الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE

LA RECHARCHE SCINTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARÈS

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude de Master

Filière : Electrotechnique

Spésailité : Réseau électrique

Transformateur intelligent modulaire à un étage avec une liaison à courant continue

---

Préparé et présenté par :

Mr. BELKACEM Yahia

Mr. BOUAHMED Walid

Proposé et dirigé par :

Dr. TAMI YOUSEF

Promotion 2023/2024

Remerciements

Le plus grand Merci revient à ***Allah*** *qui lui seul nous a guidé dans le bon sens durant notre vie et qui nous aidé à réaliser ce modeste travail.*

Nous tenons à remercier notre encadreur **' Dr. TAMI Yousef. '***Docteur à l'université Dr. YAHIA Farès de Médéa, pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce travail et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et ses directives, et d'avoir aussi au la gentillesse de lire et corriger ce travail.*

Nous exprimons nos profondes gratitudes à ***nos parents*** *pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont en duré.*
Nos sincères remerciements aux ***messieurs les membres du jury*** *pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.*

Nous remercions également ***tous les enseignants de département d'électrotechnique*** *de l'université Dr. YAHIA Farès de Médéa qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.*

Nous tenons à remercier l' honorable **Pr. SEBAA Karim** et *docteur* **' Dr. ZEMIRLINE Nassim.**.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à ***tous nos amis et collèges*** *pour tout le soutien moral et matériel…*

DÉDICACE

Avant tout, 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 :

À mes chers parents, que Dieu les garde et les protège, pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

À mes frères et à mes sœurs

À ma grande ***famille Belkacem***

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment

À tous mes collègues d'études

BELKACEM Yahia

DÉDICACE

Avant tout, 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 :

À mes chers parents, que Dieu les garde et les protège, pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

À mes frères Tarek, Iyad, Rida et Younes, et à ma sœur Zinab

À ma grande ***famille Bouahmed***

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment

À tous mes collègues d'études

B.Walid

Résumé

L'évolution croissante, tant en termes de consommation que de production d'électricité, est accompagnée d'un besoin croissant de modernisation du réseau électrique de distribution et d'approvisionnement en énergie électrique, avec un contrôle et une qualité accrue. Les transformateurs basse fréquence (TBF), qui actuellement constituent le réseau électrique, présentent plusieurs limitations telles qu'une régulation de tension inefficace, des dimensions importantes et l'utilisation d'huile pour le refroidissement du transformateur, un aspect crucial avec des répercussions négatives sur l'environnement.

En raison des contraintes des transformateurs basse fréquence (TBF), l'objectif principal de ce mémoire est d'analyser et de proposer un Transformateur Intelligent (ST) pouvant être intégré dans le réseau électrique, entre les réseaux de moyenne et basse tension, et offrir une liaison DC pour la recharge des véhicules électriques (VE).

Le Transformateur Intelligent (ST) est caractérisé par une topologie modulaire, composée de convertisseurs matriciels monophasés (CMM) et de transformateurs haute fréquence (THF) et le dimensionnement des filtres d'entrée et de sortie qui l'accompagnent. Le fonctionnement du ST est illustré dans les conditions normales de connexion MT/BT avec l'intégration d'un bus DC pour la possibilité de charger des VE. Les simulations du ST sont réalisées avec MATLAB/Simulink et confirment le bon fonctionnement du ST dans le réseau MT/BT, ainsi que lors l'intégration du Bus DC.

Mots Clé : Convertisseurs matriciels monophasés (CMM) ; Transformateurs haute fréquence (THF) ; Transformateur Intelligent (ST) ; Transformateur à Semi-conducteur (TSC).

ملخص

إن الزيادة المتنامية في استهلاك وإنتاج الكهرباء تواكبها حاجة متزايدة لتحديث شبكة توزيع وتوريد الطاقة الكهربائية، مع تحسين التحكم والجودة. تواجه المحولات منخفضة التردد (TBF) الحالية التي تشكل جزءًا من شبكة الكهرباء عدة قيود مثل تنظيم الجهد غير الفعال، والأبعاد الكبيرة، واستخدام الزيت لتبريد المحول، وهو جانب حاسم له تأثيرات سلبية على البيئة.

نظرًا للقيود التي تعاني منها المحولات منخفضة التردد(TBF) ، يهدف هذا البحث بشكل أساسي إلى تحليل واقتراح محول ذكي (ST) يمكن دمجه في الشبكة الكهربائية، بين شبكات الجهد المتوسط والجهد المنخفض، وتوفير اتصال DC لشحن المركبات الكهربائية.(VE)

يتميز المحول الذكي (ST) بتصميمه المعياري، الذي يتألف من محولات مصفوفة أحادية الطور (CMM) ومحولات عالية التردد (THF) وتحديد أبعاد المرشحات للدخل والمخرج التي ترافقه. يتم توضيح عمل المحول الذكي (ST) في ظروف الاتصال العادية بين الجهد المتوسط والجهد المنخفض مع دمج حافلة DC لإمكانية شحن المركبات الكهربائية. يتم تنفيذ محاكاة المحول الذكي باستخدام MATLAB/Simulink وتؤكد النتائج حسن أداء المحول الذكي في شبكة الجهد المتوسط/الجهد المنخفض، وأيضًا عند دمج حافلة.DC

الكلمات المفتاحية:

محولات مصفوفة أحادية الطور(CMM) ؛ محولات عالية التردد(THF) ؛ محول ذكي(ST) ؛ محول شبه موصل.(TSC)

Abstract:

The increasing evolution in terms of electricity consumption and production is accompanied by a growing need to modernize the electrical distribution and supply network, with enhanced control and quality. The current low-frequency transformers (TBF), which constitute the electrical grid, present several limitations such as inefficient voltage regulation, large dimensions, and the use of oil for transformer cooling, a critical aspect with negative environmental repercussions.

Due to the constraints of low-frequency transformers (TBF), the main objective of this thesis is to analyze and propose an Intelligent Transformer (ST) that can be integrated into the electrical network, between medium and low voltage networks, and offer a DC link for charging electric vehicles (EV).

The Intelligent Transformer (ST) is characterized by a modular topology, composed of single-phase matrix converters (CMM) and high-frequency transformers (THF) and the sizing of accompanying input and output filters. The operation of the ST is illustrated under normal MV/LV connection conditions with the integration of a DC bus for the possibility of charging EVs. The simulations of the ST are carried out with MATLAB/Simulink and confirm the proper functioning of the ST in the MV/LV network, as well as during the integration of the DC Bus.

Keywords :

Single-phase matrix converters (CMM); High-frequency transformers (THF); Intelligent Transformer (ST); Semiconductor Transformer (TSC).

Tables des Matières

Résumé ..... ……I

Tables des Matières ..... ……III

Liste des Figures ..... ……VI

Liste des Tableaux ..... ……VIII

Liste des Abréviations ..... ……IX

Introduction Générale : .....

Chapitre I: Généralité sur Les Transformateurs à Semi-conducteur (TSC)

I.1 introduction 4

I.2Étude et Domaines d'Innovation du TSC … …..……..……..... 4

I.3 Architecture TSC.……..……..……...…6

I.4 Convertisseur Matriciel..... 8

I.4.1Convertisseur Matriciel Monophasé ……..……9

I.4.1.1 Stratégie de Commutation du Convertisseur Matriciel Monophasé AC/AC……10

I.4.2 Convertisseur Matriciel Triphasé……..……11

I.5 Transformateur Haute Fréquence ……..……12

I.6 Applications du TSC.……...14

I.7 Comparaison entre les Transformateurs Classique, TSC dans le Réseau Électrique……17

I.8 L'origine du Transformateur Intelligent ……..……..…20

I.8.1 Flux de Communication d'un Transformateur Intelligent (ST) ……..……21

I.8.2 Architecture du Transformateur Intelligent……22

I.9 Conclusion……22

Tables des Matières

Chapitre II: Transformateur ST Modulaire

II.1 Introduction……24

II.2 Convertisseur Matriciel modulaire ……..…….24

II.3 Topologie du ST……25

II.4 Dimensionnement des Filtres du ST…….....31

II.4.1Filtre d'entrée …….……...31

II.4.2Filtre de sortie.....33

II.6 Conclusion…….……..35

Chapitre III: Résulta de simulation

III.1 Introduction ……36

III.2 Scénarios d'Étude……38

III.2.1 Charge linéaire ……38

III.2.2 Réseau AC BT avec deux charges RL en Parallèle……..42

III.2.3 Charge Non Linéaire ……45

III.2.3 Intégration d'autres Sources……..50

III.3 Chargement des Véhicules Électriques (VE)……..51

III.4 Conclusion ……..53

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale ……..…….54

Référence

ANNEXE 01

ANNEXE 02

ANNEXE 03

ANNEXE 04

ANNEXE 05

Liste des Figures

Liste des Figures

Figure I.1: Vagues d'innovation dans l'étude des TSC

Figure I.2 - Schéma simplifié du TSC

Figure I.3 : Différentes topologies du TSC.

Figure I.4 : Schéma de configuration modulaire représentatif pour le TSC

Figure I.5 : Les avantages du CM

Figure I.6 : (a) Représentation graphique d'un CM avec *n x m* phases ; (b) Représentation graphique d'un module de commutation bidirectionnel

Figure I.7 : Représentation graphique d'un convertisseur matriciel monophasé.

Figure I.8 : Convertisseur Matriciel Triphasé

Figure I.9 : Graphique de la fréquence de fonctionnement du transformateur conventionnel par rapport à la plage de fréquences de fonctionnement du HFT

Figure I.10 : Transformateurs haute fréquence

Figure I.11: Possibles applications du TSC dans le système de distribution d'énergie électrique

Figure I.12 : a) Application dans les systèmes de traction ; **b)** Production d'énergie offshore ; **c)** Smart grid

Figure I.13 : Différentes applications du TSC

Figure I.14 : Schéma simplifié d'un LFT (a) et d'un TSC (b)

Figure I.15 : Comparaison TSC vs LFT

Figure I.16 : Schéma d'un réseau intelligent avec l'intégration d'un ST

Figure I.17 : Diagramme de blocs d'un convertisseur à trois étages

Figure II.1 : Schéma simplifié de l'association en série des convertisseurs matriciels monophasés.

Figure II.2 : Topologie simplifiée de ST

Figure II.3 : Représentation détaillée de l'étage de conversion d'une phase de sortie ST, plus précisément la première phase

Figure II.4 : Représentation des interrupteurs bidirectionnels

Liste des Figures

Figure II.5: Schéma graphique des formes d'onde d'entrée et de sortie AC/AC

Figure II.6: Filtre d'entrée du système de surveillance

Figure II.7: Schéma équivalent du filtre d'entrée du système de surveillance

Figure II.8 : Filtre de sortie AC du ST

Figure II.9: Schéma équivalent du filtre de sortie AC du ST

Figure III.1 : schéma globale de transformateur intelligent (ST).

Figure III.2 : schéma éclater du bloc ph-1

Figure III.3 : charge linéaire RL

Figure III.4: La forme d'onde de la Tension triphasée côté MT

Figure III.5: La forme d'onde du Courant côté MT.

Figure III.6: La forme d'onde de la Tension de sortie des convertisseurs du premier étage de conversion du ST.

Figure III.7: La forme d'onde de la Tension de sortie des convertisseurs du deuxième étage de conversion du ST

Figure III.8: La forme d'onde de la Tension de sortie des convertisseurs du troisième étage de conversion du ST.

Figure III.9: La forme d'onde de la Tension de sortie du transformateur de chaque étage de conversion du ST.

Figure III.10: La forme d'onde de la Tension au niveau de la charge.

Figure III.11 : charge linéaire variable.

Figure III.12: La forme d'onde des Tensions triphasée du côté MT

.

Figure III.13: La forme d'onde des courants triphasée côté MT.

Figure III.14: La forme d'onde des tensions triphasées du côté BT

Liste des Figures

Figure III.15: La forme d'onde des courants triphasées côté BT.

Figure III.16: Charge Non Linéaire**.**

Figure III.17: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT

Figure III.18: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT

Figure III.19: représenté analyse spectrale de THD de côté BT

Figure III.20: représenté analyse spectrale de THD de côté MT

Figure III.21: charge non linéaire **(**Redresseur triphasé a demi pont).

Figure III.22: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT

Figure III.23: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau BT

Figure III.24: représenté analyse spectrale de THD de côté BT

Figure III.25: représenté analyse spectrale de THD de côté MT

Figure III.26: Intégration du 2ème source de tension côté BT

Figure III.27: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT.

Figure III.28: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau BT

Figure III.29: Sortie source de tension constante [DC]

Figure III.30: la charge RC[DC]

Figure III.31: La forme d'onde de la tension aux bornes de charge.

Figure III.32: Tension du côté BT en fonctionnement simultané MT/BT et chargement du VE.

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : États de commutation possibles du MCM AC/AC.

Tableau II.1 : Combinaisons possibles d'états des interrupteurs du premier convertisseur d'entrée de la Figure II.3.

Tableau II.2 : Tensions de sortie du transformateur haute fréquence du premier étage de conversion en fonction des tensions de sortie des trois convertisseurs d'entrée respectifs.

Tableau II.3 : Valeur des composants du filtre d'entrée.

Tableau II.4 : Valeurs des composants du filtre de sortie

Tableau III.1 : Valeurs des paramètres du ST.

Tableau III.2 : Valeurs des paramètres du HFT

Tableau III.3: Valeurs des paramètres de simulation ST

Liste des abréviations

Rp : La résistance électrique de l'enroulement primaire.

Rs : La résistance électrique de l'enroulement secondaire.

X_p: La réactance de perte de l'enroulement primaire.

X_s: La réactance de perte de l'enroulement secondaire.

V : La tension semple

U: La tension composé

f : Fréquence

w : Pulsation

H: Henry

l : L'inductance propre

N1 ,N2 : Nombre des spires.

Ø : Flux magnétique

t: Temps.

R : Résistance.

L : Inductance.

C : Capacité

RLC: Résistance-Inductance-Capacité.

BT : Basse tension.

MT: Moyenne tension.

HT : Haute tension.

VA : Volt - Ampère.

kV: kilo - Volt.

BF : Basse fréquence.

HF : Haute fréquence.

CfinY : Condensateur du filtre d'entrée du ST en connexion étoile (pour le calcul du condensateur du filtre)

CfinΔ : Condensateurs du filtre d'entrée du ST

Cfout : Condensateurs du filtre de sortie du ST

Ifmin : Courant minimum à la sortie du filtre d'entrée du ST

Lfin : Bobines du filtre d'entrée du ST

Lfout : Bobines du filtre de sortie du ST

Pf : Facteur de puissance

Liste des abréviations

Rfin : Résistance en parallèle avec le condensateur du filtre d'entrée du ST

Skji : Interrupteur bidirectionnel du convertisseur j = {1,2,3,4} de l'étage de

Vab, Vbc, Vca : Tensions composées d'entrée du ST

Vfmax : Tension maximale à la sortie du filtre d'entrée du ST

Zfin : Impédance caractéristique du filtre d'entrée du ST

Zfout : Impédance caractéristique du filtre de sortie du ST

ωc : Fréquence angulaire de coupure de la tension d'entrée du filtre d'entrée duST

ωi : Fréquence angulaire de la tension d'entrée du filtre d'entrée du ST

ωs : Fréquence angulaire de commutation des convertisseurs matriciels

ζ : Coefficient d'amortissement

fc : Fréquence de coupure du filtre d'entrée

fs : Fréquence de commutation des convertisseurs matriciels

DC : Courant de sortie du convertisseur de sortie du ST de l'étage de conversion du bus DC

ro : Résistance équivalente à la sortie du filtre de sortie du ST

vCfinΔd, vCfinΔq : Composantes d et q de la tension des condensateurs du filtre d'entrée

vCinab, vCinbc, vCinca : Tension des condensateurs du filtre d'entrée des phases ab, bc et ca

Introduction Générale

Le concept de réseau électrique intellige, avec l'intégration d'énergies renouvelables et de nouvelles charges associées à celui-ci, telles que les véhicules électriques, est un concept qui gagne de plus en plus en importance ces dernières années. Le réseau électrique, avec la contribution des nouvelles charges, a subi de grands changements, qui devraient se poursuivre, étant donné que l'impact de cette évolution sera de plus en plus ressenti dans la qualité du service.

La nécessité d'une automatisation et d'un contrôle accrus du réseau électrique a conduit à une étude et à une recherche constante de solutions afin de répondre aux besoins émergents et d'améliorer la qualité du service de distribution d'énergie électrique. L'introduction de transformateurs intelligents (ST - Smart Transformers) dans la liaison entre le réseau de moyenne et basse tension, en remplacement des transformateurs de basse fréquence TBF (LFT - Low Frequency Transformers), est une solution qui permet de répondre à de nombreux défis qui se posent actuellement et dans un avenir proche. Les TBF présentent diverses limitations qui motivent l'étude et le développement de technologies telles que le transformateur à Semi-conducteur TSC (SST - Solide State Transformer), plus performantes et dotées de plus de fonctionnalités que celles présentées par le type de transformateurs qui composent actuellement le réseau électrique. Toutes les fonctionnalités que l'étude de cette nouvelle solution montre qu'il est possible de mettre en œuvre encouragent une étude de plus en plus approfondie et la volonté de faire en sorte que ce type de transformateurs soit incorporé dans le réseau.

Le concept de à Semi-conducteur (TSC) a été présenté par McMurray en 1968. Contrairement au transformateur de basse fréquence (TBF), ce type de transformateur fonctionne à des fréquences élevées, ce qui présente des avantages considérables en termes de poids et de volume. Le concept de TSC a été étudié et a évolué au fil des ans, aboutissant au concept de Transformateur Intelligent (TI), offrant des possibilités de contrôle et de gestion du réseau électrique de manière facile, rapide et intelligente. Ce concept fait actuellement l'objet d'études en vue de devenir une solution à mettre en œuvre dans le réseau électrique dans un avenir proche.

Au cours des prochains chapitres de ce mémoire, plusieurs raisons seront d'abord exposées pour souligner l'importance des Transformateurs Intelligents (TI), ainsi que leurs applications et l'évolution du concept au fil des ans jusqu'à nos jours. Ensuite, il sera proposé un TI composé de convertisseurs monophasés matriciels et d'un transformateur à hautes fréquences, permettant la connexion du réseau de moyenne tension (MT) au réseau de basse tension (BT), ainsi qu'un bus en courant continu (DC) pouvant servir à diverses fins telles que la recharge des véhicules électriques.

Motivation pour l'étude des ST

Ce travail propose l'introduction de transformateurs intelligents (ST) dans le réseau électrique pour remplacer les transformateurs de basse fréquence (TBF) existants entre les réseaux de moyenne tension (MT) et de basse tension (BT), dans le but d'améliorer la qualité de service du réseau. En plus de répondre à des besoins identifiés comme prioritaires à résoudre dans le futur, tels que la réduction de l'espace occupé par le transformateur, l'analyse en temps réel du réseau et un meilleur contrôle et gestion du réseau, un transformateur intelligent offre également la possibilité de bénéficier d'avantages tels que l'isolation des perturbations dans le réseau, l'isolation galvanique entre les réseaux de moyenne tension (MT) et de basse tension (BT), et la possibilité d'avoir un bus en courant continu (DC) permettant la recharge des véhicules électriques (EV).

Avec l'application des ST dans le réseau électrique au détriment de l'utilisation des TBF, le réseau électrique pourrait devenir plus autonome et efficace dans son fonctionnement. Le contrôle de la tension et du courant est facilité, ce qui permet une action rapide et autonome en cas de défaillances et de perturbations dans la fourniture d'énergie, et l'exploitation, la gestion et la surveillance du réseau sont également facilitées dans cette mesure.

Objectifs de l’étude

Le principal objectif de cette étude est la modélisation d'un ST modulaire à appliquer dans le réseau électrique, entre le réseau MT et BT, en incorporant un bus en courant continu (DC). Les objectifs définis pour cette dissertation sont les suivants :

- Réalisation d'une étude sur l'état de l'art du TSC jusqu'au ST, ses applications et son évolution ;
- Dimensionnement d'un ST modulaire ;
- Dimensionnement d'un bus en courant continu (DC) ;
- Dimensionnement des filtres d'entrée et de sortie du ST ;
- Simulation dans MATLAB/Simulink du fonctionnement du ST dans un réseau électrique et analyse de ses performances AC et DC ;

Les tests prévus pour le système dimensionné et simulé dans Simulink sont les suivants :

- Simuler la recharge d'un véhicule électrique (EV) sur le bus en courant continu (DC) du ST tout en opérant dans le réseau alternatif (AC) en interconnectant le réseau MT et BT ;
- Simuler une charge RL linéaire alimenter par le ST ;
- Simuler deux charges RL linéaires en parallèle alimenter par le ST ;

- Simuler des charges non linéaires alimenter par le ST ;

La structure de ce travail se compose de 3 chapitres distincts. Une présentation initiale de chaque chapitre est ensuite faite individuellement pour chacune de ces sections :

• Dans le premier chapitre, une étude sur l'émergence et l'évolution de transformateur à Semi-conducteur (TSC) et par conséquent du transformateur intelligent (ST) est réalisée. Ce chapitre, qui présente l'état de l'art du ST, est également accompagné par l'étude de quelques topologies et applications du ST, ainsi qu'une comparaison du transformateur basse fréquence ou conventionnelle (TBF), du TSC et du ST dans le réseau électrique. Enfin, le convertisseur matriciel, ses applications et avantages sont présentés et décrits, ainsi que la présentation du convertisseur matriciel monophasé.

• Dans le deuxième chapitre, la topologie du ST à développer est proposée. Cette topologie est analysée et une étude du fonctionnement du ST proposée est également réalisée. Dans ce chapitre, les filtres d'entrée et de sortie du ST sont également dimensionnés.

• Dans le troisième chapitre, le fonctionnement du ST sur le réseau électrique et le fonctionnement de son bus DC sont simulés. La simulation est effectuée à l'aide de MATLAB/Simulink. Le comportement du ST dans des conditions normales de fonctionnement sur le réseau électrique, c'est-à-dire sans perturbation ni utilisation du bus DC, est analysé, puis son fonctionnement sur le réseau électrique est examiné avec l'ajout du fonctionnement du bus DC et des différentes charges linéaires et non linéaires sur le réseau MT.

• En fin, les conclusions qui résument tout le travail réalisé sont présentées, et des perspectives de travail futur pour le développement et l'approfondissement de l'étude du système développé sont également proposées.

CHAPITRE I :

Généralité sur Les Transformateurs à Semi-conducteur (TSC)

I.1 introduction

Le réseau intelligent du futur est élaboré en vue d'atténuer ou d'éviter les conséquences des événements liés à la qualité de l'électricité (comme les baisses de tension), d'améliorer les indices de fiabilité (en réduisant le nombre et la durée des interruptions) et d'accroître l'efficacité (en diminuant les pertes). [1],[2].

Par contre, l'introduction des ressources d'énergie renouvelable a entraîné une augmentation de la complexité dans le fonctionnement du système électriques. Avec le développement technologique des convertisseurs d'électroniques de puissance et l'utilisation de nouveaux alliages aux bonnes capacités magnétiques, un nouveau type de transformateur est apparu, appelé "Transformateur à Semi-conducteurs TSC", ou transformateur électronique de puissance (*en Anglais Solide-State Transformer, SST*). Les TSC sont très récents, donc la compréhension de leur comportement dans les systèmes électriques est encore limitée. Cependant, avec l'augmentation de la production décentralisée à petite et grande échelle, et la nécessité qui en découle de contrôler la tension dans le réseau, les TSC ont un potentiel élevé d'utilisation dans les systèmes électriques.

Un élément clé des réseaux intelligentes futures est le transformateur à semi-conducteurs, qui offre de nouvelles possibilités pour contrôler la distribution de l'électricité et introduit également de nouvelles fonctionnalités dans le réseau de distribution, telles que la compensation de la puissance réactive, des courants de court-circuit limités ou la compensation des chutes de tension. Toutefois, il est important de noter que l'implémentation de ces fonctionnalités se fera au détriment d'un système plus complexe et onéreux. [3],[5]. Le TSC est appelé à jouer un rôle clé dans le remplacement des transformateurs classiques. [4]

I.2 Étude et Domaines d'Innovation du TSC

Ce concept a été étudié au fil des ans avec diverses applications dans les systèmes de traction et de distribution d'énergie électrique. Pour une meilleure compréhension de l'évolution des domaines d'étude et d'application du transformateur à semi-conducteurs (TSC), la Figure I.1 donne un aperçu de l'évolution et des perspectives d'évolution du SST. La figure montre que l'année de début correspond à l'année où le concept a été proposé par McMurray, marquant le début du développement du concept de SST pour les systèmes électriques de traction. Au cours des décennies suivantes, les TSC ont également été proposés pour les réseaux électriques intelligents, suivis de nouveaux développements au sein des systèmes électriques de traction.

