figure 2.1 illustre la configuration de base d'un SST à trois étages bidirectionnelle, qui se compose de trois étapes principales: l'étage moyenne tension, l'isolation et l'étage basse tension.

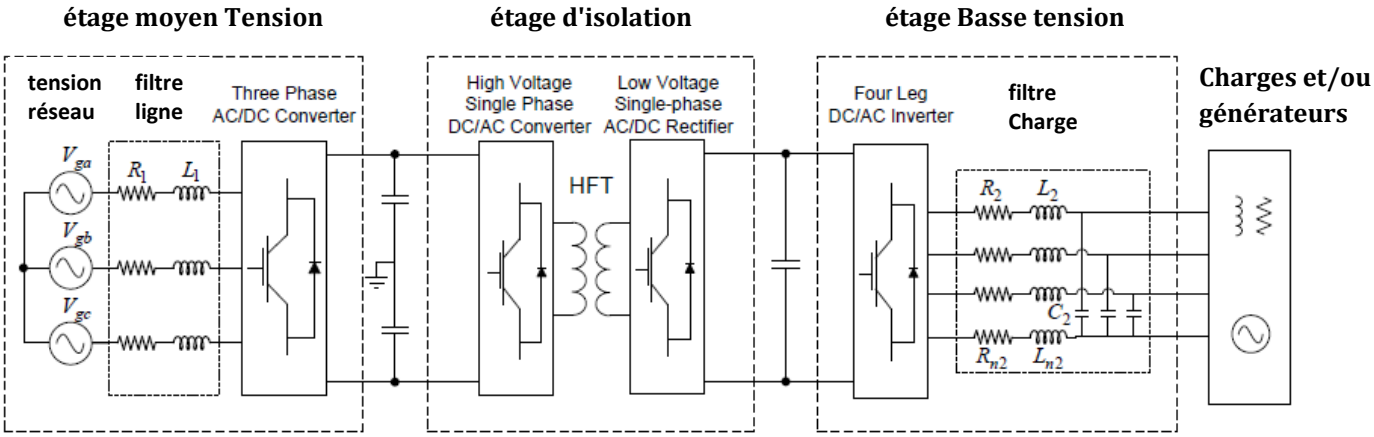


Figure 2.1 : Configuration de base d'un SST en trois étages.

Lorsque la puissance passe du côté MT au côté BT, la tension alternative fréquence-entrée est convertie en une tension continue MV par le convertisseur triphasé alternatif / continu qui, dans ce cas, fonctionne comme un redresseur. L'étage d'isolation, qui comprend un transformateur à haute fréquence (HFT) et les deux convertisseurs correspondants des côtés MT et BT, convertit d'abord la tension continue côté MV en une tension en onde carrée haute fréquence appliquée au primaire du HFT. Le signal d'onde carrée du côté secondaire est ensuite converti en une forme d'onde CC en courant continu par le convertisseur côté BT, qui fonctionne également en tant que redresseur.

Enfin, le convertisseur courant continu / courant alternatif triphasé côté BT, qui fonctionne comme un onduleur, fournit la forme d'onde alternative fréquence-puissance de sortie à partir de la liaison CC du côté BT. Le côté MT (appelé ci-après étage d'entrée) est connecté à un réseau de distribution MT, tandis que le côté BT (appelé ci-après étage de sortie) est supposé être connecté à un réseau BT auquel la charge et la production pourraient être connectées. Lorsque l'énergie passe du côté BT au côté MT (c'est-à-dire que la génération BT est prédominante), le comportement du SST est similaire à celui décrit ci-dessus; à la base, les étapes d'entrée et de sortie remplacent les fonctions. Le reste de cette section fournit un résumé de la configuration sélectionnée pour chaque étape et les contrôleurs correspondants.

Dans ce travail, une MMC triphasée avec des demi- ponts SM est utilisée pour l'étage d'entrée. Une stratégie de contrôle prévu pour la régulation et le maintient à un niveau la tension constante contre les fluctuations. Cette technique est non utilisée vu que le système est raccordé en boucle ouverte pour cette étude préliminaire; la conception et la liaison entre les SM en intégrants des capacités, sa a permet une circulation des courants et génération d'une tension Continu lissée par la capacité de filtrage en parallèle.

L'étage d'isolation est divisé en trois parties : une MMC monophasée, un HFT et un convertisseur AC/DC pont de transistors à double alternance avec filtre shunt parallèle C, la commande utilisée pour les convertisseurs DC/AC et AC/DC et identique en utilisant des générateurs d'impulsions avec un décalage de temps.

L'étage de sortie comporte un onduleur MLI triphasé avec l'utilisation d'une commande a base de la commande MLI Sinus-Triangulaire qui fournit une alimentation Alternatif de fréquence 50 /60 hz.

2.2.1 Étage d'entrée. Configuration et control

L'étage MT du SST est connecté à un système de distribution alternatif triphasé via des filtres RL. La figure (2.2) illustre la configuration de la console MMC triphasée sélectionnée pour ce travail. S'il est supposé que la puissance passe du côté MT au côté BT du SST, le contrôleur MMC côté MV 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 joue le rôle d'un onduleur qui transmet la tension continue du circuit intermédiaire de l'étage d'entrée à la tension alternative à la fréquence du réseau. Comme le montre la figure (2.2), chaque branche du MMC triphasé se compose de deux bras supérieur et inférieur avec un sous-module (SM) connecté en série similaire, une résistance de bras (R_{arm}) et une inductance de bras (L_{arm}).

Différents types de SM sont disponibles pour la réalisation d'un MMC tels que le convertisseur à demi-pont, le convertisseur à pont complet, le convertisseur NPC (pince neutre) à trois niveaux, le

convertisseur avec condensateur volant à trois niveaux (FC) et différentes topologies de convertisseurs à connexion croisée [23-24].

Dans ce travail, le convertisseur demi- pont est utilisé comme SM pour MMC.

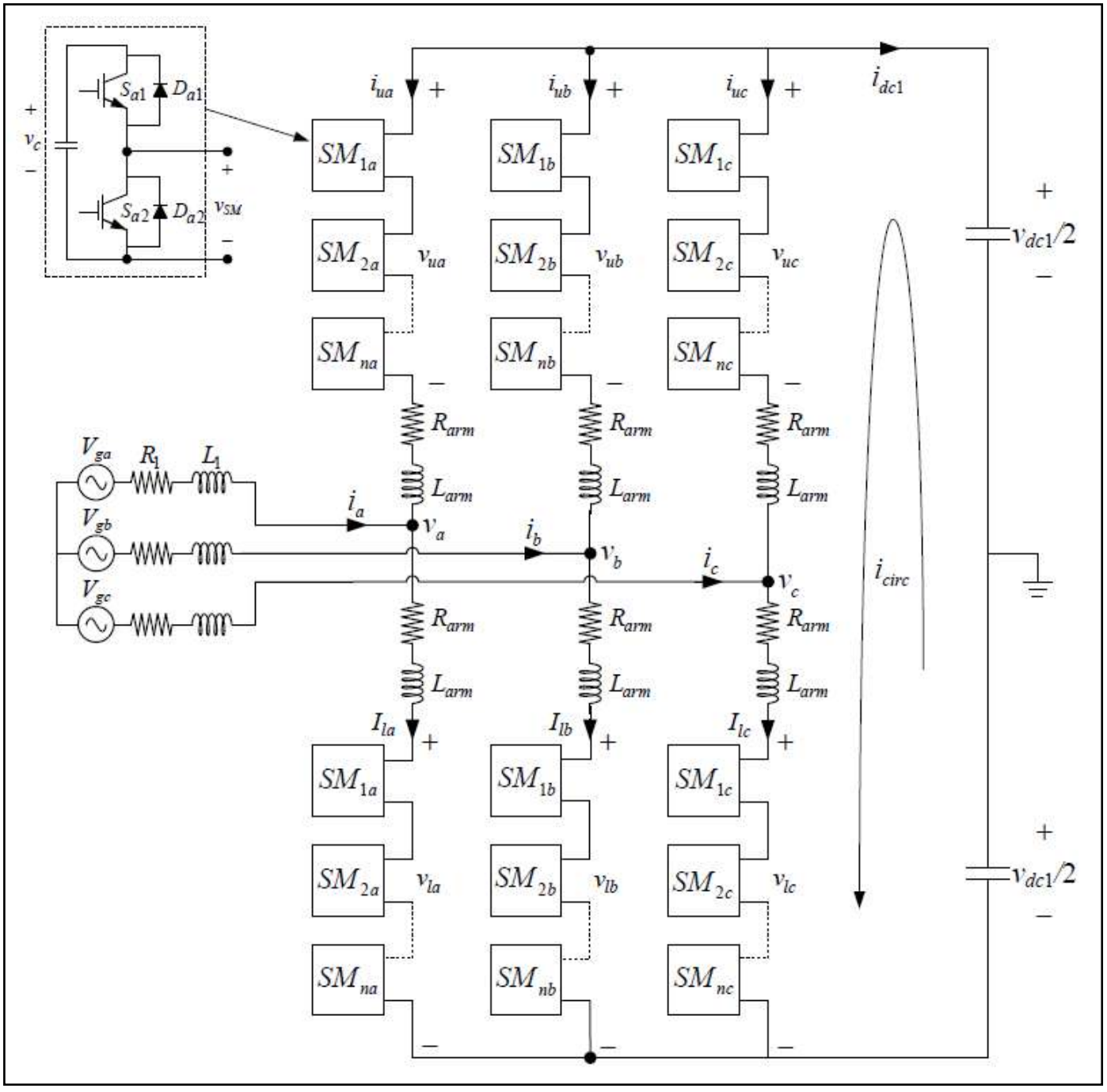


Figure 2.2. Configuration de l'étage d'entrée triphasé.

La figure (2.3) illustre les différents états de fonctionnement du demi- pont SM par rapport à la direction du courant. Comme on peut le voir sur cette figure, le demi- pont SM comprend deux commutateurs IGBT, $\mathbf{S_1}$ et $\mathbf{S_2}$, et un condensateur servant de source de courant continu avec une tension **Vc**, le commutateurs $\mathbf{S_1}$ et $\mathbf{S_2}$ sont commutés de manière complémentaire.

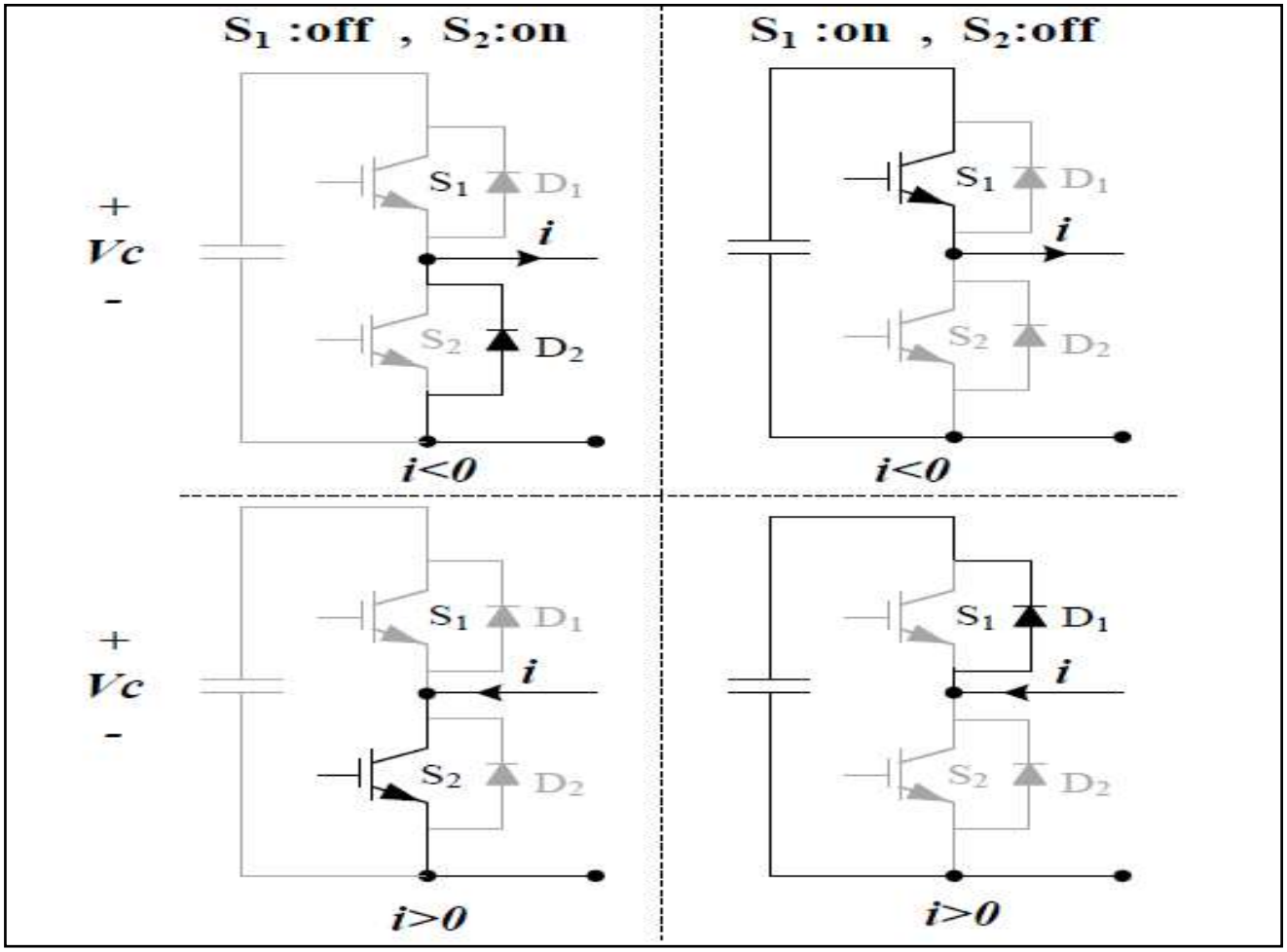


Figure 2.3. Différents états de fonctionnement d'un SM demi- pont.

