REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électrique

Thème

Modélisation, Dimensionnement et réalisation d'un transformateur de puissance haute fréquence (HF) ,cas d'application : transformateur de puissance intelligent.

Présenté par

ALI KACEM AIMENE

Proposé et Dirigé par

Pr. Nadir Kabeche

Promotion Juin 2024

Remerciements

J’exprime ma gratitude envers ALLAH le tout-puissant pour m’avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien cette tâche actuelle.

J’exprimema gratitude envers mon prompteur, Pr.Nadir KABACHE, pour son soutien, son orientation, sa disponibilité et tous les conseils qu'il m’a donné tout au long de ce travail. J’exprime aussi mes remerciements les plus a M. Nassim Zemerline, doctorant au laboratoire de recherche LREA, pour son appréciable aide.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail, ainsi que pour toutes leurs remarques et critiques constructives.

Jetiens également à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide, que ce soit de près ou de loin, au sein de notre famille. J’exprimema profonde gratitude envers ma mère, mes frères et sœurs, ainsi que mes proches, pour leur soutien constant.

Dédicaces

Je dédie ce travail modeste :

A la lumière de ma vie, ma mère, je vous offre ceci en témoignage d'amour pour votre sacrifice sans limites, et je vous souhaite une santé et un bien être continus, que Dieu vous protège.

A mes frères et sœurs

A tous mes amis

A tous mes collègues de la promotion 2024

A tous ceux qui m'aiment et qui me sont chers

A mes professeurs, mon Promoteur

ملخص

يلخص هذا العمل نمذجة محول الطاقة عالي التردد (HFT) وتحديد حجمه وبنائه، والذي يستخدم في بناء محولات الطاقة الذكية، ويتكون العمل المقترح من ثلاثة أجزاء، في الجزء الأول يتم تقديم حالة الفن في محولات الطاقة في الشبكة الكهربائية مع إعطاء مقارنة بين محول الطاقة التقليدي ومحول الطاقة الذكي أو "محول الحالة الصلبة". في الجزء الثاني، نناقش في الجزء الثاني نمذجة المحول عالي التردد؛ واختيار اللفات الأولية والثانوية، ونوع الموصلات، ولا سيما أسلاك الليتز، وأخيرًا نناقش المادة المغناطيسية من حيث الشكل والنوع. الجزء الأخير من هذا العمل مخصص للبناء العملي لمحول طاقة عالي التردد. للتحقق من صحة التصميم، يتم اختبار المحول تجريبيًا وعن طريق المحاكاة.

SST-(محول الحالة الصلبة)، محول أشباه الموصلات **THF** -محول التردد العالي

Résumé

Ce travail résume la modélisation, le dimensionnement et la réalisation d'un transformatrice haute fréquence (THF), qui est utilisé dans la réalisation des transformateursde puissance intelligents.Le travail proposé comporte trois parties.Dans la première partie,un état d'art est donné sur les transformateurs de puissance dans le réseau électrique tout en donnant une comparaison entre le transformateur de puissance classique et le transformateur de puissance intelligent ou le '*Solid-state transformer*'.Dans la deuxième partie, nous parlons de la modélisation du transformateur haute fréquence ; choix des enroulements primaire et secondaire, type de conducteurs notamment le fil de litz et enfin nous parlons du matériau magnétique d'un point de vue forme et type. La dernière partie de ce travail est consacrée à la réalisation pratique d'un transformateur de puissance HF. Pour valider la réalisation effectuée, le transformateur réalisé est testé expérimentalement et par simulation.

SST– (Solid -state transformer), Transformateur à semi-conducteurs. **THF**- Transformateur haute fréquence

Abstract

This work summarises the modeling, sizing and construction of a high-frequency transformer (HFT), which is used in the construction of intelligent power transformers .The proposed work is in three parts. In the first part, a state of the art is given on power transformers in the electrical network while giving a comparison between the conventional power transformer and the intelligent power transformer or 'Solid-state transformer'. In the second part, we discuss the

modeling of the high-frequency transformer; choice of primary and secondary windings, type of conductors, in particular litz wire, and finally we discuss the magnetic material from the point of view of shape and type. The last part of this work is devoted to the practical construction of an HF power transformer. To validate the design, the transformer is tested experimentally and by simulation.

SST- (Solid -state transformer), Semiconductor transformer. **HFT**-High frequency transformer

Sommaire

Chapitre I Généralité sur les Transformateurs Intelligents et Classiques

I. Introduction……...3
II. Structure d'un transformateur classique……..3

II .1.Enroulements primaires et secondaires…….4

II .2.Noyau magnétique……4

II. 3.Isolation……...……..4

II. 4.Flux magnétique……...5

II. 5.Bobinages……..5

II. 6.Dispositifs de refroidissement…….5

II. 7.Bornes et connexions……...5

II.8.Boîtier ou enveloppe……5

III-Les différents types de transformateurs…….5

III.2.Transformateur de distribution……5

III.1.Transformateur de puissance……5

III.3.Transformateur de mesure……6

III. 4.Transformateur de Protection…….6

IV. Avantages et Inconvénients des transformateurs classiques……6

V. Transformateurs intelligents……...7

V.1. Topologies d'un SST……...8

V.2.Principe de fonctionnement d'un transformateur à semi-conducteurs ……9

V.3.Conception d'un SST à trois étages ……10

V.4.Modélisation du SST à trois étages à base de MMC……...11

a. **Étage d'entrée……11**
b. **Étage d'isolation……12**
c. **Étage de sortie……...13**

VI.5. Avantages et Inconvénients du SST……14

Sommaire

VI.6. Applications générales du SST……14

III. Conclusion……15

Chapitre II Structure d'un Transformateur Haute Fréquence (THF)

I-Introduction……..17

II-Principe du fonctionnement des transformateurs…….....17

III –Dimensionnement du transformateur HF……18

III. 1. Choix du type de bobinage……..18

a .Bobinage à nid d'abeilles……..19

b . Bobinage« deux fils en main »……19

c .Bobinage concentrique…….....20

III. 2. Choix des conducteurs…….... 20

a-Conducteur isolé ……20

b-Groupe de conducteurs ……..21

c-Fils de Litz……22

III. 4. Types des matériaux conducteurs.....22

a-Le cuivre et ses alliages ……22

b- L'aluminium ……23

III. 5. L'isolement entre bobines……23

III. 6. Écrans contre rayonnement……..23

a-Écrans électriques ……23

b-Écrans magnétiques ……23

III. 7.Calcul des éléments parasites…….....24

III. 8. Facteur d'effet de peau……..……24

III. 9. Effet de proximité……....24

III. 8.Choix du noyau magnétique……..25

a-Ferrites……25

b-Acier au silicium ……..26

c-Nanocristallins ……..27

Sommaire

d-Amorphe …… ….27
III. 11. Choix de la forme du corps magnétique…….……..…….28
IV **–Conclusion** ……29

Chapitre III Dimensionnement et réalisation expérimentale d'un transformateur HF

I-Introduction……30
II - Démarches de dimensionnement et réalisation du transformateur HF……. ……30
II 1. Choix du corps magnétique.....31
II.2. Dimensionnement du bobinage du transformateur haute HF……..……33
II.3. Identification du paramètres du transformateur haute HF.……...…...35
III- Résultats de simulation du transformateur HF……...36
IV-Résultats expérimentaux……39
V- Conclusion……...43
Conclusion Générale……...45
Bibliographie

Liste des figures

Figure I.1 Vue en coupe d'un transformateur triphasé MT/BT……...3

Figure I.2: Photo graphie des enroulements d'un transformateur triphasé……4

Figure I.3: Formes des tôles d'un transformateur monophasé……4

Figure1.4 SST à un seul étage-type ……8

Figure I.5 SST à deux étages-type B……...9

Figure I.6 SST à deux étages avec une sortie MVDC……9

Figure I.7 SST à trois étages……...9

Figure I.8 Principe de fonctionnement……10

Figure I.9 Structure de base d'un SST en trois étages……..10

Figure I.10 Configuration de l'étage d'entrée triphasé**……**.12

Figure I.11 Configuration de l'étage d'isolation d'un SST…….……13

Figure I.12 Configuration de l'étage de sortie d'un SST……..14

Figure. I.13. Applications potentiel les de la SST dans le futur système de distribution…...15

Figure II.1. Structure de base d'un transformateur monophasé……17

Figure II.2 **:**Bobinage à nid d'abeilles ……..19

Figure II.3 **:** Bobinage de deux fils en main……..19

Figure II.4 : Bobinage concentrique avec les différentes configurations……20

Figure II. 5 : Épaisseur de peau**.**…….. ……..21

Figure II.6 : Différents types de fils de Litz……22

Figure. II.7: Explication physique de l'effet de proximité……25

Figure II.9:le matériaux ferrite…….26

Figure II.10 : le matériaux acier au silicium.…….26

Figure II.11 : le matériau nanocristallin……27

Figure II.12 : le matériau amorphe……..28

Figure II.13 : Différentes formes du noyau magnétique……28

Figure III.1 : Les paramètres mécaniques de base du noyau ……31

Figure III.2 : Corps magnétique type C utilisé dans le projet…… …….……...32

Figure III.3 : Les dimensions du corps magnétique de type C……32

Figure III.4 : Schéma équivalent du transformateur pour l'identification des paramètres…35

Liste des figures

Figure III.5 : HFT avec un convertisseur en pont complet……..36

Figure III.6 : Les tensions d'entrée et de sortie du THF à vide……...37

Figure III.7 : Les tensions d'entrée et de sortie du THF en charge…….37

Figure III.8 : Les courants primaire et secondaire du transformateur HF……...38

Figure III.9 : La tension et le courant primaire en charge……38

Figure III.10 : La tension et le courant secondaire en charge……..39

Figure III.11 : Le prototype du transformateur HF réalisé……39

Figure III.12 : Le banc d'essai du transformateur HF……40

Figure III.13 : . Les tensions d'entrée et de sortie du transformateur HF à vide……41

Figure III.14 : Les tensions d'entrée et de sortie du transformateur HF en charge…….42

Figure III.15 : Les courants primaire et secondaire du transformateur en charge……...42

Liste des Tableaux

Tableau III.1 : Les mesures des dimensions du noyau. …….32

Tableau III.2 : Tableau indicatif pour le choix des câbles pour le THF…...……..…….. 33

Tableau III.3 : Paramètres du modèle du THF.……... …….34

Tableau III.4 : L'efficacité du model du transformateur HF, test de simulation..…….…….36

Tableau III.5 : L'efficacité du transformateur HF, test expérimental……..40

Liste des abréviations

SST– (Solid -state transformer), Transformateur à semi-conducteurs

TS-transformateur Intelligent

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

MT/BT-Moyen/basse tension

N1/N2 - nombre de spires primaire et secondaires

MVAC–(Medium Voltage AC) Moyenne tension AC

LVAC– (Low Voltage AC), Basse tension AC

U1L1 - Tension composé phase 1

I1L1 - Courant dans la phase 1

AC et AC- courant alternatif

DAB - Double pont actif

FBC - Convertisseur Full-Bridge

HF – Haute Fréquence

THF-Transformateur haute fréquence

HV-Haute tension

IGBT-Transistor bipolaire à grille isolée

LF-Basse fréquence

LFT-Transformateur basse fréquence

BT-Basse tension

DC– Courant continu

Introduction Générale

Introduction générale

Le transformateur de puissance à semi-conducteurs (SST) représente une nouvelle génération de transformateurs de puissance intelligents qui reposent sur l'électronique de puissance, offrant ainsi une flexibilité dans la conversion de tension et le transfert d'énergie. Le transformateur SST (Solid-State Transformer) [1], [2] également appelé transformateur d'électronique de puissance (PET), présente des avantages en comparaison avec le transformateur traditionnel. Entre autres ; on trouve la petite taille, les pertes de puissance réduites, la capacité à contrôler la qualité de l'énergie afin de réduire ou d'éviter les baisses de tensionainsi que l'amélioration des indices de fiabilité (par exemple, en réduisant le nombre d'interruptions et leur durée).