La figure I.1, illustre également que, selon les prévisions d'innovation, les prochaines années verront une augmentation de l'utilisation des TSC dans les réseaux électriques.

Au cours des dernières années, l'intérêt pour les "transformateurs intelligents", mieux connus sous le nom de Transformateurs à Semi-conducteurs, a tellement augmenté, la technologie TSC a été considérée par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) comme l'une des technologies les plus pertinentes pour les futurs systèmes de distribution d'énergie.[6]

Actuellement, le TSC n'est pas considéré comme un substitut du transformateur classique, mais plutôt comme une alternative à celui-ci. En utilisant des convertisseurs électroniques de puissance et un transformateur de haute fréquence, on obtient un équipement multifonctionnel qui réalise toutes les fonctions du transformateur classique, à savoir la réduction/élévation de la valeur de tension du primaire au secondaire ainsi que l'isolement galvanique.

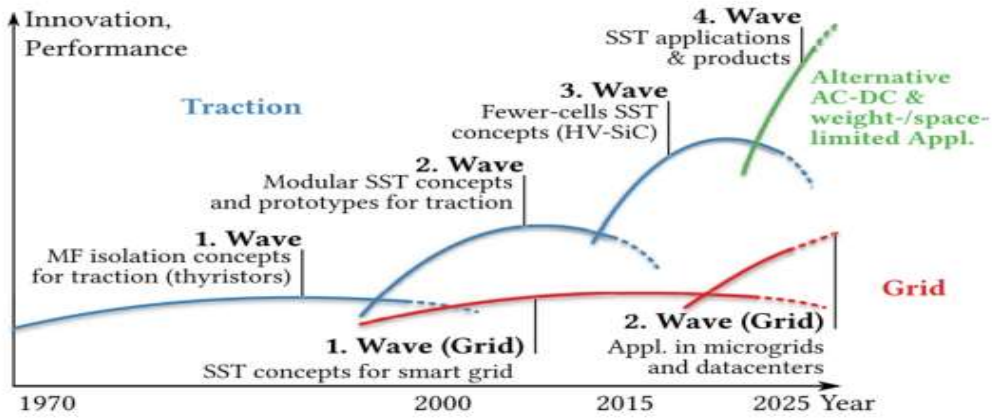


Figure I.1: Vagues d'innovation dans l'étude des TSC [6]

Cependant, en plus de ces fonctions, le TSC présente d'autres avantages et fonctionnalités par rapport au transformateur classique, notamment :

- Grande capacité de contrôle ;
- Volume réduit du transformateur de haute fréquence. Le volume du transformateur est inversement proportionnel à la fréquence, c'est-à-dire que l'augmentation de la fréquence de fonctionnement entraîne une diminution du volume du transformateur ;
- Ajustement pour un facteur de puissance unitaire ;
- Bon comportement face aux fluctuations de tension ;
- Capacité de protection en aval de l'installation.

I.3 Architecture du TSC

Dans l'auteur caractérisent le TSC dans différentes topologies et architectures, avec leurs applications respectives. Le TSC est généralement constitué de 2 convertisseurs électroniques de puissance ou plus et d'un transformateur haute fréquence intégré (figure I.2). Selon les différentes topologies, le TSC peut être classé en 4 catégories (figure I.3) : [6],

a) TSC à un seul étage sans liaison DC, c'est-à-dire sans étage DC ;

b) TSC à deux étages. Il contient une liaison DC du côté du secondaire ;

c) TSC à deux étages. Il contient une liaison DC du côté du primaire ;

d) TSC à trois étages. Il contient une liaison DC à la fois sur le primaire et le secondaire du transformateur.[28]

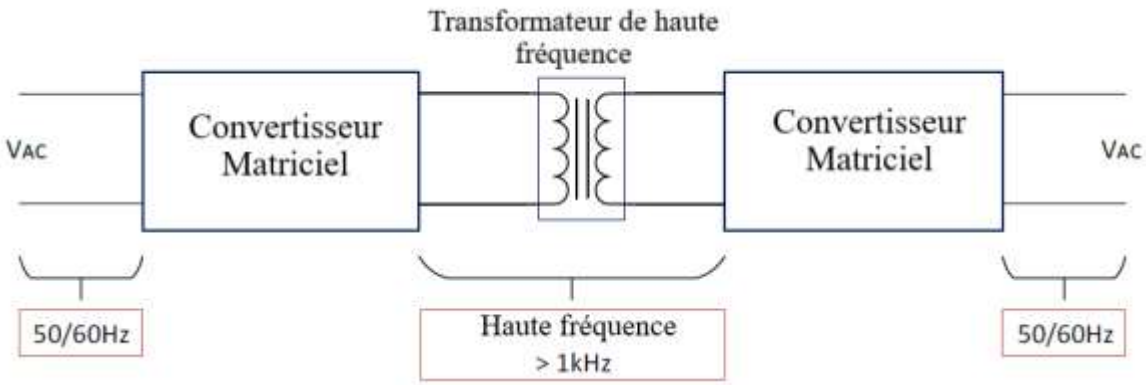


Figure I.2 - Schéma simplifié du TSC.[28]

En plus de ce qui a été expliqué jusqu'à présent, il est possible de diviser les TSC en non modulaires, semi-modulaires et modulaires. Une représentation d'une topologie à trois niveaux avec une configuration potentielle modulaire et une cellule de base pour la conversion DC/DC est présentée dans la Figure I.4. Dans cette même figure, des convertisseurs possibles à appliquer à chaque niveau sont également présentés. Il est à noter qu'une configuration non modulaire bénéficie généralement d'une utilisation réduite de semi-conducteurs. Afin de supporter la tension MT et de tirer profit des nombreux autres avantages offerts par les non modulaires, une structure modulaire est une excellente option pour un TSC. Parmi les avantages de ces structures modulaires, on trouve une moindre sensibilité aux interférences électromagnétiques et une plus grande tolérance aux pannes.[7]

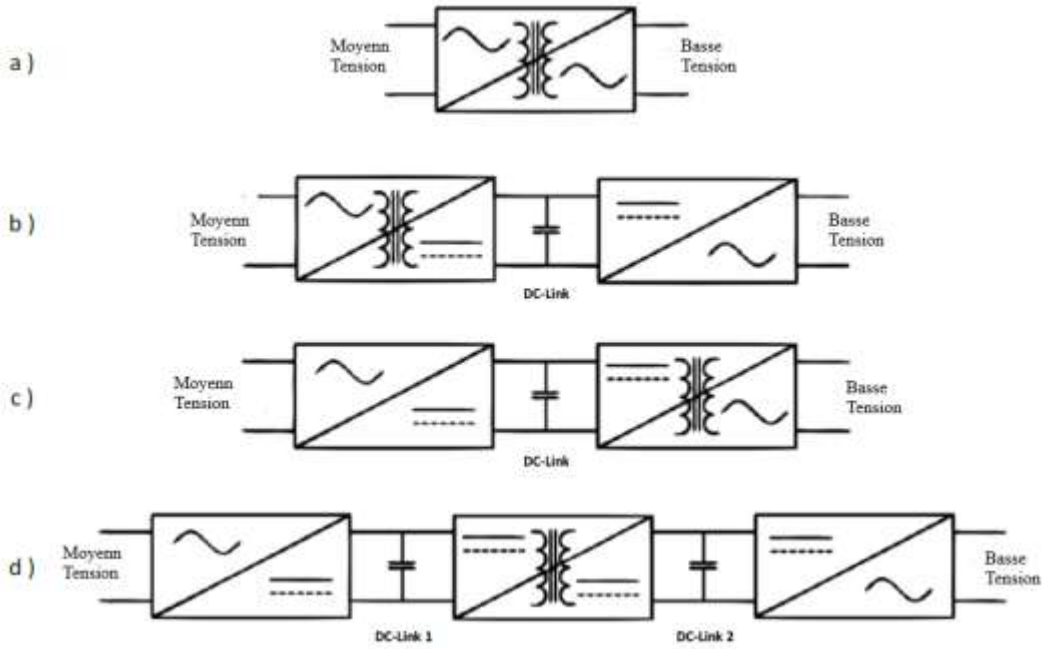


Figure I.3 : Différentes topologies du TSC.

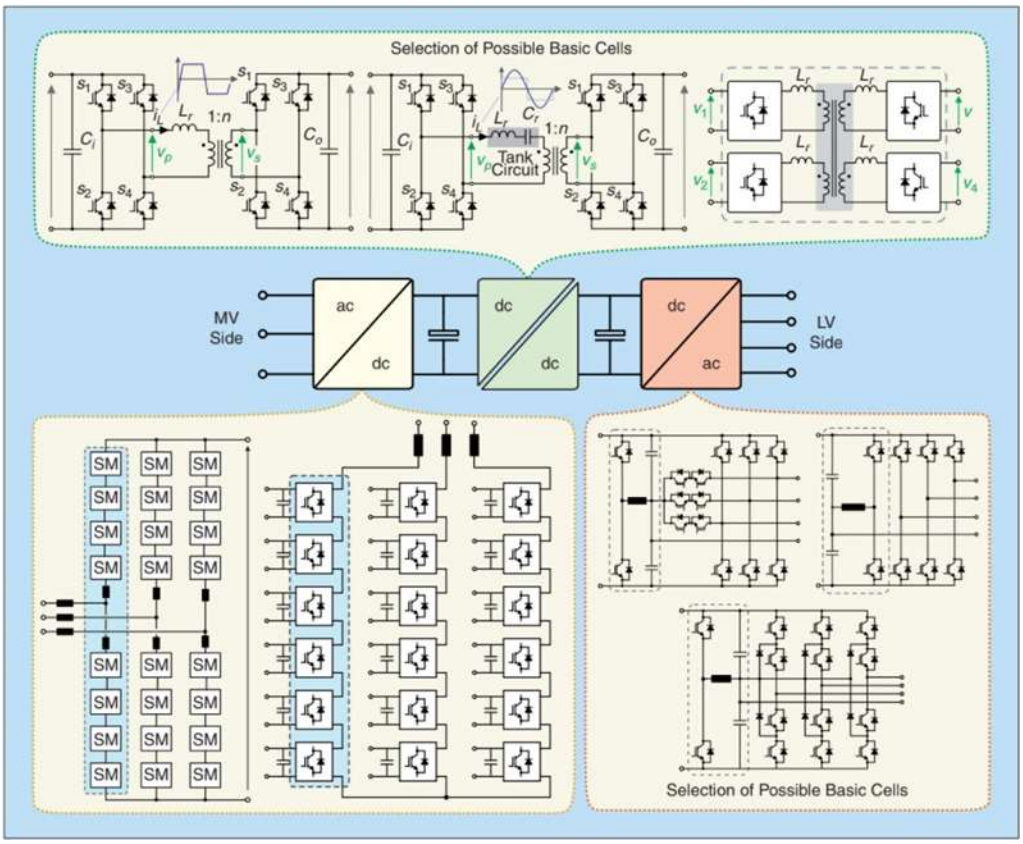


Figure I.4 : Schéma de configuration modulaire représentatif pour le TSC [7].

I.4 Convertisseur Matriciel

Le concept du Convertisseur Matriciel (CM) a été publié pour la première fois en 1976. Cependant, le terme "convertisseur matriciel" n'est apparu qu'en 1980, lorsque Venturini et Alessina ont réellement développé le convertisseur matriciel, en présentant le circuit de puissance d'un convertisseur comme une matrice d'interrupteurs bidirectionnels. Au cours des dernières décennies, les progrès technologiques ont permis de fonctionner à des fréquences élevées tout en réduisant les chutes de tension de commande. Ces avancées, ainsi que l'amélioration des circuits de commande et de contrôle, ont été les principaux moteurs de l'intérêt croissant pour les convertisseurs matriciels, avec une commande à haute fréquence.

L'un des principaux avantages de cette technologie par rapport aux autres est qu'elle permet un flux de puissance bidirectionnel, bien qu'elle offre également d'autres avantages, comme le montre la figure I.5 [29]. Cependant, comme ce convertisseur est principalement composé de semi-conducteurs, cela complique le processus de commutation entre les différents semi-conducteurs et rend difficile la définition de stratégies de modulation garantissant à la fois des tensions de sortie sinusoïdales et des courants d'entrée sinusoïdaux [30].

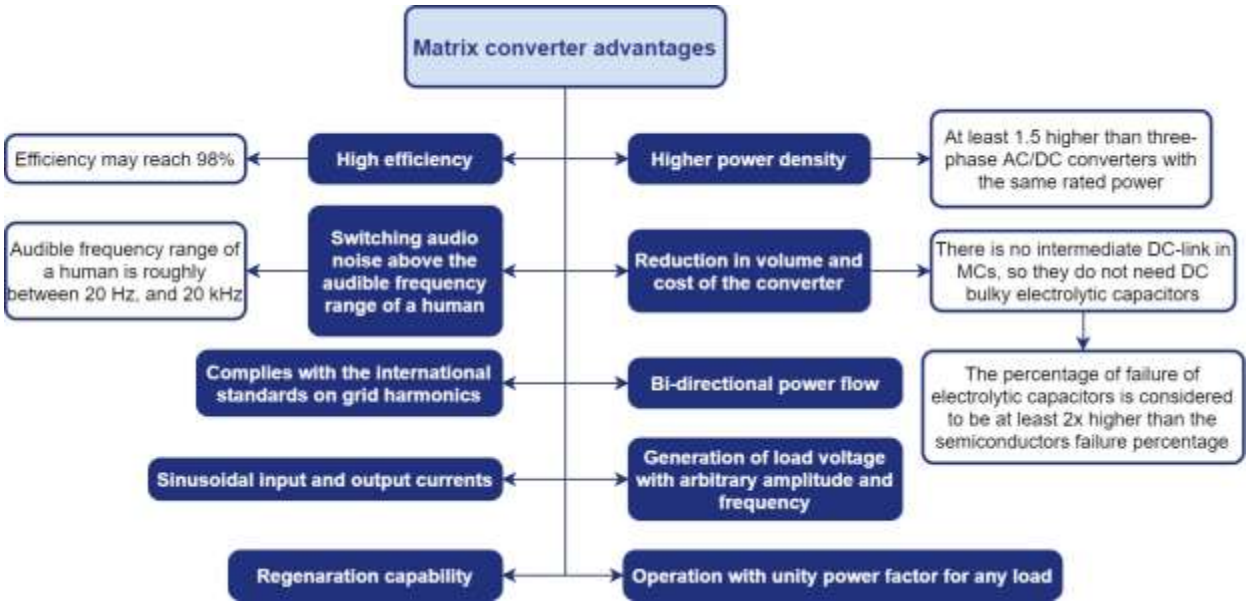


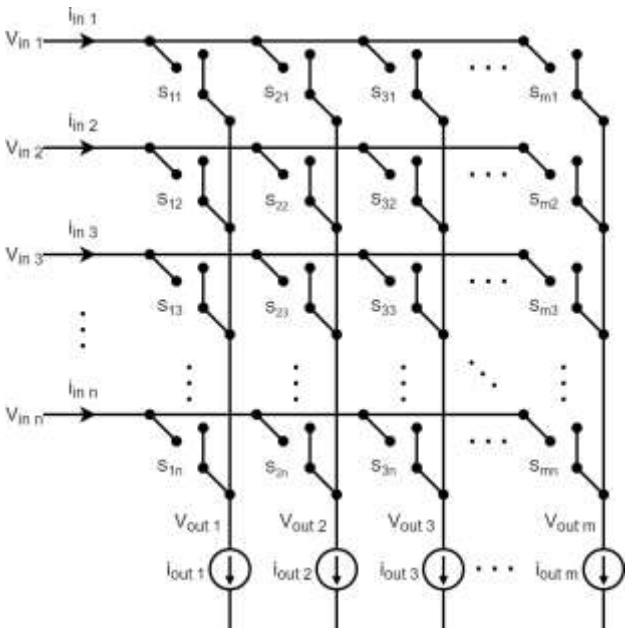
Figure I.5 : Les avantages du CM [30].

La figure I.6(a) présente un modèle d'un CM, composé d'un ensemble d'interrupteurs de puissance bidirectionnels de dimensions n × m, servant à relier directement une source de tension à n phases à une source de courant à m phases. [30]

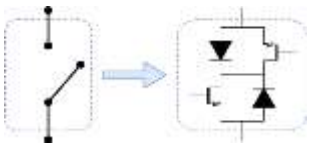
Comme chaque interrupteur a deux états, cela permettrait théoriquement d'avoir $2^{n\,x\,m}$ combinaisons de connexion [30]. Cependant, les sources de tension ne doivent pas être court-circuitées et les sources de courant ne doivent pas être laissées ouvertes. Ainsi, ces contraintes topologiques signifient qu'un système avec *n* sources de tension et *m* sources de courant ne peut avoir que *nm* combinaisons possibles.

Le CM nécessite un interrupteur bidirectionnel capable de bloquer la tension et de conduire le courant dans les deux directions. Malheureusement, aucun semi-conducteur actuel ne répond à ces critères, d'où la nécessité de construire ces interrupteurs en associant différents semi-conducteurs. [31]

La figure I.6 (b) illustre la solution employée pour résoudre ce problème, qui consiste à utiliser une paire de diodes et de transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) en configuration antiparallèle à émetteur commun. De cette manière, la diode confère au module de commutation la capacité de blocage inverse, tandis que l'IGBT assure des performances de commutation à haute fréquence [29].



(a)



(b)

Figure I.6 : (a) Représentation graphique d'un CM avec *n x m* phases ; (b) Représentation graphique d'un module de commutation bidirectionnel [29].

Chaque interrupteur bidirectionnel peut être défini mathématiquement par une variable S_{kj}, en supposant des semi-conducteurs idéaux, qui peut prendre deux états possibles : " $S_{kj} = 1$ " si l'interrupteur est fermé et " $S_{kj} = 0$ " si l'interrupteur est ouvert.

$$S_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{, si l'interrupteur est fermé} \quad k \in \{1,\ldots,m\} \\ 0 & \text{, si l'interrupteur est ouvert} \quad j \in \{1,\ldots,n\} \end{cases} \qquad (I.1)$$

I.4.1Convertisseur Matriciel Monophasé

Le système étudié dans cette thèse est un système monophasé, ce qui signifie que les convertisseurs matriciels qui le composent sont également des convertisseurs matriciels monophasés (CMM). Zuckerberger [31] a été le pionnier dans le développement de cette variante de convertisseur matriciel, et

cette matrice est constituée de quatre interrupteurs bidirectionnels, comme illustré à la figure I.7. En outre, il est possible de représenter l'état des semi-conducteurs par une matrice 2x2, comme indiqué dans l'expression (I.2).

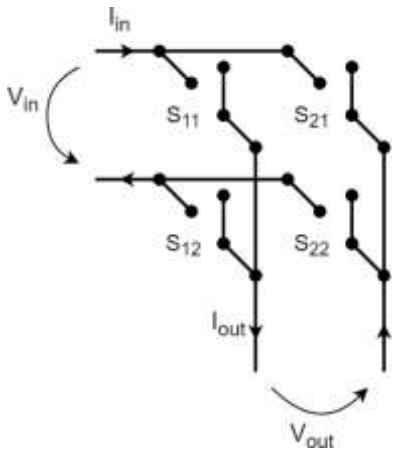


Figure I.7 : Représentation graphique d'un convertisseur matriciel monophasé. [31]

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \qquad (I.2)$$

I.4.1.1 Stratégie de Commutation du Convertisseur Matriciel Monophasé AC/AC

Typiquement, un convertisseur matriciel (MC) est utilisé comme un système de conversion basé sur une source de tension [31]. Cependant, dans l'approche proposée, les stratégies de contrôle habituelles ne peuvent pas être utilisées car le convertisseur est connecté à un transformateur haute fréquence et la valeur moyenne de la tension à chaque période de commutation doit être nulle pour éviter la saturation du transformateur.

Le tableau II.1 présente les quatre états de commutation possibles, compte tenu des contraintes topologiques existantes. Cela signifie qu'il n'est pas possible de faire fonctionner simultanément les interrupteurs S11 et S21 ou S12 et S22 pour garantir que le réseau AC ne soit pas court-circuité. Par contre, il faut s'assurer qu'au moins un des interrupteurs de la paire S11-S12 et S21-S22 est passant à tout moment pour garantir la continuité du courant de sortie.

Tableau II.1 : États de commutation possibles du MCM AC/AC.

Nom	***État***	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}	V_{out}
1	1	1	0	0	1	V_{in}
2	-1	0	1	1	0	$-V_{in}$
3	0	1	1	0	0	0
4	0	0	0	1	1	0

I.4.2 Convertisseur Matriciel Triphasé

Le convertisseur matriciel triphasé illustré à la Figure I.8 est composé de neuf interrupteurs bidirectionnels entièrement contrôlés, permettant de connecter deux systèmes triphasés, l'un ayant les caractéristiques d'une source de tension et l'autre ayant les caractéristiques d'une source de courant. Théoriquement, sans tenir compte des contraintes topologiques, la présence de neuf interrupteurs bidirectionnels donnerait lieu à 512 (2^9) combinaisons possibles pour l'état de ces interrupteurs. Cependant, en prenant en compte les contraintes topologiques, le nombre d'états possibles est réduit à 27 (3^3), car il n'est pas souhaitable de court-circuiter des sources de tension ou de laisser des sources de courant en circuit ouvert.

En supposant que les semi-conducteurs des interrupteurs bidirectionnels se comportent de manière idéale (tension de conduction nulle, courant de fuite nul en état bloqué, et temps de commutation nul), chaque interrupteur peut être représenté mathématiquement par une variable S_{kj} qui peut prendre la valeur « 1 » si l'interrupteur est fermé (ON) et la valeur « 0 » s'il est ouvert (OFF).

L'état des semi-conducteurs du convertisseur peut être représenté dans une matrice de 3x3 éléments.

$$S_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{, si l'interrupteur est fermé} \quad k \in \{1,\ldots,m\} \\ 0 & \text{, si l'interrupteur est ouvert} \quad j \in \{1,\ldots,n\} \end{cases} \qquad (I.3)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{32} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \qquad (I.4)$$

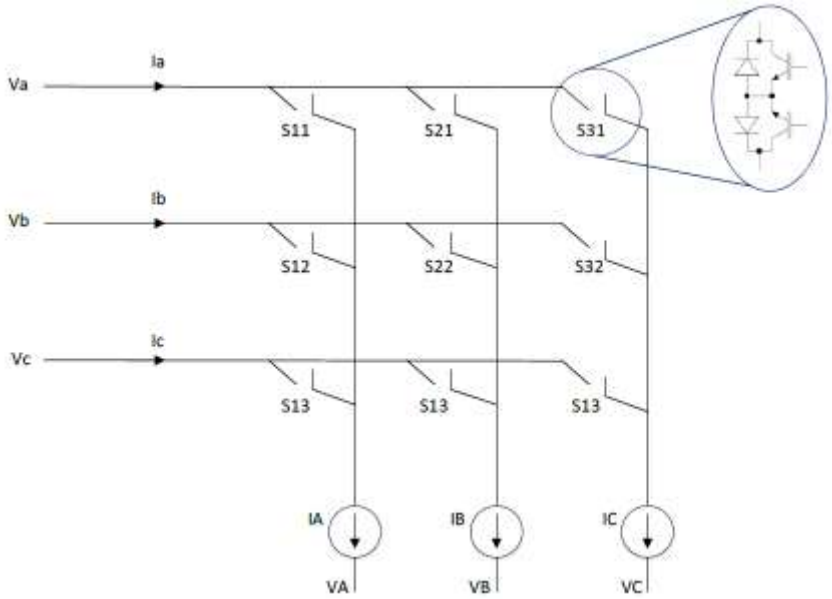


Figure I.8 : Convertisseur Matriciel Triphasé [28]

Pour que les restrictions topologiques mentionnées soient vérifiées, il est nécessaire de garantir la continuité du courant dans chaque phase de sortie du convertisseur (caractère source de courant), impliquant ainsi qu'il y ait toujours un interrupteur fermé dans chaque ligne de la matrice S. Afin d'éviter le court-circuit entre les phases à l'entrée du convertisseur, il ne doit y avoir plus d'un interrupteur avec l'état logique "1" dans chaque ligne de la matrice S, c'est-à-dire que la somme instantanée de tous les éléments de chaque ligne de la matrice S (Éq. I.4) est toujours égale à "1" (Éq. I.5). Les restrictions mentionnées impliquent que, à chaque instant, chaque phase de sortie ne soit connectée qu'à une seule phase d'entrée.[28]

$$\sum_{j=1}^{3} S_{kj} = 1 \quad k \in \{1,2,3\} \qquad (I.5)$$

I.5 Transformateur Haute Fréquence

Depuis l'introduction des systèmes alternatifs (AC) en 1887, le transformateur à couplage magnétique est devenu un élément essentiel du réseau électrique, permettant ainsi la transformation de la tension et l'isolation galvanique. Bien que la construction de base du transformateur n'ait pas beaucoup changé au cours du dernier siècle, il y a eu une évolution significative dans le traitement des matériaux et la création de nouveaux alliages avec des densités de magnétisation élevées et de faibles pertes par hystérésis. Cela a permis la conception de transformateurs plus efficaces pouvant fonctionner à des fréquences plus élevées.