Lorsque le commutateur $\mathbf{S_1}$ est ON, la tension de SM est égale à $\mathbf{V_c}$ et on dit que SM est inséré. Lorsque le commutateur $\mathbf{S_2}$ est ON, la tension de SM est égale à zéro et on dit que SM est contourné. De plus, lorsque le courant s'insère de la polarité positive du condensateur, le condensateur est chargé et lorsque le courant s'insère de la polarité négative du condensateur, le condensateur est déchargé. Étant donné que dans la topologie MMC, chaque bras doit pouvoir fonctionner avec la tension totale de la liaison continue, la valeur de chaque tension de capacité SM doit être: commutée de manière complémentaire.

$$V_{cSM} = \frac{Vdc}{n} \qquad (2.1)$$

Pour mieux analyser le modèle de la console MMC côté MT, la figure 2.4 illustre l'interaction d'un segment de la console MMC et du lien CC à tension continue [25-26].Le courant des bras supérieur et inférieur de la phase k, (k = a, b, c), $\mathbf{i_{uk}}$ et $\mathbf{I_{Lk}}$, (u/upper/supérieur), (L/Lower/ inférieur) peut être exprimé par :

$$i_{uk} = i_{circ} - \frac{ik}{2} \qquad (2.2)$$

$$I_{Lk} = i_{circ} + \frac{ik}{2} \qquad (2.3)$$

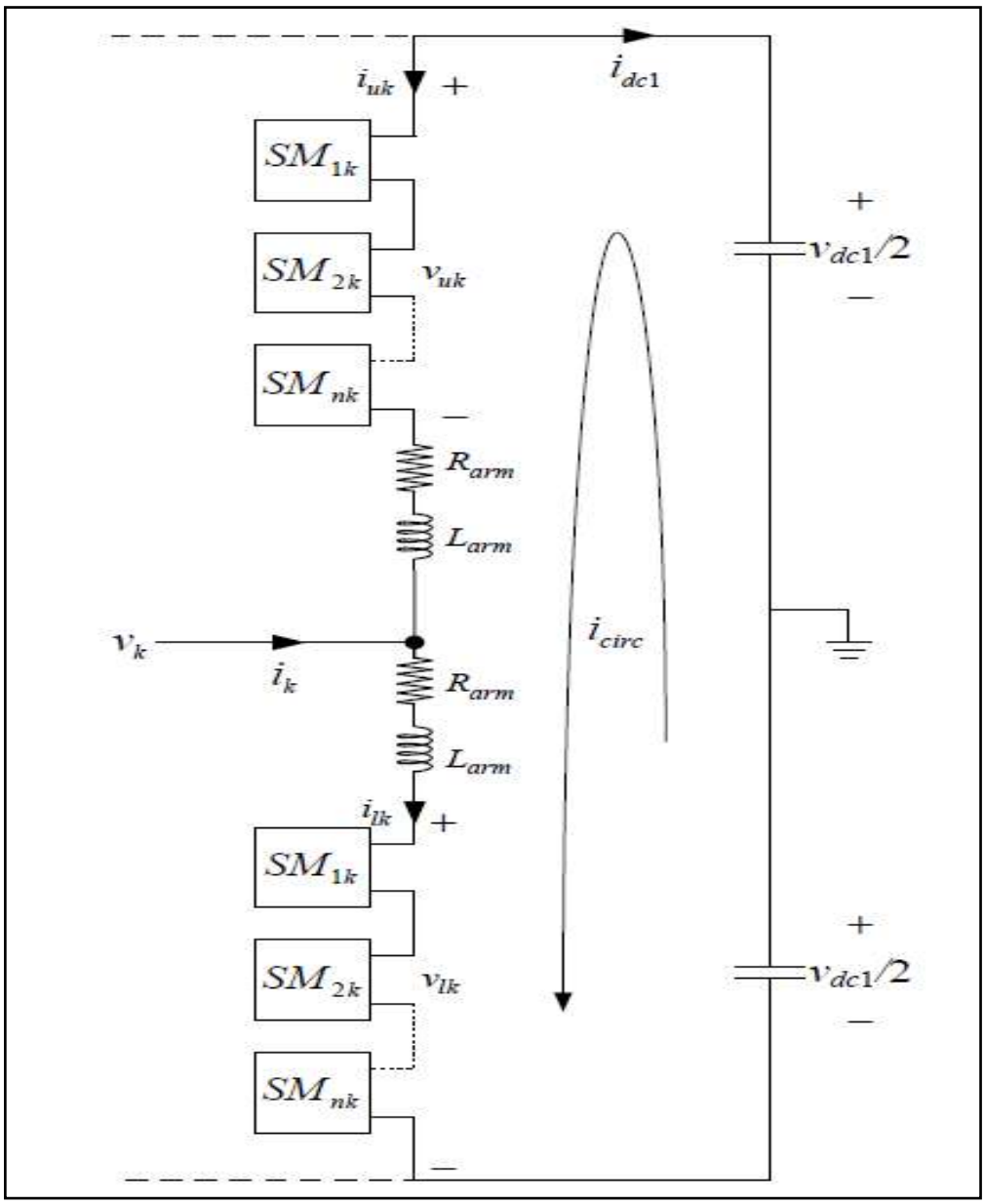


Figure 2.4. Une configuration D'un bras de l'étage d'entrée MMC.

Où : $\mathbf{I_k}$ est le courant d'entrée de la phase k, $\mathbf{i_{circ}}$ le courant de circulation pouvant être obtenu en ajoutant (2.2) et (2.3):

$$i_{circ}=\left(\frac{iuk + Ilk}{2}\right) \qquad (2.4)$$

Les tensions supérieures et inférieures de la phase k, $\mathbf{V_{uk}}$ et $\mathbf{V_{Lk}}$ peuvent être exprimées comme suite :

$$V_{uk}=\left(\frac{Vdc1}{2}\right)-V_k-(R_{arm}*i_{uk})-\left(L_{arm}*\left(\frac{d(iuk)}{dt}\right)\right) \qquad (2.5)$$

$$V_{Lk}=\left(\frac{Vdc1}{2}\right)-V_k-(R_{arm}*i_{Lk})-\left(L_{arm}*\left(\frac{d(iLk)}{dt}\right)\right) \qquad (2.6)$$

où $\mathbf{V_k}$ est la tension de la phase k du côté alternatif du MMC, $\mathbf{R_{arm}}$ et $\mathbf{L_{arm}}$ sont respectivement la résistance et l'inductance de chaque branche du MMC. En soustrayant (2.6) de (2.5) et en substituant $\mathbf{i_{uk}}$ and $\mathbf{i_{Lk}}$ de (2.2) - (2.3), on obtient la forme suivante pour $\mathbf{V_k}$:

$$V_k=\left(\frac{VLk-Vuk}{2}\right) + \left(\frac{Rarm*ik}{2}\right) + \left(\frac{Larm}{2}*\frac{dik}{dt}\right) \qquad (2.7)$$

Comme on peut le voir à la figure 2.2 :

$$V_{gk}=V_k + (R_1*i_k) + \left(L_1*\frac{dik}{dt}\right) \qquad (2.8)$$

où $\mathbf{R_1}$ et $\mathbf{L_1}$ sont la résistance et l'inductance des filtres d'entrée. En remplaçant (2.7) par (2.8), on obtient l'équation suivante:

$$V_{gk}= \frac{VLk-Vuk}{2}+\frac{Rarm*ik}{2}+\left(\frac{Larm}{2}*\frac{dik}{dt}\right)+ (R_1*i_k) +\left(L_1*\frac{dik}{dt}\right) \qquad (2.9)$$

Un circuit équivalent de la MMC peut être déduit de ces résultats (voir figure 2.5). En utilisant les formes suivantes [27]:

$$V_{eq}= \frac{VLk-Vuk}{2} \qquad (2.10)$$

$$R_{eq} = R_1+\frac{Rarm}{2} \qquad (2.11)$$

$$L_{eq}= L_1+ \frac{Larm}{2} \qquad (2.12)$$

L'équation (2.9) devient:

$$V_{gk}=V_{eq} + (R_{eq}*i_k)+L_{eq}*\left(\frac{dik}{dt}\right) \qquad (2.13)$$

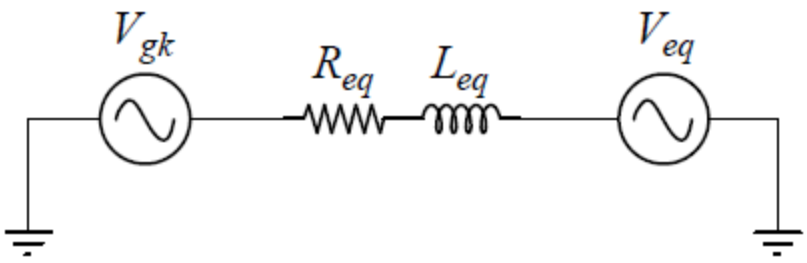


Figure 2.5. Circuit équivalent d'une MMC [26].

2.2.2 Étage d'isolement: configuration et contrôle

Le modèle mis en œuvre pour représenter l'étage d'isolation comprend trois parties principales (Fig. 2.6):

- Un MMC monophasée à un bras, dont le travail ressemble à celui d'un onduleur, génère un signal d'entrée haute fréquence vers le HFT cela fonctionne avec une forme d'onde à 2 kHz
- Le HFT qui est modélisé comme un transformateur idéal en série avec son impédance de court-circuit
- Un convertisseur à double pont monophasé (BT monophasé) agissant en tant que redresseur et fournissant la tension de liaison continue requise pour l'étage de sortie du SST [28].

Une brève description de la stratégie de contrôle mise en œuvre pour les convertisseurs de chaque côté HFT est donnée ci-dessous.

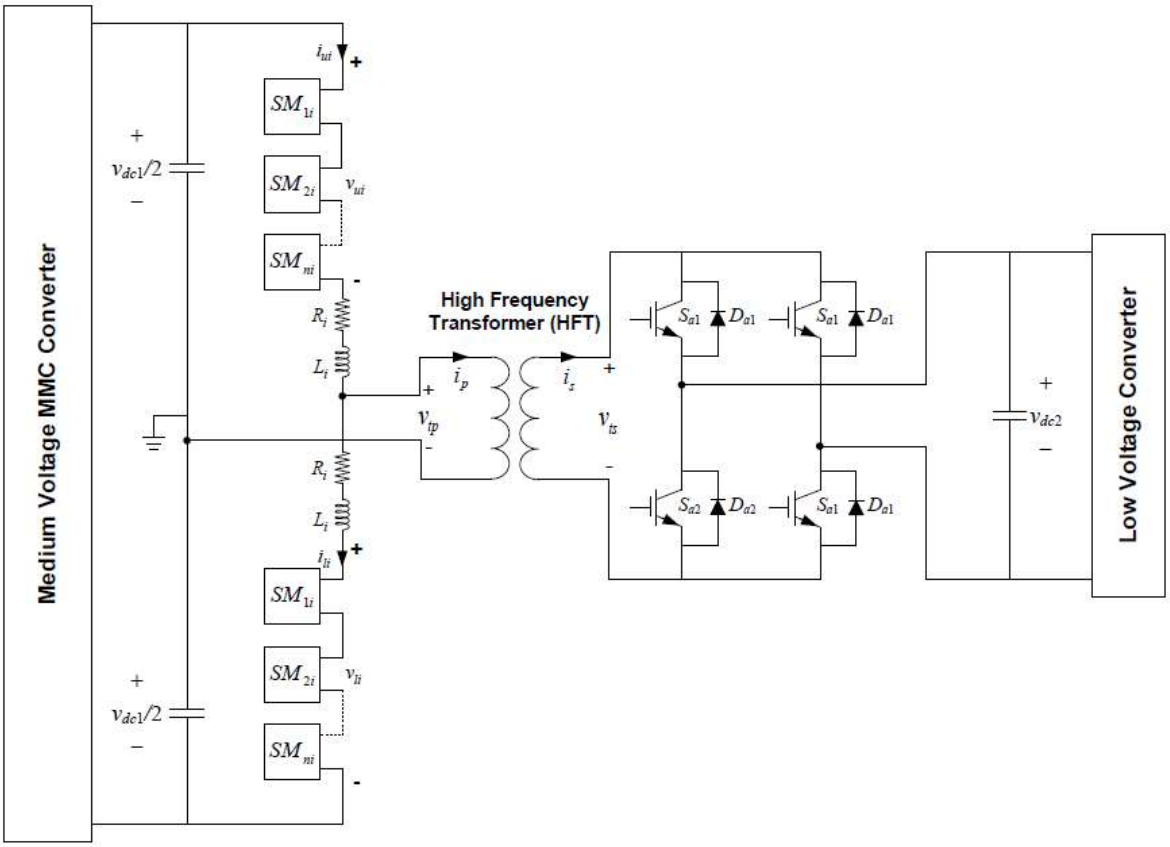


Figure 2.6. Configuration de L'étage D'isolation

2.2.2.1 MMC monophasé

La stratégie de contrôle mise en œuvre pour ce convertisseur monophasé MV est l'utilisation des générateur d'impulsions décalé dans le temps, pour chaque demi période on envoie une impulsion au SM coté supérieur et inférieur de cette manière :

- 1 ère Demi période : une impulsion pour les 03 IGBT supérieur de bras supérieur avec 03 IGBT inférieur de bras inférieur.

- 2 ère Demi période : une impulsion pour les 03 IGBT inférieur de bras supérieur avec 03 IGBT supérieur de bras inférieur.

Cette technique renvoi une demi-période positive vers le négatif pour produire une alternance négatif et positif de fréquence élevé, cette commutation engendre un signal carré de fréquence 2 kHz pour attaquer le HFT.

2.2.2.2 Transformateur haute fréquence

Le transformateur à haute fréquence (HFT) est nécessaire pour réaliser l'isolation électrique. Il doit également permettre des rapports de tension et de courant élevés entre l'entrée et la sortie. L'utilisation d'un HFT dans le SST est la principale raison de la réduction de la taille par rapport aux transformateurs classiques fonctionnant à la fréquence du réseau (c'est-à-dire 50-60 Hz).

Par conséquent, une conception optimisée de la haute fréquence en mode DAB est nécessaire pour tirer parti des avantages de la SST [29]. De nombreuses considérations et difficultés de conception doivent être prises en compte afin de satisfaire le fonctionnement à haute tension, haute puissance et haute fréquence du transformateur à étage d'isolation. Le premier défi est le choix du matériau magnétique qui devrait être suffisant pour fournir une densité de puissance élevée et une perte faible. Le deuxième défi est la configuration du noyau et des enroulements, car ils auront un effet considérable sur le rendement à haute fréquence. Le troisième défi est la conception thermique, qui doit éviter les pannes de l'appareil dans les applications haute tension et forte puissance. Enfin, l'exigence d'isolation est très importante dans les applications haute tension et dans la conception compacte, principalement lorsque l'huile est éliminée [30]. Les articles [31-32] présentent la conception et l'optimisation de transformateurs pour les applications SST.

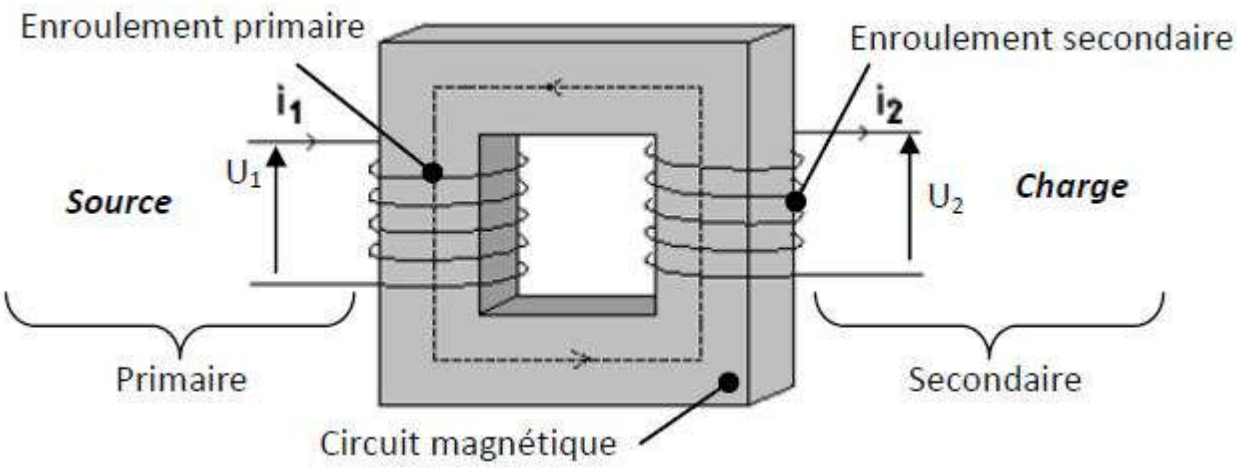


Figure 2.7.. Circuit Magnétique HFT

Les transformateurs à haute fréquence transfèrent l'énergie électrique. La taille physique dépend de la puissance à transférer ainsi que de la fréquence de fonctionnement. Plus la fréquence est élevée, plus la taille physique est petite. Les fréquences sont généralement comprises entre 20 et 100 kHz. La ferrite est principalement utilisée comme matériau de base.

La première étape pour calculer un transformateur haute fréquence consiste généralement à choisir un noyau approprié à l'aide du recueil de données contenant certaines tables à cet effet. Une autre manière de choisir un noyau approprié est décrite dans les références [35] et [36] où, dans un premier temps, une masse ou un volume de noyau est déterminé en fonction de la puissance de transfert et de la fréquence de commutation.
Dans la deuxième étape, le nombre principal de tours (spires) est calculé car il détermine la densité de flux magnétique dans le noyau. Ensuite, le diamètre du fil est calculé, ce qui dépend du courant dans les bobines primaire et secondaire.