Le transformateur classique,en raison de son rôle et de son mode de fonctionnement classique,est actuellement incapable de s'adapter aux changements et aux évolutions possibles du réseau électrique. En effet, avec l'augmentation de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique et en raison des propriétés particulières du niveau de tension et de la valeur de fréquence, l'utilisation de transformateurs standards est irrationnelle. Par contre, les transformateur intelligents intègrent dans leur conception des technologies avancées de communication et de contrôle ce qui les permettre de suivre les évolutions technologiques ainsi que les exigences récentes du système électrique. Ces appareils peuvent surveiller en temps réel divers paramètres du réseau électrique, y compris la tension, le courant, la fréquence et d'autres données cruciales. Les transformateurs intelligents peuvent fournir des informations aux systèmes de gestion de l'énergie en temps réel grâce à des capteurs et des dispositifs de communication. En plus, ils ont la capacité de réagir instantanément aux fluctuations très changeantes et imprévisibles de la demande et de l'offre, en particulier, avec l'intégration croissante de sources d'énergie renouvelables telles que le solaire et l'éolien et la diversité des consommateurs que ça soit classiques ou moderne tels que les véhicules électriques et autres.

L'un des éléments principaux du transformateur intelligent est le transformateur de puissance haute fréquence ou le THF. Parrapport aux transformateurs de fréquence standard (50/60 Hz), les THF de puissance offrent de nombreux avantages en termes de taille, d'efficacité, de réponse transitoire et de compatibilité avec les technologies modernes :

- En augmentant la fréquence de fonctionnement, il est possible de réduire la taille du noyau magnétique et des enroulements. Cela permet de concevoir des transformateurs plus compacts et plus légers
- Les matériaux magnétiques utilisés dans les transformateurs haute fréquence, tels que les ferrites, présentent des pertes de noyau plus faibles à des fréquences élevées. Cela contribue à une meilleure efficacité globale du transformateur.
- Les THF peuvent réagir plus rapidement aux changements de charge ou de conditions d'entrée, ce qui est crucial pour les applications nécessitant des réponses dynamiques rapides.

- A des fréquences plus élevées, il est possible d'obtenir une meilleure isolation entre les enroulements primaire et secondaire, augmentant ainsi la sécurité et la fiabilité des dispositifs.

Par conséquent, le présent travail est consacré au dimensionnement, modélisation simulation et réalisation d'un transformateur de puissance HF. Dans la partie dimensionnement et, en se basant sur des données d'entré et de sortie du THF, les différents éléments du transformateur sont dimensionnés tels que le circuit magnétique, les bobinages primaire et secondaire, le type du fils, etc. Dans la partie modélisation et simulation, les paramètres du transformateur sont identifiés afin d'avoir un modèle de simulation. Finalement, les résultats de modélisation et du dimensionnement sont exploités pour la réalisation d'un prototype du transformateur HF.

Le transformateur réalisé a été testé par des simulations numériques est tests expérimentaux. Les résultats obtenus montrent clairement la similitude et la concordance entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux ce qui valide la réalisation effectuée.

En plus d'une introduction générale et d'une conclusion générale, le présent travail s'articule sur trois chapitres. Dans le premier chapitre, un état d'art est donné sur les transformateurs de puissance dans le réseau électrique tout en donnant une comparaison entre le transformateur de puissance classique et le transformateur de puissance intelligent. Dans le deuxième chapitre, nous parlons de la modélisation du transformateur haute fréquence ; choix des enroulements primaire et secondaire, type de conducteurs notamment le fil de litz et enfin nous parlons du matériau magnétique d'un point de vue forme et type. Le dernier chapitre de ce travail est consacré à la réalisation pratique d'un prototype du transformateur de puissance HF.

Chapitre 1

Généralité sur les Transformateurs Intelligents et Classiques

I. Introduction

Les transformateurs de puissance d'energie électrique sont des dispositifs électromagnétiques essentiels utilisés pour transférer l'énergie électrique entre des circuits de niveaux de tension différents. L'histoire du transformateur classique remonte au XIXe siècle, lorsque Michael Faraday a découvert l'induction électromagnétique en 1831 sur la base de laquelle les premiers transformateurs monophasés et triphasé à courant alternatif ont été conçus en 1885 et 1889 respectivement.

Malgré leur rôle prémordial dans le système électrique, ce type de transformateurs se trouve incapable de suivre l'évolution technologique ainsi que les exigences modernes du système électrique tels que la flexibilité de fonctionnement, capacité de surveillances, communication, réponse rapides, intégration facile et efficace des énergies renouvelables etc. Pour surmnter ces limitation, les transformateur à base des convertisseurs électroniques appellés transformateurs intelligent ont vue le jour. Les transformateurs de puissance intelligents représentent une évolution significative des transformateurs classiques, intégrant des technologies numériques avancées pour offrir une gestion plus sophistiquée de l'énergie.

Ce chaptre donne un petit état d'art sur ces différents types de transformateurs.

II -Structure d'un transformateur classique

La structure générale d'un transformateur classique, Figure (I.1), est composée de plusieurs éléments essentiels, dont les principaux sont les enroulements et le noyau magnétique.

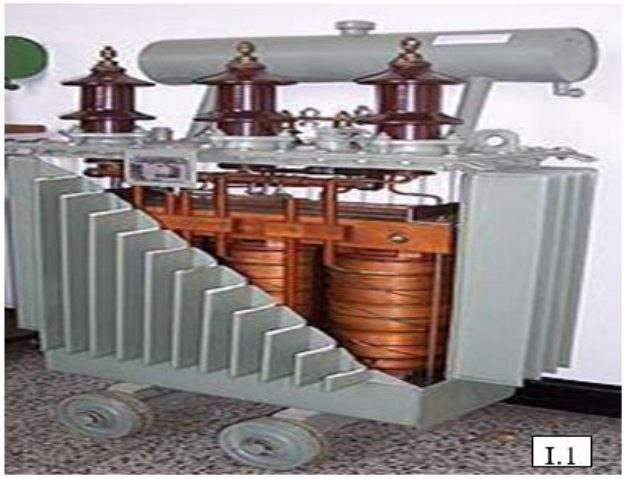


Figure. I.1. Vue en coupe d'un transformateur triphasé MT/BT.

Les principaux éléments d'un transformateur classique sont détaillés dans les sections suivantes.

II .1. Enroulements primaires et secondaires

Les transformateurs classiques ont au moins deux enroulements de fil conducteur, appelés enroulement primaire et enroulement secondaire, Fig. (I.2). Le courant alternatif est appliqué au circuit primaire, créant un champ magnétique variable. Ce champ induit des courants et des forces électromotrices au niveau du circuit secondaire



Figure. I.2. Photo graphie des enroulements d'un transformateur triphasé.

II .2. Noyau magnétique

Le noyau magnétique est généralement fabriqué à partir de tôles en acier laminé Fig. (I.3). Il sert à fournir un chemin magnétique pour le flux magnétique généré par le courant alternatif dans le primaire. La forme du noyau peut varier (par exemple, noyau toroïdal, noyau en E, noyau en U) en fonction de l'application spécifique du transformateur.



Figure. I.3. Formes des tôles d'un transformateur monophasé.

II. 3. Isolation

L'isolation est cruciale pour éviter les courts-circuits et garantir la sécurité électrique. Les enroulements sont isolés les uns des autres et du noyau magnétique pour empêcher les perturbations électriques indésirables.

II. 4.Flux magnétique

Lorsqu'un courant alternatif traverse le primaire, il crée un champ magnétique variable qui induit une force électromotrice (FEM) dans le secondaire. Le noyau magnétique concentre le flux magnétique, améliorant ainsi l'efficacité du transfert d'énergie.

II. 5. Bobinages

Les enroulements sont souvent réalisés avec du fil de cuivre pour minimiser les pertes ohmiques. Ils sont disposés de manière à maximiser le couplage magnétique entre le primaire et le secondaire.

II. 6.Dispositifs de refroidissement

Les transformateurs génèrent de la chaleur en raison des pertes ohmiques et hystérésis. Des dispositifs de refroidissement tels que des radiateurs ou des systèmes de refroidissement à l'huile sont souvent intégrés pour maintenir la température à des niveaux acceptables.

II. 7. Bornes et connexions

Des bornes et des connexions sont fournies pour connecter le transformateur au réseau électrique. Ces points de connexion facilitent l'intégration du transformateur dans un système plus vaste.

II.8. Boîtier ou enveloppe

Certains transformateurs sont logés dans des boîtiers ou des enveloppes pour des raisons de sécurité et de protection. Ces enveloppes peuvent être hermétiquement scellées pour empêcher l'humidité de pénétrer et peuvent également contenir des dispositifs d'extinction d'arc en cas de défaut.

III. Les différents types de transformateurs

Il existe plusieurs types de transformateurs, chacun adapté à des applications spécifiques en fonction des besoins en tension, en fréquence et en puissance, nous mentionnons ce qui suit:

III.1.Transformateur de puissance

Un transformateur de puissance est un appareil électrique essentiel dans les réseaux électriques qui transfère efficacement l'énergie en ajustant la tension du courant alternatif. Il se compose de deux bobines entourées d'un noyau magnétique, convertissant un champ magnétique dans la batterie de deuxième génération à partir de la batterie primaire. Le rapport de transformation de la tension du transformateur est déterminé par le nombre de tours de chaque batterie.

III.2.Transformateur de distribution

Le transformateur de distribution est un composant essentiel des réseaux de distribution, qui ajuste la tension électrique avant qu'elle n'affecte les utilisateurs financiers tels que les ménages et les entreprises. Sa faible puissance nominale, sa fréquence standard et sa facilité d'installation lui permettent de distribuer efficacement l'électricité à des niveaux de tension appropriés pour une utilisation sûre dans divers contextes domestiques et industriels.

III.3.Transformateur de mesure

Le transformateur de mesure, également appelé transformateur de courant ou transformateur de potentiel, est un dispositif crucial dans les systèmes électriques pour la sûre mesure des courants et des tensions. Ce dispositif utilise le même principe que les transformateurs de puissance, réduisant les niveaux de courant et tension à des valeurs appropriées pour les instruments de mesure.

III. 4.Transformateur de Protection

Les transformateurs de protection, également connus sous le nom de transformateurs de courant ou de potentiel, sont essentiels dans les systèmes de protection électrique. Ils détectent les courants liés aux défauts électriques comme les circuits et déclenchent les actions appropriées, assurant une réponse rapide et précise aux anomalies électriques. Ils sont largement utilisés dans les réseaux de distribution, les sous-stations et d'autres installations critiques, contribuant à la stabilité et à la fiabilité du système.

IV. Avantages et Inconvénients des transformateurs classiques

Bien que les transformateurs traditionnels offrent de nombreux avantages pour la transmission et la distribution de l'électricité, ils présentent également des inconvénients liés à la perte de puissance, à la taille, au coût et à certains aspects environnementaux. Les progrès technologiques peuvent contribuer à atténuer certains de ces inconvénients au fil du temps, ses avantages sont les suivant :

- La robustesse
- La fiabilité : la fiabilité des transformateurs de puissance est cruciale, car ils constituent des maillons essentiels dans la chaîne d'approvisionnement en électricité, assurant la stabilité du réseau et la fourniture continue d'énergie aux utilisateurs finaux.
- L’efficacité : Ce type de transformateurs a un rendement élevé, généralement compris entre 98,5 % et 99,5 %.Le rendement est la mesure de l’énergie électrique réellement transférée par rapport à l’énergie totale consommée. Cette efficacité élevée réduit les pertes d’énergie et contribue à la durabilité du réseau électrique.

- L'isolation électrique : Ces transformateurs fournissent une isolation électrique entre les différentes parties du réseau, assurant la sécurité des utilisateurs et la protection contre les surtensions.