Ces avancées, couplées au développement des convertisseurs électroniques de puissance et aux progrès de la technologie des semi-conducteurs (avec des capacités de commutation plus rapides, des tensions de blocage plus élevées et des densités de puissance accrues), ont permis de créer des équipements multifonctionnels pour les applications dans les réseaux basse tension.

Par conséquent, le transformateur haute fréquence (HFT) est pressenti pour remplacer le transformateur traditionnel de 50/60 Hz.

Ainsi, en plus d'assurer une isolation galvanique et de pouvoir réduire ou augmenter la tension, il permet également une gestion intelligente de l'énergie, une amélioration de la qualité de l'énergie, une réduction du poids et du volume, ainsi qu'une densité énergétique élevée.

La figure I.9 montre la plage de fréquences de fonctionnement du transformateur classique par rapport à celle du HFT. Alors qu'un transformateur conventionnel fonctionne entre 50 et 60 Hz, le HFT fonctionne généralement dans une plage allant de plusieurs kilohertz à des centaines de kilohertz.[31]

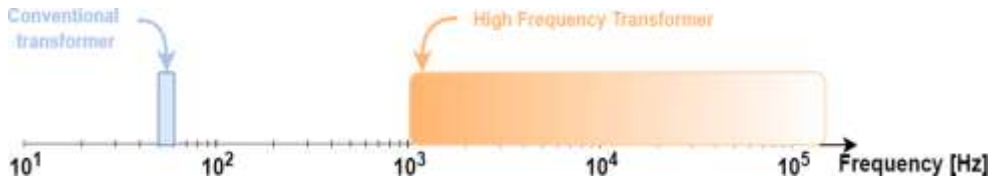


Figure I.9 : Graphique de la fréquence de fonctionnement du transformateur conventionnel par rapport à la plage de fréquences de fonctionnement du HFT. [31]

Voici quelques caractéristiques et avantages des transformateurs haute fréquence :

- **Taille et poids réduits** Les transformateurs haute fréquence sont généralement plus compacts et légers que leurs homologues à basse fréquence en raison des dimensions plus petites des composants nécessaires.

$$V = k * \frac{1}{f} \qquad \text{(I.6)}$$

Dans cette formule :

- V représente le volume du transformateur,
- k est une constante de proportionnalité,
- f est la fréquence de fonctionnement du transformateur

- **Efficacité élevée :** Ils peuvent offrir une efficacité de conversion d'énergie élevée en raison de leur capacité à réduire les pertes par effet Joule et les pertes magnétiques. Grâce à l'utilisation de matériaux spéciaux tels que les aciers au silicium, les ferrites et les amorphes.

- **Faible bruit :** Les transformateurs haute fréquence peuvent produire moins de bruit audible en raison de leur fonctionnement à des fréquences élevées.
- **Régulation précise :** Ils peuvent offrir une meilleure régulation de la tension et du courant grâce à la capacité de contrôle plus précis à des fréquences élevées.



Figure I.10 : Transformateurs haute fréquence [26]

I.6 Applications du TSC

Ces dernières années, un grand effort a été déployé pour concevoir, mettre en œuvre et exploiter tout le potentiel des TSC dans les systèmes de distribution d'énergie électrique, en particulier dans les réseaux électriques intelligents "smart grid". La Figure I.11 illustre d'une part le système électrique traditionnel, où le transformateur classique est intégré dans diverses applications du système de distribution d'énergie électrique. D'autre part, elle présente une vision de la manière dont le TSC pourrait être appliqué à l'avenir.

Le TSC peut être utilisé dans n'importe quel système électrique, mais compte tenu de ses capacités, il est logique de l'appliquer dans des systèmes où le transformateur classique n'est pas aussi efficace [28].

- *Systèmes de traction (Figure I.12 a))* **:** Le transformateur des systèmes de traction pour une locomotive représente environ 15% de leur poids total. Avec l'introduction du transformateur TSC dans ce type de systèmes, on s'attend à obtenir des améliorations significatives en termes de poids et d'efficacité.
- *Production d'énergie offshore (Figure I.12 b))* **:** L'introduction du transformateur TSC dans ces systèmes d'énergie entraîne une réduction de poids et de taille. Le principal avantage est la création de plates-formes plus petites à moindre coût. L'ajustement du facteur de puissance à une

valeur unitaire est un avantage supplémentaire de ce transformateur, augmentant ainsi l'efficacité de transmission de l'énergie.

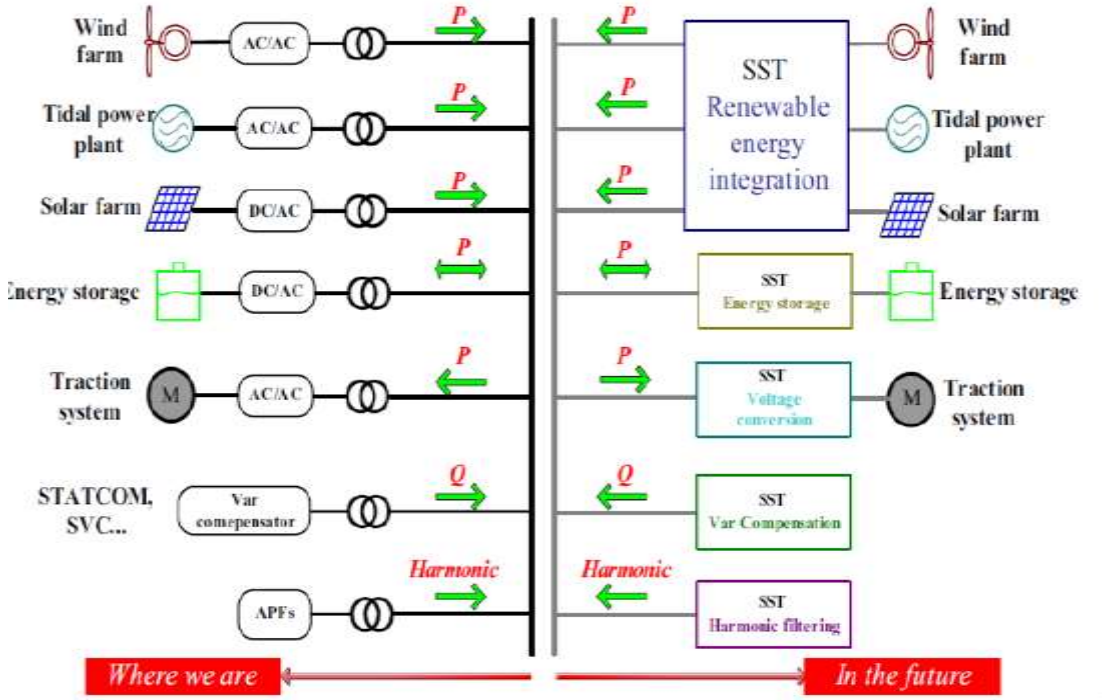


Figure I.11: Possibles applications du TSC dans le système de distribution d'énergie électrique [28].

- *Réseau Intelligent ou Smart grid (Figure I.12 c))* **:** Dans un avenir proche, avec l'augmentation de la production d'énergie renouvelable, l'utilisation d'un système de gestion d'énergie efficace devient nécessaire. Par conséquent, le transformateur TSC peut être intégré en tant que gestionnaire du flux d'énergie.

Le TSC présente une grande polyvalence. Nous allons donc analyser quelques applications de ce transformateur dans le réseau électrique [28] :

- *Application entre la source et la charge ou le réseau de distribution* (Figure I.13 A), B)). Le SST permet d'obtenir en sortie une fréquence et une tension efficace constantes, lorsque la tension et/ou la fréquence d'entrée sont variables. Le réglage du facteur de puissance à une valeur unitaire permet d'augmenter l'efficacité de la transmission d'énergie, ainsi que le flux de puissance active.

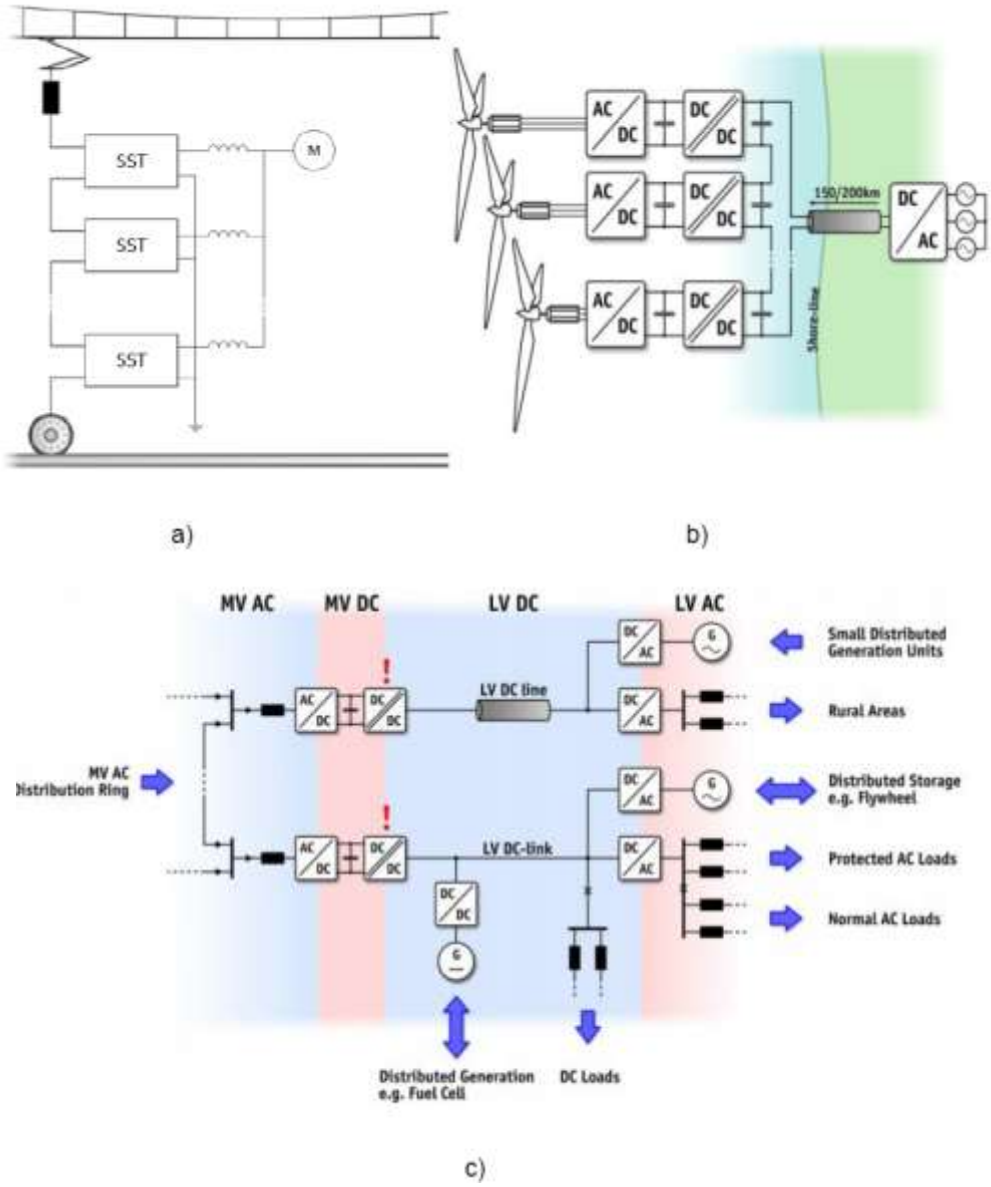


Figure I.12 : a) Application dans les systèmes de traction ; **b)** Production d'énergie offshore ; **c)** Smart grid [28].

- *Liaison entre deux réseaux de distribution* (Figure I.12 C)). Une des caractéristiques qui distingue le SST des transformateurs classiques est qu'il ne nécessite pas que les deux réseaux aient le même niveau de tension et de fréquence. Il peut également être utilisé comme compensateur d'énergie réactive pour les deux réseaux.
- *Application entre le réseau de moyenne tension et le réseau de basse tension ou la charge* (Figure I.12 D)). Dans ce contexte, le TSC présente un avantage par rapport au transformateur classique, car il permet le contrôle du flux d'énergie active entre le côté moyenne tension et le côté basse tension. Cette caractéristique est très utile dans le cas où il y a une génération d'énergie du côté basse tension, comme c'est le cas avec les panneaux photovoltaïques.

Comme on peut le constater, il existe de nombreuses applications pour le TSC, de sorte que pour chacune d'entre elles, il existe différents besoins. Ce travail se concentrera sur l'application du TSC entre le réseau de moyenne tension et celui de basse tension, tel que représenté dans la figure I.12 D).

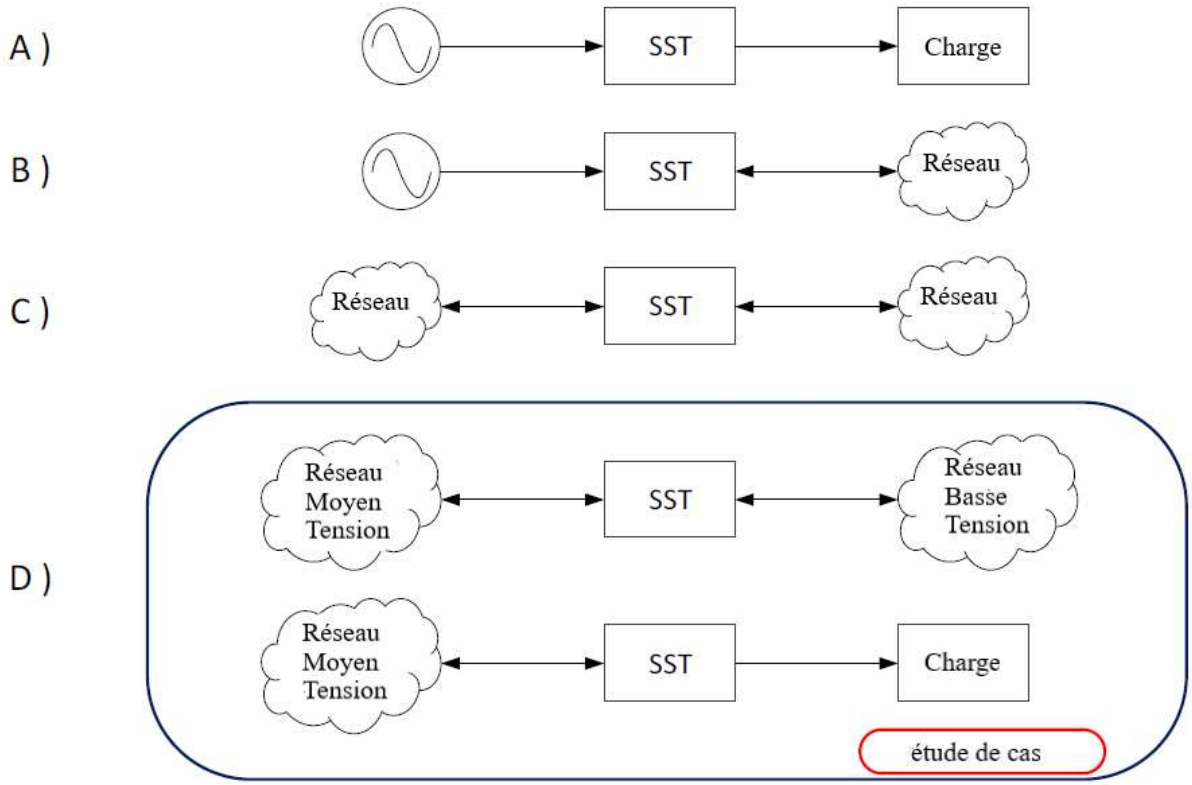


Figure I.13 : Différentes applications du TSC.

I.7 Comparaison entre les Transformateurs Classique et TSC dans le Réseau Électrique

Le transformateur basse fréquence (en anglais : Low Frequency Transformer (LFT)) fonctionne à la fréquence du réseau électrique (50 Hz en Algérie) et joue le rôle de convertir la tension du réseau entre les différents niveaux de tension de fonctionnement du réseau électrique (HT, MT et BT). Ces transformateurs n'ont aucun effet sur la fréquence ni sur tout autre paramètre du réseau électrique, leur fonction se limite à la réduction ou à l'augmentation de la tension au niveau secondaire (figure I.14).

De nos jours, les TBF sont des dispositifs fondamentaux du réseau de distribution d'énergie. L'utilisation généralisée du transformateur a conduit à une technologie relativement peu coûteuse, mature et très efficace. Malgré leur grande utilité, ils présentent quelques inconvénients, tels que :

- Dimensions importantes ;
- Présence d'huile dans le transformateur, nocive pour l'environnement ;
- Saturation du noyau du transformateur ;

- Fluctuations de tension ;
- Sensibilité aux harmoniques du courant de sortie ;
- Régulation de tension peu efficace. Au niveau de la distribution, la régulation de tension est peu satisfaisante.

En 1980, le chercheur James Brooks a mis en œuvre le premier prototype du Transformateur à Semi-conducteurs (TSC). En raison des importantes limitations technologiques de l'époque, il a rencontré peu de succès. Cependant, au fil des années, le concept du TSC s'est développé, avec différentes architectures et topologies, et au cours des dix dernières années, l'architecture et la topologie des TSC ont été adaptées pour permettre de nouvelles applications, notamment dans les systèmes électriques.

De par son fonctionnement à haute fréquence, les TSC permettent une réduction de leur taille et de leur poids par rapport à l'utilisation d'un TBF. Les TSC offrent un meilleur contrôle de la tension et permettent également de contrôler la fréquence au niveau du secondaire indépendamment de la fréquence au niveau du primaire par le transformateur. La Figure I.14 présente une représentation simplifiée de ce qui a été décrit.

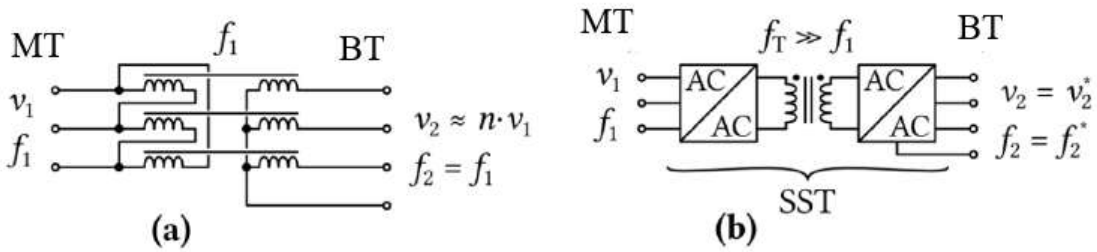


Figure I.14 : Schéma simplifié d'un TBF (a) et d'un TSC (b) [6].

Grâce à la topologie choisit pour le TSC, celui-ci présente de nombreux avantages lorsqu'il est utilisé dans le réseau entre MT et BT, notamment : [6]

- Limite l'inversion du flux de puissance dans les réseaux de distribution ;
- Contrôle des surtensions ;
- Identification et contrôle de la charge ;
- Réduction du poids et du volume du transformateur ;
- Correction du facteur de puissance ;
- Compensation de la puissance réactive ;
- Isolation des perturbations dans le réseau (creux, transitoires dans le réseau, ...) ;
- Connexion DC des deux côtés BT et MT ;
- Isolation galvanique entre réseaux ;
- Filtrage actif

En général, lorsque nous comparons ces deux types de transformateurs, TSC et TBF, les caractéristiques qui se démarquent le plus et les distinguent sont exposées dans la Figure I.15.

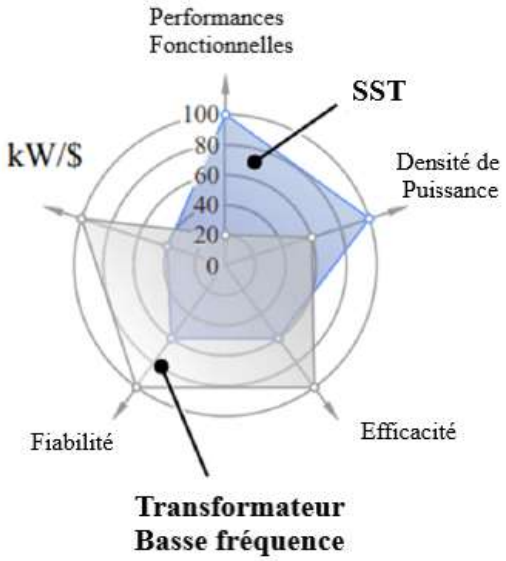


Figure I.15 : Comparaison TSC vs TBF [6]

C'est remarquable que les TSC offrent des avantages en termes de fonctionnalité opérationnelle dans le réseau et de densité de puissance. En incorporant un transformateur haute fréquence, leur volume est considérablement réduit par rapport aux TBF. Cette réduction, tant en volume qu'en poids, est habituellement de l'ordre de 20% à 50% [6].

Cependant, le TSC présente également certains inconvénients par rapport au transformateur conventionnel, qui peuvent inclure, entre autres, les éléments suivants : [11]-[12]

- Le coût du SST dépasse celui de son équivalent en transformateur conventionnel. Il est donc évident qu'il est nécessaire de disposer de semi-conducteurs haute tension et haute puissance bon marché et fiables pour être compétitif avec le transformateur conventionnel ;
- Le TSC a une efficacité inférieure à celle du transformateur conventionnel en raison des pertes de semi-conducteurs ;
- Le TSC a une conception plus sophistiquée (par exemple, nécessite plus de dispositifs et de composants pour la conception) que le transformateur conventionnel, ce qui ajoute certains risques en termes de fiabilité ;
- Le TSC présente des émissions électromagnétiques plus élevées que le transformateur conventionnel, ce qui peut nécessiter une meilleure compréhension de l'impact du TSC et une meilleure conception pour atténuer cet impact.

Ainsi, il est possible d'appliquer le TSC au réseau électrique et d'obtenir une plus grande efficacité et une plus grande densité de puissance avec sa mise en œuvre. Lorsque nous comparons ces deux types de transformateurs, nous pouvons comprendre que les avantages qu'ils offrent dépendent de leur application. Il existe plusieurs degrés de liberté pour le dimensionnement d'un TSC et plusieurs applications dans lesquelles il y a de nombreux avantages à utiliser des TSC par rapport aux transformateurs basse fréquence.

Avec l'intégration de systèmes de communication dans un TSC, on obtient un deuxième type de transformateur, le transformateur intelligent (Smart Transformer, ST), qui ajoute des avantages au premier grâce aux possibilités de gestion du réseau électrique à distance, d'échange de données sur divers paramètres du réseau par le biais de mesures directes et d'envoi de ces informations à ceux qui surveillent de près le réseau électrique, ce qui facilite grandement sa gestion.

Ainsi, l'évolution du TSC aboutit au ST, le transformateur intelligent. Les avantages de ce type de transformateur sont ceux mentionnés pour le TSC, auxquels s'ajoutent d'autres avantages comme :

- Contrôle à distance de la charge ;
- Contrôle à distance des systèmes de génération ;
- Analyse en temps réel de l'état du réseau électrique ;
- Facilité d'accès et de contrôle du réseau électrique ;
- Gestion plus efficace et efficiente du réseau électrique.