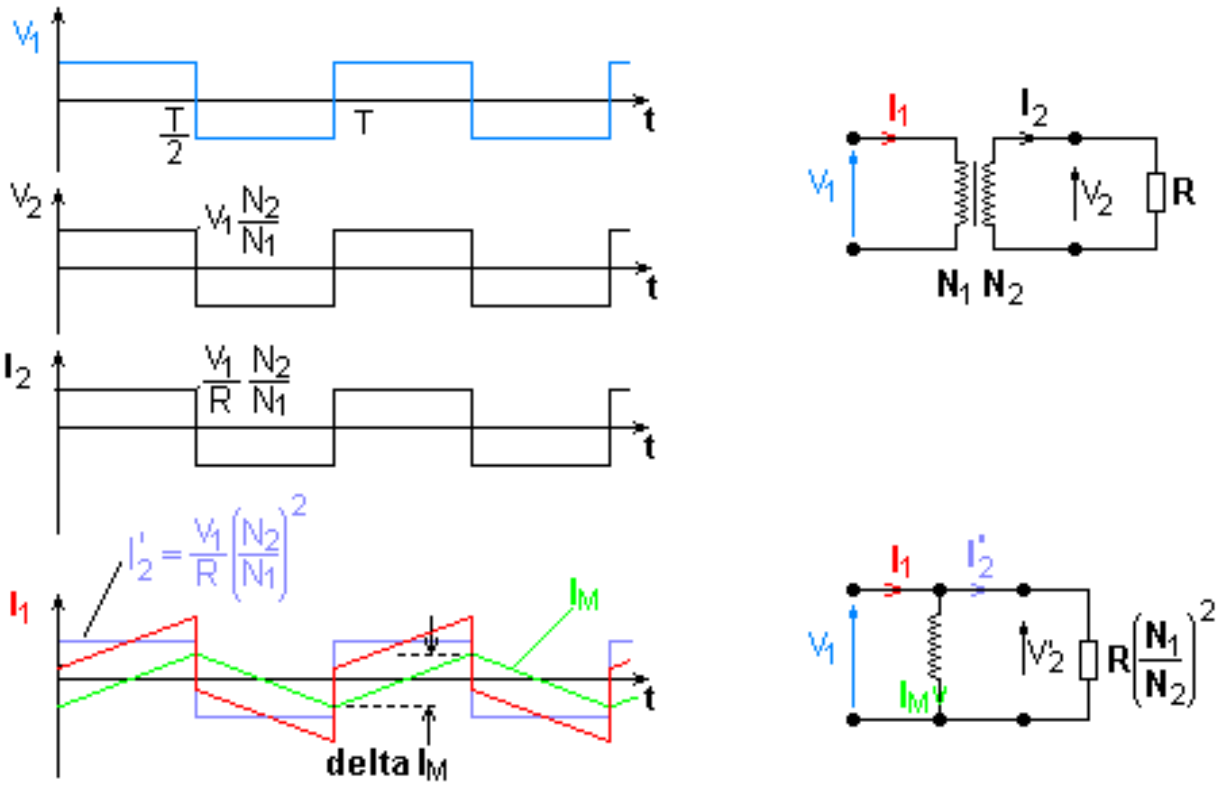


Figure 2.8 : Tensions et courants du transformateur

On suppose qu'il existe une tension carrée $\mathbf{V_1}$ du côté primaire du transformateur. Cela provoque un courant d' entrée $\mathbf{I_1}$, qui consiste en le courant de retour secondaire transformé I_2 et le courant magnétisant $\mathbf{I_M}$ (voir figure 2.8). Un noyau sans entrefer est utilisé afin de réduire au maximum le courant magnétisant.

La tension carrée à l'entrée du transformateur génère un courant magnétisant $\mathbf{I_M}$ de forme triangulaire presque indépendant du courant secondaire (voir également le circuit équivalent de la figure 2.8). Le courant magnétisant est approximativement proportionnel au flux magnétique **(Φ),** c'est-à-dire à la densité de flux magnétique **(B).**

La tension d'entrée $\mathbf{V_1}$ détermine le flux magnétique dans le noyau du transformateur correspondant à la loi de Faraday $\mathbf{V = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}}$ (voir Figure 2.9). .

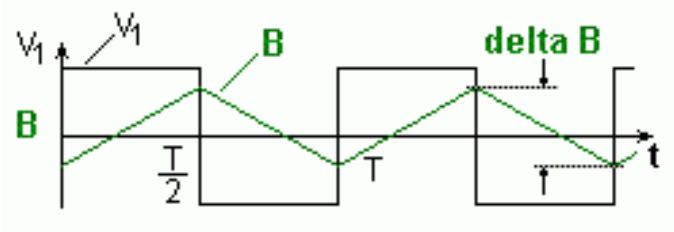


Figure 2.9 : Tension d'entrée et densité de flux magnétique du transformateur

Alors les formules de Boucherot sont données par :

$$U_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} * f * N_1 * \varphi_{max} = 4.44 * f * N_1 * \varphi_{max} \quad (2.14)$$

$$U_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} * f * N_2 * \varphi_{max} = 4.44 * f * N_2 * \varphi_{max} \quad (2.15)$$

$$\text{Ou } \varphi_{max} = B_{max} * S \quad (2.16)$$

S : section du circuit magnétique (en m^2)
B_{max} : champ d'induction maximal (en T:Tesla).
φ : flux utile crée par spire dans les enroulements primaire et secondaire.

On tire alors de (2.14), (2.15) et (2.16) :

$U_1 = 4.44 * f * B_{max} * N_1 * S$
$U_2 = 4.44 * f * B_{max} * N_2 * S$

Pour le transformateur à droite dans le diagramme ci-dessus, les conditions suivantes s'appliquent:

- Le changement (B) de la densité de flux dépend de la fréquence $f = \frac{1}{T}$ et du nombre de tours (N_1) .
- Plus la fréquence et le nombre de tours sont élevés, plus le changement de densité de flux est faible.
- plus le changement de densité de flux (B) est faible, plus les pertes par hystérésis sont réduites.

2.2.2.3 Convertisseur monophasé à pont complet à deux niveaux

Le pont à deux niveaux monophasé BT (figure 2.6), Il redresse la tension de sortie du HFT (V_{ts}) et contrôle la tension de liaison CC du côté BT (V_{dc2}) à la valeur souhaitée. Le pont utilisé est un pont de Greatz, le signale d'entrée est un signal Alternatif carré de fréquence élevée, le redresseur garde l'alternance positif à sa valeur maximal et inverse l'alternance négatif en alternance positive ce qui va produire un signale continu de valeur fixe au point maximal servant comme entrée pour l'onduleur MLI.

2.2.3 Étage de sortie: configuration et contrôle

La topologie de convertisseur à quatre branches constitue un choix efficace pour les applications nécessitant un contrôle précis du redresseur contrôlé à courant neutre. L'ajout d'un bras supplémentaire offre un degré de liberté et une meilleure capacité de contrôle par rapport au convertisseur classique à trois bras [33-34]. Dans Ce mémoire, un convertisseur PWM triphasé à quatre bras est utilisé pour le côté BT du SST, avec une impédance RL pour les courants de filtrage et une batterie de condensateurs pour les tensions de filtrage (Fig. 2.10).

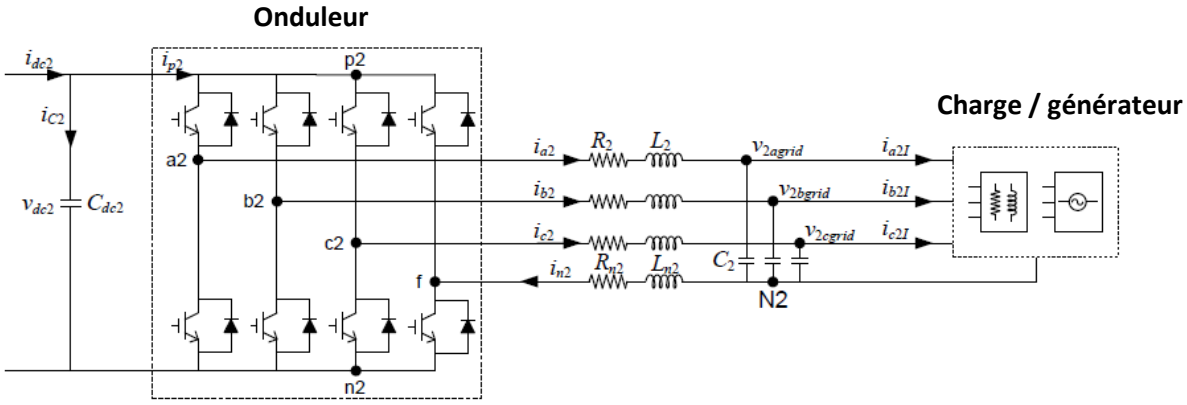


Figure 2.10. Configuration du convertisseur latéral basse tension.

2.2.3.1 Modélisation de l'onduleur triphasé

Pour modéliser l'onduleur de tension, (figure 2.11), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f_{em}. égale à $\frac{E}{2}$ connectés entre eux par un point noté n_0.

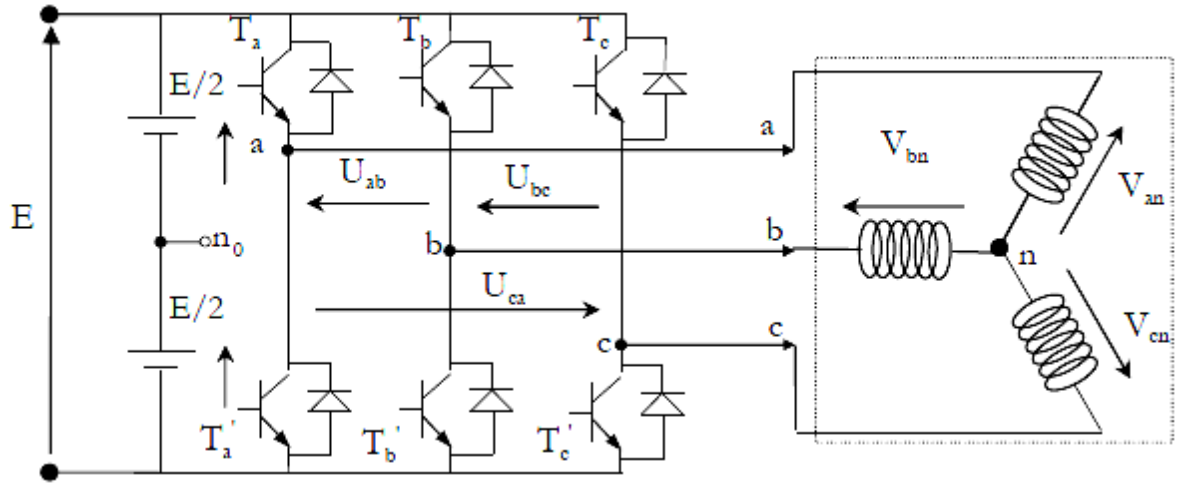


Figure 2.11. Schéma d'un onduleur de tension triphasé

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé n.

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques Si. On appelle T_i et T'_i les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux).On a :

- si Si=1, alors T_i est passant et T'_i est ouvert
- si Si=0, alors T_i est ouvert et T'_i est passant.

Les tensions composées (de lignes) délivrées par l'onduleur sont données comme suit :

$$U_{ab}=V_{an}-V_{bn}=(S_a-S_b) \quad (2.17)$$

$$U_{bc}=V_{bn}-V_{cn}=(S_b-S_c) \quad (2.18)$$

$$U_{ca}=V_{cn}-V_{an}=(S_c-S_a) \quad (2.19)$$

Les tensions V_{an}, V_{bn}, V_{cn} forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

$$V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0 \quad (2.20)$$

De (2.17), (2.19) et (2.20), on a :

$$V_{an}=\frac{E}{3}(2S_a-S_b-S_c) \quad (2.21)$$

De (2.17), (2.18) et (2.20), on a :

$$V_{bn}=\frac{E}{3}(2S_b-S_a-S_c) \qquad (2.22)$$

De (2.17), (2.19) et (2.20), on a :

$$V_{cn}=\frac{E}{3}(2S_c-S_a-S_b) \qquad (2.23)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} = \frac{E}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix}$$

2.2.3.2 Modulation de largeur d'impulsion Sinus-Triangle

Le principe général consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Cette technique repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Le premier, appelé signal de référence, représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commande des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs. Le forme du signale, généré par une commande MLI, dépend des deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence . $m=\frac{fp}{fref}$
- Le coefficient de réglage en tension « r » égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation . $r=\frac{Vref}{Vp}$

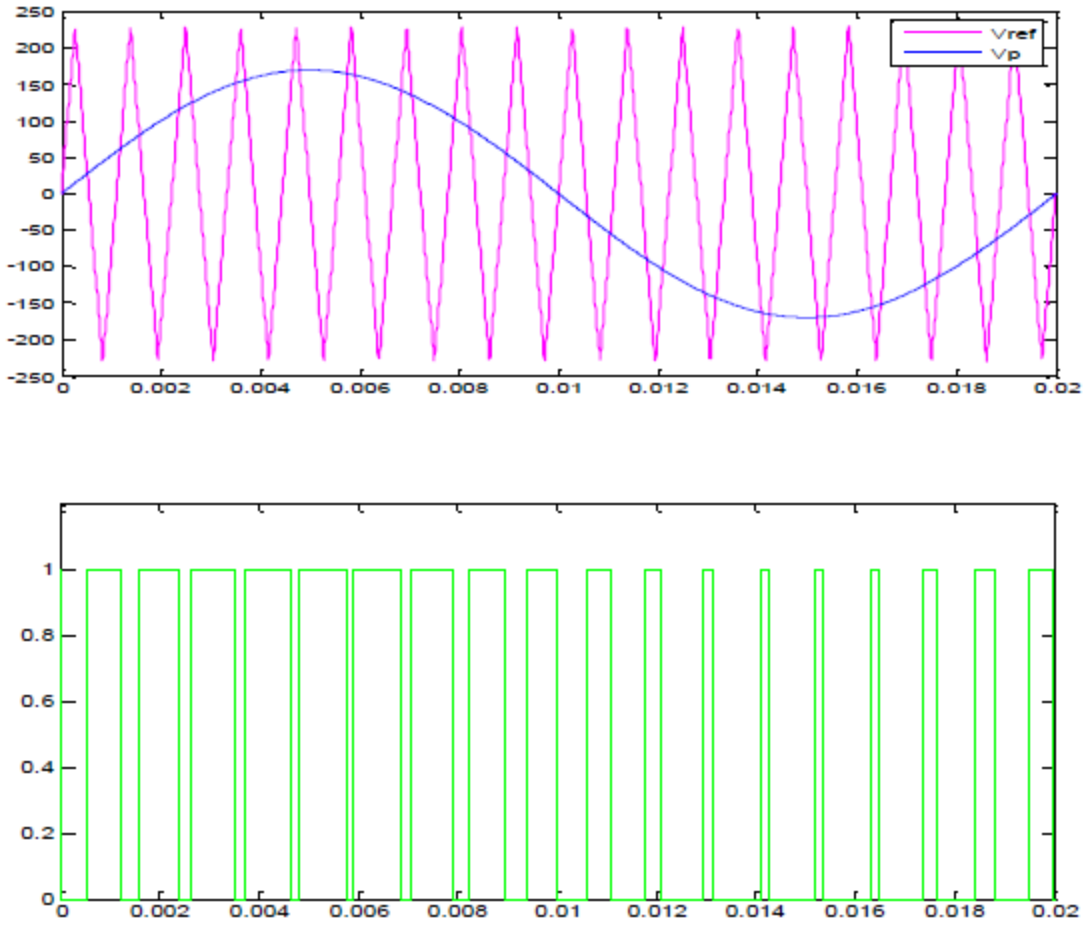


Figure 2.12. Génération des signaux de commande MLI sinus-triangle de l'onduleur.

2.3. Conclusion

Ce chapitre a fourni une description d'un modèle SST bidirectionnel à trois étages basé sur les blocs MMC. Un MMC triphasé avec des SM à demi- ponts est utilisée pour l'étage d'entrée MT. La liaison des SMs est une stratégie qui peut recevoir une commande pour mieux gérer la tension et la régulation. L'étage d'isolation MT/BT est divisé en trois parties: une MMC monophasée, une HFT et un convertisseur en pont Greatz monophasé. Les générateurs d'impulsions ont joué le rôle d'inversion d'alternance pour les deux convertisseurs MV et BT. Un transformateur HF est utilisé avec ses paramètres réel et sa fréquence choisi suivant le signal d'entrée. Finalement, Un Onduleur triphasé à quatre bras est utilisé pour l'étage de sortie BT. Une stratégie de MLI sinus-triangulaire est modélisée afin d'être utilisée pour la commande de l'onduleur dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Mise en œuvre du modèle du SST à trois étages dans l'environnement Matlab/Simulink

3.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est double: d'une part, il illustrera l'architecture du modèle SST mis en œuvre dans l'environnement Matlab/Simulink; D'autre part, mieux comprendre la conception et le fonctionnement de la configuration sélectionnée pour ce mémoire. Le chapitre fournit un résumé du modèle développé en montrant les blocs principaux de chaque étape de la SST.