En dépit de ces avantages, les transformateurs classiques souffrent de plusieurs inconvénients, à savoir : en sont come suivant :

- Pertes d'énergie : Même avec une efficacité élevée, les transformateurs génèrent inévitablement des pertes d'énergie, principalement sous forme de chaleur, ce qui peut nécessiter des systèmes de refroidissement.
- Taille et poids : Les transformateurs peuvent être encombrants et lourds, ce qui peut limiter leur utilisation dans des espaces restreints ou nécessiter une infrastructure de support robuste.
- Coût initial : La fabrication et l'installation de transformateurs peuvent représenter un investissement financier important, en particulier pour les transformateurs de puissance de grande capacité.
- Maintenance : Bien qu'ils soient généralement fiables, les transformateurs nécessitent une maintenance régulière pour assurer leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie.
- Impact environnemental :Certains transformateurs utilisent des huiles isolantes qui peuvent présenter des risques environnementaux en cas de fuite.
- Pas convivial pour l'intégration des énergies renouvelables, des véhicules électriques et du stockage d'énergie
    - La tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du courant de sortie, et rien ne permet de la réguler ou de compenser les problèmes de qualité de l'alimentation tels que les harmoniques de charge, le facteur de puissance.
    - Pas de capacité de stockage d'énergie.
    - Pas de port DC

V. Transformateurs intelligents

Les transformateurs intelligents à base de l'électronique de puissance sont une évolution majeure dans le domaine des transformateurs de puissances ouvrant ainsi un horizon vers la substitution des transformateurs de puissance classiques. Dotés de capacités de communication, de capteurs avancés et de systèmes de contrôle, les transformateurs intelligents peuvent suivre efficacement et en temps réel la complexité et la dynamique des réseaux électriques modernes, notamment, avec l'intégration croissante de sources d'énergie renouvelables tel que le solaire et l'éolien, ainsi que l'adoption graduelle des véhicules électriques.

Le transformateur intelligent à semi-conducteurs , Solid-State Transformer ou SST, est un élément clé des futurs réseaux électriques [1], [2]. L'idée d'un "transformateur à semi-conducteurs" est discutée depuis 1970. L'objectif initial était de convertir le courant alternatif

en courant alternatif pour l'augmenter ou le diminuer de manière similaire à celle d'un transformateur conventionnel [3]. En 1970, W. McMurray de General Electric a présenté pour la première fois un convertisseur AC/AC à liaison haute fréquence, qui est devenu la base du transformateur à semi-conducteurs basé sur un convertisseur direct AC/AC[4]. Un grand nombre de recherches ont été publiées pour examiner la construction, la fonctionnalité et le contrôle du transformateur à semi-conducteurs [5],[6]-[7].

Le SST joue le même rôle que celui du transformateur traditionnel, mais la structure et le mode de fonctionnement sont entièrement différents[8]. Actuellement, le SST est utilisé pour transformer les moyennes tensions (MT) en Basses tensions (BT). L'un des éléments clés du SST est le transformateur haute fréquence qui assure la liaison entre le coté MT et le coté BT. En effet, le transfert de puissance à haute fréquence aide à réduire considérablement le poids et la taille du transformateur, en comparaison avec le transformateur classique avec la même gamme de puissance transférée.

V.1. Topologies d'un SST

Ils existent différentes topologies pour le SST [8],[9]:

- Le SST à un étage (sans capacité de liaison DC), Figure. I.4 : Il convertit directement le courant alternatif moyenne tension (MVAC) en courant alternatif basse tension (LVAC) avec un transformateur haute fréquence comme isolation.
- SST à deux étages (avec liaison DC du côté BT), Figure. I.5 : Le MVAC est converti en LVDC au premier stade, puis le LVDC est converti en LVAC par un onduleur.
- SST à deux étages (avec liaison DC du côté MT) Figure. I.6 : Au premier étage, le MVAC est converti en MVDC par l'intermédiaire d'un redresseur, puis en MVAC à travers pont actif double (DAB). Finalement, le LVAC résultant du transformateur HF est convertie en LVAC sans utiliser de capacité de liaison DC un onduleur.
- SST à trois étages Figure. I.7 : le MVAC est converti en MVDC au premier étage, le MVDC est converti en MVAC au deuxième étage par le biais d'un pont actif double (DAB), le LVAC résultant de transformateur HF est convertie en LVDC par un pont actif double, finalement, le LVDC est converti en LVAC par un onduleur dans le troisième étage. C'est ce type de transformateur qui est le plus utilisé.

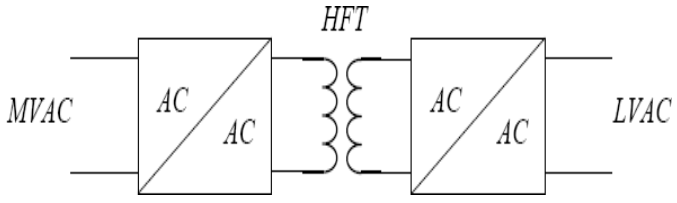


Figure. I.4 :SST à un seul étage-type

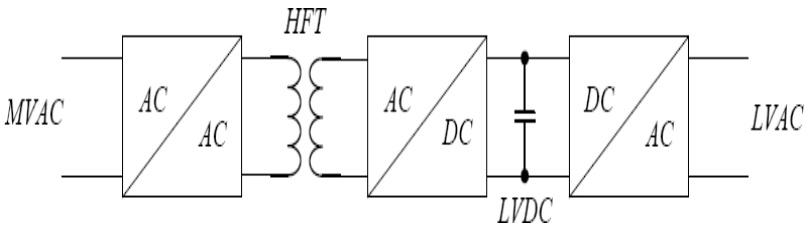


Figure. I.5 :SST à deux étages-type B

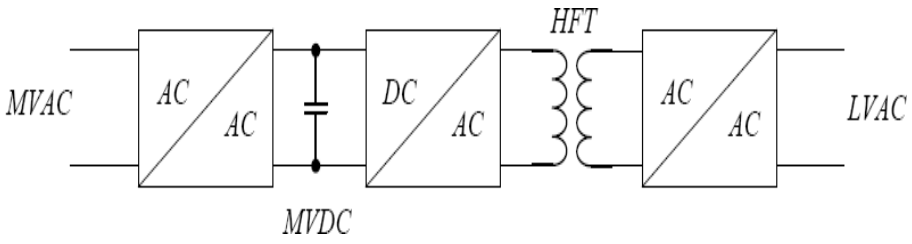


Figure. I.6 :SST à deux étages avec une sortie MVDC

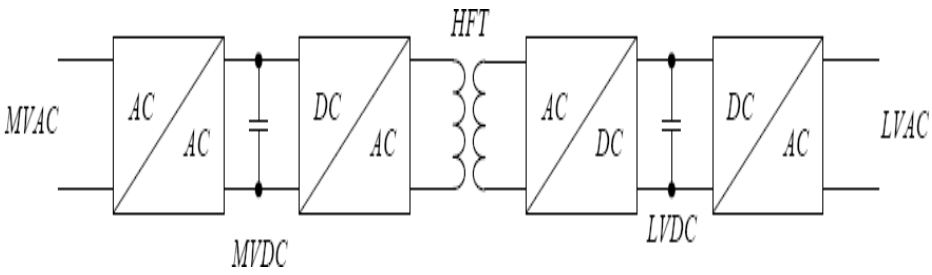


Figure. I.7 :SST à trois étages

V.2. Principe de fonctionnement d'un SST à trois étages

La figure (I.8)illustre le principe de fonctionnement du transformateur à semi-conducteurs. Comme on peut le voir, les convertisseurs électroniques de puissance convertissent d'abord la tension d'entrée à fréquence industrielle en tension alternative à haute fréquence, puis une induction électromagnétique induit la tension alternative à haute fréquence dans le secondaire. Dans le secondaire, les convertisseurs électroniques de puissance convertissent la tension alternative à haute fréquence en une tension de sortie souhaitée. Pour garantir que la tension de sortie ne change pas avec la fluctuation de la charge, les boucles de contrôle sont connectées aux bornes d'entrée et de sortie.

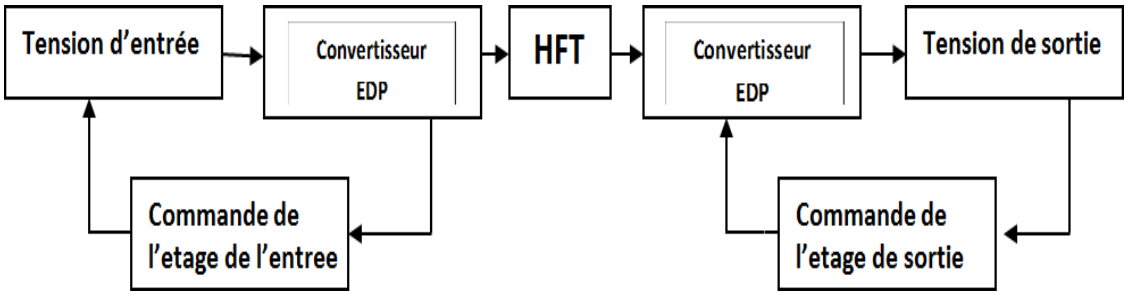


Figure. I.8 Principe de fonctionnement d'un SST.

V.3. Conception d'un SST à trois étages

La figure (I.9) montre la configuration schématique et la conception nécessaire d'un SST à trois étages bidirectionnels, qui se compose de trois étages principaux : étage moyenne tension, étage d'isolement et étage basse tension.

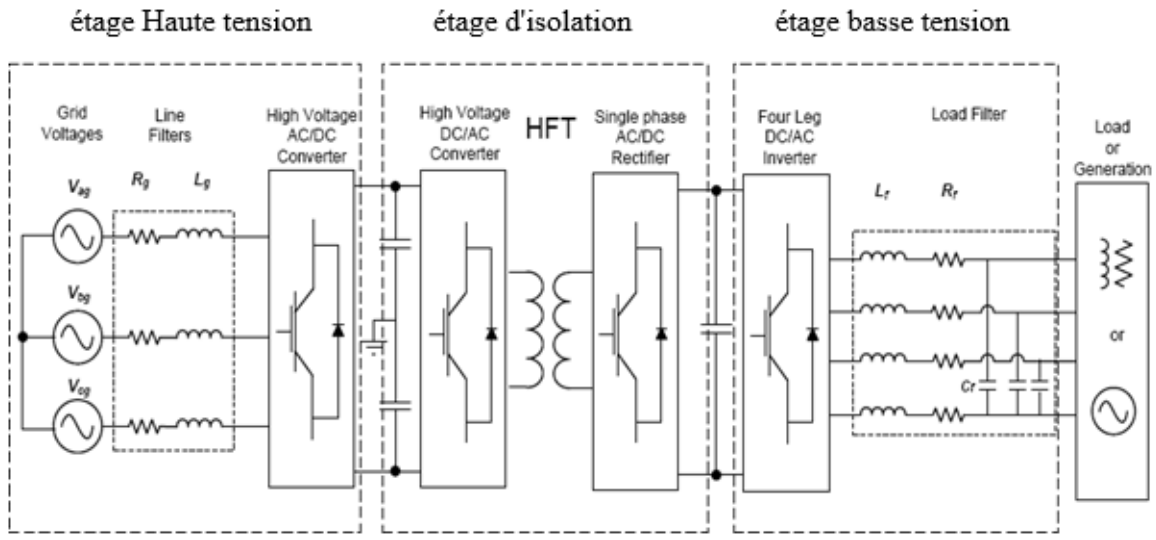


Figure. I.9. Structure de base d'un SST en trois étages.

Le convertisseur triphasé AC/DC, qui dans ce cas sert de redresseur, convertit la tension AC de fréquence d'entrée en une tension DC MV tant que l'énergie circule du côté MV vers le côté LV.

La tension continue du côté MT est d'abord convertie en une tension rectangulaire haute fréquence appliquée au primaire de la transformatrice haute fréquence (HFT) par l'étage d'isolation, qui se compose du HFT et des deux convertisseurs correspondants des côtés MT

et BT. Le convertisseur côté BT, qui sert également de redresseur, transforme ensuite le signal rectangulaire côté secondaire en une forme d'onde continue.