I.8 L'origine du Transformateur Intelligent

En 1968, McMurray a créé le transformateur à semi-conducteurs TSC (Solid-State Transformer, SST) [15], qui était basé sur des semi-conducteurs à électroniques de puissance. La véritable application du TSC n'est apparue que dans les années 90, pour une utilisation dans les systèmes de traction, comme les trains, afin de garantir que les transformateurs soient moins volumineux et moins lourds. En effet, le TSC permettait une réduction du volume et du poids d'environ 20% à 50% et une augmentation de l'efficacité d'environ 93% à 96%. Cependant, ce transformateur n'a jamais été produit industriellement parce que le gain marginal en termes de volume et de poids a été réduit avec l'augmentation de la fréquence de fonctionnement du réseau de distribution de 16,6 Hz à 50 Hz. [15]

Cependant, les avantages de l'utilisation du TSC dans les réseaux électriques de distribution sont bien plus importants que ceux dans le système de traction, car il facilite les fonctionnalités intelligentes. En réalité, le TSC peut remplacer le transformateur basse fréquence, permettant la connexion entre le réseau MT et le réseau BT, ainsi que fournir une connectivité à courant continue (DC) et des services de réseau des côtés MT et BT. Dans ce cas, contrairement au système de traction, où les exigences les plus importantes

sont le poids et le volume, les exigences principales pour le TSC dans le réseau électrique de distribution sont l'efficacité et la fiabilité, car il n'est pas tolérable d'avoir des interruptions dans la fourniture d'énergie électrique, ni des pertes élevées.

L'introduction de nouvelles fonctionnalités dans le TSC, notamment de contrôle et de communication, a rendu ce transformateur intelligent, donnant ainsi naissance au ST.

I.8.1 Flux de Communication d'un Transformateur Intelligent (ST)

Le ST a la capacité de communiquer avec les différents réseaux locaux, et le flux d'information peut se faire dans les deux sens, c'est-à-dire du transformateur vers le réseau, mais aussi du réseau vers le transformateur. Pour cette raison, le ST est une bonne option pour atténuer ou résoudre les problèmes de réseau.

La figure I.16 illustre le mode de fonctionnement du ST dans le réseau de distribution, où l'on peut observer les deux types de flux que le ST est capable de gérer : en rouge le flux d'énergie et en bleu le flux de communication. En plus des flux, on peut également observer les différents types de services que le ST peut fournir au réseau, mettant en évidence les services à l'industrie, aux hôpitaux, aux maisons intelligentes, aux systèmes d'énergie renouvelable, aux centrales électriques conventionnelles et aux systèmes de stockage d'énergie.

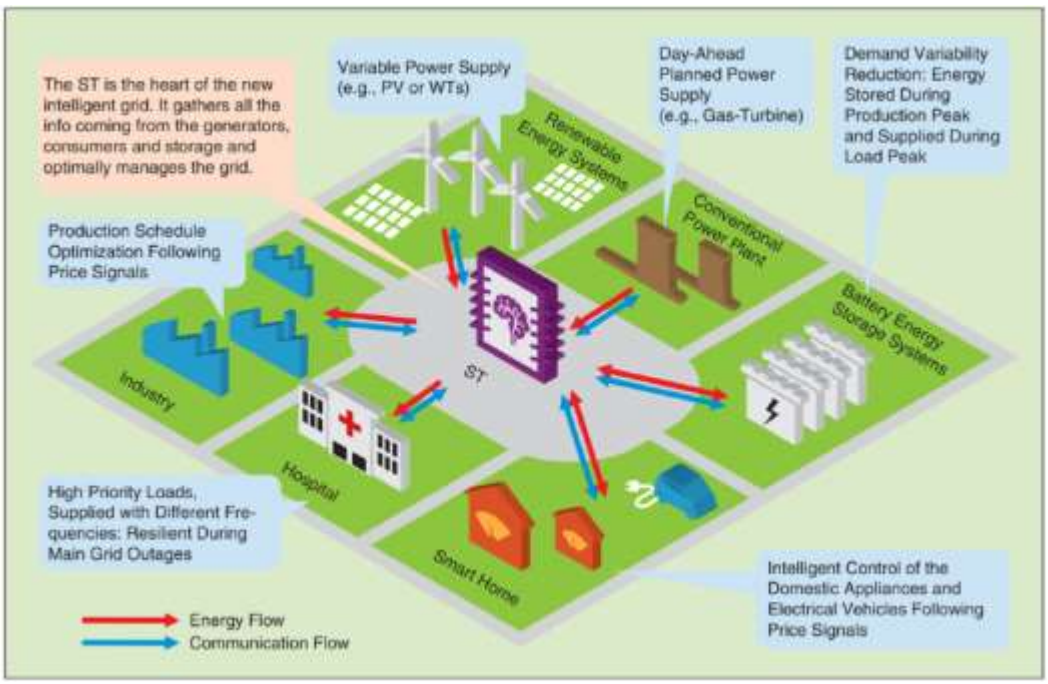


Figure I.16 : Schéma d'un réseau intelligent avec l'intégration d'un ST [13]

I.8.2 Architecture du Transformateur Intelligent

Il existe trois types d'architectures pour le ST, qui varient non seulement en nombre d'étages de conversion, mais tiennent également compte de l'efficacité, de la fiabilité et des fonctionnalités supplémentaires du ST. [15]

Les architectures, ainsi que leurs caractéristiques respectives, sont décrites ci-dessous :

- Architecture à 1 étage (MT-AC / BT-AC) et architecture à 2 étages (MT-AC / MT-DC / BT-AC) :
  - Nombre réduit de composants ;
  - Les perturbations d'un côté du ST peuvent également affecter l'autre côté ;
  - Ne permet pas l'intégration de réseaux BT DC.
- Architecture à 3 étages (MT-AC / MT-DC / BT-DC / BT-AC) :
  - Connexions DC des deux côtés ;
  - Réalise trois étapes de conversion (AC-DC, DC-DC, DC-AC), comme illustré dans la Figure I.17
  - Dispose de plus de fonctionnalités, telles que l'utilisation directe de sources renouvelables DC ;
  - Composé de : redresseur actif, isolé DC-DC et un onduleur.

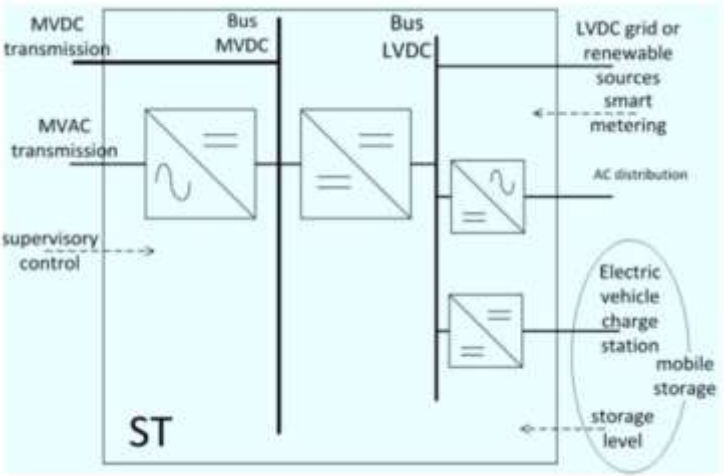


Figure I.17 : Diagramme de blocs d'un convertisseur à trois étages[15].

I.9 Conclusion

Ce chapitre a exploré les transformateurs à Semi-conducteur (TSC), en introduisant leur structure et en les comparant aux transformateurs traditionnels. Les TSC se distinguent par leur efficacité énergétique améliorée, leur compacité et leur flexibilité fonctionnelle, grâce à l'utilisation de technologies modernes de semi-conducteurs.

Les TSC représentent une avancée majeure pour les systèmes de distribution d'énergie électrique, offrant des réseaux plus robustes et efficaces. Cependant, ils posent des défis tels que le coût initial élevé,

la complexité de conception et la gestion thermique. La recherche et le développement continu seront essentiels pour surmonter ces obstacles.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la modélisation des transformateurs intelligents, en explorant les techniques permettant d'optimiser leur performance et leur intégration dans les systèmes électriques modernes.

CHAPITRE II :

Transformateur ST Modulaire

II.1 Introduction

Le transformateur intelligent mieux connus sous le nom de Transformateurs à Semi-conducteurs, 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 : convertisseur matriciel pour élever la fréquence 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 [14]

La structures de base de ce type de transformateur (appelé Solide-State-Transformer - SST), Cette structure comprend les étages suivants :

- ♦ Convertisseur matriciel haute tension-haute fréquence à base de semi-conducteurs
- ♦ Convertisseur matriciel base tension-haute fréquence à base de semi-conducteurs
- ♦ Transformateurs haute fréquence
- ♦ Redresseur coté base tension pour avoir l'énergie en DC
- ♦Filtre d'entrée et de sortie

II.2 - Convertisseur Matriciel Modulaire

Le Convertisseur Matriciel Modulaire est composé de convertisseurs matriciels monophasés en série, garantissant que les valeurs de tension supportées par les semi-conducteurs sont compatibles avec les semi-conducteurs actuellement disponibles sur le marché. Cela permet de garantir leur bon fonctionnement. [28]

La Figure II.1 représente un schéma simplifié de l'association en série des convertisseurs matriciels monophasés."

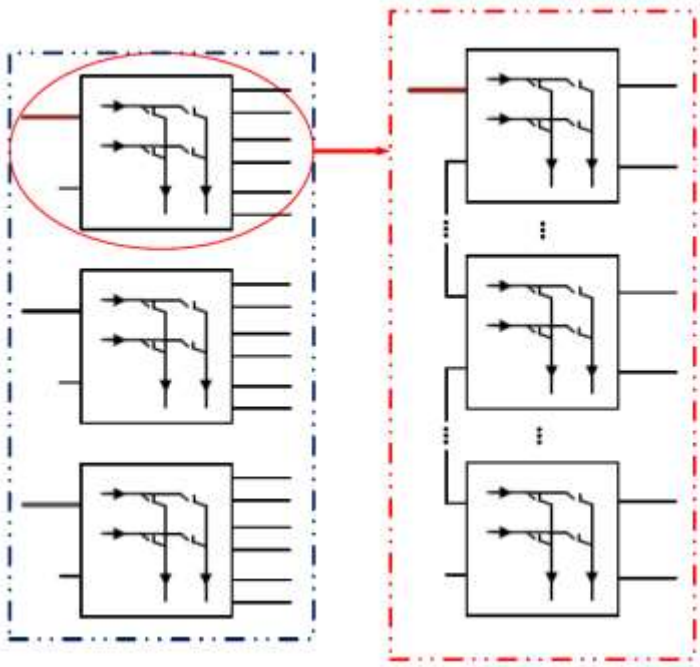


Figure II.1 - Schéma simplifié de l'association en série des convertisseurs matriciels monophasés. [28]

II.3 Topologie du ST

Le système proposé à mettre en œuvre est un ST modulaire destiné à être installé dans le réseau électrique de distribution, assurant la liaison entre le réseau MT et BT. Le ST est composé de convertisseurs matriciels monophasés aux étages d'entrée et de sortie, dont les semi-conducteurs sont commutés à haute fréquence. Entre les convertisseurs d'entrée et de sortie se trouvent les transformateurs à haute fréquence. Dans le cas étudié, la fréquence de fonctionnement des transformateurs est de 50 kHz.

En plus des trois phases de sortie vers le réseau BT, le ST présente également un bus DC qui peut être très utile dans diverses applications telles que le chargement de véhicules électriques. Le schéma général de la topologie est présenté dans la Figure II.2.

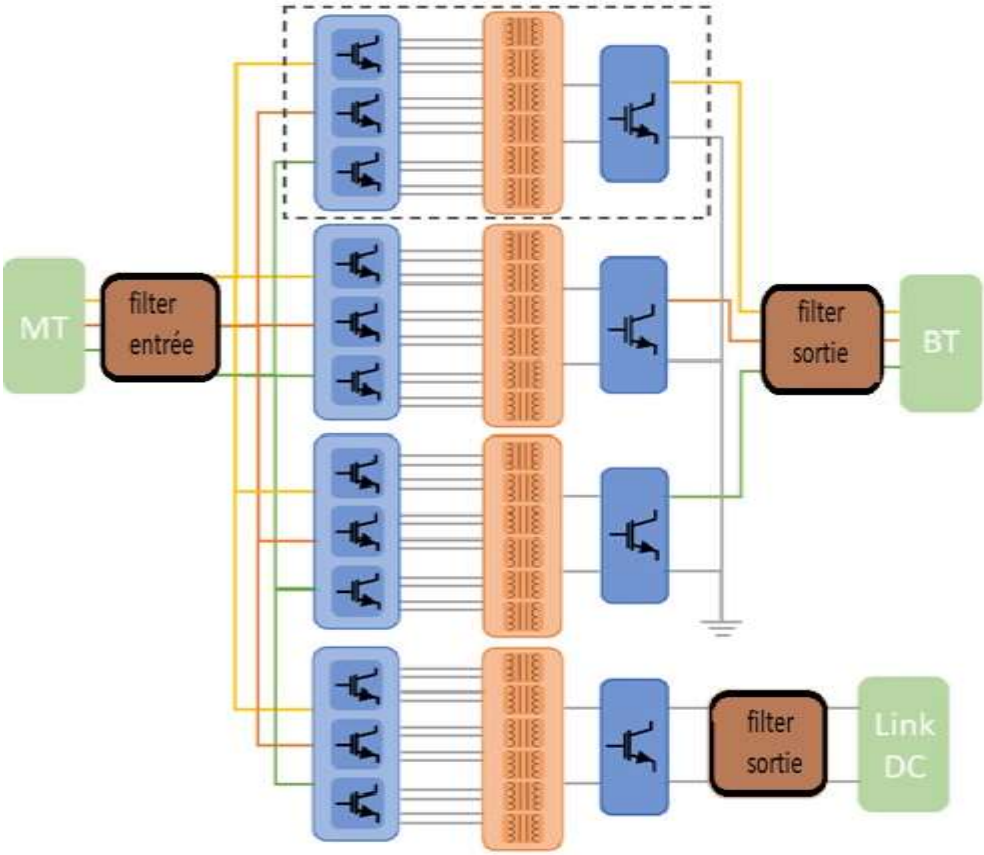


Figure II.2 : Topologie simplifiée de ST [15]

Le premier étage de conversion du ST est présenté en détail dans la Figure II.3, où la composition modulaire de ce transformateur peut être observée. Cette figure explique le premier ensemble de 3 convertisseurs de l'étage d'entrée du ST, les connexions entre les transformateurs à haute fréquence et le convertisseur de sortie correspondant qui caractérise chacune des phases de sortie du ST.

Pour une meilleure compréhension de ce qui sera exposé par la suite, il convient de souligner que l'état des interrupteurs Sa_{11}, Sa_{12}, Sa_{13} et Sa_{14} correspond à l'état des interrupteurs

Sa_{15}, Sa_{16}, Sa_{17} et Sa_{18} respectivement. Le même raisonnement s'applique aux autres convertisseurs de chaque étage de conversion du ST. Ainsi, pour simplifier, les états de Sa_{11}, Sa_{12}, Sa_{13} et Sa_{14} seront toujours considérés, sans mention, comme correspondant aux états des 4 autres interrupteurs de ce même convertisseur.

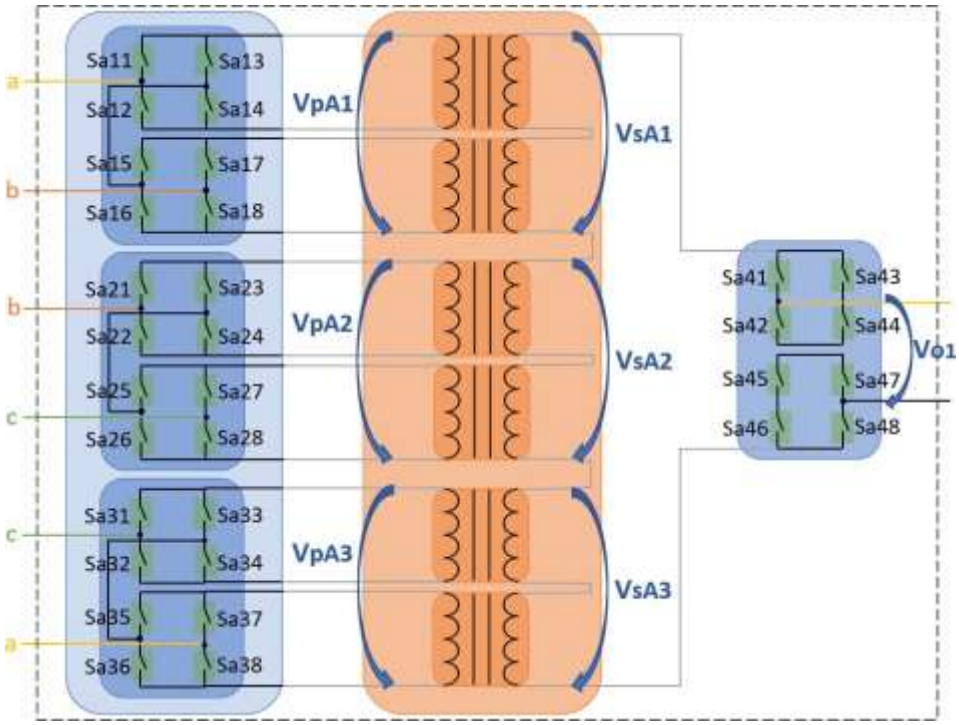


Figure II.3 : Représentation détaillée de l'étage de conversion d'une phase de sortie ST, plus précisément la première phase [15].

Les interrupteurs identifiés comme Sa_{11}, Sa_{12}, et ainsi de suite, correspondent à des interrupteurs bidirectionnels pouvant avoir différentes configurations composées d'IGBT de diodes et/ou de MOSFET connectés de manière à permettre la bidirectionnalité du courant et de la tension [25]. Une des représentations possibles pour les interrupteurs bidirectionnels est présentée dans la Figure II.4.

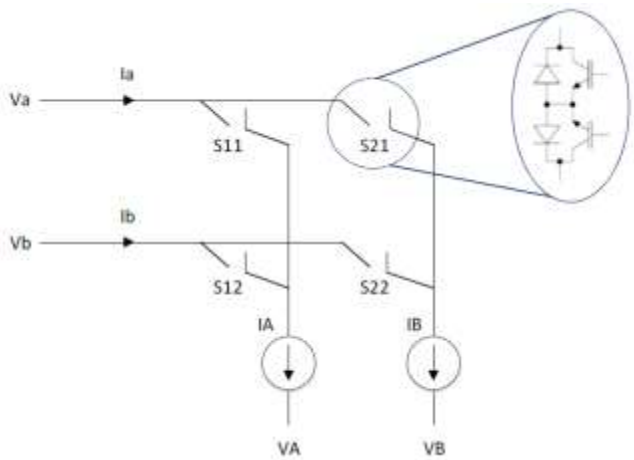


Figure II.4 : Représentation des interrupteurs bidirectionnels [28].

Cette configuration composée d'IGBT avec connexion à un émetteur commun et à des diodes garantit un transit d'énergie bidirectionnel et permet le support de tensions et courants continus et inverses [15].

Selon l'état des interrupteurs, il est possible d'établir une correspondance entre ceux-ci et les tensions obtenues à la sortie du convertisseur, en fonction de son entrée. Le Tableau II.1 montre cette correspondance pour le premier convertisseur de l'ensemble des trois convertisseurs d'entrée de la Figure II.3, qui correspond aux mêmes états possibles pour chacun des convertisseurs de ce niveau.

Les deuxième et troisièmes convertisseurs d'entrée de chacun des trois étages de conversion du ST ont les mêmes combinaisons possibles que celles représentées dans le Tableau II.1. Les tensions de sortie pour ces deuxièmes et troisièmes convertisseurs de l'étage de conversion sont V_{bc} et V_{ca} pour les états qui indiquent la tension V_{ab} dans le tableau, respectivement.

Tableau II.1 : Combinaisons possibles d'états des interrupteurs du premier convertisseur d'entrée de la Figure II.3.

S_{a11}	S_{a12}	S_{a13}	S_{a14}	V_{pA1}
1	0	0	1	V_{ab}
1	1	0	1	0
0	1	1	0	$-V_{ab}$
0	0	1	1	0

Selon chacune des tensions possibles à la sortie de chaque convertisseur, et sachant qu'un étage de conversion est composé de trois convertisseurs matriciels monophasés, les tensions possibles à obtenir au secondaire du transformateur haute fréquence, à un facteur d'échelle près pour simplification correspondant au rapport de transformation, sont représentées dans le Tableau II.2.

Tableau II.2 : Tensions de sortie du transformateur haute fréquence du premier étage de conversion en fonction des tensions de sortie des trois convertisseurs d'entrée respectifs.

Phase a			V_{o1}
V_{pA1}	V_{pA2}	V_{pA3}	
V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	0
V_{ab}	V_{bc}	$-V_{ca}$	$-2V_{ca}$
V_{ab}	V_{bc}	0	$-V_{ca}$
V_{ab}	$-V_{bc}$	V_{ca}	$-2V_{bc}$
V_{ab}	$-V_{bc}$	$-V_{ca}$	$2V_{ab}$
V_{ab}	$-V_{bc}$	0	$-3V_b$
V_{ab}	0	V_{ca}	$-V_{bc}$
V_{ab}	0	$-V_{ca}$	$3V_a$
V_{ab}	0	0	V_{ab}
$-V_{ab}$	V_{bc}	V_{ca}	$-2V_{ab}$
$-V_{ab}$	V_{bc}	$-V_{ca}$	$2V_{bc}$
$-V_{ab}$	V_{bc}	0	$3V_b$
$-V_{ab}$	$-V_{bc}$	V_{ca}	$2V_{ca}$
$-V_{ab}$	$-V_{bc}$	$-V_{ca}$	0
$-V_{ab}$	$-V_{bc}$	0	$V ca$
$-V_{ab}$	0	V_{ca}	$-3V_a$
$-V_{ab}$	0	$-V_{ca}$	V_{bc}
$-V_{ab}$	0	0	$-V_{ab}$
0	V_{bc}	V_{ca}	$-V_{ab}$
0	V_{bc}	$-V_{ca}$	$-2V_{ca}$
0	V_{bc}	0	$-V_{ca}$
0	$-V_{bc}$	V_{ca}	$-3V_c$
0	$-V_{bc}$	$-V_{ca}$	V_{ab}
0	$-V_{bc}$	0	$-V_{bc}$
0	0	V_{ca}	V_{ca}
0	0	$-V_{ca}$	$-V_{ca}$
0	0	0	0

Il faut noter que la commande du convertisseur matricielle modulaire AB, est la même pour les autres convertisseurs modulaires BC et CA avec un décalage de 2л/3.

Figure II.4 présente l'esquisse graphique des signaux d'entrée et de sortie à obtenir dans ce même convertisseur AC/AC. En d'autres termes, il est prévu de convertir un signal sinusoïdal d'une fréquence de 50 Hz en un autre signal avec la même amplitude mais commuté à 50 kHz. Il est important de noter que la figure II.5 n'est pas à l'échelle

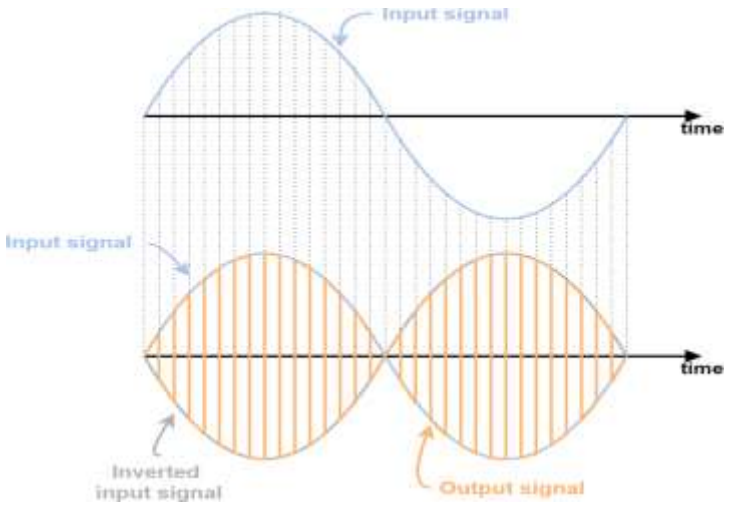


Figure II.5: Schéma graphique des formes d'onde d'entrée et de sortie AC/AC [26]

II.4 Dimensionnement des Filtres du ST

II.4.1 Filtre d'Entrée

Le dimensionnement du filtre d'entrée du ST présenté dans cette section vise à minimiser les pertes, le déphasage entre les tensions du réseau et celles appliquées au ST, ainsi que le déphasage entre les tensions et courants d'entrée pour obtenir un facteur de puissance unitaire [15]. Le filtre utilisé à l'entrée du ST est un filtre de second ordre et peut être représenté par le schéma de la Figure II.6.