3.2. Modélisation et simulation du SST dans l'environnement Matlab/Simulink

La figure (3.1) illustre la mise en œuvre Matlab / Simulink de niveau supérieur du modèle SST à trois niveaux. Les principales caractéristiques de chaque étape ont déjà été analysées dans les chapitres précédents; un bref résumé est fourni ci-dessous:

- Etage d'entrée MV (moyenne tension): une MMC triphasée (redresseur triphasé commandé double alternance en pont tout transistors
- Etape d'isolation: DAB "Dual Active Bridge"(double pont actif) CC / CC contenant une MMC monophasée, un HFT et un pont redresseur pont complet monophasé ainsi que la stratégie de contrôle associée.
- Etape de sortie BT (basse tension): Convertisseur PWM triphasé à quatre bras.

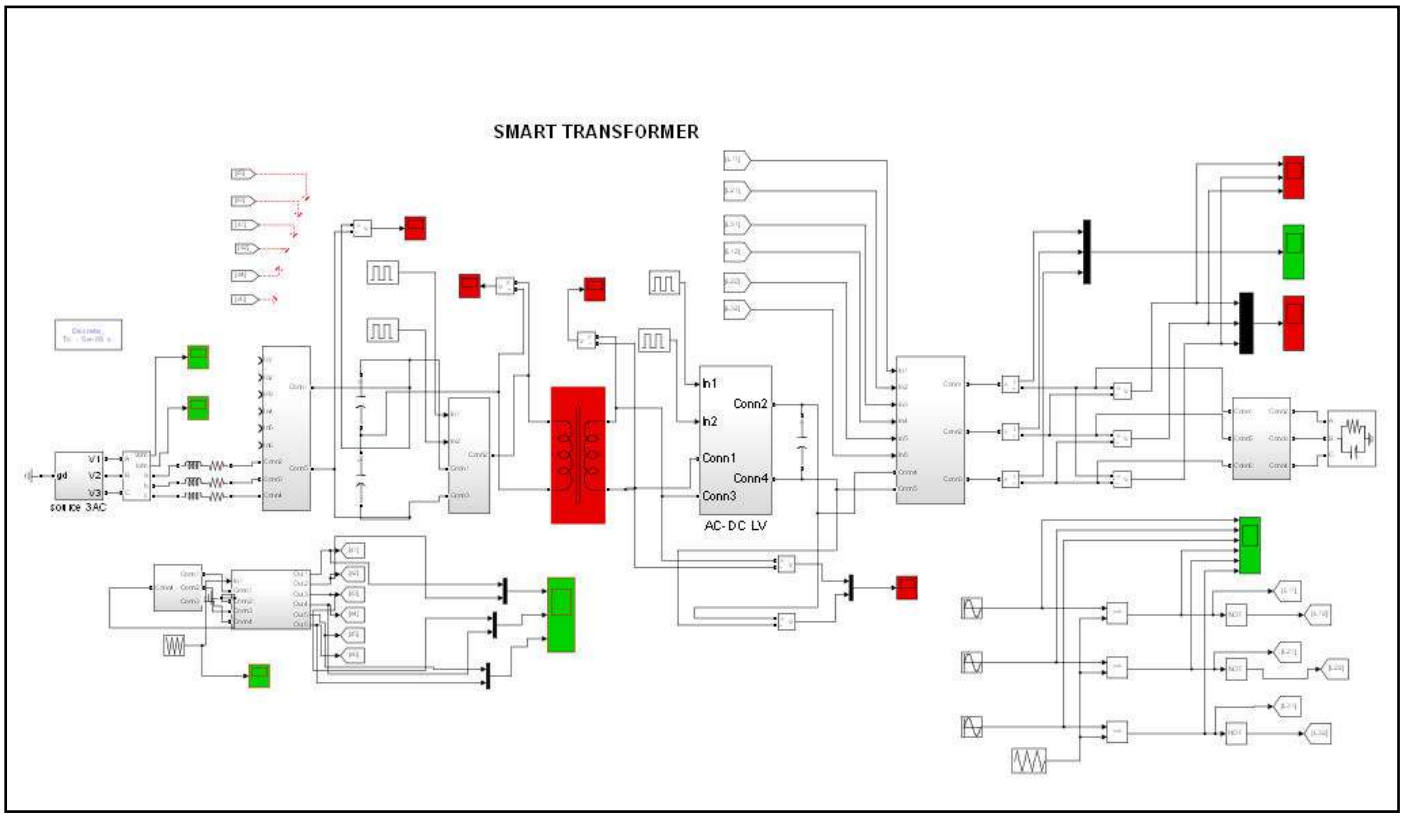


Figure 3.1. Implémentation Matlab / Simulink du modèle SST en trois étages.

La mise en œuvre de chaque étage est détaillée dans les trois sections suivantes, Chaque section présente le schéma des convertisseurs de puissance utilisés.

3.2.1. la mise en œuvre de l'étage d'entrée MV

La Source d'entrée est un système triphasé équilibré standard avec une fréquence de 50Hz, en série ave impédance (R-L) (Fig. 3.2). L'impédance RL est considérée comme filtre de la ligne

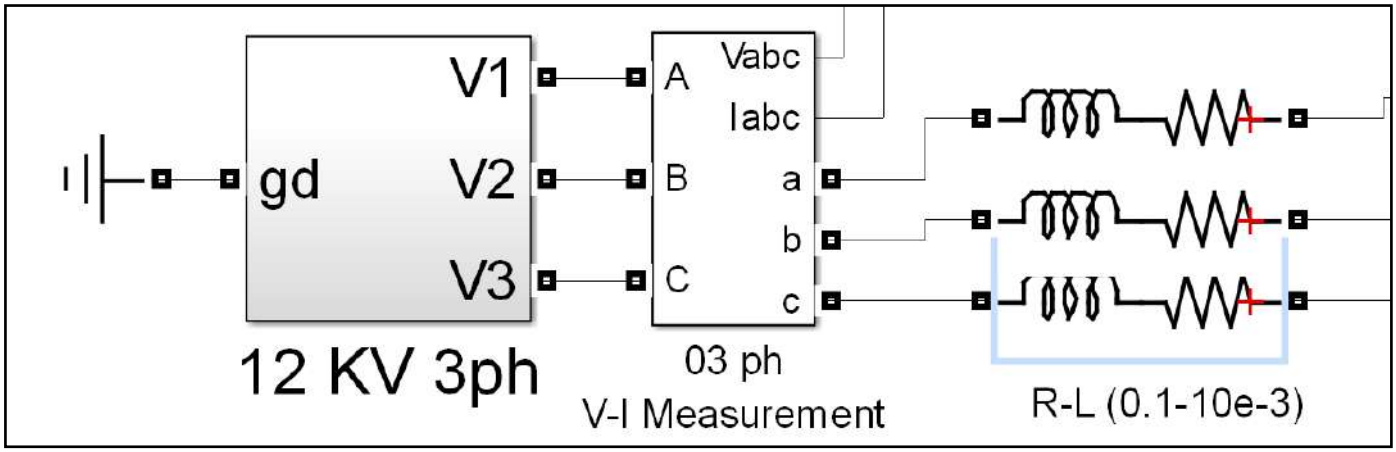


Figure 3.2.Étage d'entrée configuration source 3ph.

Le modèle MMC triphasé de l'étage d'entrée MT comporte six SM à demi- pont par bras, en raison de (12) IGBT pour chaque phase. Le schéma de chaque sous-module (SM) est décrit dans la Figure (3.3). La mise en œuvre de l'étage d'entrée, dans Matlab / Simulink, est présenté sur la figure (3.4).

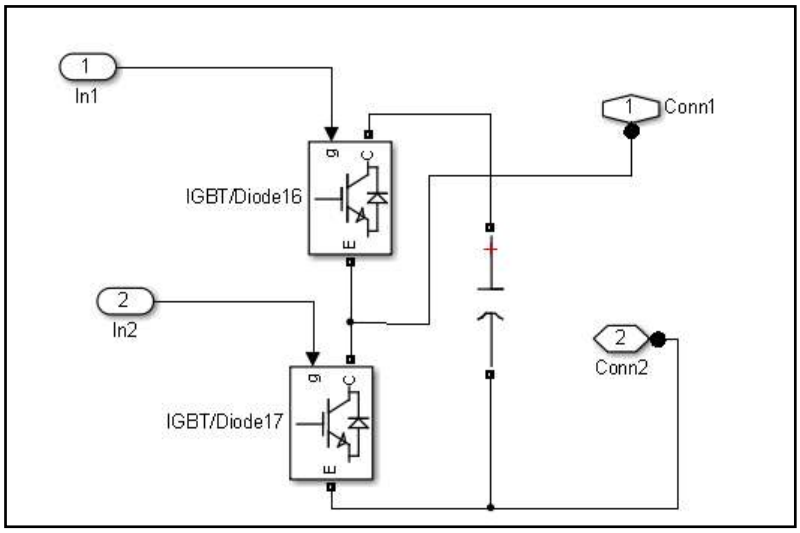


Figure 3.3. Etage d'entrée - Configuration des sous-modules de demi- pont (SM).

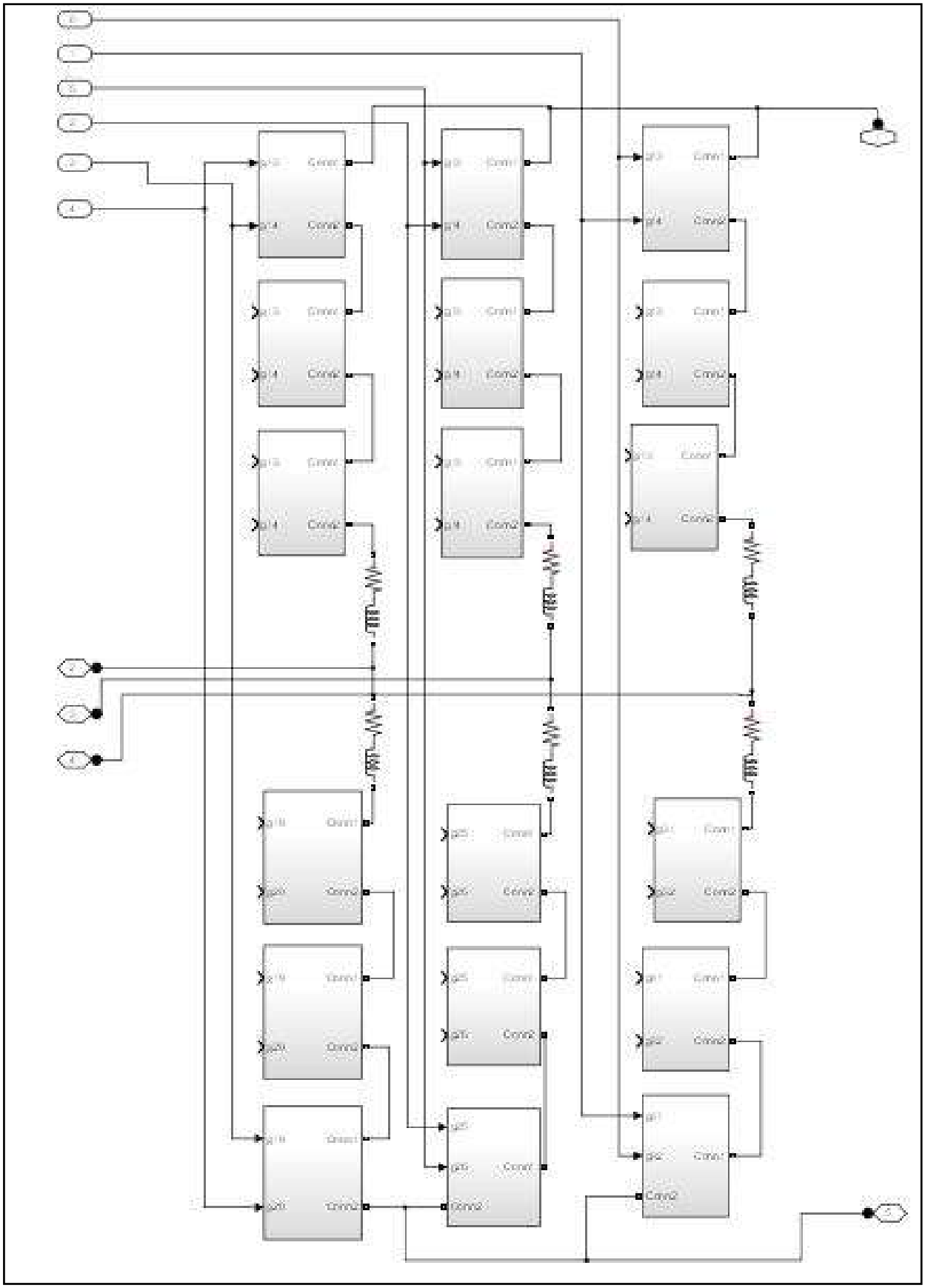


Figure 3.4. Étage d'entrée - Configuration MMC triphasée.

3.2.2. Mise en œuvre de l'étage d'isolement MV-LV

3.2.2.1. MMC monophasé MV

Comme nous l'avons déjà mentionné, au chapitre précédent, l'étage d'isolation SST se compose de trois parties différentes: MMC monophasé, HFT et un pont redresseur monophasé.

La figure (3.5) illustre la configuration de la console MMC monophasée: elle est composée de deux bras avec six sous-modules en demi- pont et d'une impédance de bras jouant le rôle d'inverseur convertissant la liaison en tension continue en une forme d'onde haute fréquence à plusieurs niveaux au primaire du transformateur haute fréquence.

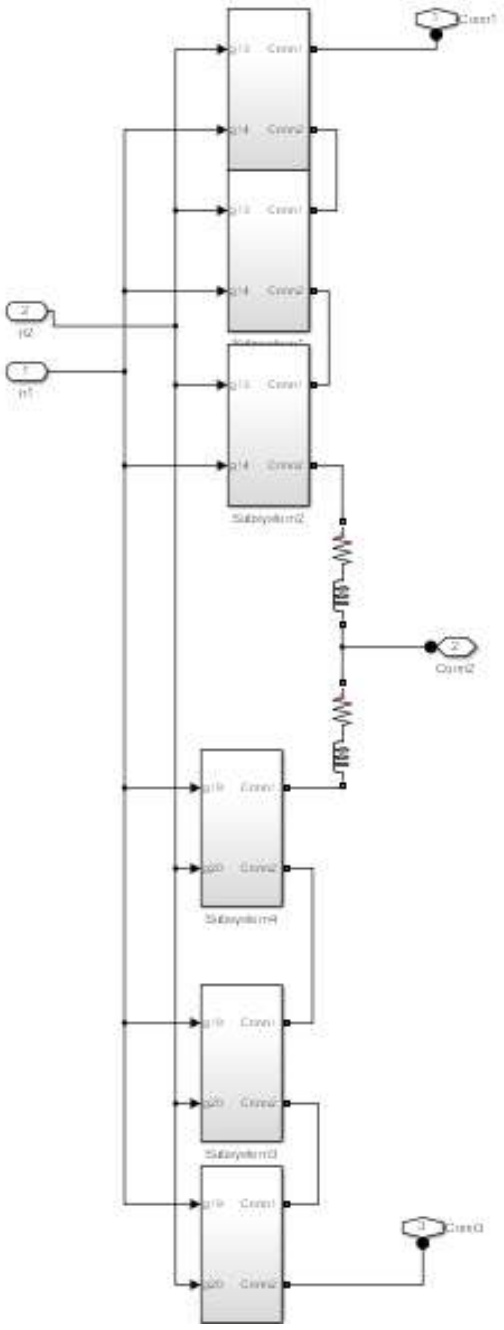


Figure 3.5. Etage d'isolement - Mise en œuvre de la console MMC monophasée MV.