Enfin, le convertisseur triphasé DC/AC côté BT, qui fonctionne comme un onduleur, fournit la forme d'onde alternative à fréquence industriel et puissance de sortie à partir de la liaison DC du côté BT.

Le côté BT, également appelé étage de sortie, est supposé être connecté à un réseau BT qui peut être utilisé pour connecter la charge et la production, tandis que le côté MT, également appelé étage d'entrée, est connecté à un réseau de distribution MT. Le comportement du SST est identique à celui décrit précédemment lorsque l'énergie circule du côté BT au côté MT (c'est-à-dire que la production BT est prédominante).

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

VI.4. Modélisation du SST à trois étages à base de MMC

a. Étage d’entrée

Au niveau de l'entrée, le redresseur a la structure d’un convertisseur modulaire multiniveaux triphasée (MMC), avec des sous-modules (SM) demi-ponts à base des IGBT, Fig. (10).Des filtres RL sont utilisés pour relier l'étage MT du SST au système de distribution AC triphasé. Le MMC du côté MT fonctionne comme un redresseur, convertissant la tension AC du réseau en tension DC, en supposant que l'énergie se déplace du côté MT vers le côté BT du SST.En cas d'inversion du flux de puissance, le MMC joue le rôle d'un onduleur qui transmet la tension continue du circuit intermédiaire de l'étage d'entrée à une tension alternative à la fréquence du réseau [10], [11].

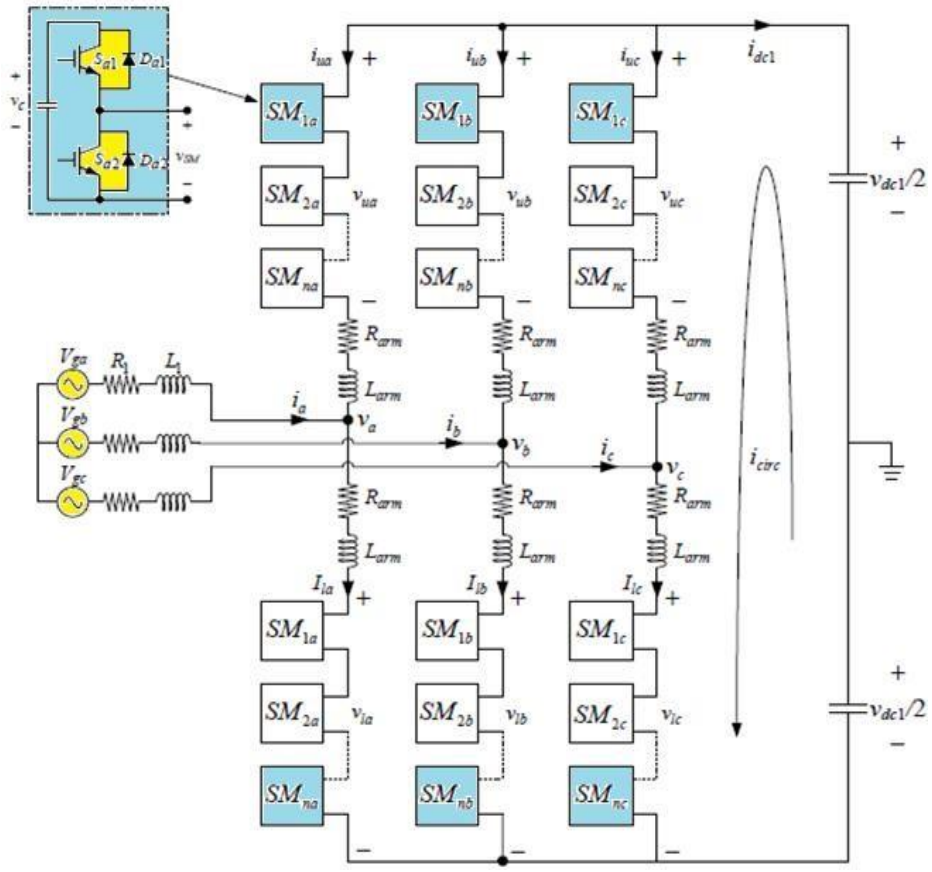


Figure. I.10. Configuration de l'étage d'entrée du SST**.**

b. Étage d'isolation

L'étage d'isolation comprend trois parties principales, Figure(I.11**) :**

- Un MMC monophasée à un bras, dont le travail ressemble à celui d'un onduleur, génère un signal d'entrée haute fréquence vers le HFT cela fonctionne avec une forme d'onde à 10 kHz.
- Le transformateur HF qui sert à abaisser la tension MT en tension BT avec valeur convenable.
- Un convertisseur à double pont monophasé (BT monophasé) agissant en tant que redresseur et fournissant la tension de liaison continue requise pour l'étage de sortie du SST [12].

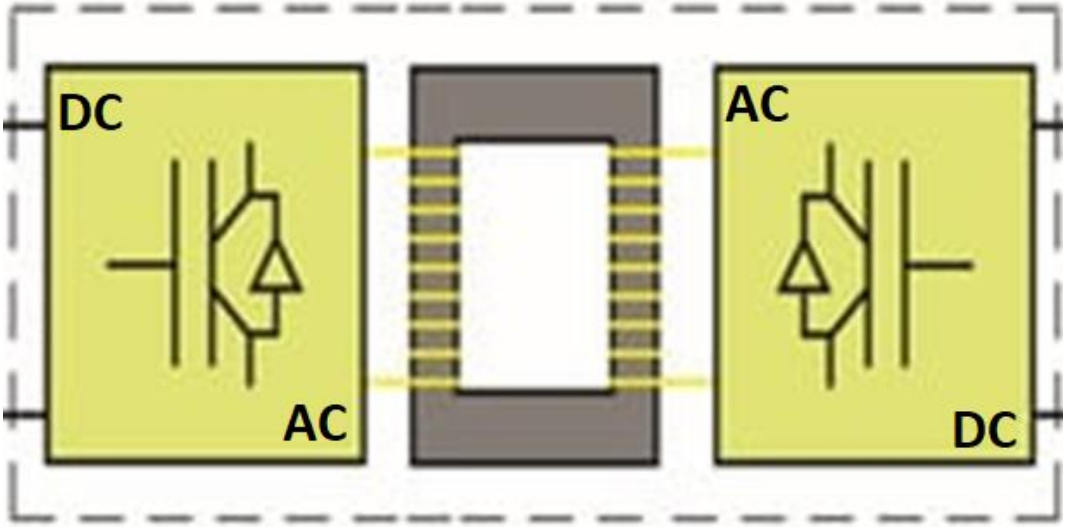


Figure. I.11. Configuration de l'étage d'isolation d'un SST.

c. Étage de sortie

L'étage de sortie n'est qu'un onduleur triphasé qui sert à convertir la tension continue du coté BT en une tension alternative avec fréquence et amplitude synchronisées avec celles du réseau BT avec lequel le SST est connecté. Pour un contrôle précis, la topologie de convertisseur à quatre branches constitue un choix efficace, Figure (I.12). L'ajout d'un bras supplémentaire offre un degré de liberté et une meilleure capacité de contrôle par rapport au convertisseur classique à trois bras [13], [14].

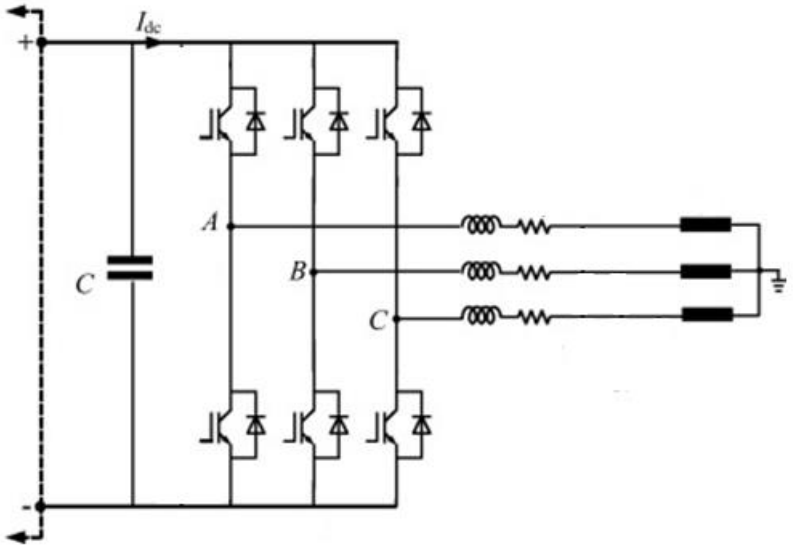


Figure. I.12. Configuration de l'étage de sortie d'un SST.

V.5. Avantages et Inconvénients du SST

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

- Taille et poids plus réduits.
- Contrôle rapide du flux de puissance active bi-directionnellement
- Amélioration de la qualité de l'alimentation
- Intégration facile des ressources renouvelables
- Correction du facteur de puissance
- Contrôle de la puissance réactive des deux côtés du SST
- Auto-équilibrage et fréquence variable
- Régulation instantanée de la tension
- Compensation de la tension,
- Compensation harmonique
- Isolation des pannes entre les côtés primaire et secondaire.
- Au cours des dernières années, les dispositifs électroniques hauts puissance de faibles pertes sont disponibles à un prix moins cher. Les avantages des SST combinés à des dispositifs électroniques de puissance moins chère soutiennent la faisabilité économique du SST pour remplacer les transformateurs classiques[15].

Cependant, le SST a certains inconvénients par rapport au transformateur conventionnel, entre autres, on trouve :

- La conception du SST est plus complexe (par exemple, il nécessite plus de périphériques et de composants de conception) que celle du transformateur traditionnel, ce qui augmente les risques en termes de fiabilité.

  D'autre part, La combinaison de tous ces aspects avec les capacités et les avantages offerts par Ce dispositif a également favorisé une recherche importante sur le développement et l'application des SST [17].

V.6. Applications générales du SST

Des travaux acharnés ont été faits pour améliorer le fonctionnement du SST et l'intégrer dans différentes secteurs, tel que :

- Dans le secteur de tractions.
- Dans l'intégration des énergies renouvelables.
- Dans les stations de recharge DC.
- Le conditionneur de qualité d'énergie unifié(UPQC).
- Application dans les réseaux intelligents(SmartGrid).

La Figure (I.13)illustre l'une des voies d'application du SST dans le réseau électrique intelligent pour intégrer les énergies renouvelables.

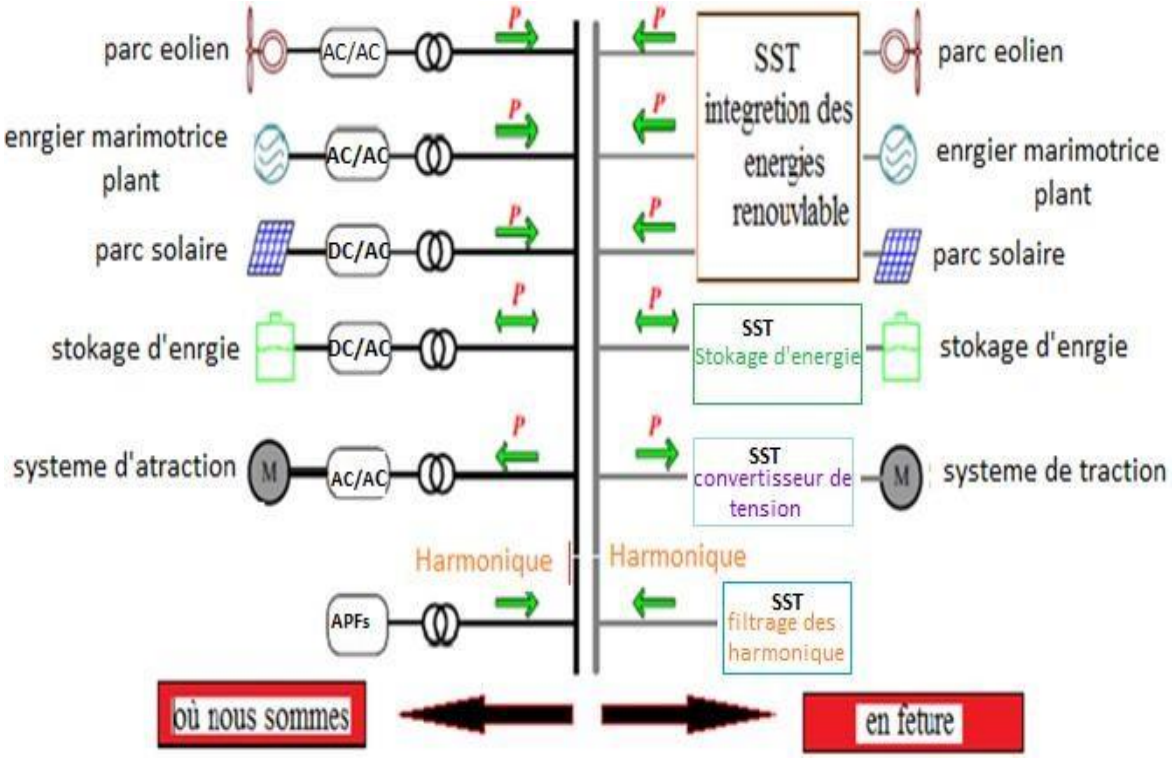


Figure. I.13. Applications potentiel les de la SST dans le futur système de distribution.