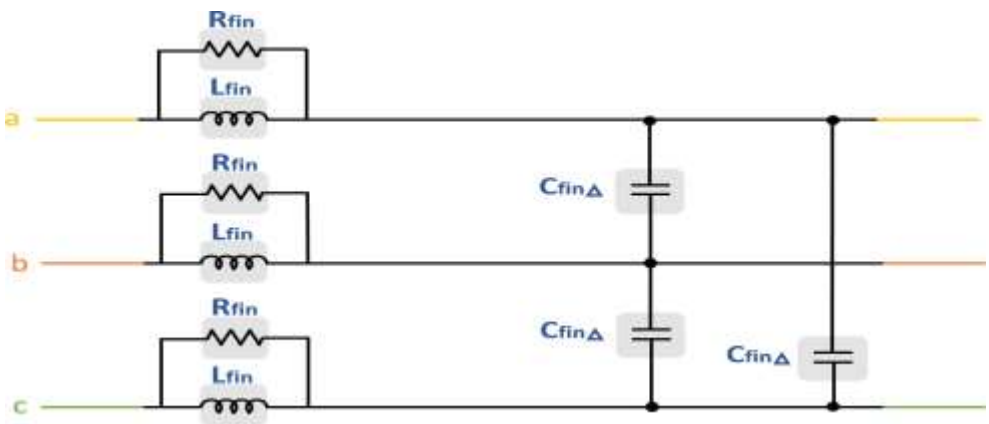


Figure II.6: Filtre d'entrée du système de surveillance [15].

Pour dimensionner le filtre, le schéma équivalent monophasé représenté dans la Figure II.7est pris en compte. C'est sur la base de ce schéma équivalent que tous les composants du filtre sont dimensionnés.

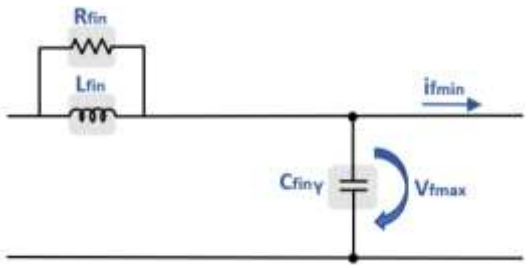


Figure II.7: Schéma équivalent du filtre d'entrée du système de surveillance [15].

Pour le calcul de la capacité du condensateur du filtre d'entrée, on considère l'équation de dimensionnement II.1 [15]. Pour cela, il est nécessaire de connaître le courant minimum à la sortie du filtre, $I_{f\,min}$, la tension maximale à la sortie de celui-ci, $V_{f\,max}$, le facteur de puissance, P_f, et la fréquence du réseau f_i, c'est-à-dire ω_i.

$$C_{finY} = \frac{I_{fmin}}{w_c V_{fmax}} \times \tan\left(cos^{-1}(FP)\right) \qquad (II.1)$$

La valeur de la bobine est calculée à partir de l'équation (II.2), en considérant la valeur du condensateur calculée en (II.2) et la valeur de la fréquence de coupure f_c, c'est-à-dire ω_c. Cette fréquence de coupure doit correspondre à une valeur entre la fréquence du réseau et la fréquence de commutation, plus précisément une décade au-dessus de la fréquence du réseau et une décade en dessous de la fréquence de commutation, soit $f_i << f_c << f_s$, c'est-à-dire, $\omega_i << \omega_c << \omega_s$. Cet aspect est important pour que le filtre minimise les harmoniques de haute fréquence et l'effet de résonance résultant de la fréquence de coupure [15].

$$I_{fm} = \frac{1}{w^2 c f_{min}} \qquad (II.2)$$

La résistance d'amortissement qui est connectée en parallèle avec la bobine est dimensionnée selon l'équation (II.3). Il convient de noter que Z_{fin} correspond à l'impédance du filtre d'entrée qui est donnée par l'équation (II.4).

$$\boldsymbol{R = \frac{Z_{fin}}{2\,\zeta}} \qquad \text{(II.3)}$$

$$\boldsymbol{Z_{fin} = \sqrt{\frac{L_{fin}}{C_{finY}}}} \qquad \text{(II.4)}$$

Selon ce qui a été exposé précédemment, avec les valeurs calculées, les conditions sont réunies pour dimensionner le filtre d'entrée. Les valeurs de la résistance d'amortissement et de la bobine du schéma équivalent monophasé correspondent aux valeurs appliquées à ces mêmes composants dans le filtre d'entrée du ST. La valeur de la capacité du condensateur du filtre d'entrée du ST est liée à la valeur de la capacité du condensateur présent dans le schéma équivalent par l'intermédiaire de l'équation (II.5).

$$\boldsymbol{C_{fin\Delta} = \frac{C_{finY}}{3}} \qquad \text{(II.5)}$$

Le tableau II.3, les valeurs des composants constitutifs du filtre d'entrée du système de surveillance étudié sont présentées.

Tableau II.3 : Valeur des composants du filtre d'entrée.

$C_{fin\Delta}$ [μF]	L_{fin} [mH]	R_{fin} [Ω]
0.65	1.1	382

II.4.2 Filtre de Sortie

Le filtre de sortie appliqué à la sortie du ST correspond à la représentation présentée sur la Figure II.8. Ce filtre est caractérisé comme un passe-bas, permettant d'obtenir un courant de meilleure qualité du côté BT en filtrant les harmoniques de haute fréquence.[15]

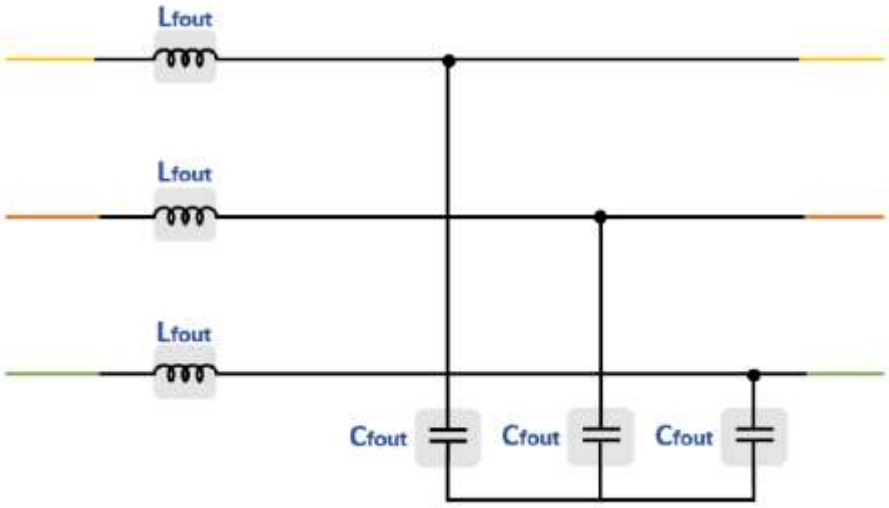


Figure II.8 : Filtre de sortie AC du ST [15].

Afin de dimensionner le filtre de sortie du ST, on utilise une simplification basée sur le schéma équivalent monophasé représenté dans la Figure II.9

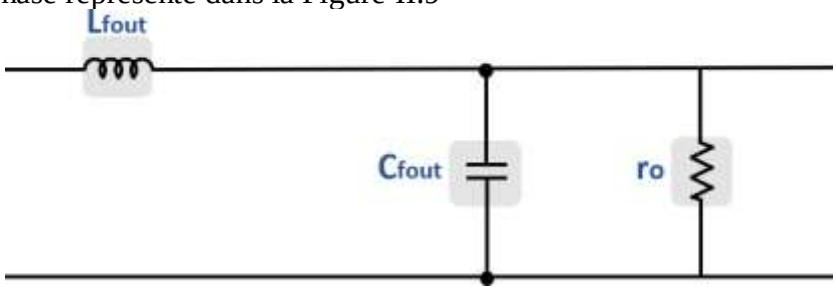


Figure II.9: Schéma équivalent du filtre de sortie AC du ST [15]

Tous les calculs des composants constitutifs du filtre de sortie du ST correspondent aux composants représentés dans le schéma équivalent monophasé. La capacité du condensateur du filtre de sortie doit être obtenue à partir de l'équation II.6, où $Z_{f\,out}$ est l'impédance caractéristique du filtre de sortie et est obtenue par l'équation II.7. Dans cette dernière expression, r_0 correspond à la valeur de la résistance équivalente en sortie du filtre obtenue à partir des valeurs de tension et de puissance en sortie du côté BT, et ζ correspond au coefficient d'amortissement du filtre.[10]

$$C_{fout} = \frac{1}{w_c z_{fout}} \qquad \text{(II.6)}$$

$$z_{fout} = \frac{r_0}{2\zeta} \qquad \text{(II.7)}$$

La valeur de ω_c, tout comme pour le filtre d'entrée, est liée à la fréquence de coupure f_c choisie. Cette fréquence de coupure doit correspondre à une valeur d'une décade au-dessus de la fréquence du réseau et une décade en dessous de la fréquence de commutation, ce qui peut être représenté par la condition suivante : $f_i << f_c << f_s$, c'est-à-dire, $\omega_i << \omega_c << \omega_s$. La valeur de la bobine peut être obtenue selon l'équation (II.8) en fonction de la valeur de l'impédance caractéristique du filtre de sortie et de la fréquence de coupure, de manière similaire à ce qui a été considéré précédemment[14].

$$L_{fout} = \frac{z_{fout}}{w_c} \qquad \text{(II.8)}$$

Tableau II.4 : Valeurs des composants du filtre de sortie

C_{fout} [μF]	L_{fout} [mH]
0.23	440

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les transformateurs intelligents (ST) modulaires, une avancée des transformateurs à Semi-conducteur (TSC). Nous avons détaillé la topologie des ST, soulignant leur flexibilité et adaptabilité grâce à des configurations modulaires. Les ST utilisent des composants électroniques avancés pour gérer efficacement les flux d'énergie, facilitant leur intégration dans les réseaux intelligents et les infrastructures de recharge pour véhicules électriques. Nous avons également discuté des avantages et des défis de chaque topologie, mettant en avant les innovations qui rendent ces systèmes essentiels pour l'avenir de la gestion de l'énergie. Dans le prochain chapitre, nous simulerons cette topologie des ST avec le logiciel Matlab pour valider les concepts et analyser leur performance dans des scénarios pratiques.

CHAPITRE III :

Résultats de simulation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une série de scénarios et d'expériences pour évaluer l'efficacité du transformateur intelligent, toutes les simulations ont été réalisées à l'aide de l'outil Simulink de Matlab.

Afin de simuler et d'étudier les performances du transformateur intelligent (ST) dans son fonctionnement dans le réseau électrique, on définit dans une phase initiale les paramètres qui caractérisent le ST et son transformateur haute fréquence (THF), sous lesquels les simulations seront effectuées. Les tableaux III.1et III.2 présentent ces caractéristiques pour le fonctionnement du ST comme convertisseur de tension 10 kV / 400 V, reliant ainsi le réseau de moyenne tension (MT) et basse tension (BT).

Tableau III.1 : Valeurs des paramètres du ST.

Paramètres de Simulation	***Valeur***
$V_{RMS_{MT}}\,[V]$	10 000
$V_{RMS_{BT}}\,[V]$	400
$\omega_{MT}\,[rads^{-1}]$	$2\pi.50$
$\omega_{BT}\,[rads^{-1}]$	$2\pi.50$
$f_{transformateur}\,[Hz]$	50 000

Tableau III.2 : Valeurs des paramètres du HFT

Parameters de HFT	***Valeur***
$V_{RMS\ P}\,[V]$	10 000
$V_{RMS\ S}\,[V]$	400/3
$R_P = R_S\,[\Omega]$	0
$L_P = L_S\,[H]$	0

La figure III.1 montre le schéma global du système dans la simulation. De gauche à droite, il inclut le réseau alternatif (AC), suivi du filtre d'entrée, du convertisseur matriciel AC/AC modulaire monophasé, et du transformateur haute fréquence (HFT). Ensuite, connecté au HFT se trouve le convertisseur matriciel AC/AC monophasé, ainsi que la liaison DC, et dans la partie la plus à droite du système se trouve les différentes charges connectées à notre transformateur. En plus de ces éléments, la simulation inclut également des équipements de mesure (tels que voltmètres et ampèremètres) et le système de commande, représenté par le rectangle rouge, comme on peut le voir dans la figure III.1. L'annexe B montre tous les schémas de simulation qui composent le système, y compris les schémas des sous-systèmes présents dans la figure III.1.

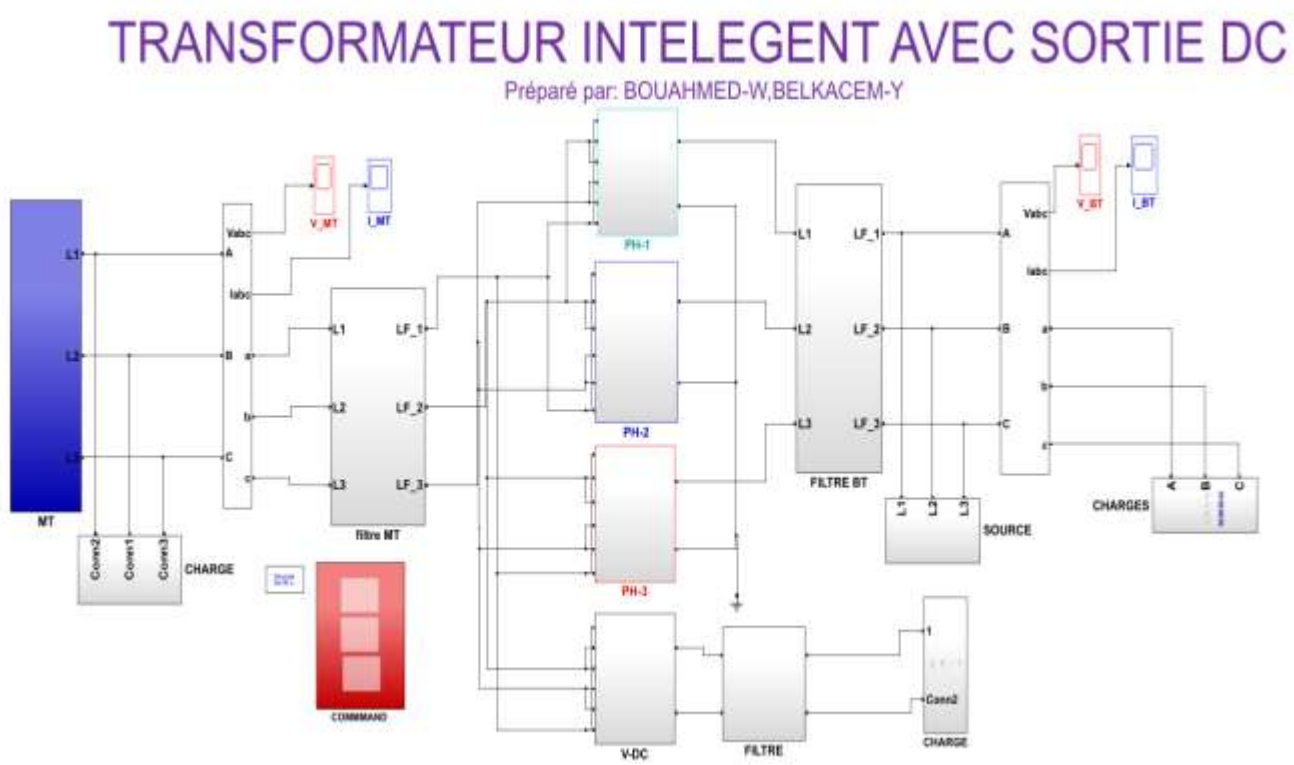


Figure III.1 : schéma globale de transformateur intelligent (ST).

La figure III.2 montre en détaille les composant du bloc Ph-1, qui est composé du gauche à droite de convertisseur matricielle modulaire coté MT, des transformateurs haute fréquence idéals ainsi que du convertisseur matriciel modulaire coté BT.

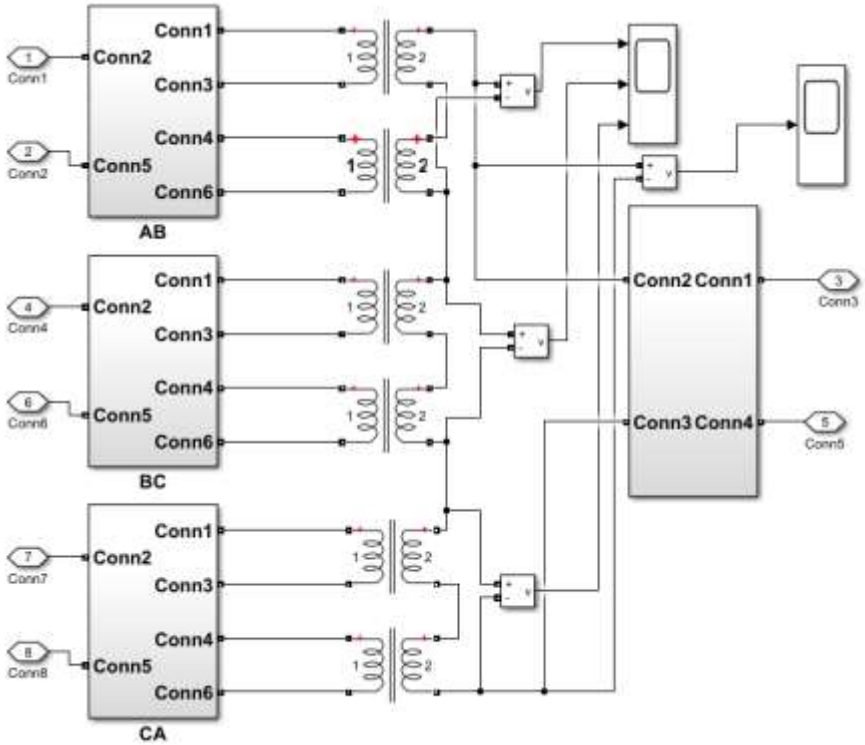


Figure III.2 : schéma éclater du bloc ph-1

III.2 Scénarios d'Étude

Cette section présente en détail les résultats obtenus dans les Cinque scénarios considérés. Le premier cas consiste à définir le réseau MT et BT avec une charge linéaire RL. Le deuxième est similaire au premier, mais au lieu d'avoir une seule charge, il présente deux charges linéaires RL en parallèle. Dans la troisième situation, est en ajoutant une charge non linéaire, sa première partie est Redresseur triphasé a diode et la deuxième partie est Redresseur triphasé a diode demi pont. Le quatrième scénario consiste à intégrer une source électrique coté BT. Dans la cinquième situation il a été Chargement des Véhicules Électriques (VE)

III.2.1 Charge linéaire : "Dans ce cas d'étude, la charge est représenté uniquement par une charge RL, comme le montre la figure III.3 ou R= 60 Ω et L=3x10^{-3} mH.

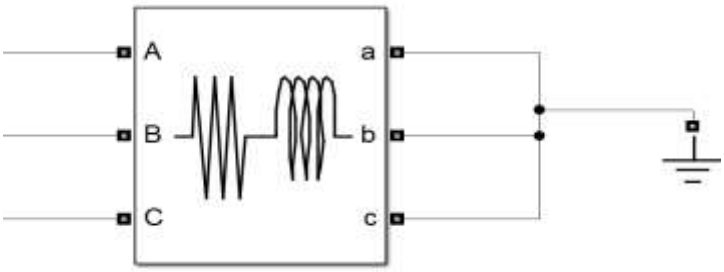


Figure III.3 : charge linéaire RL.

Le réseau AC est défini par une source de tension AC caractérisée par les paramètres présentés dans le tableau III.1. Les figures III.4 et III.5 montrent les résultats de la simulation du réseau AC en régime permanent, incluant la forme d'onde de la tension et la forme d'onde du courant.

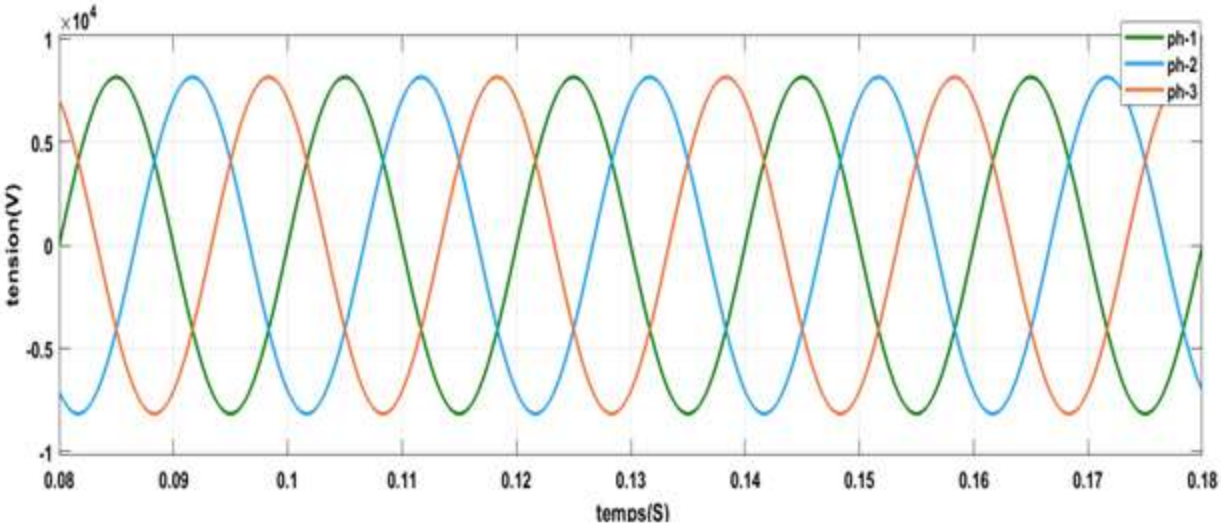


Figure III.4: La forme d'onde de la Tension triphasée côté MT.

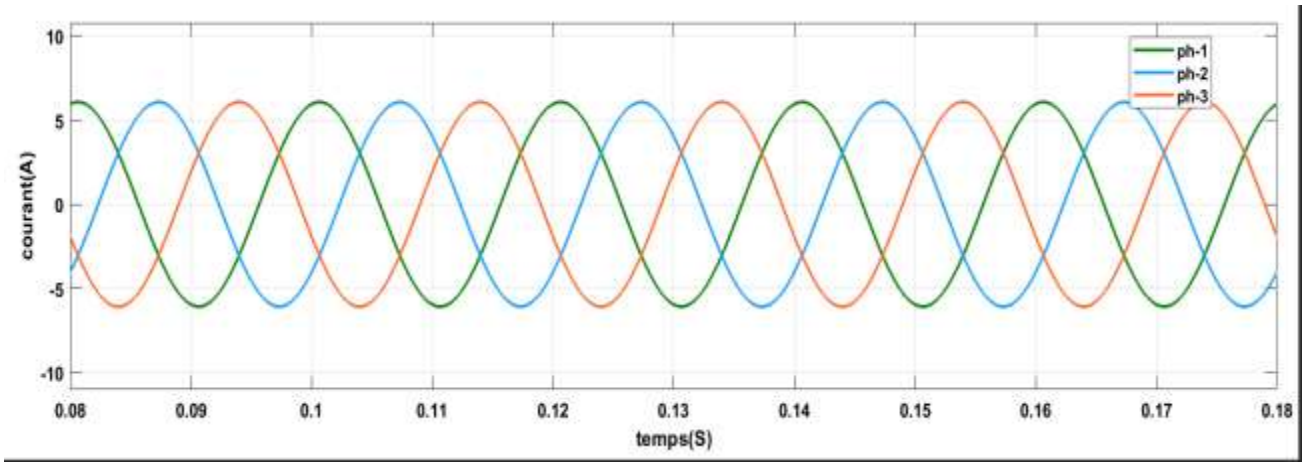


Figure III.5: La forme d'onde du Courant côté MT.

Il est possible de conclure, en analysant les figures III.4 et III.5, que le courant du réseau AC présente le comportement souhaité, c'est-à-dire que la tension et le courant ont tous deux une forme d'onde sinusoïdale.