3.2.2.2. Conception de transformateur Haute Fréquence sur SIMULINK

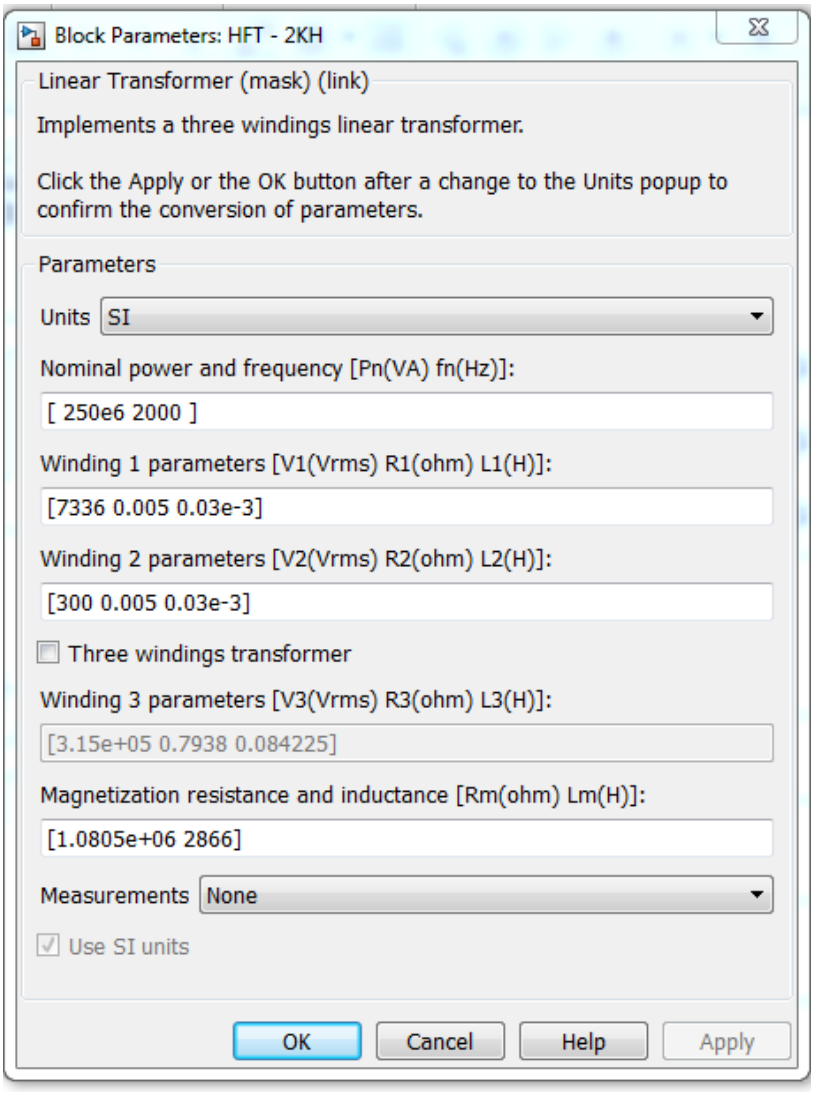


figure 3.6. paramètres de HFT

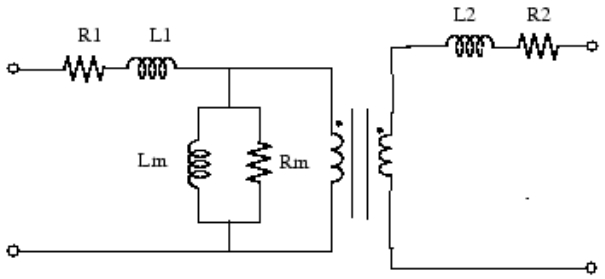


figure 3.7. Transformateur linéaire modèle sur simulink

Le modèle prend en compte les résistances d'enroulement (R_1 R_2) et les inductances de fuite (L_1 L_2), ainsi que les caractéristiques magnétiques du noyau, modélisées par une branche linéaire (R_m L_m).

.

3.2.2.3. Pont redresseur monophasé LV

La figure 3.8 illustre la configuration du redresseur monophasé, de son filtre (C_2) et de ses blocs de commande Générateur d'impulsons. La procédure de contrôle pour cette console MMC monophasée est basé sur les générateurs d'impulsion sois pour le convertisseur MV ou LV.

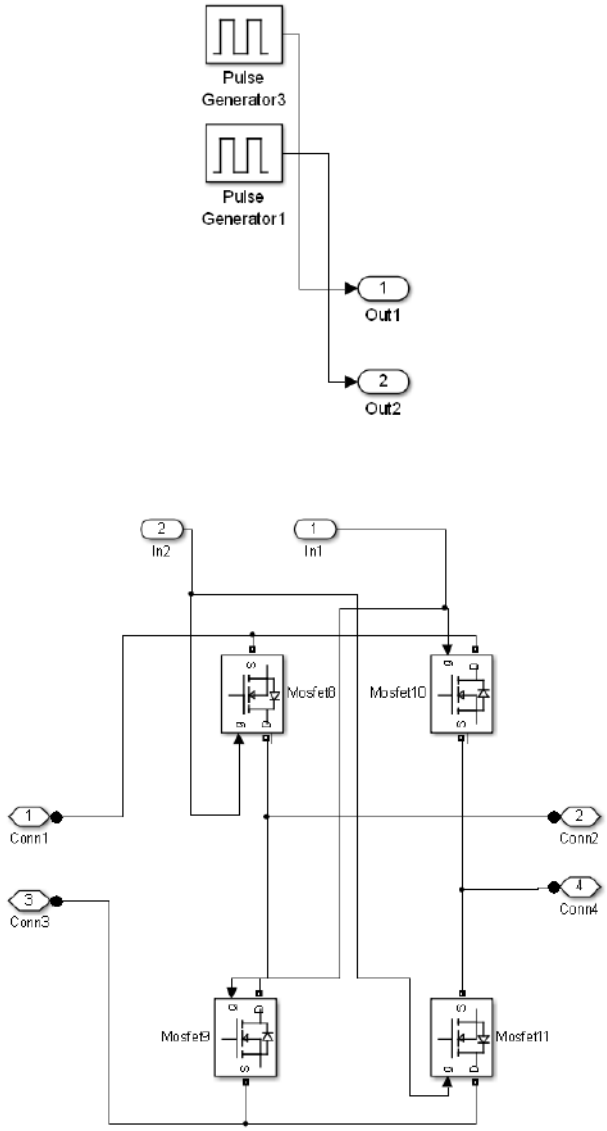


Figure 3.8. Etage d'isolement - Configuration de la commande Convertisseurs monophasé MV et LV

3.2.3. la mise en œuvre de l'étage de sortie BT

La figure 3.9 montre la configuration de l'étage BT tel qu'implémenté dans ce mémoire: il s'agit d'un Onduleur triphasé en double alternance en pont tout transistors, avec commande MLI sinus-triangulaire à trois bras.

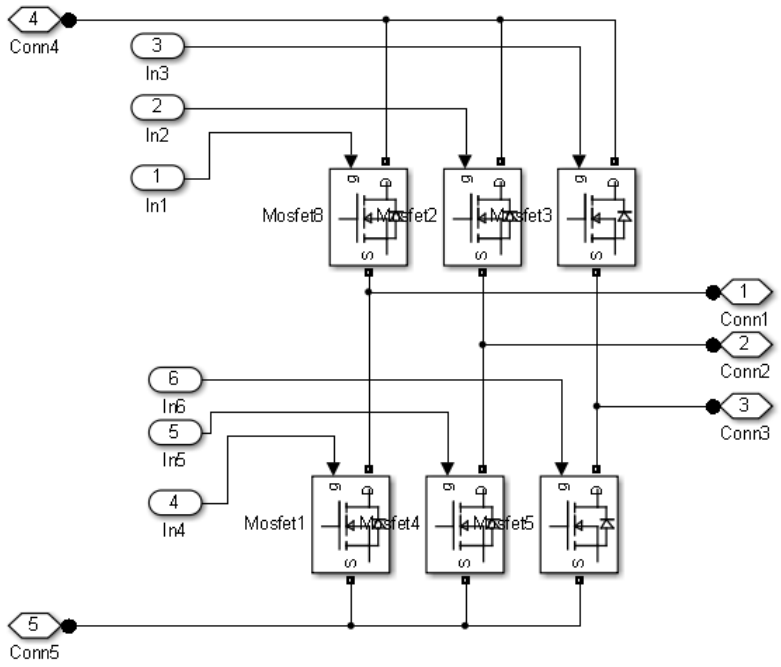


Figure 3.9. Topologie d'Onduleur MLI triphasé.

3.3. Résultats de la simulation

Tous les tests ont été simulés en supposant que les pertes dans les semi-conducteurs sont négligées, les classements des semi-conducteurs ne sont donc pas pertinents pour cette étude. La simulation est testée pour un délais de 30s pour atteindre la stabilité des signaux. Le régime transitoire est non pris en charge dans cette étude, Le tableau (3.1) résume les paramètres utilisés au cours de la simulation pour les différents composants du système étudié [37].

Tableau 3.1 : paramètres utilisés	
Paramètres	**Valeurs**
Tension réseau (tension composé)	12 kV
Résistance du filtre côté réseau (R1)	0.1 Ω
Inductance du filtre côté grille (L1)	10 mH
Nombre de SM par bras MMC	06
Capacité SM en MMC1 et MMC2	0,4 mF
Résistance du bras de MMC1	0.2 Ω
Inductance du bras de MMC1	5 mH
MMC1 fréquence de commutation	10 kHz

Capacité de liaison cc côté MT	1 mF
Résistance au bras de MMC2	0.001
Inductance du bras de MMC2	0.1 mH
Fréquence de commutation du convertisseur en pont complet MT MMC2 et BT	10 kHz
Fréquence de fonctionnement du transformateur	1 kHz
Résistance de court-circuit du transformateur	0,005 Ω
Inductance de fuite du transformateur	0,03 mH
Capacité de liaison CC côté courant	3 mF
Fréquence de commutation du convertisseur côté BT	10 kHz
Résistance du filtre côté charge (R2)	0.01 Ω
Inductance du filtre côté charge (L2)	0,9 mH
Capacité de filtrage côté charge (C2)	200 µF
Charge	1kw (0.5 kvar)

La tension d'entrée du SST est de valeur 12kV entre Phases et de 50 hz est considérée comme sinusoïdale sans fluctuations (Fig. 3.10). Le courant de ligne est dépendant de la charge ainsi les convertisseurs en aval qui sont considérés comme des impédances de différents types et il est de valeur très faible vue la tension élevée de la source (Fig. 3.11).

Le rôle de redresseur triphasé et de redressé la tension sinusoïdal appliqué à l'entrée du SST, les capacités intégrés et le filtre en parallèle ont aidé a bien redressé la tension (Fig. 3.12). Etant donné que le système fonctionne en boucle ouverte et, vu qu'aucune commande n'est utilisée, les blocs MMC sont commandés en plaine onde. Le système des capacités ingérées joue le rôle de liaison entre IGBTs et pour le passage des courants.

Le rôle de convertisseur DC-AC est de convertir la tension continue à la sortie du redresseur MV et le filtre en une tension alternatif sous la forme d'un signale carré d'une fréquence élevée appropriée (dans notre cas 2 kHz), figure (3.13). Pour la commande des gâchettes des IGBT, des générateurs d'impulsions ont été utilisés.

Le transformateur à haute fréquence reçoit la tension désiré de moyen tension a son entrée comme un signal de forme carré a 2000Hz et la convertie en un signal de même forme et d'amplitude abaissé

(Fig.3.14). La valeur de la tension dépend des exigences des charges connectées aux SST (coté basse tension).

Le convertisseur AC-DC, coté basse tension, convertie le signal carré généré par le transformateur HF d'amplitude BT et de fréquence 2000 Hz en un signale continu (3.15).

L'onduleur MLI menu d'une commande sinus-triangle reçoit au départ un signale continu et il l'a convertie en signale sinusoïdale d'une fréquence standard (50 Hz) pour alimenter les charge connecté au système. La commande de MLI utilise comme paramètres :

- L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence , m=$\frac{fp}{fref}$, pour notre cas on a pris : m=$\frac{2000}{50}$=40
- Le coefficient d'amplitude de la tension, égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation, r= $\frac{Vref}{Vp}$= $\frac{4.5}{5}$ est pris comme : r=0.9

Les différents signaux, délivrés par l'onduleur, sont rapportés les figures (3.16-3-20), où on constate l'équilibrage dans le système triphasé à la sortie de l'onduleur.

Il est à noter que l'un des avantages principaux d'un SST est la possibilité d'alimenter des charges nécessitant des tensions continues telles que les lampes LED, les moteurs CC, etc. Dans ce cas, la sortie du redresseur, coté basse tension, est utilisée pour ces charge.

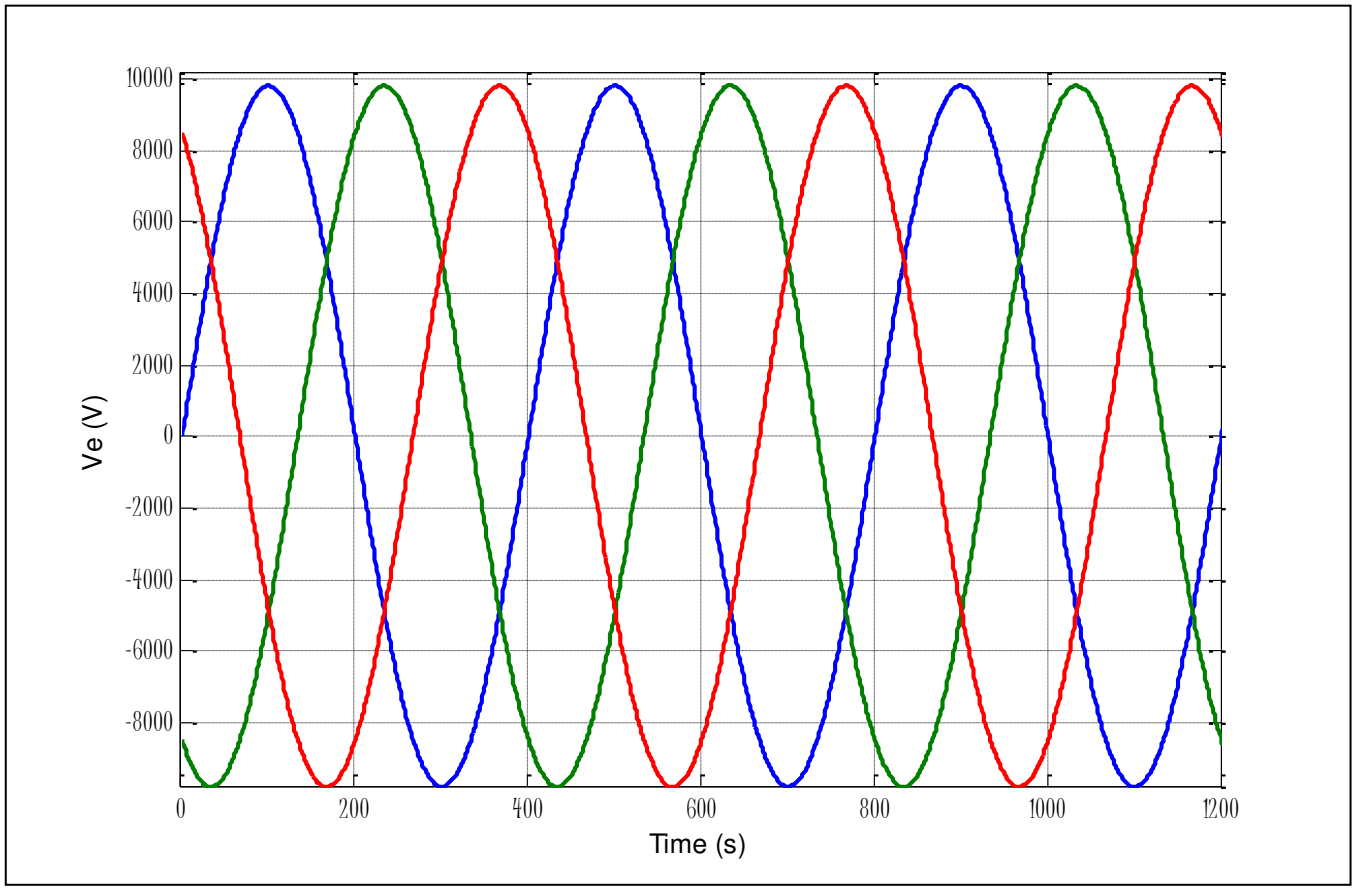


Figure 3.10 . Tension source alternatif (alimentation SST)