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, une brève description a été fournie concernant les transformateurs classiques et les transformateurs intelligents à base d'électronique de puissance ou le SST. La comparaison entre ces deux types de transformateur permet de conclure que le transformateur conventionnel qui a été largement utilisé dans les applications industrielles jusqu'à présent présente des inconvénients qui ne le permettent pas de suivre efficacement les développements et les changements récents du système électrique. Par sa structure et ses capacités, le transformateur intelligent représente un candidat fiable pour alternatif le

transformateur classique. L'un des éléments essentiel du transformateur intelligent est le transformateur HF. Dans ce qui suit, cet élément sera modélisé dimensionné et réalisé pratiquement.

Chapitre 2

Structure d’un Transformateur Haute Fréquence (THF)

I- Introduction

Le transformateur haute fréquence joue un rôle important dans la réalisation des transformateurs intelligent à base des semi-conducteurs ou le SST. Cet élément et, comme indiqué dans le chapitre précédent permet de réduire considérablement la taille et le coût du transformateur de puissance intelligent comparé au transformateur classique pour la même gamme de puissance. Dans ce chapitre, une approche de dimensionnement et de conception du transformateur de puissance à haute fréquence est développée. Le dimensionnement du transformateur HF dépend des variables d'entrée qui sont la puissance à transformer, la tension MVAC et la fréquence ainsi que la variable de sortie est la tension LVDC. Différents facteurs peuvent être variés pour trouver une conception optimale du THF telle que la densité du courant d'enroulement, la densité de flux, le nombre de spires primaires et secondaires, type de matériau ferromagnétique, forme du circuit magnétique, etc.

II- Principe du fonctionnement des transformateurs

D'une manière générale, un transformateur ne possède pas de pièces mobiles et peut être décrit comme un "appareil électrique statique". Comme son nom l'indique, il donne l'idée de transformer une chose en une autre. Cet équipement électrique fonctionne selon la loi de Faraday sur l'induction électromagnétique. Comme le montre la figure (II.1),la première bobine qui reçoit l'énergie d'une alimentation en courant alternatif est appelée l'enroulement primaire et l'autre bobine qui fournit de l'énergie si une charge est connectée à sa sortie est appelée l'enroulement secondaire.

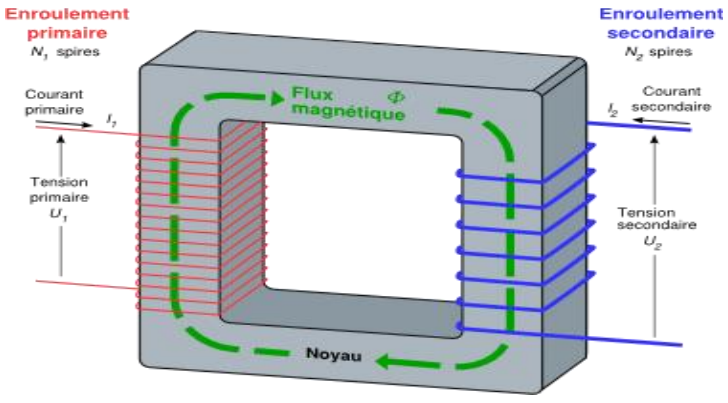


Figure .II.1.Structure de base d'un transformateur monophasé.

Si une alimentation en courant alternatif est connectée au primaire, elle produit un flux alternatif dans le noyau magnétique. Lorsque ce flux fluctuant dans le noyau traverse les enroulements secondaires, la force électromotrice induite dans chaque bobine est généralement la même pour le primaire et le secondaire. Compte tenu de leurs caractéristiques statiques et de l'application des lois de l'induction électromagnétique, son circuit secondaire

peut recevoir de l'énergie de son primaire lorsque le flux magnétique reliant les enroulements primaires et secondaires sur le noyau augmente et diminue. Ainsi, un transformateur ne peut fonctionner qu'en courant alternatif. Les transformateurs sont des composants d'articulation dans le réseau électrique. Ils permettent de passer la tension d'un niveau à un autre pour assurer la liaison entre les différentes parties du réseau électrique qui sont les moyens de production (MT), le réseau de transport (THT, HT), le réseau de répartition (HT, MT) et le réseau de distribution (MT, BT).

En plus des contraintes prise en charge dans la réalisation des transformateurs classiques, le transformateur utilisé dans le SST doit nécessite certaines considérations de conception supplémentaires pour fonctionner en haute fréquence, en particulier le type du matériau magnétique et les sections des conducteurs utilisés dans la réalisation des bobines.

III –Dimensionnement du transformateur HF

Le dimensionnement du transformateur HF concerne ces trois parties essentielles qui le constituent, à savoir :

- Le bobinage du circuit primaire
- Le bobinage du circuit secondaire
- Le circuit magnétique

III. 1. Choix du type de bobinage

La stratégie de bobinage est importante afin d'optimiser le fonctionnement du transformateur et minimiser l'influence de tout effets indésirables. En effet, plusieurs contraintes sont à considérées telles que[17] :

- La minimisation des capacités parasites entre spires ou entre enroulements. En effet, réduire ces valeurs permet d'augmenter la fréquence de résonnance des composants et cela diminue les pertes en commutation du circuit électronique.
- La minimisation des inductances de fuites (ou les coefficients de couplage) entre les enroulements. L'amélioration du couplage entre enroulements diminue les pertes en commutation du circuit électronique.
- L'amélioration de l'isolation entre les enroulements du transformateur.

On distingue différents types de bobinages, parmi lesquels :

a. Bobinage à nid d'abeille

Pour réduire l'effet de proximité et la capacité parasite, les bobines multicouches sont enroulées selon des motifs dans lesquels les spires successives ne sont pas parallèles mais croisées à un angle ou en forme de zigzag, Figure (II.2). Ce bobinage est dit à nid d'abeille ou en panier, il représente la forme la plus courante des bobines de faible puissance.



Figure. II.2. Bobinage à nid d'abeille.

b. Bobinage de deux fils en main

Afin d'obtenir une inductance de fuite minimale, on bobine côte à côte une spire deprimaireetunespiredesecondaire.Danscetteconfiguration,lacapacitérépartieseraimporta nte.Unevariantedecettetechniqueestl'utilisationd'uncâbleblindépourréaliserletransformat eur(primaireréaliséavecl'âme,secondaireréaliséaveclamasse).



Figure. II.3. Bobinage de deux fils en main.

c. Bobinage concentrique

Les bobinages utilisent toute la longueur des jambes du circuit magnétique et se réalisent en une ou plusieurs couches successives, Figure (II.4) .L'inductance de fuite est d'autant plus faible que le bobinage est long .Elle peut être diminuée en alternant des couches de primaires et de secondaires.

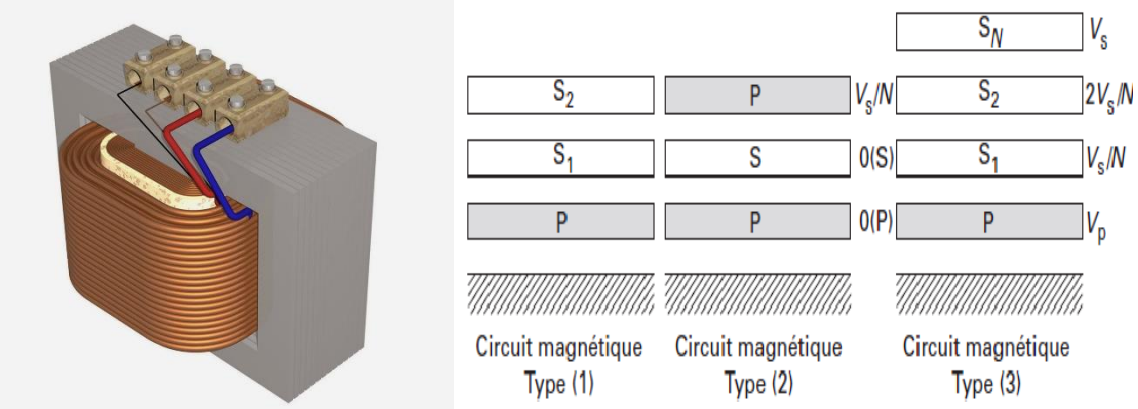


Figure. II.4. Bobinage concentrique avec les différentes configurations.

C'est la structure qui est utilisée pour la réalisation du transformateur HF du présent travail.

III. 2. Choix des conducteurs

Plusieurs types de conducteurs peuvent être utilisés dans la conception des transformateurs HF, et cela dépend de plusieurs paramètres, tel que l'intensité de courant, la tension appliquée, et la fréquence de fonctionnement [18].

a. Conducteur isolé

A fréquence élevée, on considère en première approximation que le courant circule en surface sur une épaisseur δappelée profondeur de pénétration, à laquelle la densité de courant atteint 37% de sa valeur en périphérie, c'est l'effet de peau, Figure (II.5). Elle diminue au fur et àmesure que la fréquence augmente. On peut alors calculer pour différentes fréquences l'intensité maximale admissible dans un fil .En effet la section du fil étant donné par :

$$S_{fil} = \pi r^2 = \frac{I_{eff}}{J} \qquad \text{(II.1)}$$

Où :

S_{fill} : Est la section du fil.

r : Est le rayon du fil,

J : Représente la densité du courant.

I_{eff} : Est le courant efficace, tel que :

$$I_{eff\ max} = j\pi\delta^2 \qquad \text{(II.2)}$$

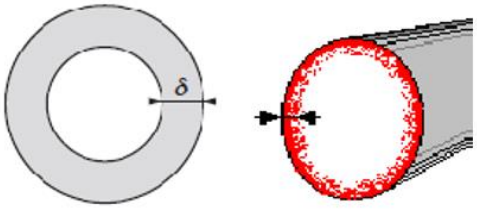


Figure.II.5. Épaisseur de peau**.**

On admet que pour un conducteur en cuivre, la profondeur de pénétrationδ dans un métal de résistivité ρ et de perméabilité μ à une fréquence f est donnée par :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu f}} \approx \frac{70}{\sqrt{f}} \text{avec} \quad \delta\ en\ mm \qquad \text{(II.3)}$$

P:Résistivitéduconducteur (Ωm).

μ:perméabilité du conducteur.