Il convient de noter que le filtre d'entrée permet de minimiser certaines des harmoniques de haute fréquence du courant d'entrée. Ces harmoniques résultent de la haute fréquence de commutation des semi-conducteurs qui composent les convertisseurs d'entrée du ST, et ces courants ont une forme approximativement sinusoïdale. Le contrôle des courants MT n'a pas pu être simulé dans MATLAB en raison de la limitation du programme à exécuter la complexité de calcul nécessaire. Ce contrôle aurait permis d'obtenir des ondes sinusoïdales avec une interférence réduite par rapport aux ondes de la Figure III.4.

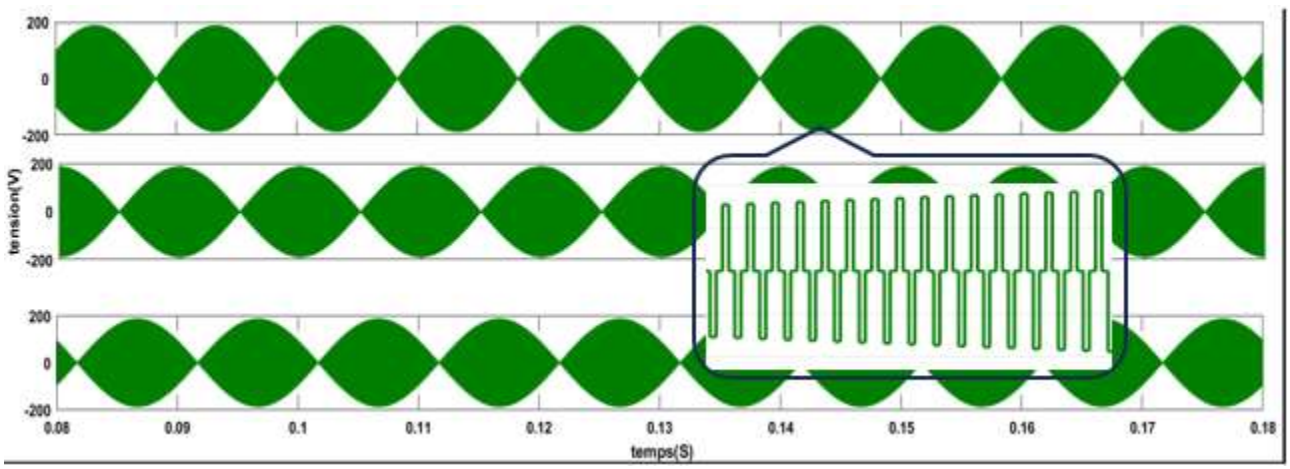


Figure III.6: La forme d'onde de la Tension de sortie des convertisseurs du premier étage de conversion du ST.

Les tensions en sortie des convertisseurs restants sont représentées, pour le deuxième et le troisième étage de conversion du ST, dans les Figures III.7 et III.8.

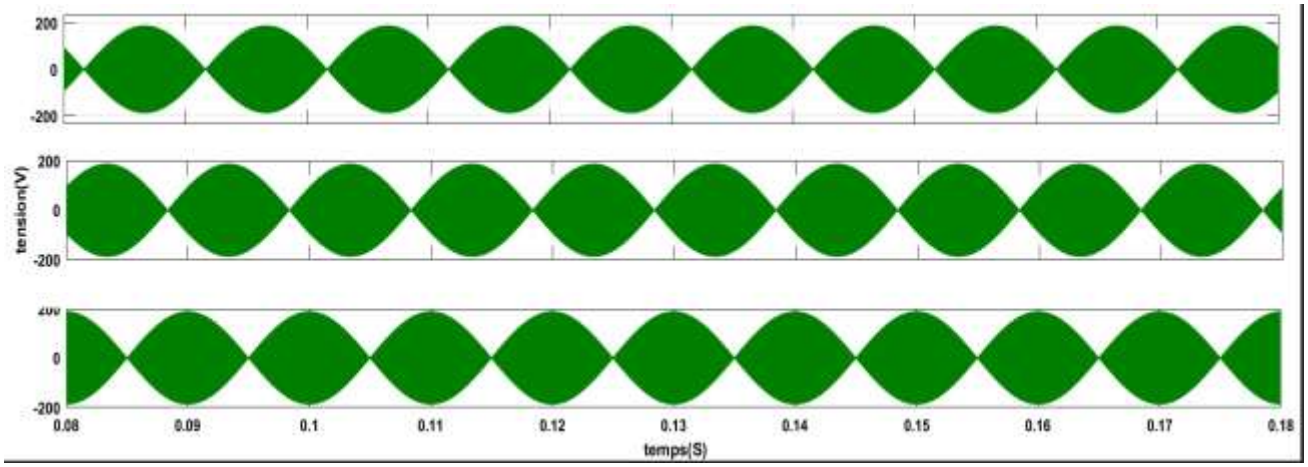


Figure III.7: La forme d'onde de la Tension de sortie des convertisseurs du deuxième étage de conversion du ST.

Néanmoins, nous pouvons constater que, même avec quelques interférences résultant de l'absence de contrôle, les ondes tendent à se rapprocher d'une forme sinusoïdale. Les tensions de sortie de chacun des convertisseurs qui composent le premier étage de conversion du ST sont représentées dans la Figure III.6.

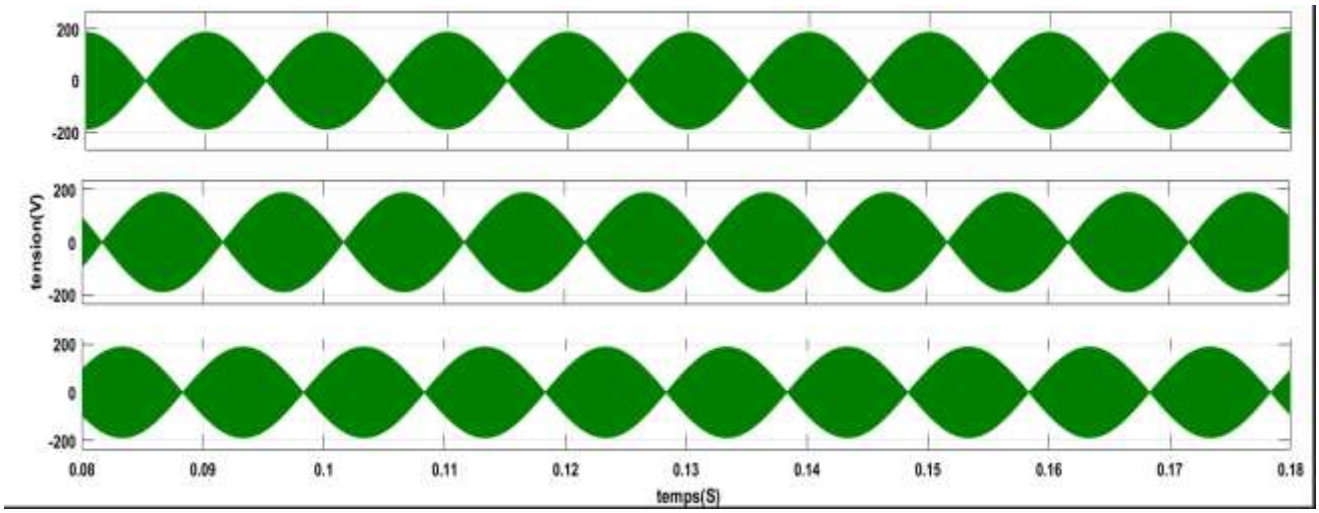


Figure III.8: La forme d'onde de la Tension de sortie des convertisseurs du troisième étage de conversion du ST.

Ces tensions de sortie des convertisseurs d'entrée du ST correspondent donc aux tensions d'entrée du transformateur haute fréquence. Ainsi, à la sortie du transformateur, nous avons, pour chacun des étages de conversion du ST, les représentations de la Figure III.9

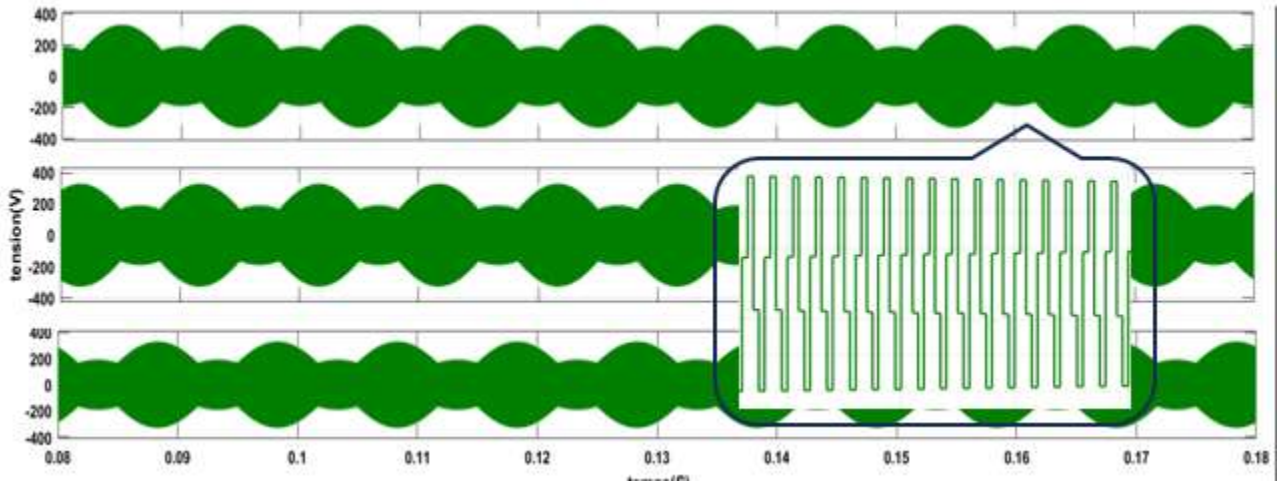


Figure III.9: La forme d'onde de la Tension de sortie du transformateur de chaque étage de conversion du ST.

La tension obtenue côté BT est représentée sur la figure III.10

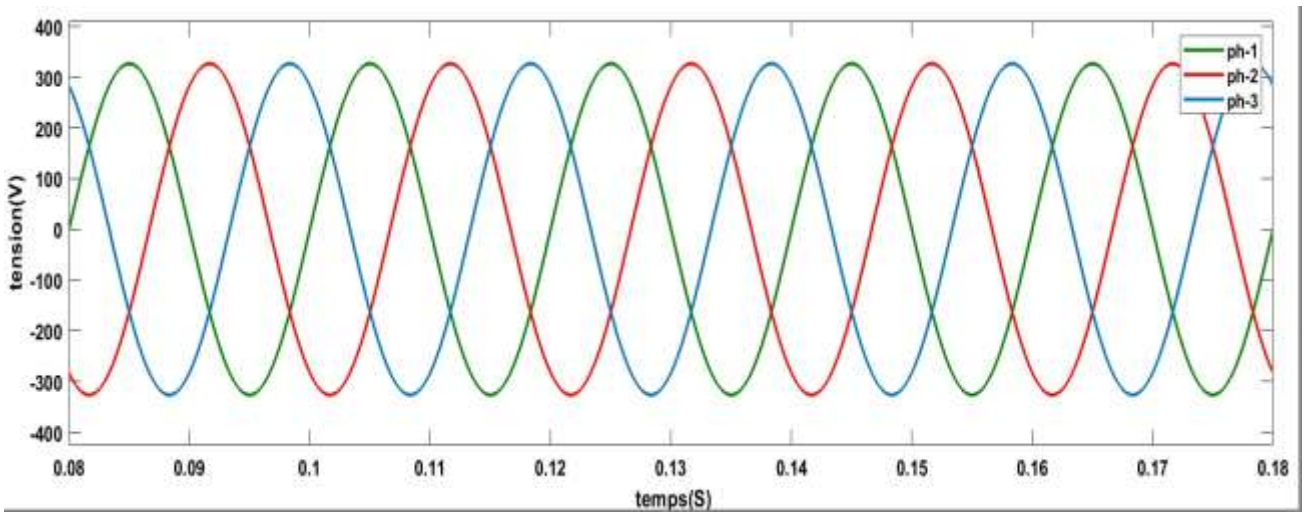


Figure III.10: La forme d'onde de la Tension au niveau de la charge.

III.2.2 Réseau AC BT avec deux charges RL en Parallèle

Le deuxième cas simulé présente le réseau AC BT caractérisé par deux charges RL en parallèle, comme le montre la figure III.11, où (R_1, L_1) (R_2, L2) sont égaux. La simulation commence uniquement avec la charge R_1L_1 connectée, et ce n'est qu'au moment t_1 que la charge R_2L_2 est connectée. Lors de l'exécution du test, l'instant t_1 a été fixé à 0,1 s. et 0,4 s.

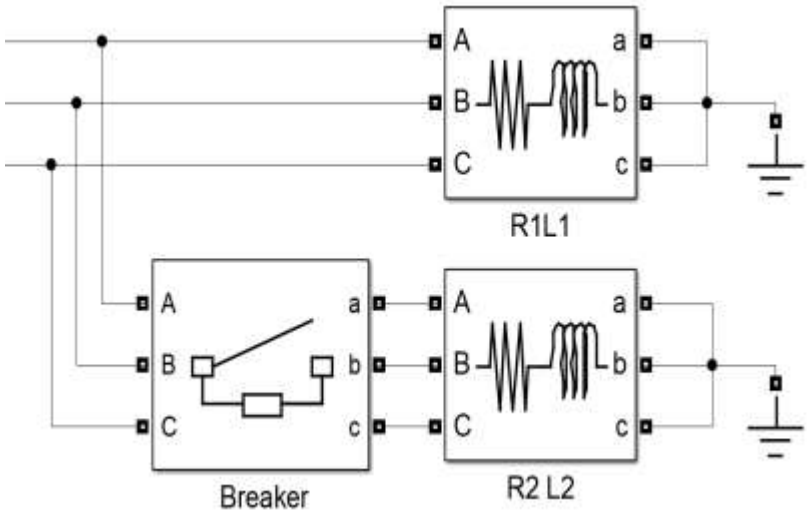


Figure III.11 : charge linéaire variable.

Dans cette simulation, le système jusqu'à l'instant 0,1 s est le même que dans le cas initial, à l'exception de la valeur de la charge du réseau AC. Par conséquent, c'est à partir de cet instant qu'il devient pertinent d'observer les résultats puisque c'est à partir de ce moment que le système à deux charges en parallèle. Les figures III.12 et III.13 et les figures III.14 et III.15 présentent respectivement les résultats du réseau AC coté MT et coté BT, dans un intervalle de temps incluant l'instant où la seconde charge est connectée. Les figures III.12 et III.14 représente la forme d'onde de la tension coté MT et BT respectivement, et les figure III.13 et III.15 montre la forme d'onde du courant coté MT et BT respectivement.

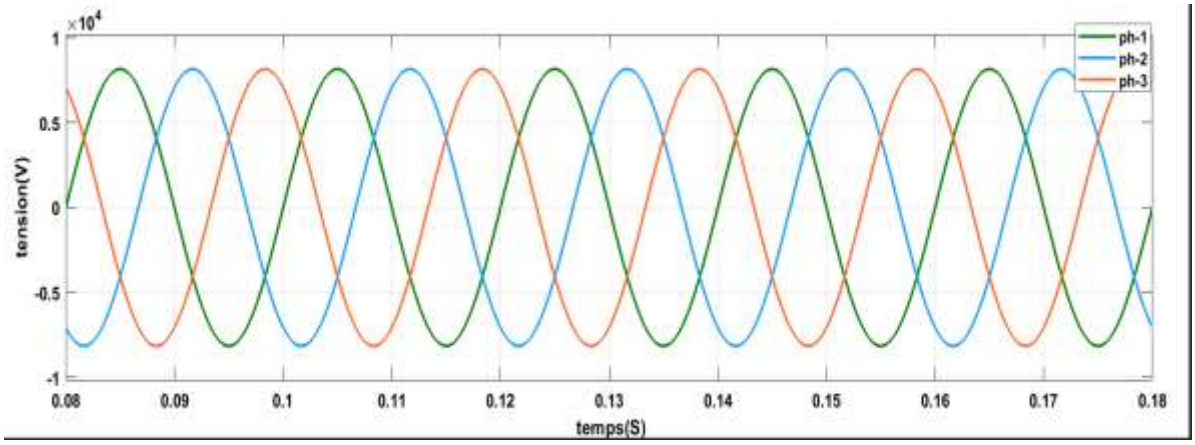


Figure III.12: La forme d'onde des Tensions triphasée du côté MT.

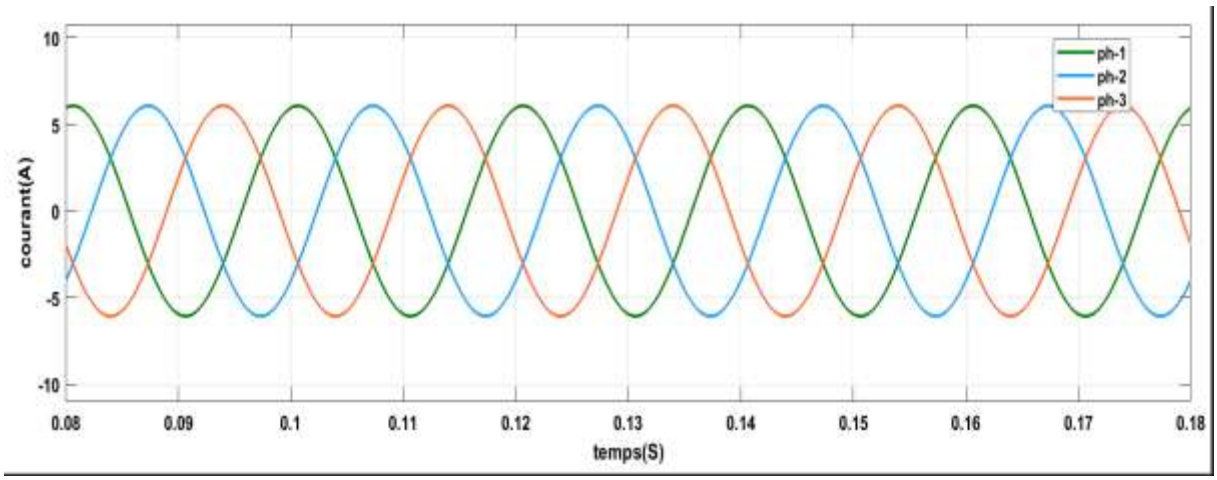


Figure III.13: La forme d'onde des courants triphasée côté MT.

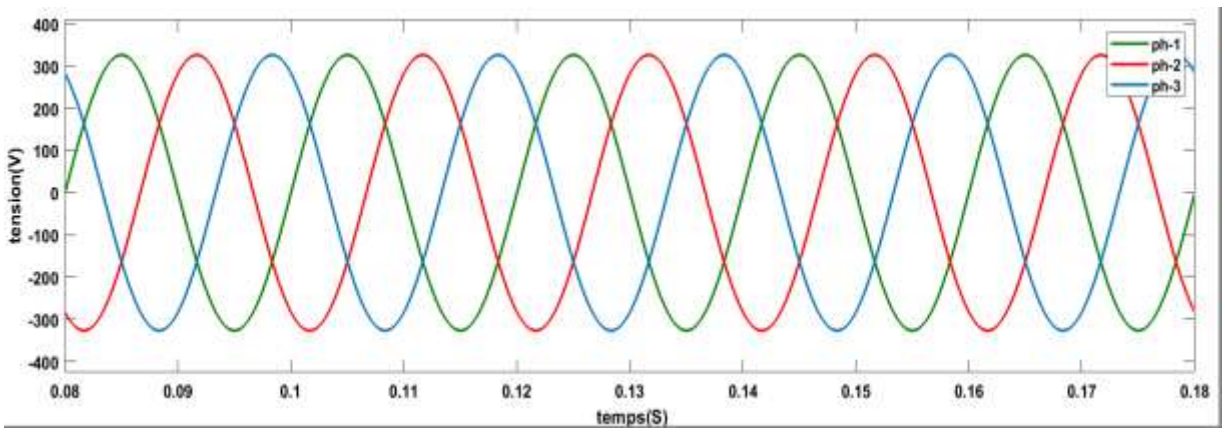


Figure III.14: La forme d'onde des tensions triphasées du côté BT.

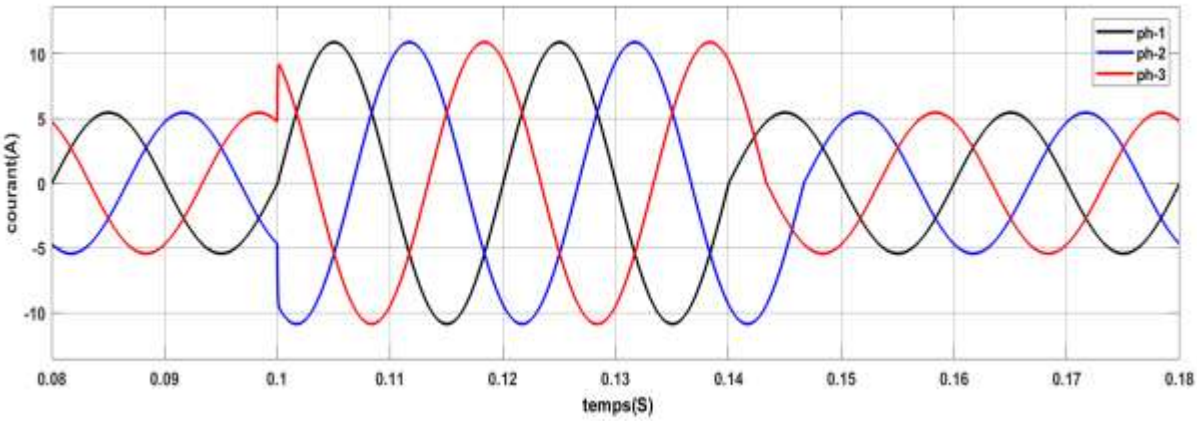


Figure III.115: La forme d'onde des courants triphasées côté BT.

Il devient évident, en analysant la figure III.15, qu'à l'instant où la seconde charge est connectée au réseau AC BT, la valeur du courant augmente, comme prévu. De plus, des oscillations dans la forme d'onde du courant sont également observées. La raison en est qu'après la perturbation dans le système (la connexion de la deuxième charge), le système passe par un transitoire avant d'atteindre l'état stable. Lorsque le système atteint à nouveau l'état stable, le courant se stabilise et les oscillations précédentes ne sont plus observées, comme le montre la figure III.15. Cette figure affiche de nouveau le courant du réseau AC BT, mais cette fois dans un intervalle de temps après avoir atteint le régime permanent avec la déconnexion de la 2ème charge.

III.2.3 Charge Non Linéaire

a) Redresseur triphasé a diode

Le troisième teste, c'est une charge non linéaire représentée par un redresseur triphasé a diode, avec charge résistive R=100 Ω représentés dans les Figures III.16.

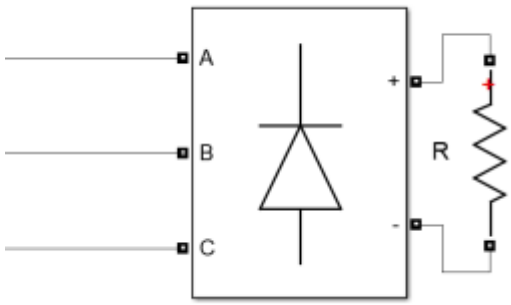


Figure III.16: Charge Non Linéaire**.**

Les tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT et BT et valeur de THD, représentés dans les Figures III.17 et III.18

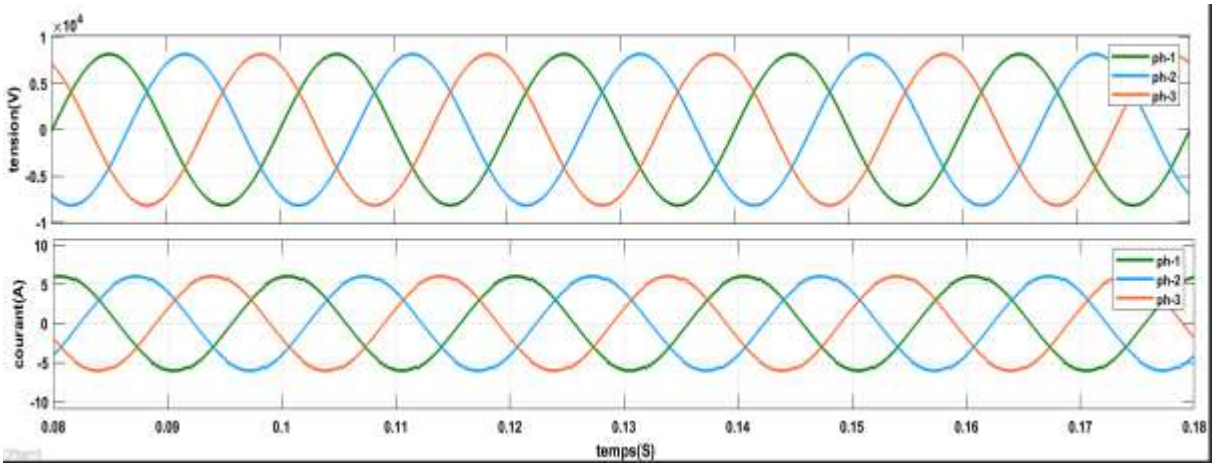


Figure III.17: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT (THD=0.34%).