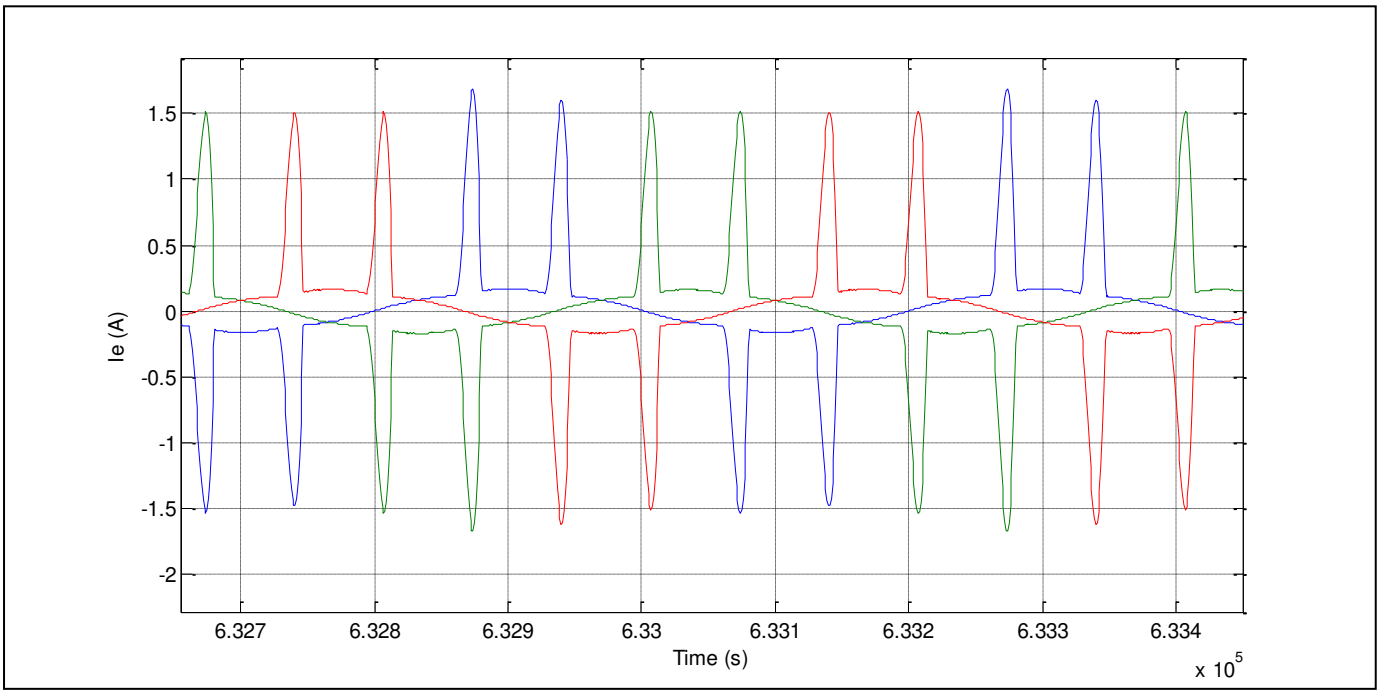


Figure 3.11. Courant source alternatif (alimentation SST)

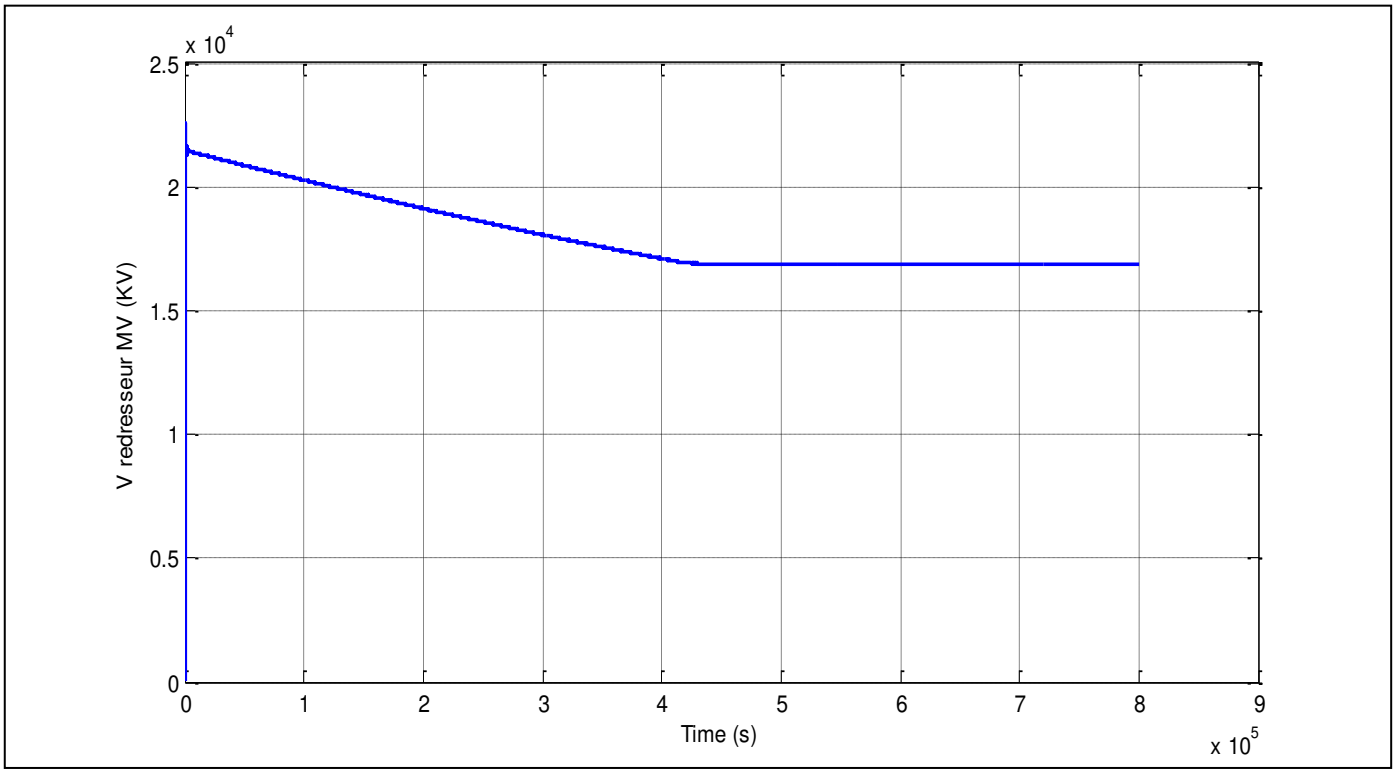


Figure 3.12. Tension a la sortie de Redresseur 3ph MV.

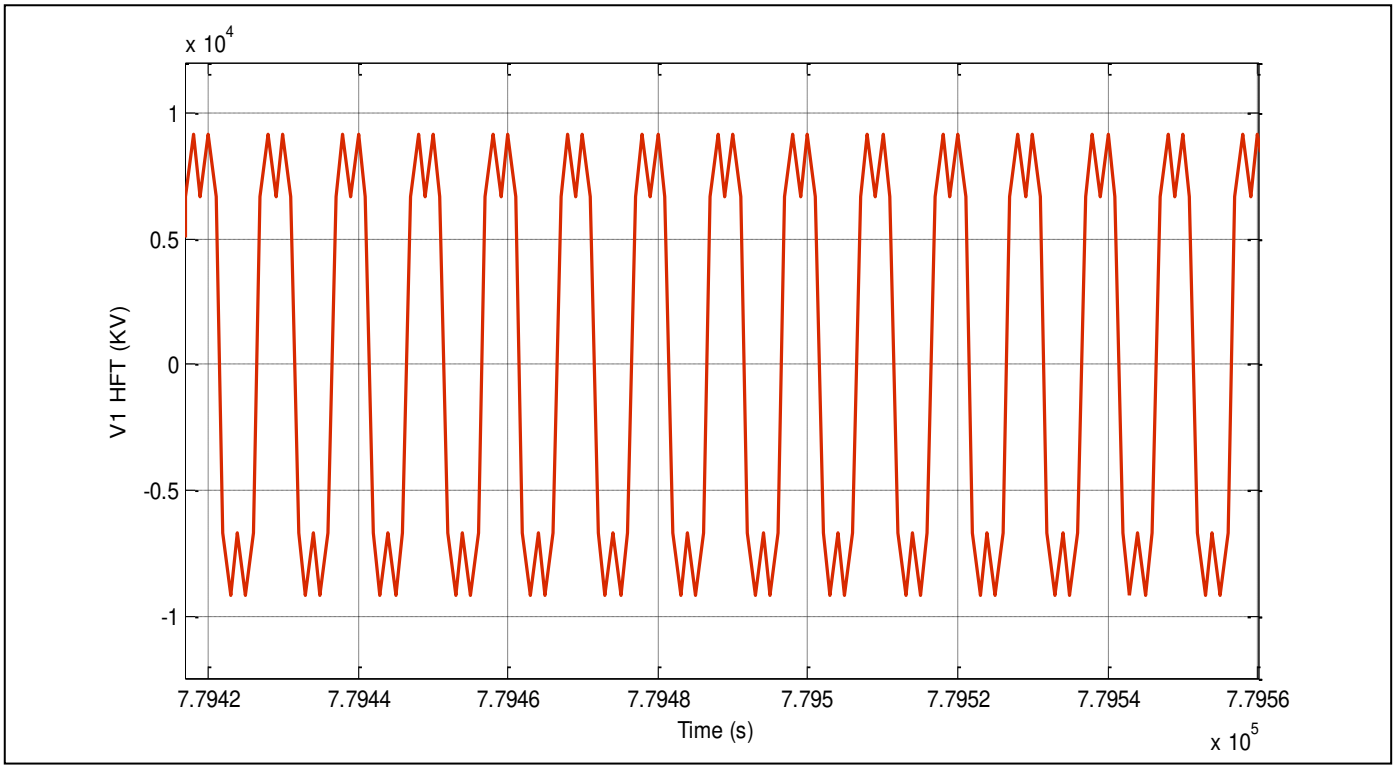


Figure 3.13. Tension à L'entrée de HFT.

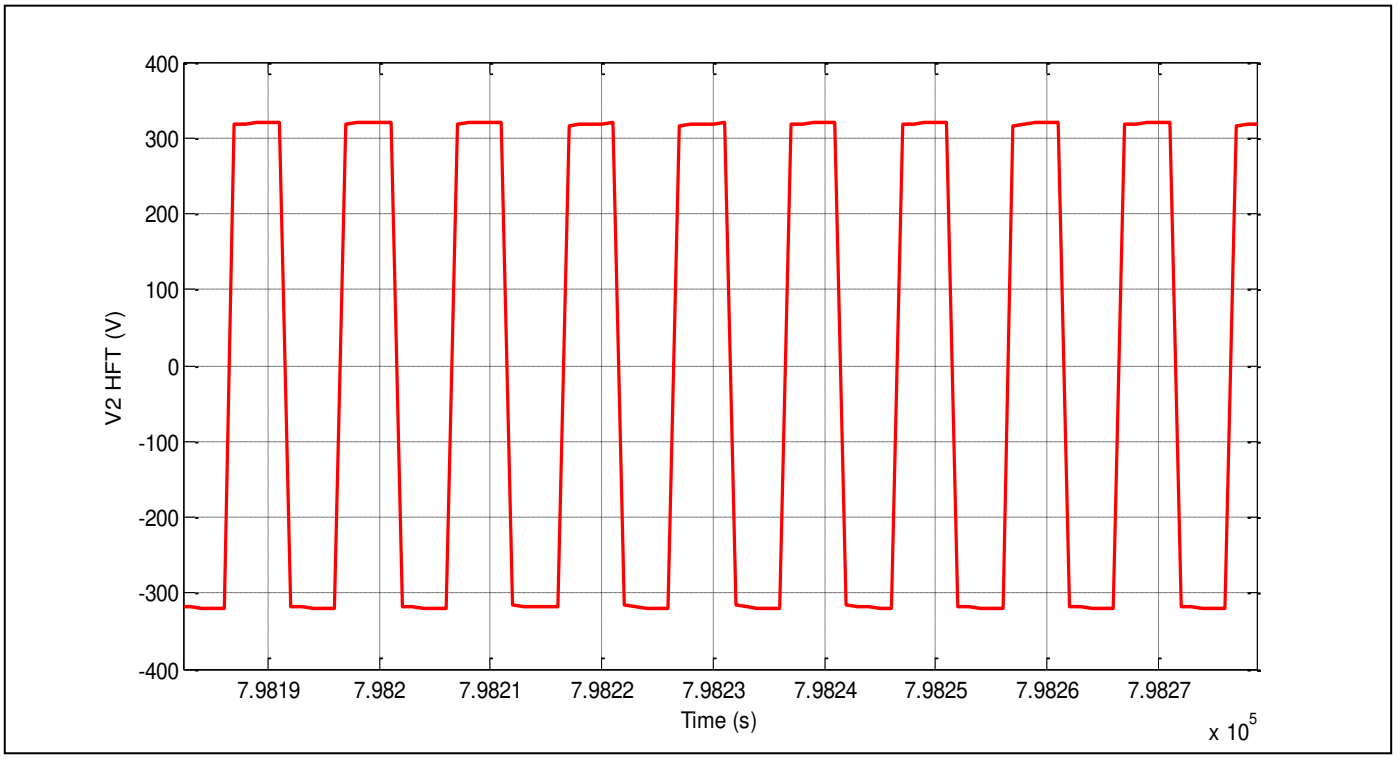


Figure 3.14. Tension à la sortie de HFT.

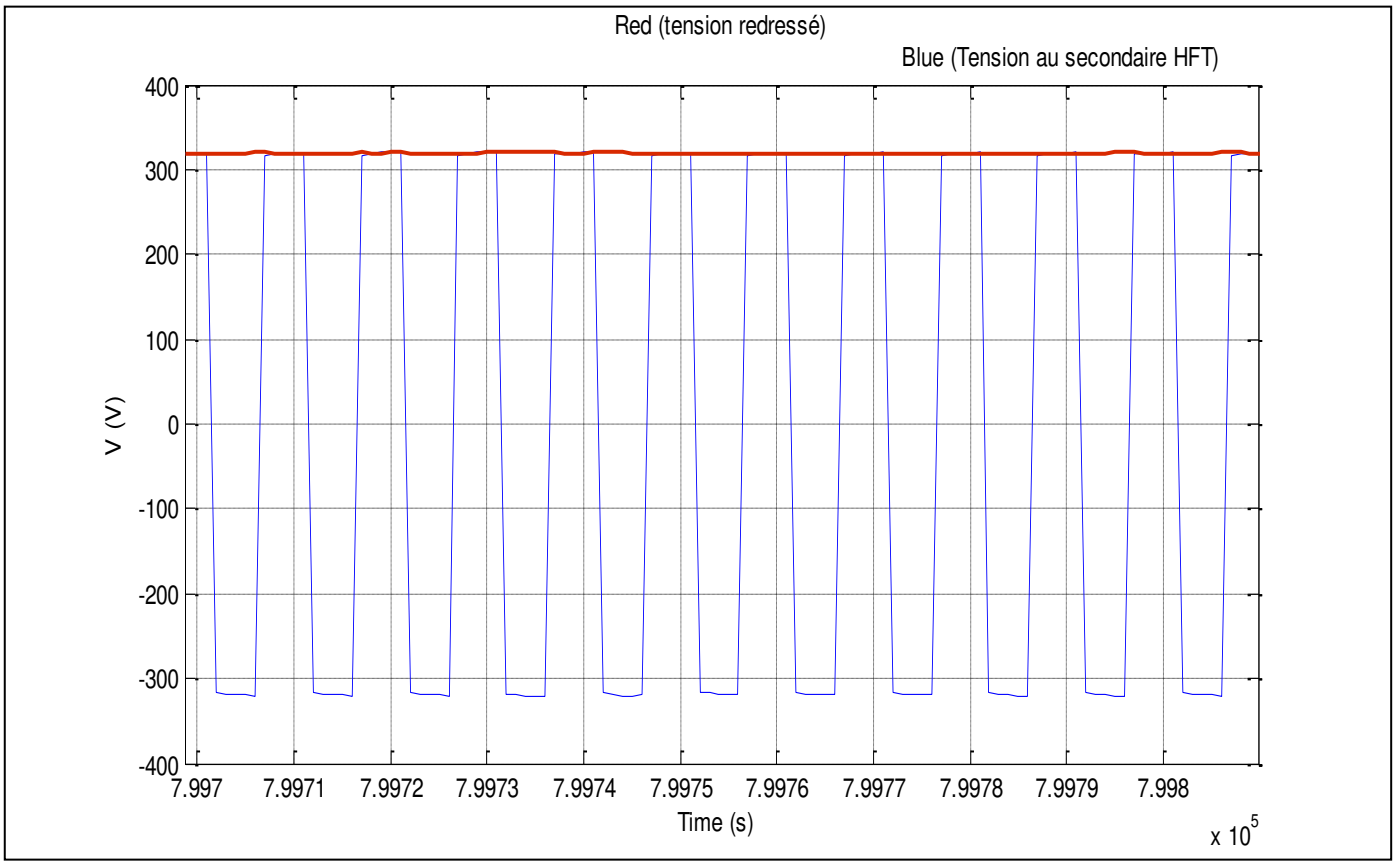


Figure 3.15. Tension carré a La sortie de HFT et tension continu a la sortie de redresseur BT avec filtrage.