μ_0 *: perméabilité du vide*

f:fréquenceducourant (Hz).

b. Groupe de conducteurs

Si on considère plusieurs conducteurs proches les uns des autres , les champs magnétiques générés par les différents conducteur set les champs de fuite dus aux influences magnétiques agissent sur les courants circulant dans les autres conducteurs .Ainsi ,l'effet de peau se superpose et crée un effet de proximité entre conducteurs qui provo que encore une augmentation de la résistance en haute fréquence et, conséquent des pertes supplémentaires dans le conducteur.

c. Fils de Litz

Les pertes des transformateurs changent lorsque la fréquence augmente, car une fréquence plus élevée entraîne un effet de peau plus important, ce qui augmente la résistance effective. Dans un conducteur métallique, le courant alternatif est distribué de telle sorte que le cœur du conducteur présente une densité de courant nettement inférieure à celle de sa couche externe, ou peau. Dans les conducteurs, on parle d'effet de peau. L'utilisation de fils de Litz est un moyen d'atténuer l'impact de l'effet de peau sur la résistance effective. En divisant le conducteur en brins insolés beaucoup plus petits avec les écrans appropriés, les fils de Litz réduisent cette résistance, Figure (II.6). Les minuscules brins du fil sont tous isolés les uns des autres. Un fil plus épais est formé de plusieurs centaines de brins, et son épaisseur est égale à la taille du fil.

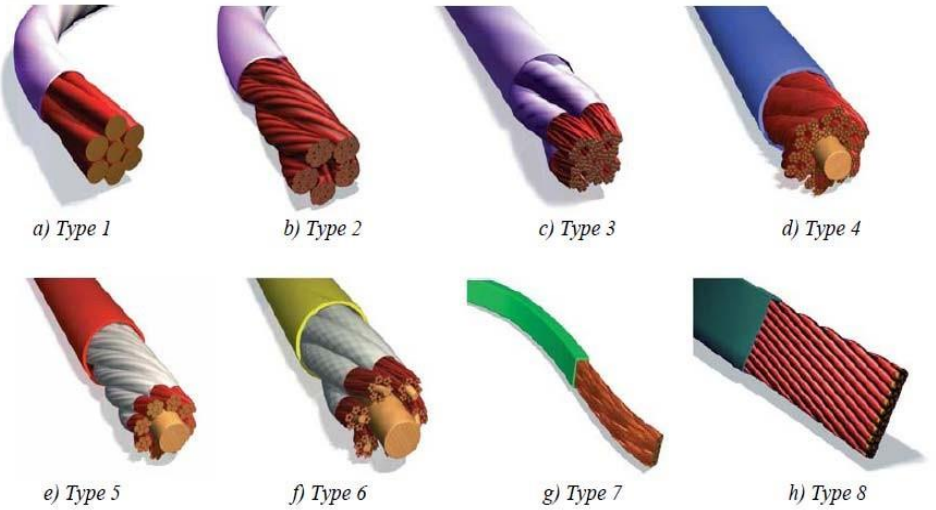


Figure .II.6. Différents types de fils de Litz.

III. 4. Types des matériaux conducteurs

Il existe plusieurs types de conducteurs pouvant être utilisés dans le bobinage des transformateurs.

a. Le cuivre et ses alliages

C'est le conducteur de base le plus utilisé pour la réalisation des bobinages .Il est utilisé soit à l'état pur (cuivre électrolytique), soit faiblement allié pour lui donner des qualités particulières ,soit sous forme d'alliages proprement dits où le laiton et le bronze sont couramment employés avec le cuivre.
Il existe sous deux formes :

- Forme écrouie avec une limite élastique de 20 dan/mm2 qui trouve son emploi dans les pièces usinées (clinquants)

- Forme recuit avec une limite élastique de 6daN/mm2,plus particulièrement réservé à la fabrication des enroulements.

Les diamètres de fil de cuivre les plus couramment utilisés varient de 20 mm à plusieursmillimètres.Sarésistivitéélectriqueestde0.00017μΩ.màlatempératureambiante. Pour des raisons d'encombrement et de montée en fréquence, les fils de grands diamètres seront remplacés par des méplats, des multibrins ou fils de litz .Le cuivre ,en de hors de sa faible résistivité, présente l'avantage considérable sur l'aluminium de se souder et de se braser très facilement.

b. L'aluminium

L'aluminium, avec une limite élastique de 12 dan/mm2, est peu couteux, beaucoup plus léger et avec une résistivité 1,65 fois supérieure à celle du cuivre, ce qui oblige à employer des sections plus élevées si l'on désire conserver le même niveau de pertes joules. Par contre, la masse des conducteurs avec l'aluminium sera toujours à pertes égales 2 fois plus faibles qu'avec l'emploi du cuivre [19].

III. 5.L'isolement entre bobines

Lesisolantssontutilisésdanslaconstructiondestransformateurspourassurerl'isolationentrel escouchesdespiresd'unmêmeenroulementouentrelesdifférentsenroulements. Ces isolants sont caractérisés par leur rigidité diélectrique et par leur classe thermique.

III. 6. Écrans contre rayonnement

Un moyen de réduire des parasites électromagnétiques rayonnés est de placer un ou plusieurs écrans électrostatiques entre les enroulements [20] .

a. ***Écrans électriques*** :En cas de présence d'une tension de mode commun entre les enroulements, et afin d'éviter les courant capacitifs dans ces enroulements ils sont séparée par deux écrans électrostatiques qui sont portés au potentielle de chacun de ces enroulements.

b. ***Écrans magnétiques*** : L'utilisation d'écrans magnétiques permet de s'affranchir d'une part, du flux de fuite existant à l'extrémité de la spiral constituant le noyau magnétique et d'autre part être insensible aux champs magnétiques extérieur et par réciprocité de ne pas rayonner.

III. 7.Calcul des éléments parasites

A haute fréquence, les champs électromagnétiques et électrostatiques sont présents entout point du bobinage. Leurs actions sur les conducteurs et les isolants peuvent être décrites au niveau des schémas équivalents par :

- Les inductances de fuite et la variation de la résistance des enroulements ;
- Les capacités parasites(ainsi qu'une résistance représentant les pertes dans les isolants).

III. 8. Facteur d'effet de peau

L'effet de peau peut être décrit comme la propension du courant AC à circuler dans un conducteur de telle manière que la densité du courant est plus élevée près de la surface du conducteur et plus faible à des profondeurs plus importantes dans le conducteur [21]. Le courant circule donc principalement au niveau de la "peau" du conducteur (surface extérieure) et à un certain niveau connu sous le nom de profondeur de peau. L'effet de peau entraîne une augmentation de la résistance du conducteur aux hautes fréquences .Selon [22], l'effet de peau est causé par la modification du champ magnétique du courant alternatif. En général, les conducteurs constitués de fils sont utilisés pour transférer l'énergie et, dans le cas d'un fil transférant du courant alternatif, un champ magnétique est produit autour de ce conducteur. Si l'intensité du courant dans ces fils change, le champ magnétique change également. Cette modification du champ magnétique produit également un champ électrique qui résiste à la modification de l'intensité du courant. Ce champ opposé est connu sous le nom de "force contre-électromotrice". Ainsi, au centre du conducteur, il existe une forte force contre-électromotrice qui s'oppose aux électrons conducteurs et les renvoie à la surface du conducteur. Malgré la force d'opposition de la force contre-électromotrice, l'intensité du courant est plus élevée à la surface du conducteur, tandis qu'elle est réduite en profondeur.

III. 9. Effet de proximité

La circulation du courant dans un conducteur est largement influencée par un champ magnétique alternatif, et le courant circulant dans un conducteur isolé produit un champ magnétique autour du conducteur qui peut induire des courants de Foucault dans les conducteurs voisins, modifiant ainsi la circulation initiale du courant dans les conducteurs [23]. La résistance en courant alternatif des conducteurs voisins augmente en raison des effets de proximité. Cet effet augmente avec la fréquence, et la résistance en courant alternatif d'un conducteur peut être dix fois supérieure à la résistance en

courant continu à très haute fréquence. Selon [24], l'effet de proximité se produit lorsque la circulation du courant dans une couche de l'enroulement influence la circulation dans une autre couche.

La figure(II.7) illustre l'effet de proximité : le courant circule vers d'autres enroulements en raison des champs incidents des conducteurs voisins [21]. Comme le montre la figure, lorsque les conducteurs sont enroulés pour produire une ou plusieurs couches, une "force magnétomotrice" se développe le long du plan d'enroulement. La surface utile du conducteur est réduite en raison de l'effet de proximité.

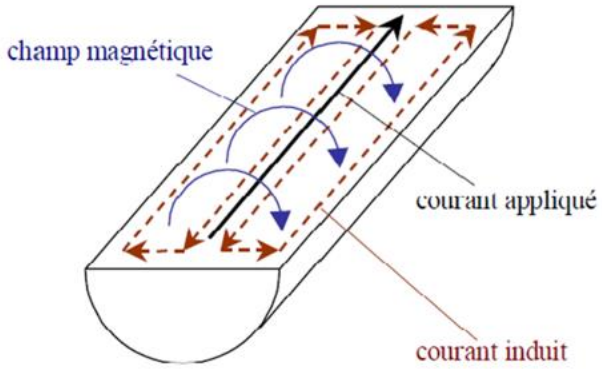


Figure. II.7. Explication physique de l'effet de proximité.

III. 10.Choix du noyau magnétique

Le choix du type de matériau magnétique est très important, en particulier, pour le cas de fonctionnement d'un transformateur en haute fréquence. Selon la fréquence et le niveau de saturation, on distingue différents type de matériau magnétique, parmi lesquels ceux cité ci-dessous.

a. Ferrites

La ferrite est un matériau magnétique doux et, bien que les ferrites soient largement utilisées pour les applications HF, le noyau de ferrite présente une densité de flux de saturation très faible, de l'ordre de 0,3-0,5 T. La ferrite a une résistivité électrique élevée mais une densité de flux de saturation faible. Comme la résistivité élevée réduit les pertes dues aux courants de Foucault, la principale perte des ferrites est l'hystérésis, Figure (II.8).



Figure . II.8. Le matériau ferrite.

b. Acier au silicium

L'acier au silicium est largement utilisé dans les applications magnétiques douces, Figure (II.9). Ce matériau présente une "densité de flux de saturation élevée" (> 1,5 T) ainsi qu'une bonne perméabilité [25]. Dans [26], un transformateur de traction de 75 KVA fonctionnant à 400 Hz a été développé en utilisant de l'acier au silicium (FeSi). Cependant, le volume et la hauteur peuvent être améliorés à des fréquences de travail élevées. Ils conviennent généralement pour des fréquences inférieures à 1 kHz. Il est suggéré de remplacer l'acier au silicium par des noyaux amorphes à faibles pertes (Meuglas) afin de minimiser les pertes à vide. Comme le soulignent [27], [28], dans certaines applications (transmission ou distribution) utilisant aujourd'hui des puissances élevées, de minces plaques de silicium (FeSi) d'une épaisseur inférieure à 0,3 mm, laminées les unes aux autres, sont utilisées pour le noyau du transformateur. Ces plaques minces sont isolées les unes des autres pour minimiser les courants de Foucault. La méthode d'empilage des plaques permet de construire de grands noyaux d'un poids total de plusieurs centaines de tonnes. L'un des avantages du FeSi est sa densité de flux à saturation élevée, déjà mentionnée plus haut. En outre, le coût du matériau est faible, ce qui en fait une solution appropriée pour les applications nécessitant une haute tension, une puissance élevée et une basse fréquence, telles que les transformateurs conventionnels utilisés sur le réseau électrique. Cependant, les noyaux laminés présentent deux inconvénients majeurs. D'une part, les pertes augmentent considérablement lorsque la fréquence augmente. D'autre part, les laminassions entre les feuilles réduisent la conductivité thermique entre les noyaux, ce qui limite la densité des pertes.



Figure. II.9. Le matériau acier au silicium.

c. Nanocristallins

Les nanocristallins offrent les meilleures caractéristiques pour les applications hautes puissance haute fréquence, Figure (II.10). Ils constituent un excellent compromis entre les tôles d'acier au silicium laminées à haute densité de flux de saturation et les ferrites à faibles pertes [27]. La perte de l'alliage amorphe peut être contrôlée en utilisant une faible densité de flux, ce qui se traduit par un grand volume de noyau [29]. L'alliage nanocristallin s'avère être un candidat approprié car il répond aux exigences d'efficacité et de densité de puissance. Ce matériau a une densité de flux de saturation plus élevée que la ferrite (1T→1,2 T) et la perte de noyau du nanocristallin est plus faible que celle des autres matériaux, ce qui peut se traduire par un rendement élevé [30]. Avec les nanocristallins de puissance, les matériaux développés pour les hautes fréquences ont une haute résistivité, d'où des pertes par courant de Foucault faibles. Cependant, la perméabilité qui est généralement faible entraine un grand courant magnétisant.