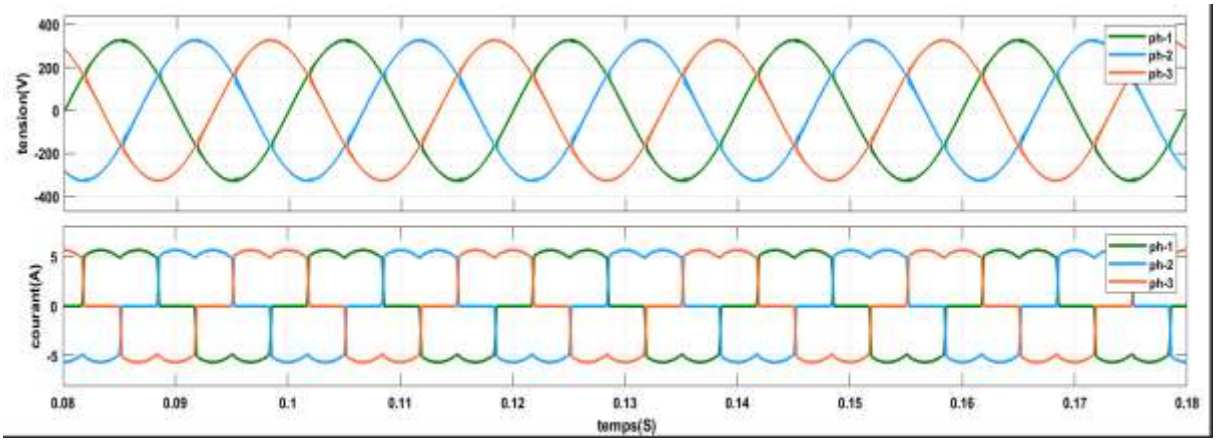


Figure III.18: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT

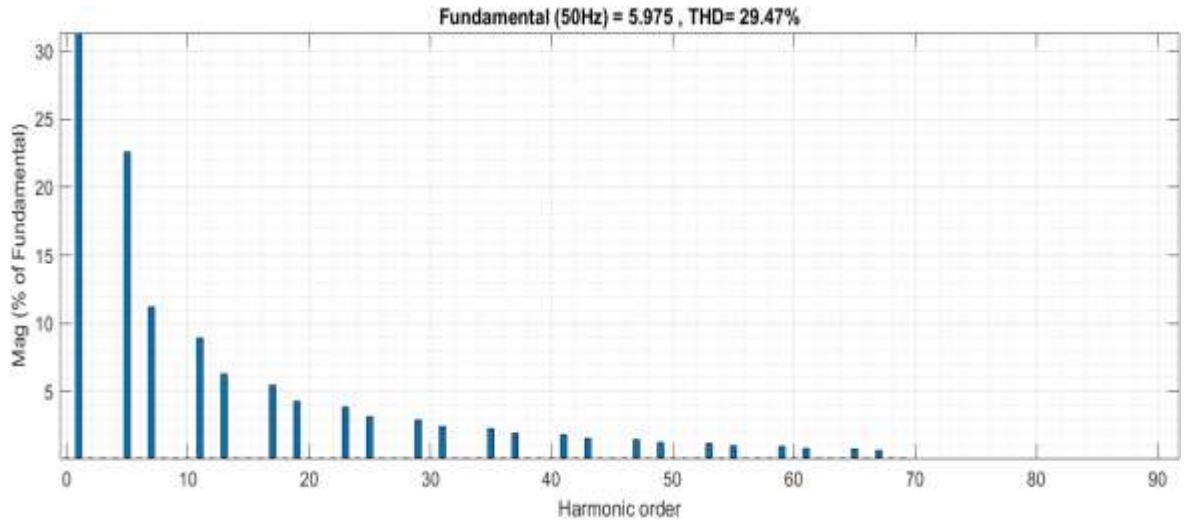


Figure III.19: représenté analyse spectrale de THD de côté BT

.

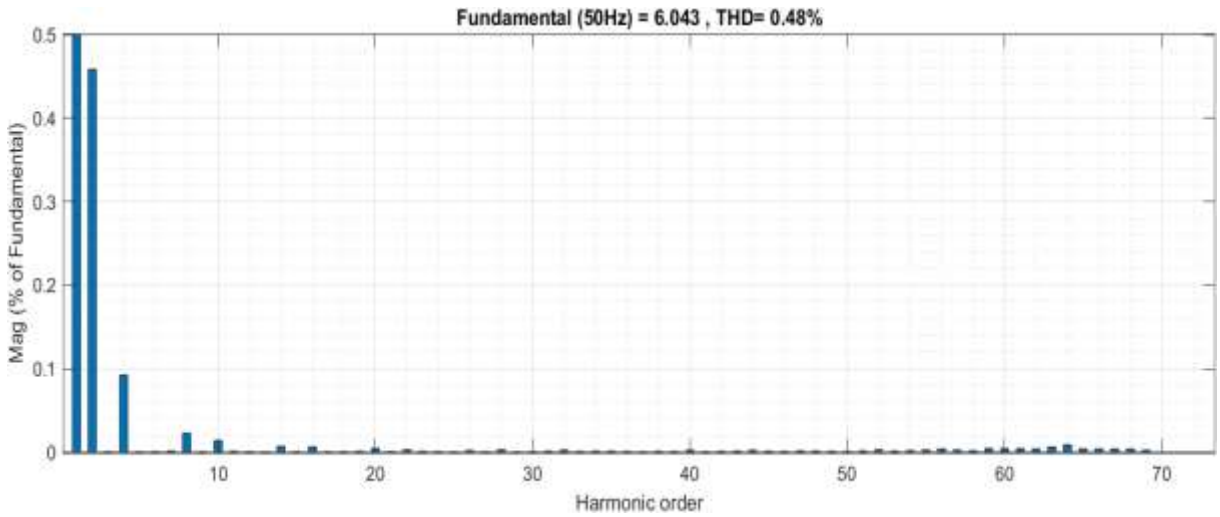


Figure III.20: représenté analyse spectrale de THD de côté MT

Même avec une charge non linéaire côté réseau AC BT, on a enregistré une THD=29.48% coté BT, et une THD = 0.48% côté réseau AC MT ce qui est tolérable selon les normes NE50160

b) Redresseur triphasé a diode demi pont

La quatrième teste, c'est-charge non linéaire redresseur triphasé a diode demi pont, avec une charge résistive, R=100 Ω représentés dans les Figures III.19

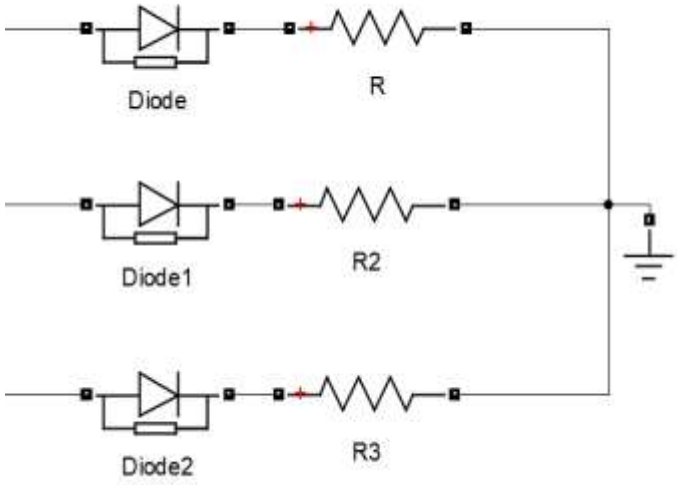


Figure III.21: charge non linéaire **(**Redresseur triphasé a demi pont).

Les tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT et BT sont représentés dans les Figures III.22 et III.23 ainsi que les valeurs de THD.

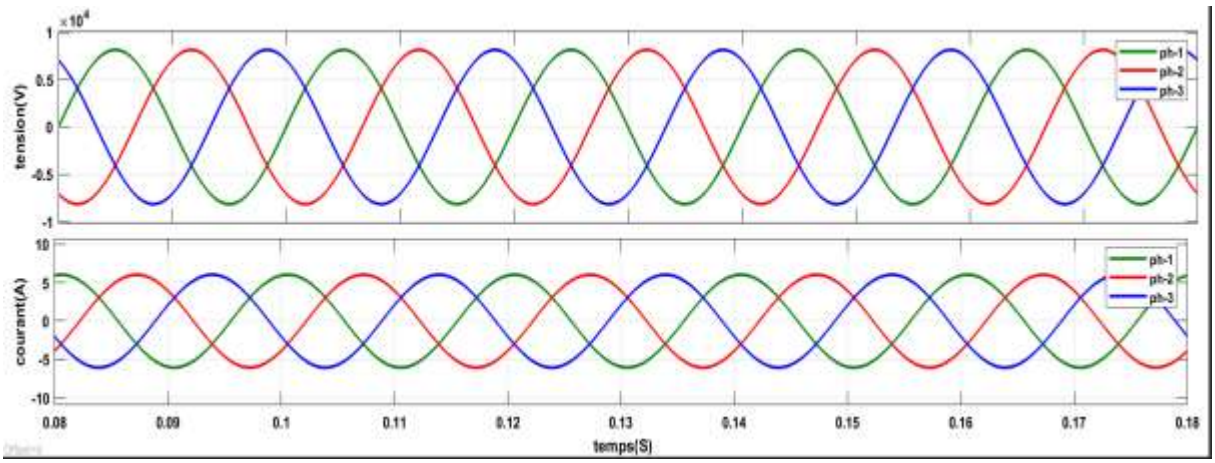


Figure III.22: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT

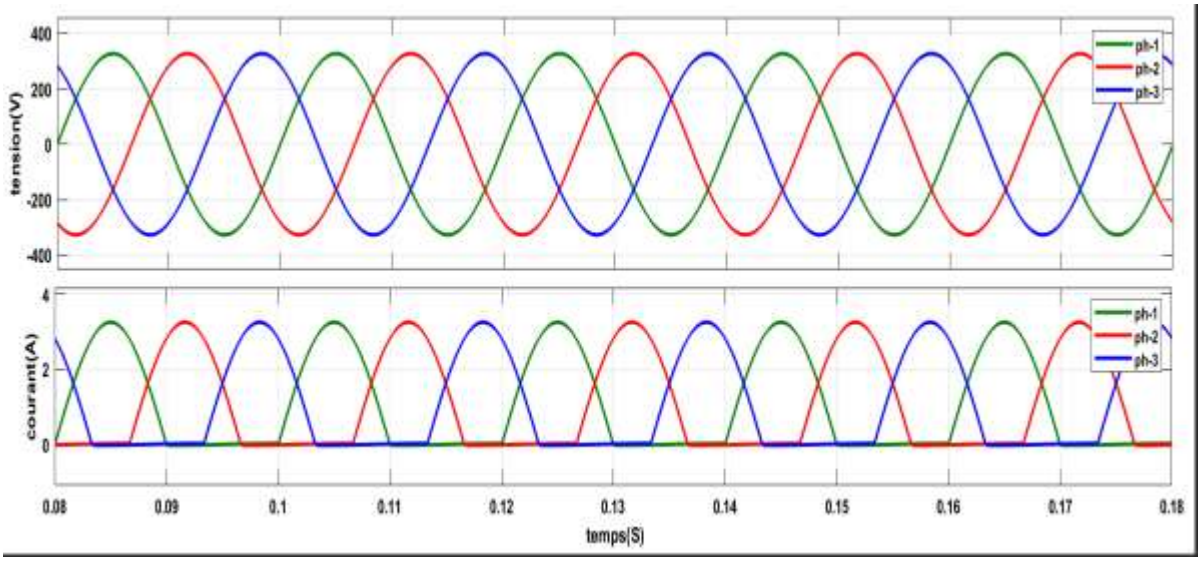


Figure III.23: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau BT.

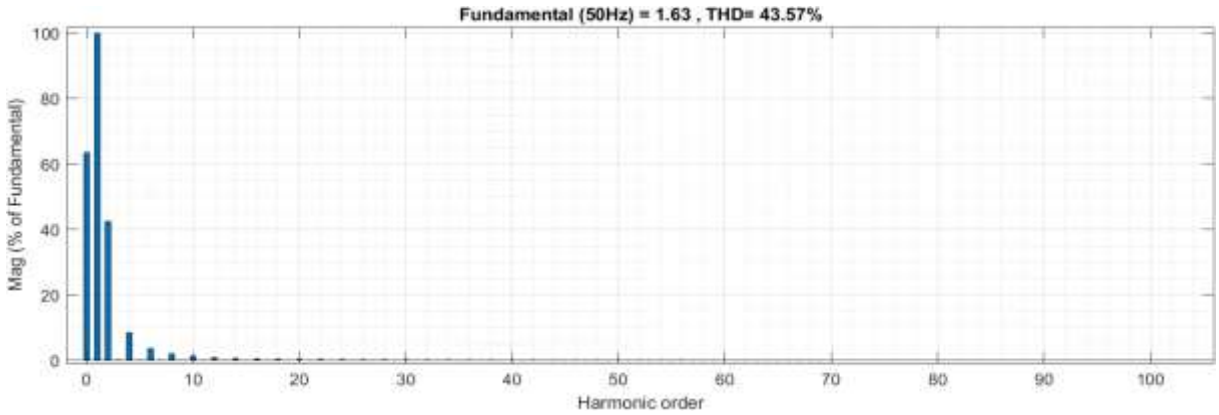


Figure III.24: représenté analyse spectrale de THD de côté BT

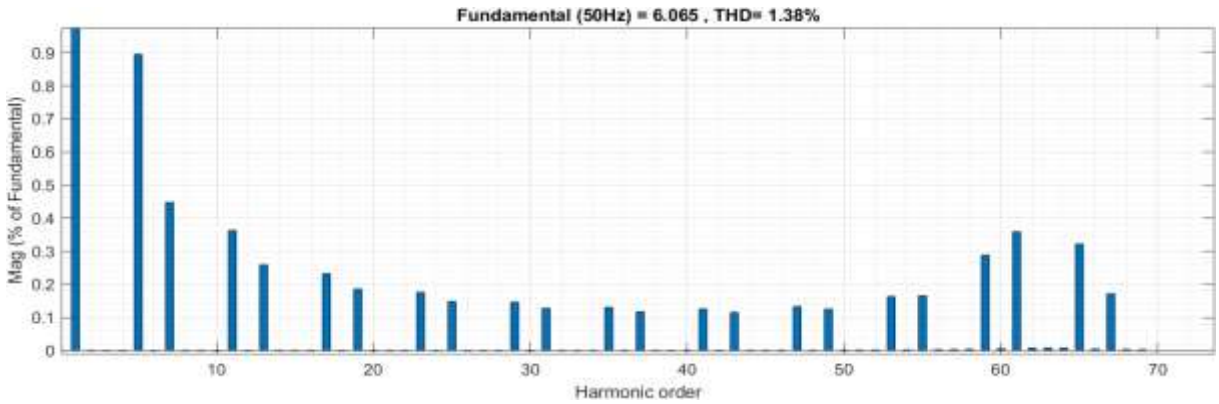


Figure III.25: représenté analyse spectrale de THD de côté MT

Même avec une charge non linéaire côté réseau AC BT, on a enregistré une THD=43.6 % coté BT, et une THD = 1.38 % côté réseau AC MT ce qui est tolérable selon les normes NE50160.

III.2.3 Intégration d'autres Sources

Nous avons intégré une autre source U = 400 V, f = 50 Hz du côté BT comme le montre la figure III.26.

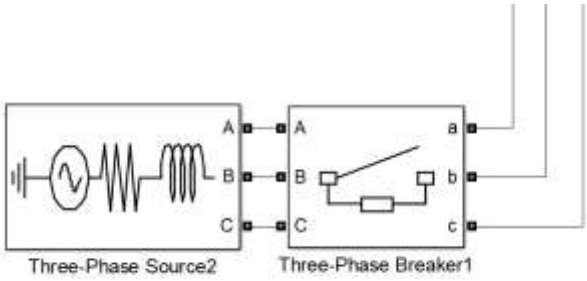


Figure III.26: Intégration du 2ème source de tension côté BT.

Le tableau III.3 représente les temps de connection de la 1ère source cote MT et la 2ème source cote BT.

Tableau III.3: Valeurs des paramètres de simulation ST

Temps (s)	Source
[0.08-0.12]	1
[0.12-0.15]	1_2
[0.15-0.22]	2

Les tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT et BT, représentés dans les figures III.27 et III.28.

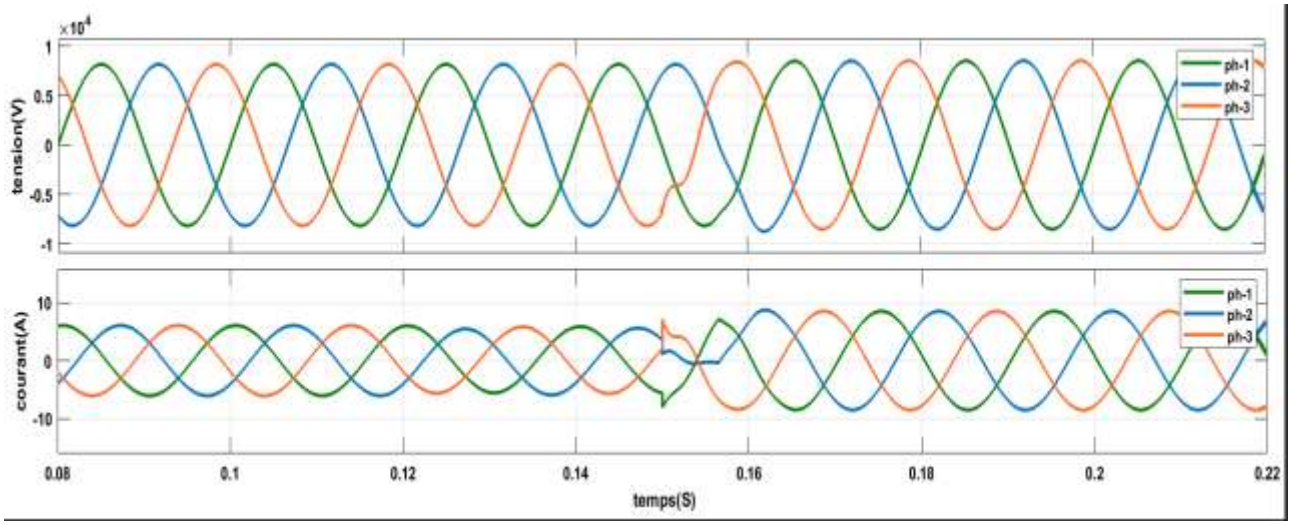


Figure III.27: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau MT.

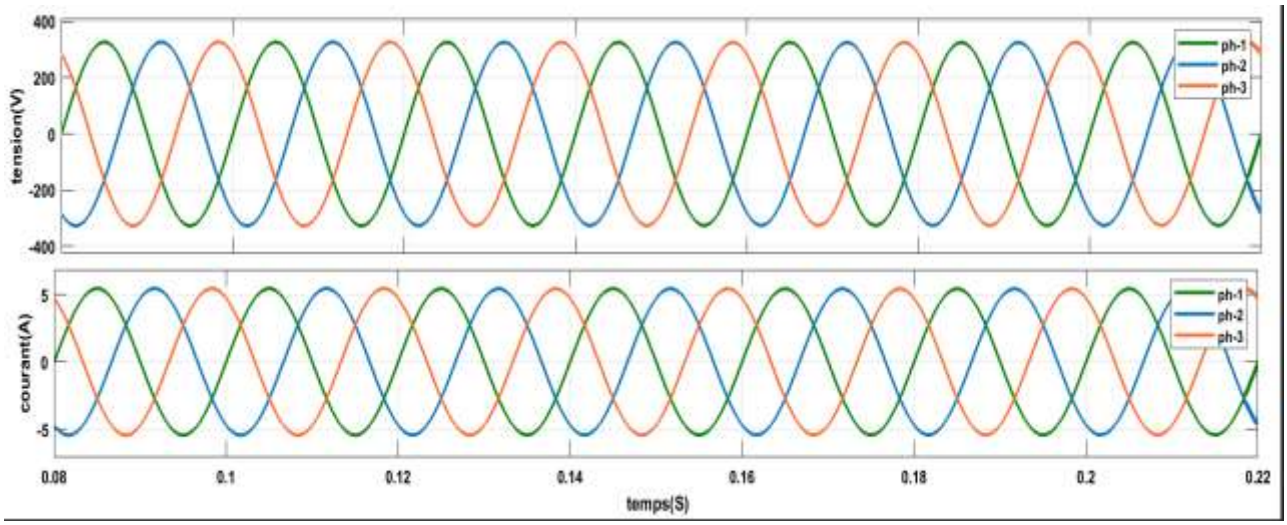


Figure III.28: La forme d'onde des tensions triphasées et les courants d'entrée du côté du réseau BT

III.3 Chargement des Véhicules Électriques (VE)

En plus de son fonctionnement sur le réseau électrique, le ST a la possibilité de faire fonctionner simultanément son bus DC. Cette section présente ainsi le chargement d'un véhicule électrique (VE) pendant que le ST remplit ses fonctions sur le réseau électrique."

Sortie source de tension constante [DC] V_{DC}=326 V, représentés dans les Figures III.29

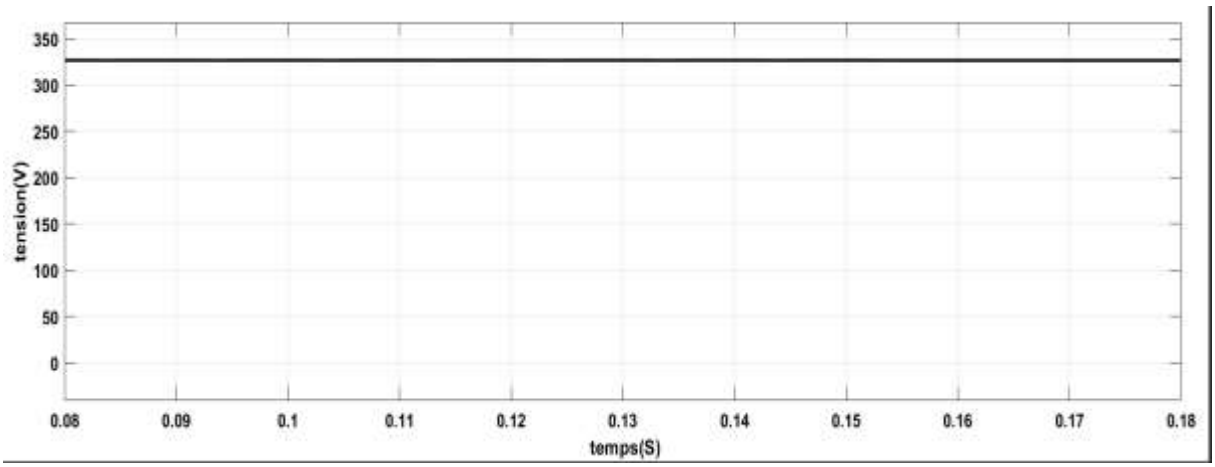


Figure III.29: Sortie source de tension constante [DC]

Ajouter une charge pour remarquer la tension aux bornes de charge R=100 Ω et C=100 e-6 Figures III.30. Représenté dans les Figures III.31

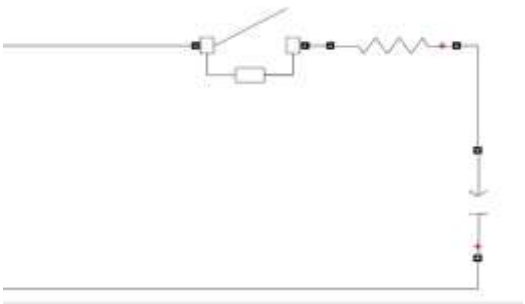


Figure III.30: la charge RC [DC].