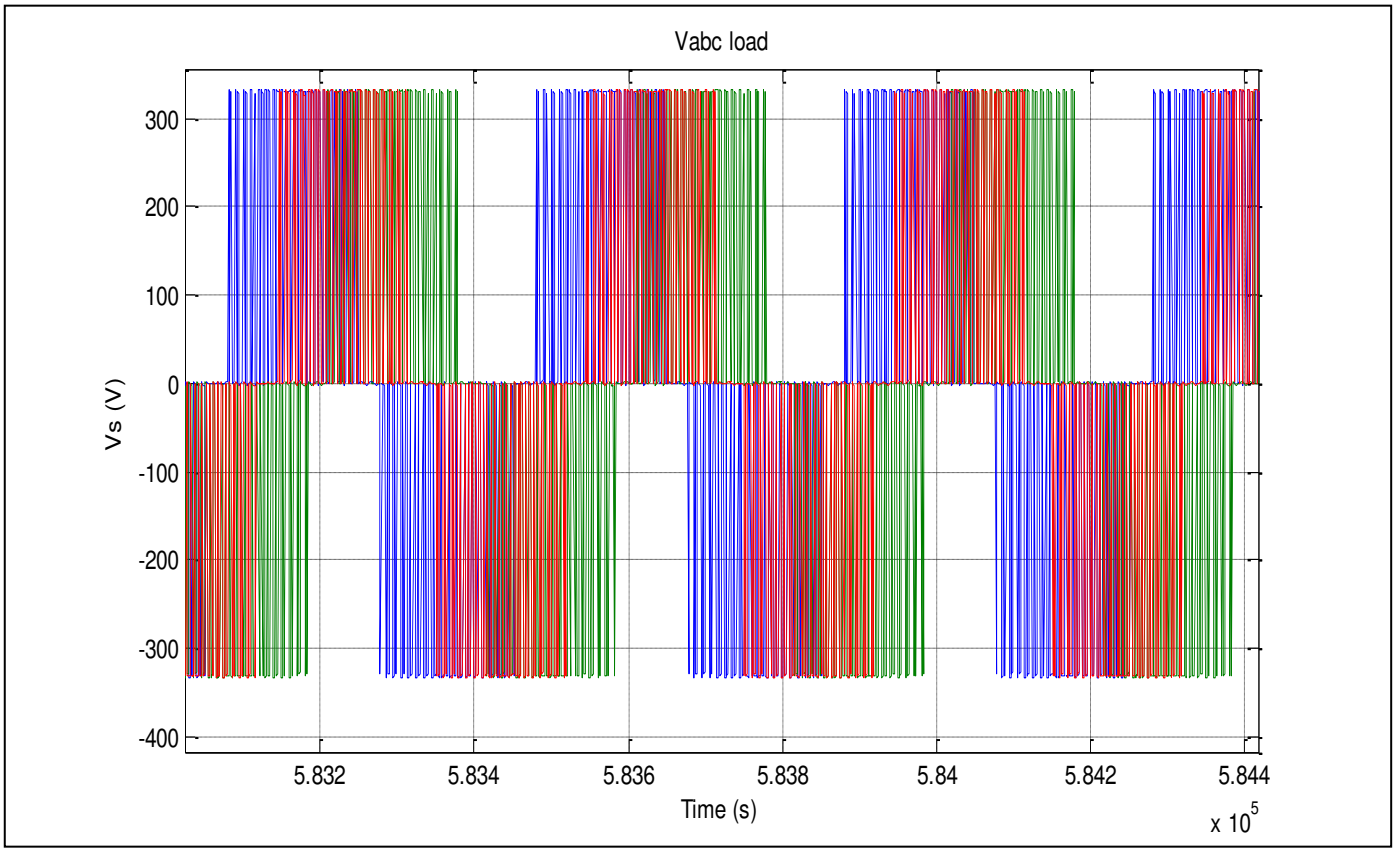


Figure 3.16. Tension à La sortie de l'onduleur MLI triphasé.

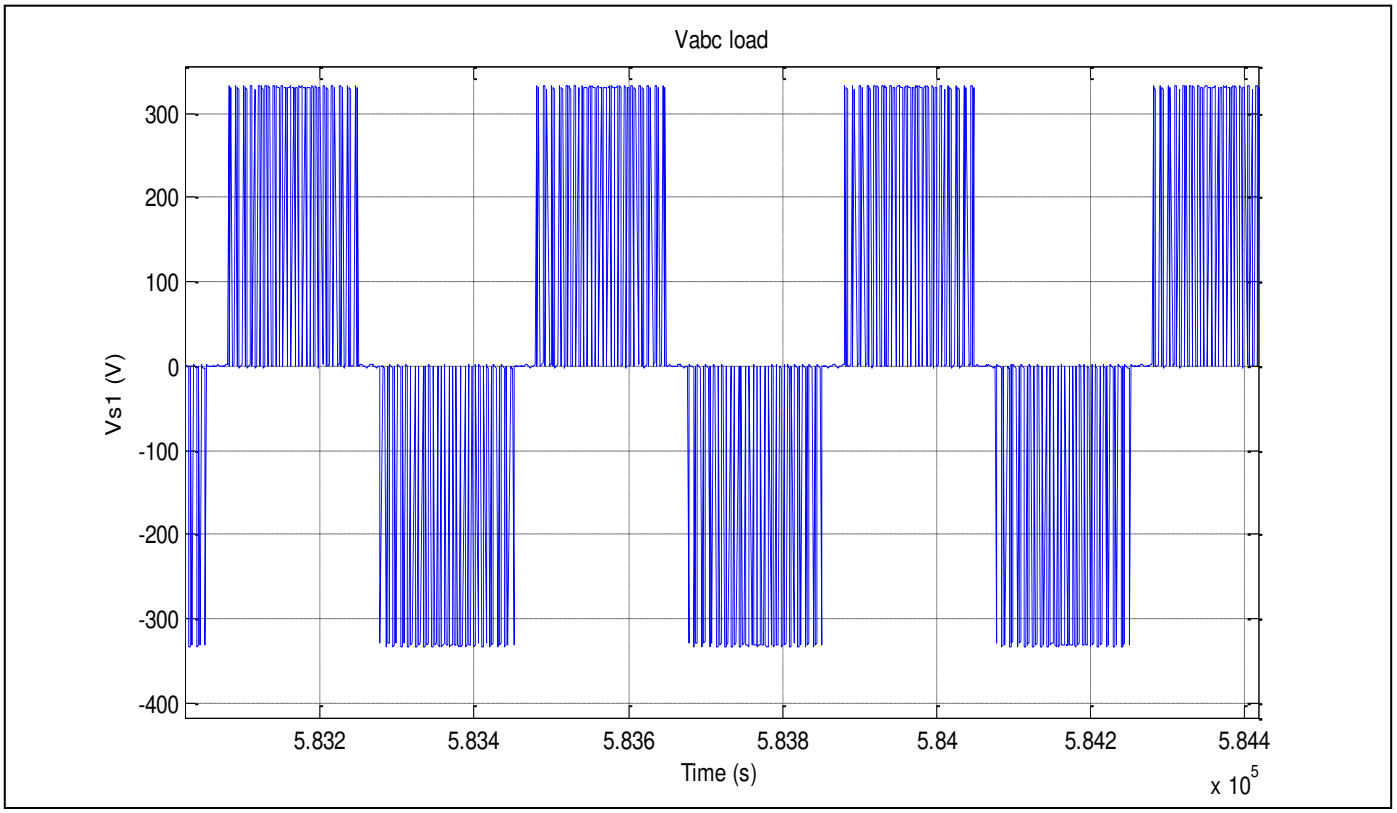


Figure 3.17. Tension à La sortie de l'onduleur MLI (phase A).

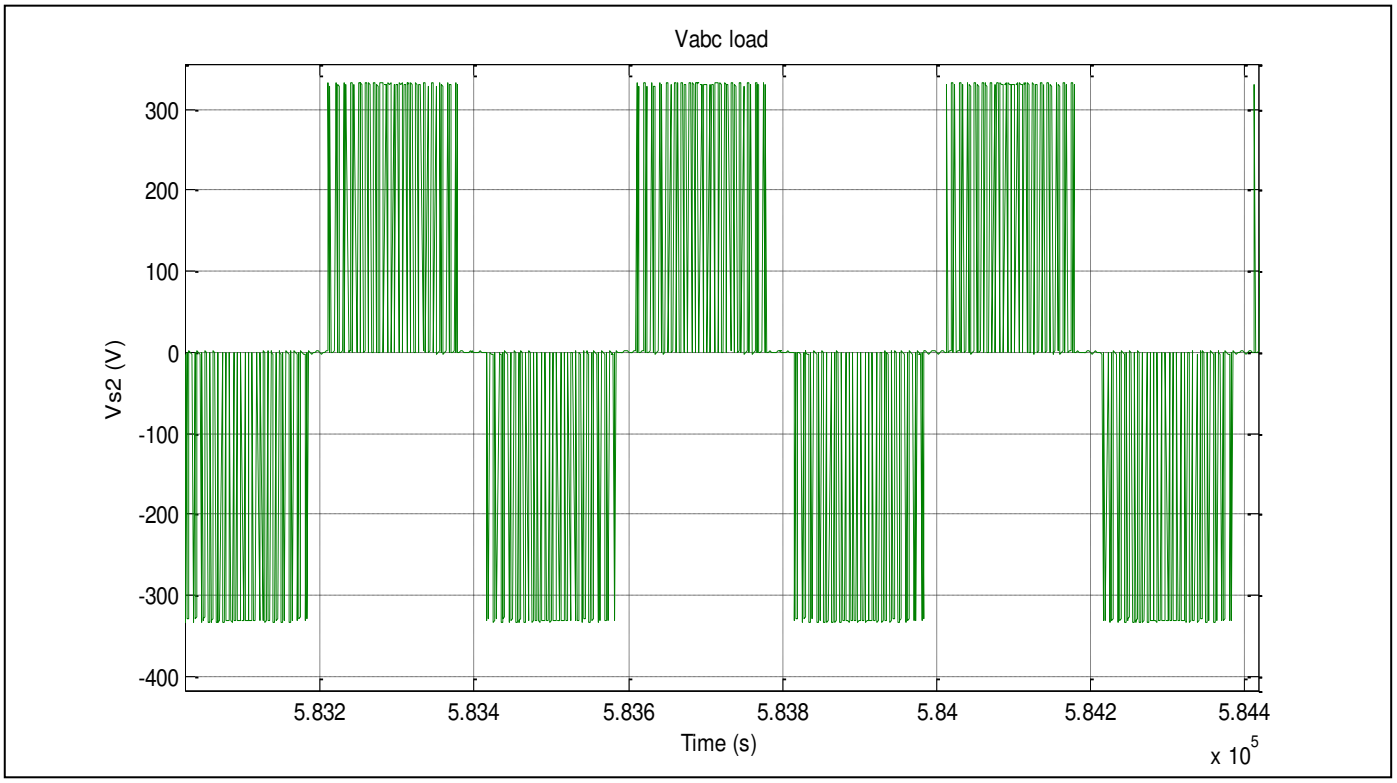


Figure 3.18. Tension à La sortie de l'onduleur MLI (phase B).

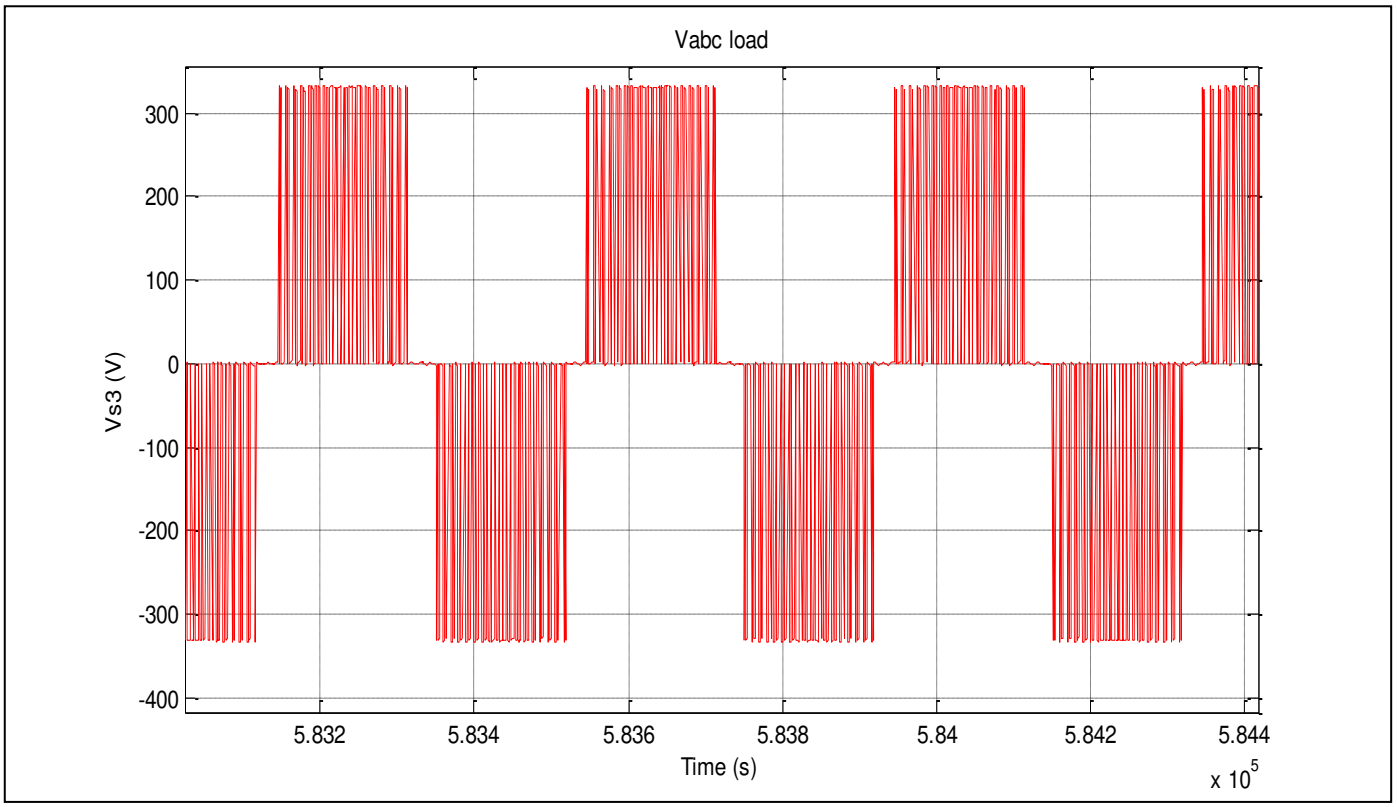


Figure 3.19. Tension à La sortie de l'onduleur MLI (phase C).