Figure .II.10. Le matériau nanocristallin.

d. Amorphe

La structure désordonnée de ces matériaux permet de diminuer considérablement les pertes par hystérésis et les courants de Foucault, ce qui permet de réduire la dissipation d'énergie sous forme de chaleur. Grâce à leur grande perméabilité magnétique (1,2 T), ils offrent un couplage magnétique optimal, tandis que leur solidité et leur stabilité thermique garantissent une performance fiable même dans des environnements exigeants. Les matériaux amorphes sont utilisés dans différentes applications, allant des alimentations à découpage aux transformateurs de puissance, ce qui permet de créer des systèmes plus durables et respectueux de l'environnement, répondant ainsi aux exigences technologiques actuelles avec une efficacité exceptionnelle, Figure (II.11).



Figure. II.11. Le matériau amorphe.

III. 11. Choix de la forme du corps magnétique

La configuration de la fenêtre est extrêmement importante. La fenêtre devrait être aussi grande que possible afin de maximiser la largeur de l'enroulement et de minimiser le nombre de couches .Ce la minimise l'inductance de fuite .De plus, avec une grande fenêtre, la dimension allouée aux lignes de fuite qu'on s'est fixé a moins d'impact. Avec une fenêtre plus large, moins de hauteur d'enroulement se révèle nécessaire, et la surface de fenêtre peut être mieux utilisée.

Pour chaque matériau, un grand nombre de formes et de dimensions EE, EFD, ETD, RM et U, tores, ... est proposé par les différents fabricants, Figure (II.12).

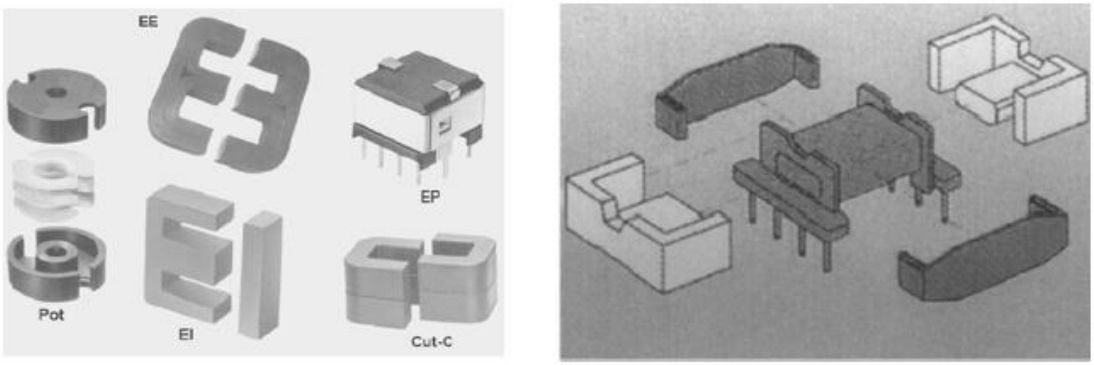


Figure. II.12. Différentes formes du noyau magnétique.

IV -Conclusion

Le transformateur haute fréquence est meilleure que l'ancien en raison de ses composants. Nous avons vu dans ce chapitre les quatre matériaux qui composent ce transformateur , chacun a ses propres caractéristiques qui le distinguent. Il est à noter que le choix des conducteurs, notamment le fil de Litz, et les types de bobinages est d'une grande importance pour la qualité du transformateur à concevoir .Les différents composants du transformateur seront dimensionnés dans le chapitre suivant

Chapitre 3

Dimensionnement et réalisation expérimentale d'un transformateur HF

I .Introduction

Le dimensionnement d'un transformateur HF de puissance est un processus crucial qui nécessite une compréhension approfondie des principes de l'électromagnétisme, des matériaux, des exigences de puissance, et des conditions d'exploitation. Dans ce chapitre, les différentes parties du transformateur HF, discutées dans le chapitre précédent, seront dimensionnées numériquement. Uneétude de simulation est effectuée pour tester le fonctionnement du transformateur dans l'environnement Matlab/Simulink. Par la suite et, en exploitant les résultats de dimensionnement obtenus, un prototype du transformateur HF est réalisé. Des tests expérimentaux sont effectués pour valider le fonctionnement correct du transformateur réalisé.

II. Démarches de dimensionnement et réalisation du transformateur HF

Le transformateur est utilisé dans le système électrique pour transférer l'énergie du circuit d'entrée au circuit de sortie par couplage magnétique. Les facteurs qui dépendent de la quantité d'énergie transférée sont la fréquence de fonctionnement du transformateur, la densité du flux magnétique. Au cours du processus de conception, les paramètres cruciaux à prendre en compte sont le matériau utilisé pour le noyau et la forme de ce dernier, le type de fil électrique, et le nombre de spires dans le côté primaire et secondaire.

La conception dépend de certaines spécifications de base telles que :

- Les tensions d'entrée et de sortie (V_e)
- La fréquence de fonctionnement (f)
- La puissance nominale (P_n)
- Le rapport de transformation entre les enroulements secondaire et primaire$n$

Pour la réalisation de ce projet, ces grandeurs sont comme suivant :

- $V_e = 100V$, $I_1 = 1A$
- $f = 10KHz$
- $P_n = 100VA$
- $n = 0.5$

II.1. Choix du corps magnétique

Le choix du type de matériau du corps magnétique dépend de la fréquence de fonctionnement du transformateur. Dans ce travail, la fréquence utilisée pour le fonctionnement du transformateur est de 10KHz. Par conséquent, le matériau le mieux adapté à cette fréquence est le nanocristalline.

La théorie du circuit magnétique est utilisée dans le processus traditionnel de conception des transformateurs. Comme le montre la figure (III.1), la surface de section transversale du noyau (Ac) et la surface de la fenêtre (Wa) sont les paramètres de base du transformateur proposé pour déterminer la taille du noyau.

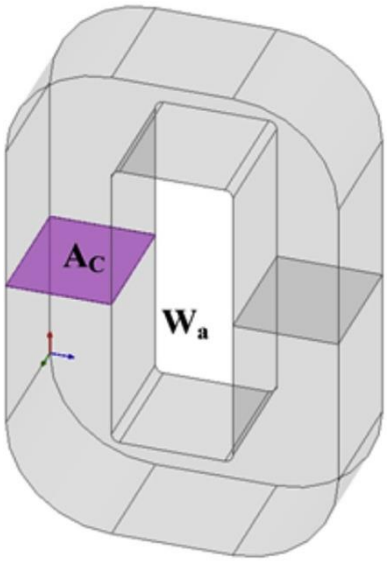


Figure. III.1. Les paramètres mécaniques de base du noyau.

A l'aide des équations mathématiques, on peut facilement déterminer les dimensions du noyau magnétique, y compris la taille de sa fenêtre ainsi que l'entrefer entre les enroulements et le noyau. L'équation de la tension globale du transformateur peut être dérivée de la loi de Faraday comme suit :

$$E = K_a . f . N . B . A_c \qquad \text{(III.1)}$$

Où :

- f:C'est la fréquence de fonctionnement [Hz].
- N : C'est le nombre de tours de l'enroulement.
- B : C'est la densité du champ magnétique [T].
- A_c : C'est la section transversale du noyau du transformateur $[cm^2]$.
- K_a : C'est la constante de forme d'onde ($K_a = 4$ pour un signal de forme carée).

Il existe une grande variété de formes de noyaux de transformateurs, telles que la forme EE, la forme UU, la forme C, la forme EI, etc. La forme choisie dans ce travail est la forme C, montrée sur la figure (III.2).



Figure. III.2. Corps magnétique type C utilisé dans le projet.

La figure (III.3) montre les différents dimensions de chaque côté du noyau. Ces dimensions sont mesurées et groupés dans le tableau III.1.

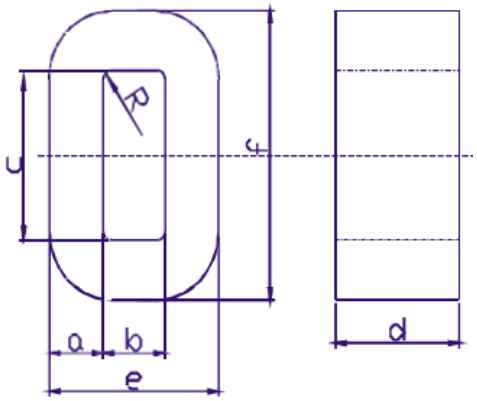


Figure. III.3. Les dimensions du corps magnétique de type C.

Tableau III.1 : Les mesures des dimensions du noyau

Variable	*c*	*a*	*b*	*e*	*f*	*d*
Mesure	56mm	10mm	20mm	40mm	75.5mm	40mm

II.2. Dimensionnement du bobinage du transformateur haute HF

Le type du fil électrique du coté primaire et secondaire doit être déterminé suivant la puissance transmise et la fréquence de fonctionnement. Ensuite, le nombre de spires dans les deux cotés est déterminé par l'équation (2).

$$N_p = \frac{V_e.10^8}{4.f.B_m.A_c}$$
$$N_s = \frac{V_s.10^8}{4.f.B_m.A_c} \qquad \text{(III.2)}$$

Où :

- N_p : C'est le nombre de spires dans le coté primaire.
- N_s : C'est le nombre de spires dans le coté secondaire.
- V_e : La tension maximale d'entrée [V].
- V_s : La tension maximale de sortie [V].
- B_m : La densité de flux maximale admissible, pour ce projet elle a été choisie comme $B_m = 0.104\text{T}$
- A_c : La section efficace du noyau, en utilisant les dimensions du tableau (1), on trouve :

$$A_c = d \cdot a = 4 \cdot 1 = 4cm^2 \qquad \text{(III.3)}$$

En utilisant les spécifications sélectionnées pour le transformateur et, avec certaine arrangement, le calcul donne :

- N_p: Le nombre de spires dans le coté primaire est $N_p = 60$
- N_s : Le nombre de spires dans le coté secondaire est $N_s = 30$

D'autre part, en utilisant la valeur de la puissance nominale et la valeur de la fréquence, le diamètre du fil de cuivre à utiliser est sélectionné à partir du tableau (III.2). En effet, le choix théorique donne $D_{Cu} \approx 1.15\ mm$, mais pour la réalisation de notre bobinage nous avons utilisé le fil existant au laboratoire dont le diamètre est $D_{Cu} = 1.5\ mm$. Il est à noter que le même diamètre est utilisé pour les bobinages primaire et secondaire.

Tableau III.2 : Tableau indicatif pour le choix des câbles pour le THF.

AWG	Diamètre [mm]	Section [mm²]	Résistance [Ohm/Km]	C. max [Ampère]
0000	11,68400	107	0,16072	380
000	10,40384	85	0,20270	328
00	9,26592	67,4	0,25551	283
0	8,25246	53,5	0,32242	245
1	7,34822	42,4	0,40639	211
2	6,54304	33,6	0,51266	181
3	5,82676	26,7	0,64616	158
4	5,18922	21,2	0,81508	135
5	4,62026	16,8	1,02762	118
6	4,11480	13,3	1,29593	101
7	3,66522	10,5	1,63410	89
8	3,26390	8,37	2,06050	73
9	2,90576	6,63	2,59809	64
10	2,58826	5,26	3,27639	55
11	2,30378	4,17	4,13280	47
12	2,05232	3,31	5,20864	41
13	1,82880	2,62	6,56984	35
14	1,62814	2,08	8,28200	32
15	1,45034	1,65	10,44352	28
16	1,29032	1,31	13,17248	22
17	1,15062	1,04	16,60992	19
18	1,02362	0,823	20,94280	16
19	0,91186	0,653	26,40728	14
20	0,81280	0,518	33,29200	11
21	0,72390	0,410	41,98400	9
22	0,64516	0,326	52,93920	7
23	0,57404	0,258	66,78080	4,7
24	0,51054	0,205	84,19760	3,5
25	0,45466	0,162	106,17360	2,7
26	0,40386	0,129	133,85680	2,2
27	0,36068	0,102	168,82160	1,7
28	0,32004	0,081	212,87200	1,4
29	0,28702	0,0642	268,40240	1,2
30	0,25400	0,0509	338,49600	0,86

II.3. Identification du paramètres du transformateur haute HF

Afin de valider les résultats de dimensionnement trouvés ci-dessus, il faut opter pour un test de simulation qui nécessite de son côté l'identification des paramètres du transformateurs. Pour ce faire le schéma équivalent de la figure (III.) est utilisé. Les résultats d'identification sont résumés dans le tableau (III.3).