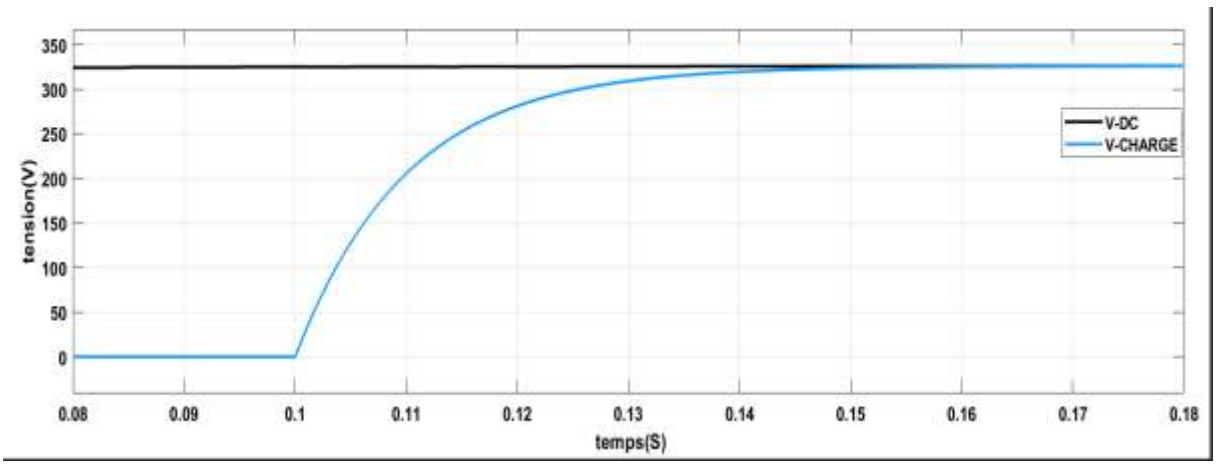


Figure III.31: La forme d'onde de la tension aux bornes de charge.

Pendant que le VE se charge, le fonctionnement du ST sur le réseau électrique reste identique à celui observé sans aucun chargement associé au bus DC du ST. La Figure III.32 montre l'évolution de la tension fournie par le ST au réseau BT, qui ne semble pas être influencée par l'utilisation du bus DC du ST pour le chargement d'un VE.

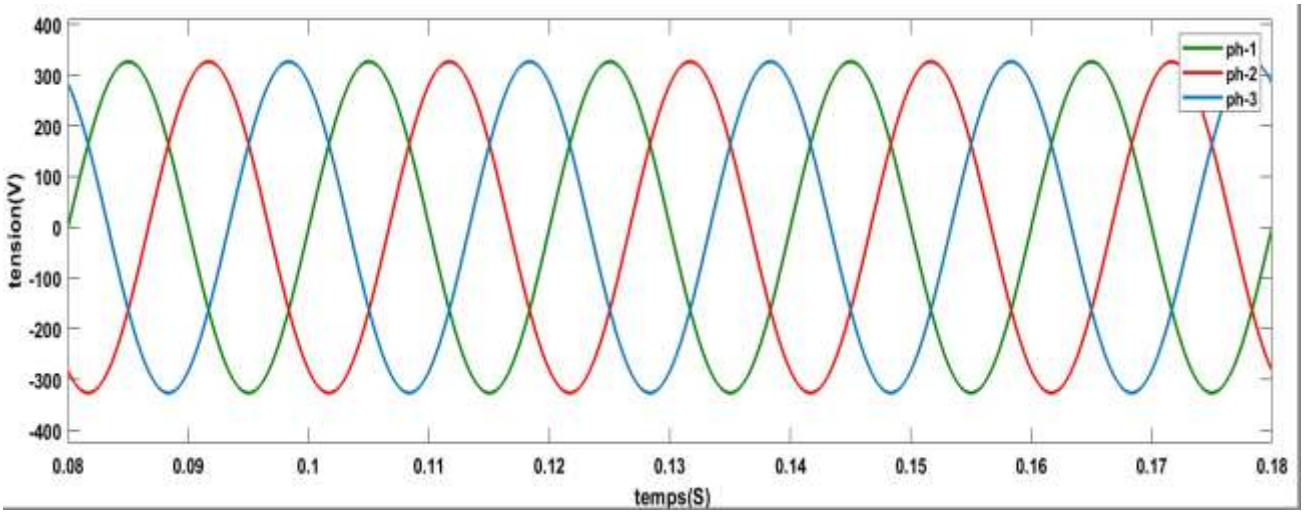


Figure III.32: Tension du côté BT en fonctionnement simultané MT/BT et chargement du VE.

III.4 Conclusion

Selon les résultats obtenus par simulation dans MATLAB/Simulink, on peut conclure que le ST proposé présente un grand potentiel d'implémentation dans le réseau électrique, grâce à ses performances et aux résultats obtenus. Le ST offre la possibilité d'avoir un bus DC pour le chargement des VE. Pendant les simulations du fonctionnement simultané MT/BT du ST, y compris avec le chargement des VE, le ST a fourni à la charge, dans toutes les situations simulées, des ondes de tension de grande qualité.

Nous concluons ainsi avec succès quelques-uns des grands avantages que l'utilisation du ST proposé offre. Le ST présente toutes les conditions pour être mis en œuvre dans le réseau électrique, avec un contrôle et une autonomie de gestion du réseau qui ne sont pas possibles avec les transformateurs actuels.

Conclusion Générale

Le travail réalisé dans cette mémoire avait pour principal objectif le développement d'un ST à intégrer dans le réseau électrique, afin de permettre un meilleur contrôle de la tension et, par l'intégration d'un bus DC, la possibilité de charger des véhicules électriques (EV). Après avoir planifié la topologie du ST, dimensionné les filtres, les tests en environnement de simulation ont permis de conclure que le ST présenté répond à plusieurs lacunes que les Transformateur à base fréquence (TBF) usuels dans le réseau présentent.

Les principaux aspects pris en compte dans le développement de ce travail étaient la non-saturation du transformateur haute fréquence, ainsi que la fourniture correcte de tension et de courant AC et DC, afin que le ST soit un bon candidat pour une future implémentation dans le réseau électrique.

D'après les résultats obtenus par la simulation sous MATLAB/Simulink, on peut conclure que le ST proposé présente un grand potentiel d'implémentation dans le réseau électrique, grâce à ses bonnes performances et aux résultats obtenus. Le ST offre la possibilité d'un bus DC pour le chargement des véhicules électriques (EV). Lors des simulations de fonctionnement MT/BT du ST, incluant le chargement simultané des EV et en présence nous avons obtenu des tensions et de courant côté BT très satisfaisants. Le ST a fourni à la charge, dans toutes les situations simulées, des ondes de tension de grande qualité.

Nous concluons ainsi avec succès certaines des principaux avantages que l'utilisation du ST proposé offre. Le ST dispose de toutes les conditions pour être mis en œuvre dans le réseau électrique, avec un contrôle et une autonomie de gestion du réseau qui ne sont pas possibles avec les transformateurs actuels, TBF.

Enfin, l'existence d'harmoniques de tension dans la MT a été prise en compte. Il a été conclu que le système proposé peut minimiser les effets de la perturbation, présentant des ondes de tension et de courant sinusoïdales en sortie.

Dans tous les scénarios de test, le taux de distorsion harmonique (THD) a été mesuré, avec des valeurs comprises entre 1,5% et 2%. Il a été conclu que le système proposé présente une bonne gamme de valeurs de distorsion harmonique, inférieure à la valeur réglementaire selon la Norme 50160.

Perspectives de travail futur

Dans la perspective de travaux futurs, il est important de mettre en évidence certains aspects d'intérêt qui contribueront à la continuité et à l'amélioration significative du travail réalisé jusqu'à présent dans ce mémoire.

L'un des premiers aspects à souligner est la mise en œuvre expérimentale du ST, y compris :

- Simuler la présence de chute de tension dans le réseau du côté MT du ST et contrôler la tension du côté BT de manière à ce qu'elle soit insensible aux chutes dans le réseau en amont ;
- Simuler la présence de surtensions dans le réseau MT et garantir le contrôle de la tension du côté BT afin que ces variations ne se produisent pas dans le réseau BT ;
- Injection de courant dans le réseau MT provenant du bus DC ;
- Le contrôle des courants MT.
- L'étude de la fiabilité du système serait également intéressante, car le fait qu'il soit composé de plusieurs convertisseurs d'entrée offre une redondance dans le système qui peut apporter de grands avantages en termes de fiabilité.

Cette mise en œuvre serait une valeur ajoutée pour des études plus approfondies, permettant un meilleur dimensionnement et une amélioration de tout ce qui a été étudié et présenté concernant le ST et son intégration dans le réseau.

[1] N. Hadjsaïd and J. C. Sabonnadière, Eds., *Smart Grids*, John Wiley-ISTE, London, UK - Hoboken, NJ, USA, 2012.

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

[3] 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. Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 231-243, June 2011.

[4] M. E. Adabi Firouzjaee, *Advanced Modeling of Solid State Transformer* [Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya], 2018.

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

[6] D. M. S. Fonseca, *Transformador Inteligente Modular de Estágio Único com Barramento DC Integrado* [Mémoire de Master, técnico lisboa], 2021.

[7] M. Liserre, M. Andresen, L. Costa, and G. Buticchi, "Power routing in modular smart transformers: Active thermal control through uneven loading of cells," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 3, pp. 43-53, 2016, doi: 10.1109/MIE.2016.2588898.

[8] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. De Carne, L. F. Costa, and Z. Zou, "The smart transformer: Impact on the electric grid and technology challenges," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 46-58, 2016, doi: 10.1109/MIE.2016.2551418.

[9] C. Kumar, Z. Zou, and M. Liserre, "Smart transformer-based hybrid grid loads support in partial disconnection of mv/hv power system," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1-8, 2016, doi: 10.1109/ECCE.2016.7855451.

[10] C. Z. El-Bayeh, K. Alzaareer, B. Brahmi, I. Mougharbel, M. Saad, A. Chandra, and U. Eicker, "A novel programmable smart transformer for energy management in buildings," in *2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, pp. 1-6, 2020, doi: 10.1109/REDEC49234.2020.9163875.

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

[12] 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.

[13] P. M. Costa Fernandes, *Transformador Eletrónico de Potência para Aplicações em Sistemas de Energia* [Master's Dissertation], Universida de técnico lisboa, 2014.

[14] 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.

[15] D. M. S. Fonseca, "Single-Stage Modular Smart Transformer with Integrated DC Bus," Master's Dissertation in Electrical and Computer Engineering, University, 2021.

[16] L. Gyugyi and B. Pelly, *Static power frequency changers: Theory, performance, and application*, 1976.

[17] M. Venturini and A. Alesina, "The generalised transformer: A new bidirectional, sinusoidal waveform frequency converter with continuously adjustable input power factor," in *1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 242-252, 1980, doi: 10.1109/PESC.1980.7089455.

[18] M. Venturini, "A new sine wave in sine wave out, conversion technique which eliminates reactive elements," in *Proc. POWERCON 7*, 1980.

[19] S. Pinto, P. Mendes, and F. Silva, "Modular matrix converter based solid state transformer for smart grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 136, pp. 189-200, July 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.02.020.

[20] P. Drabek, Z. Peroutka, M. Pittermann, and M. Cedl, "New configuration of traction converter with medium-frequency transformer using matrix converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 11, pp. 5041-5048, 2011, doi: 10.1109/TIE.2011.2138114.

[21] M. Glinka and R. Marquardt, "A new ac/ac multilevel converter family," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 662-669, 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.843973.

[22] X. She, A. Q. Huang, F. Wang, and R. Burgos, "Wind energy system with integrated functions of active power transfer, reactive power compensation, and voltage conversion," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4512-4524, 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2216245.

[23] J. J. Sandoval, S. Essakiappan, and P. Enjeti, "A bidirectional series resonant matrix converter topology for electric vehicle dc fast charging," in *2015 IEEE Applied Power Electronics and Exposition (APEC)*, pp. 3109-3116, 2015, doi: 10.1109/APEC.2015.7104795.

[24] J.-i. Itoh, K. Yamanokuchi, S. Takuma, and K. Kusaka, "Three-phase wireless power supply system using matrix converter," in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE ’19 ECCE Europe)*, pp. P.1-P.10, 2019, doi: 10.23919/EPE.2019.8914969.

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

[26] M. Sebaa and R. Chereit, "Alimentation d’une charge DC par une combinaison réseau électrique-source photovoltaïque Via un convertisseur de type MMC," 2023.

[27] S. F. Pinto, *Conversores Matriciais Trifásicos: Generalização do Comando Vectorial Directo*, PhD thesis, Univ. Técnica de Lisboa, July 2003.

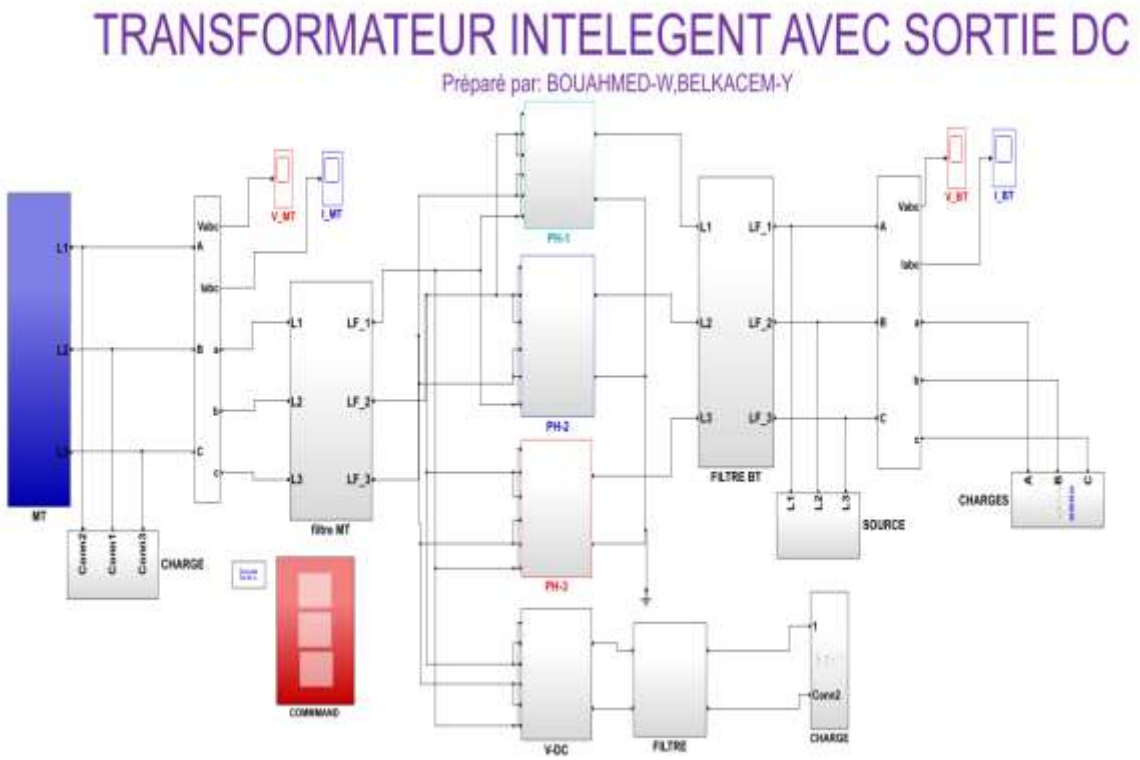
[28] P. M. C. Fernandes, "Transformador Electrónico de Potência para Aplicações em Sistemas de Energia," Master's Dissertation in Electrical and Computer Engineering, November 2014. Supervisors: S. M. S. P. F. Pinto, J. F. A. da Silva. Jury: President: M. E. S. P. de Almeida Pedro, Member: J. J. E. Santana.

[29] Z. Idris, S. Z. M. Noor, and M. K. Hamzah, "Safe commutation strategy in single phase matrix converter," in *2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, IEEE, pp. 886-891, 2005.

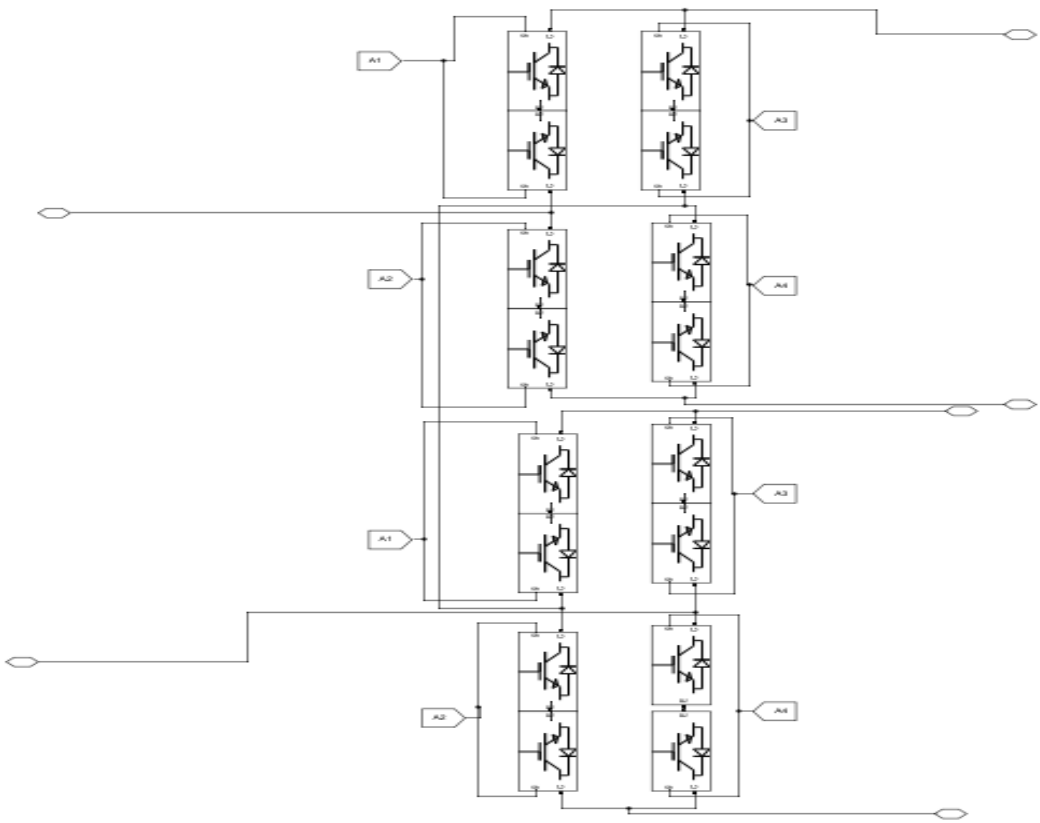
[30] J. F. Silva, S. Pinto, and J. Santana, *Conversores Comutados para Energias Renováveis*. Support text, IST, 2013.

[31] B. M. M. Cosme, *Isolated Matrix Converter for Interconnection of Low Voltage AC Grids to DC Grids* [Master's thesis], Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2021.

ANNEXE 01



ANNEXE 02



ANNEXE03-IGBT (FZ250R65KE3)

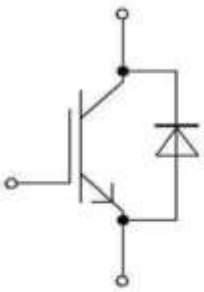
Technische Information / Technical Information

IGBT-Modul
IGBT-Module

FZ250R65KE3

hochisolierendes Modul
high insulated module





V_{CES} = 6500V
$I_{C\,nom}$ = 250A / I_{CRM} = 500A

Typische Anwendungen
- Mittelspannungsantriebe
- Traktionsumrichter

Typical Applications
- Medium Voltage Converters
- Traction Drives

Elektrische Eigenschaften
- Niedriges V_{CEsat}

Electrical Features
- Low V_{CEsat}

Mechanische Eigenschaften
- AlSiC Bodenplatte für erhöhte thermische Lastwechselfestigkeit
- Erweiterter Lagertemperaturbereich bis zu T_{stg} = -55°C
- Gehäuse mit CTI > 600
- Gehäuse mit erweiterten Isolationseigenschaften von 10,2kV AC 1min
- Große Luft- und Kriechstrecken

Mechanical Features
- AlSiC Base Plate for increased Thermal Cycling Capability
- Extended Storage Temperature down to T_{stg} = -55°C
- Package with CTI > 600
- Package with enhanced Insulation of 10.2kV AC 1min
- High Creepage and Clearance Distances

Module Label Code

Barcode Code 128



DMX - Code



Content of the Code	Digit
Module Serial Number	1 - 5
Module Material Number	6 - 11
Production Order Number	12 - 19
Datecode (Production Year)	20 - 21
Datecode (Production Week)	22 - 23

prepared by: DTH	date of publication: 2014-06-16	
approved by: DTS	revision: 3.0	UL approved (E83335)

ANNEXE04 – IGBT (DIM800XSM45-TS000)

DIM800XSM45-TS000

Single Switch IGBT Module

Replaces DS6089-4

DS6089-5 August 2014 (LN31874)

FEATURES

- 10µs Short Circuit Withstand
- High Thermal Cycling Capability
- High Current Density Enhanced DMOS SPT
- Isolated AlSiC Base With AlN Substrates

APPLICATIONS

- High Reliability Inverters
- Motor Controllers
- Traction Drives
- Choppers

The Powerline range of high power modules includes half bridge, chopper, dual, single and bi-directional switch configurations covering voltages from 1200V to 6500V and currents up to 2400A.

The DIM800XSM45-TS000 is a single switch 4500V, n-channel enhancement mode, insulated gate bipolar transistor (IGBT) module. The IGBT has a wide reverse bias safe operating area (RBSOA) plus 10µs short circuit withstand. This device is optimised for traction drives and other applications requiring high thermal cycling capability.

The module incorporates an electrically isolated base plate and low inductance construction enabling circuit designers to optimise circuit layouts and utilise grounded heat sinks for safety.

ORDERING INFORMATION

Order As:

DIM800XSM45-TS000

Note: When ordering, please use the complete part number

KEY PARAMETERS

V_{CES}		4500V
$V_{CE(sat)}$ *	(typ)	2.7V
I_C	(max)	800A
$I_{C(PK)}$	(max)	1600A

* Measured at the auxiliary terminals

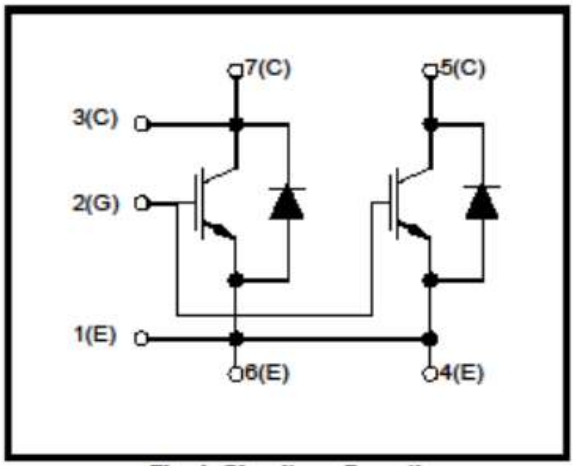


Fig. 1 Circuit configuration



Outline type code: X

(See Fig. 11 for further information)

Fig. 2 Package

ANNEXE05 (la norme NE 50160)

Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables

	Rang h	BT	MT	THT
Harmoniques impairs non multiples de 3	5	6	5	2
	7	5	4	2
	11	3,5	3	1,5
	13	3	2,5	1,5
	17 ≤ h ≤ 49	$2,27\frac{17}{h} - 0,27$	$1,9\frac{17}{h} - 0,2$	$1,2\frac{17}{h}$
Harmoniques impairs multiples de 3	3	5	4	2
	9	1,5	1,2	1
	15	0,4	0,3	0,3
	21	0,3	0,2	0,2
	21 ≤ h ≤ 45	0,2	0,2	0,2
Harmoniques pairs	2	2	1,8	1,4
	4	1	1	0,8
	6	0,5	0,5	0,4
	8	0,5	0,5	0,4
	10 ≤ h ≤ 50	$0,25\frac{10}{h} + 0,25$	$0,25\frac{10}{h} + 0,22$	$0,19\frac{10}{h} + 0,16$
THD_U		8	6,5	3