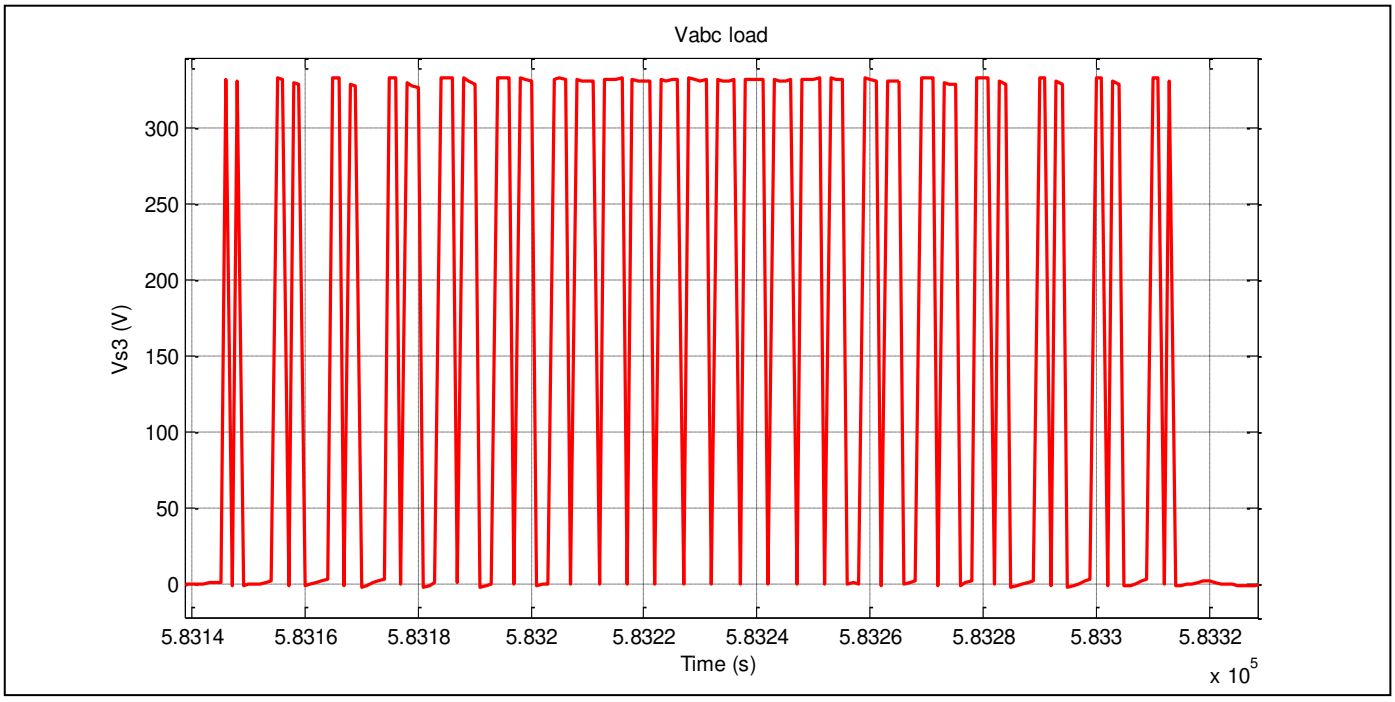


Figure 3.20. Tension à la sortie de l'onduleur MLI (phase C– avec zoom).

3.4. Commande d'un SST en boucle fermée : Principe

les aspects de contrôle du SST dépendent du type de réseau auquel il est interfacé, On trouve un réseau de production, réseau distribution ou à un réseau d'interconnexion.

3.4.1. Objectifs de la commande :

1) Fournir au réseau LVAC une source de tension stable, dont la tension et la fréquence doivent être maintenues constantes dans certaines tolérances, quelles que soient les variations de charge. Ceci peut être réalisé en contrôlant l'étage de l'onduleur comme un onduleur formant un réseau.

2) Soutenir les réseaux MVAC et LVAC avec la puissance réactive requise. Ceci peut être réalisé en incorporant la commande d-q ou la commande P-Q dans l'étage de redressement à plusieurs niveaux et l'étage d'inverseur.

3) Les perturbations telles que les courants harmoniques, l'affaissement de la tension et la houle résultant de variations brusques de la charge du côté LVAC ne doivent pas être réfléchies du côté du MVAC.

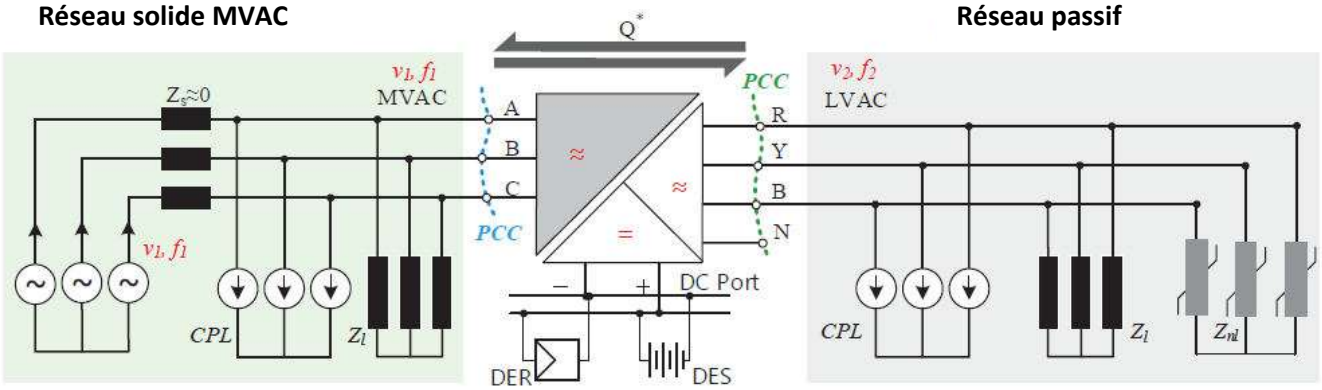


Figure 3.21 : SST interfaçant une réseau rigide avec un réseau passif.

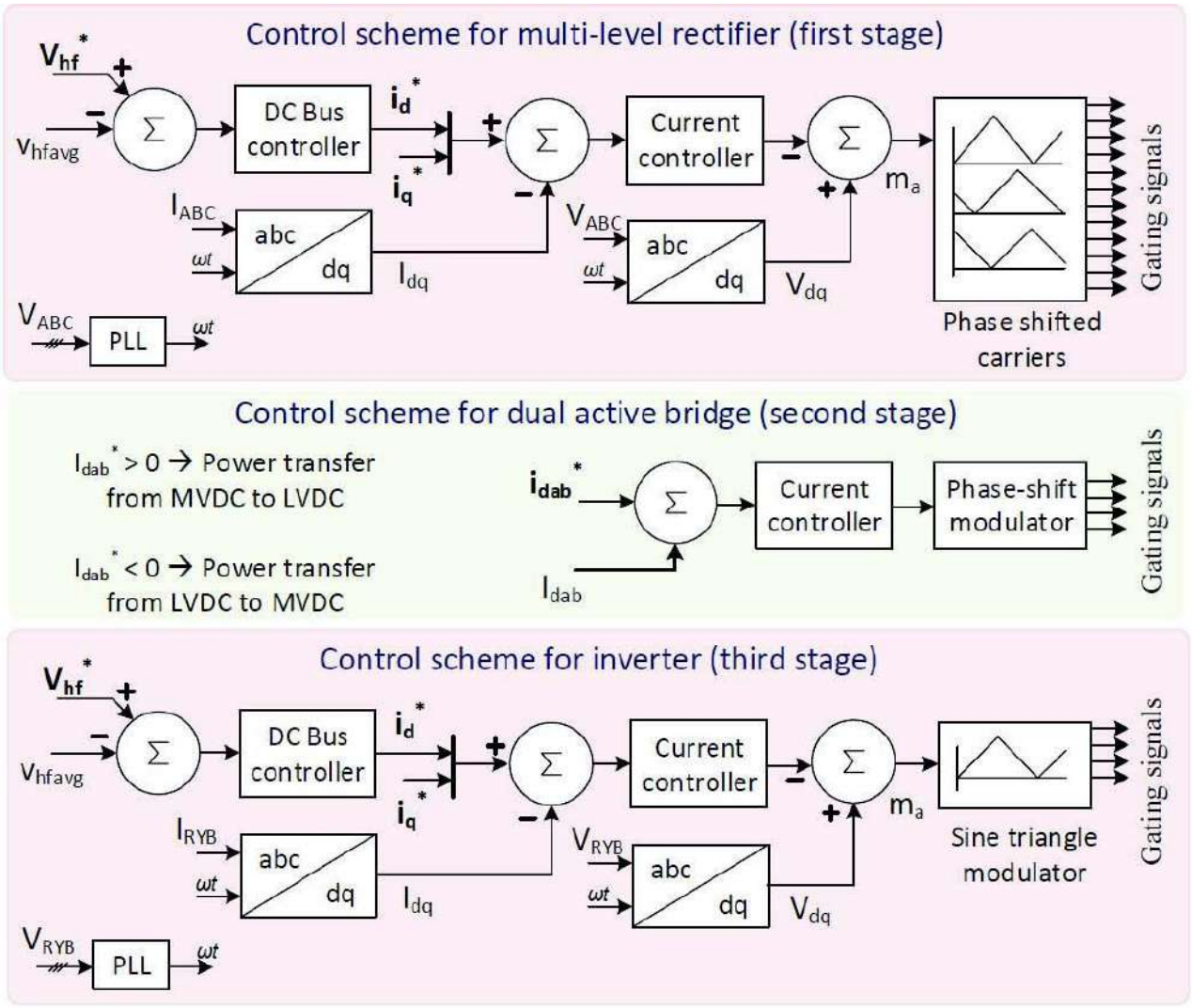


Figure 3.22 : Schémas de control pour les trois étages SST.

Les objectifs de contrôle sont clairs lorsque le SST est interfacé entre deux réseaux, c'est-à-dire :

- une commande d-q au premier étage régule le bus MVDC et contrôle le flux de puissance réactive vers le réseau MVAC
- Une commande d-q / P-Q dans le troisième étage régule la tension du bus LVDC et contrôle le flux de puissance réactive acheminé vers le réseau LVAC
- Un contrôleur de courant dans l'étage DAB peut contrôler le flux d'énergie entre le bus MVDC et le bus LVDC.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, les différents étages du SST ont été modélisés est simulés en utilisant l'environnement Matlab/Simulink. Observant les résultats de simulation obtenus, on constate bien que les résultats envisagés sont atteints concernant la conception d'un transformateur triphasé à base de semi-conducteurs qui peut imiter le fonctionnement d'un transformateur classique. La forme et le fonctionnement du transformateur résultant sont souple est commandable. Dans ce stage et, comme premier pas, le comportement du transformateur a été étudié et simulé en boucle ouverte. L'étude effectuée permet d'étendre les perspectifs vers une exploitation efficace et pratique en assurant des commandes en boucle fermée pour les différents étages du transformateur. Cette extension permettra d'atteindre pleinement d'objectifs tels que :

- L'amélioration du comportement du transformateur
- L'intégration souple et efficace des ressources renouvelables dans le système électrique
- L'amélioration de la transaction d'énergie entre différentes sources
- Le filtrage des harmoniques
- L'amélioration du facteur de puissance.

Conclusion Générale

Avec la diversité des sources d'énergie électrique qui a été évoluée avec le temps, ainsi les exigences spécifique des clients et la complexité du système électrique, une gestion intelligente est devenu une nécessité pour remédier au défis. Dans ce contexte le présent travail a donné un aperçu sur le solide state transformateur (SST), qui se présente comme l'une des solution principale pour la gestion intelligente du système électrique

En premier lieu, L'étude a illustrée le concept de transformateur à semi-conducteurs en tant que convertisseur isolé, bénéficiant d'une combinaison de convertisseurs électroniques de puissance et de transformateurs haute fréquence. La conception haute fréquence du transformateur réduit considérablement la taille et le poids du transformateur par rapport aux transformateurs classiques

En deuxième lieu, des descriptions mathématique et schématique des modules constituants Le SST ont été données. Ces descriptions ont permets d'extraire des modèles de simulation pour les différentes étages du SST. en utilisant l'environnement Matlab/Simulink, les différentes fonctionnalités du transformateur ont été simulés en boucle ouverte.

La présente étude a illustrée l'importance des transformateurs électroniques intelligents dans la gestion des réseaux électriques et permet de tracer comme perspectifs, pour la continuité de ce travail:

- Etablir la commande en boucle fermée du SST en considérant ses conditions d'utilisation
- Etablir une étude pour intégrer différentes sources d'énergie avec un seule SST
- Réalisation d'un prototype du SST.

Références / bibliographies

[1]. 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,

[2] International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJIET)
http://dx.doi.org/10.21172/ijiet.83.027
!!Design of Solid State Transformer.pdf

[3] N. Hadjsaïd and J. C. Sabonnadière (Eds.), Smart Grids, John Wiley-ISTE, London (UK) – Hoboken (NJ, USA), 2012.

[4] J. Momoh, Smart Grid. Fundamentals of Design and Analysis, John Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, USA, 2012.

[5] S. Bifaretti, P. Zanchetta, A. Watson, L. Tarisciotti, and J. C. Clare, "Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 2, no. 2, pp. 231-243, June 2011.

[6] J-S. Lai, "Power conditioning circuit topologies," IEEE. Ind. Electron. Mag., vol. 3, no.2, pp. 24–34, June 2009.

[7] A. Sundaram, "Solid state transformer (SST): Concepts, modeling, applications, advantages& challenges," Course on Power Electronics for Grid Connected Renewable Energy Systems (PEGRES), Calicut (Kerala, India), 2015.

[8] A. Maitra, A. Sundaram, M. Gandhi, S. Bird, and S. Doss, "Intelligent universal transformer design and applications," 20th Int. Conf. and Exh. on Electricity Distribution (CIRED), June 2009.

[9] documentation ," Les transformateurs" école technique de Blida, IFEG,

[10] L. Heinemann and G. Mauthe, "The universal power electronics based distribution transformer, unified approach," 32nd IEEE Annual Power Electron. Spec. Conf., pp. 504–509, 2001.

[11] A. Shiri, "A solid state transformer for interconnection between the medium and the low voltage grid design," Master Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, October 2013.

[12] 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.

[13] 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.

[14] J. W. Kolar, "Intelligent Solid State Transformers (SSTs) A Key Building Block of Future Smart Grid Systems The MEGA Cube Project," pp. 1–63.

[15] J. W. Kolarand G. I. Ortiz, "Solid State Transformer Concepts in Traction and Smart Grid Applications," pp. 1–166.

[16] J. W. Kolar, "Next Generation Power Electronics Infrastructure System The EEnergy Internet," pp. 1–57.

[17] M. Claessens, D. Dujic, F. Canales, and P. Stefanutti, "Traction transformation," pp. 1–7.

[18] A. Juneja and S. Bhattacharya, “Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet,” in *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2011, pp. 31–36.

[19] Z. Zheng, Z. Gao, C. Gu, L. Xu, K. Wang, and Y. Li, “Stability and voltage balance control of a modular converter with multi-winding high-frequency transformer,” IEEE Trans. on Power Electron., vol. 29, no. 8, August 2014.

[20] M. Mehrasa, E. Pouresmaeil, S. Zabihi, and J. P. S. Catalao, “Dynamic Model, Control and Stability Analysis of MMC-HVDC Transmission Systems,” IEEE Trans. on Power Del., vol. 32, no. 3, pp. 1471-1482, June 2017.

[21] E. Solas, G. Abad, J. A. Barrena, S. Aurtenetxea, A. Cárcar, and L. Zajac, “Modular multilevel converter with different submodule concepts - Part I: Capacitor voltage balancing method,” IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 60, no. 10, pp. 4525-4535, October 2013.

[22] A. Kumar Sahoo and N. Mohan, “A power electronic transformer with sinusoidal voltages and currents using modular multilevel converter,” Int. Power Electronics Conf. (IPEC-ECCE-Asia), Hiroshima, Japan, 2014.

[23] 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.

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

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

[26] 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.

[27] 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.

[28] A. Shojaei and G. Joos. “A modular solid state transformer with a single-phase medium-frequency transformer” IEEE Electrical Power & Energy Conf. (EPEC), 2013.

[29] A. Shri, “A solid-state transformer for interconnection between the medium and the low voltage grid,” Master Thesis, Delft Univ., 2013.

[30] X. She, A. Q. Huang, and R. Burgos, “Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems,” IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 1, no. 3, pp. 186–198, 2013.

[31] M. A. Bahmani, T. Thiringer, and M. Kharezy, “Optimization and experimental validation of medium-frequency high power transformers in solid-state transformer applications,” IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),

[32] S. Baek, “Design consideations of high voltage and high frequency transformer for solid state transformer application,” PhD Thesis North Carolina State Univ., 2009.

[33] A. Furuya, K. Oka, and K. Matsuse, “A characteristic analysis of four-leg inverter in

two AC motor drives with independent vector control," International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Seoul, South Korea , October 2007.

[34] S. El-Barbari and W. Hofmann, "Digital control of four-leg inverter for standalone photovoltaic systems with unbalanced load," 26th Annual Conf. of Industrial Electronics Society (IECON), Nagoya, Japan, October 2000.

[35] Schmidt-Walter.H/Kories.R: Taschenbuch der Elektrotechnik Verlag Harri Deutsch, 1998, ISBN 3-8171-1563-6

[36] Hirschmann.W/Hauenstein.A: Schaltnetzteile Siemens Verlag, 1990, ISBN 3-8009-1550-2

[37] https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113997/TMEAF1de1.pdf?...1... ,Advanced modeling of solid state transformer, Auteur : Mohammad Ebrahim Adabi Firouzjaee