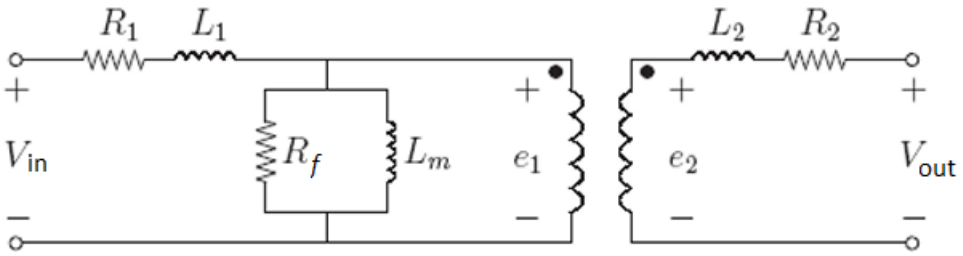


Figure. III.4. Schéma équivalent du transformateur pour l'identification des paramètres.

Tableau III.3 : Paramètres du modèle du THF.

Variable	Noyau nanocristallin
P(Puissance du transformateur)	100 VA
f (Fréquence de fonctionnement)	10 KHz
Uin(tension d'entrée)	100 V
Uout(tension de sortie)	50 V
R1 (résistance du circuit primaire)	0.250 Ohm
R2 (résistance du circuit secondaire)	0.125 Ohm
L1(inductance du circuit primaire)	154e-06 H
L2(inductance du circuit secondaire)	50e-06 H
Rf(résistance de fuite)	1.06e+3 Ohm
Lm(Inductance magnétisante)	15e-03 H

III- Résultats de simulation du transformateur HF :

Pour analyser le comportement des deux prototypes HFT, un essai en laboratoire impliquant un convertisseur en pont complet est réalisé. En effet, les principales applications des HFT concernent les convertisseurs DC-DC. Ces convertisseurs fonctionnent avec des formes d'ondes carrées, et les HFT doivent donc être testés en utilisant ce type de signaux afin de mieux caractériser leur comportement dans des conditions de fonctionnement réelles. Pour cette raison, un convertisseur à pont complet est sélectionné et réalisé pour effectuer les tests. Ce convertisseur est représenté sur la figure (III.5).

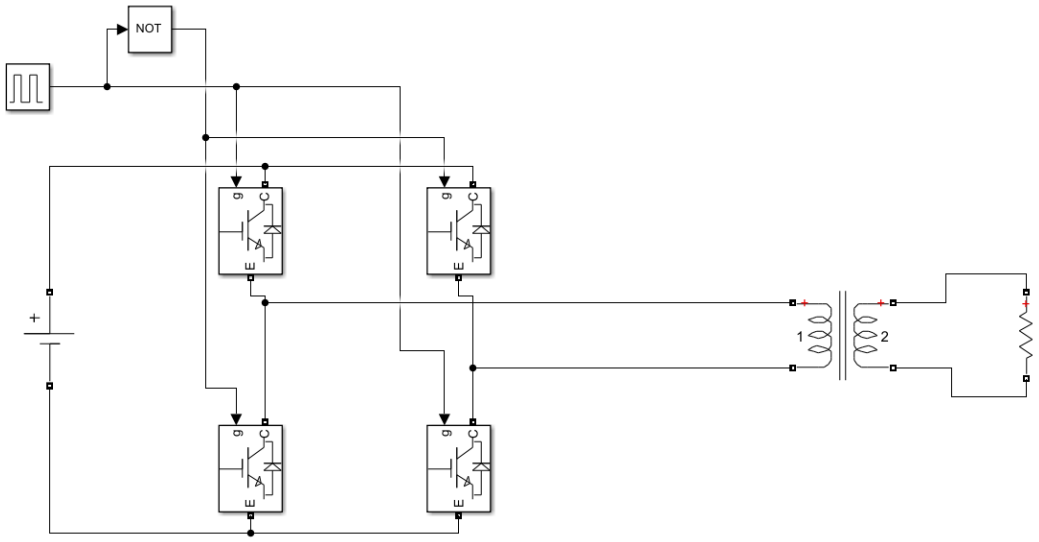


Figure. III.5.HFT avec un convertisseur en pont complet.

Avant de procéder à l'essai expérimental, un certain nombre de simulations sont effectuées dans les mêmes conditions que celles utilisées dans le dispositif expérimental en laboratoire. Les paramètres du tableau (III.3) sont utilisés pour le transformateur HF.

La figure(III.6)montre les tensions d'entrée et de sortie du transformateur HF à vide où le transformateur fonctionne d'une façon presque idéale.La figure (III.7) montre les tensions d'entrée et de sortie du transformateur en charge où une charge résistive 23Ω est utilisée. L'efficacité du modèle identifié du HFT est toujours maintenue est le rapport de transformation, entre primaire et secondaire, est bien respecté. Le tableau (III.5) résume les performances obtenues avec fonctionnement en charge.

Tableau III.4 :L'efficacité du model du transformateur HF, test de simulation

Variable	v_{peff}	v_{seff}	I_{peff}	I_{seff}	*Efficacité*
Valeur	100V	50 V	1.095	1.962	88.86 %

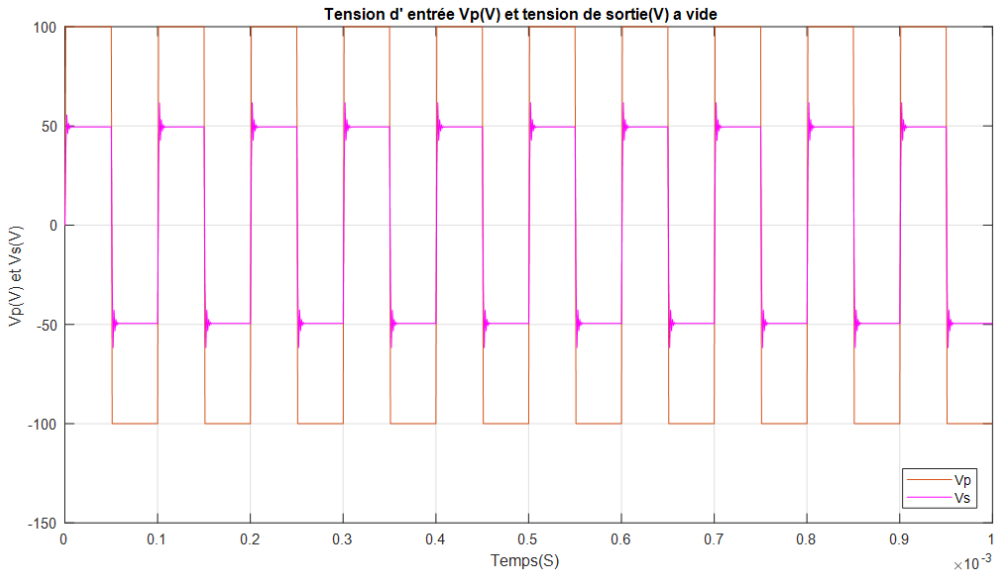


Figure. III.6. Les tensions d'entrée et de sortie du THF à vide.

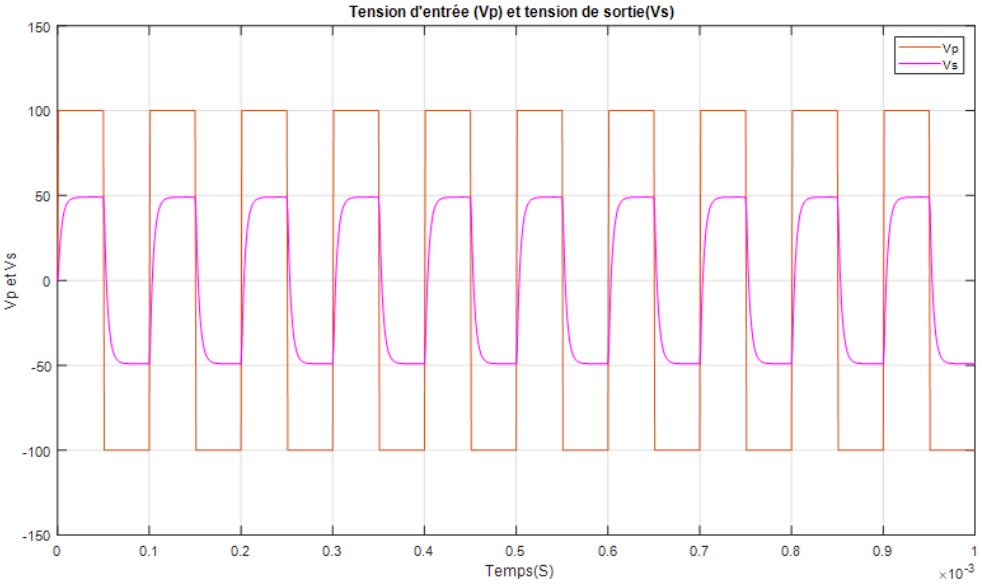


Figure. III.7.Les tensions d'entrée et de sortie du THF en charge.

La figure (III.8) représente les courants primaire et secondaire où on observe toujours le respect du rapport de transformation qui est l'inverse de celui des tensions.

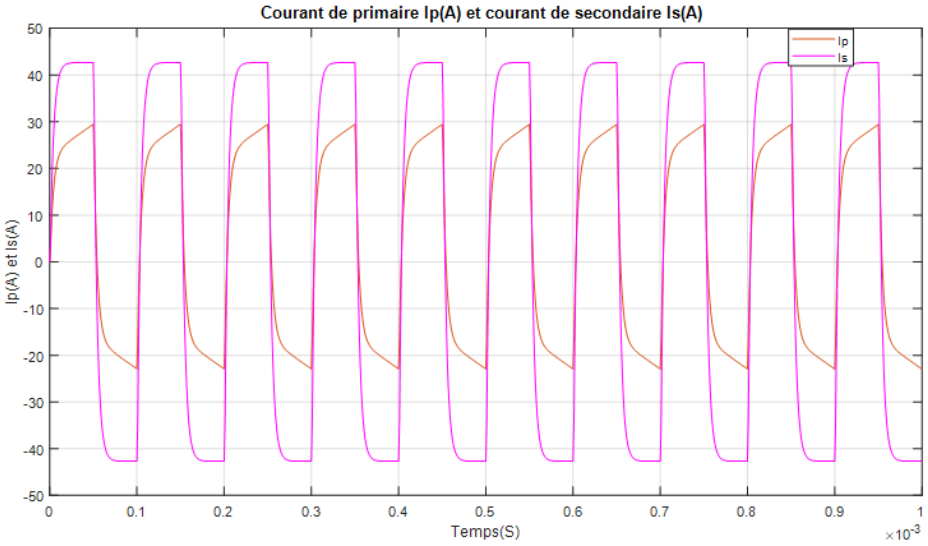


Figure. III.8. Les courants primaire et secondaire du transformateur HF.

La figure (III.9) représente la tension et le courant primaires et la figure (III.10) représente la tension et le courant secondaires (des gains d'amplification sont utilisés pour agrandir les courants). Les tensions et les courants sont en phase due à la présence d'une charge résistive.

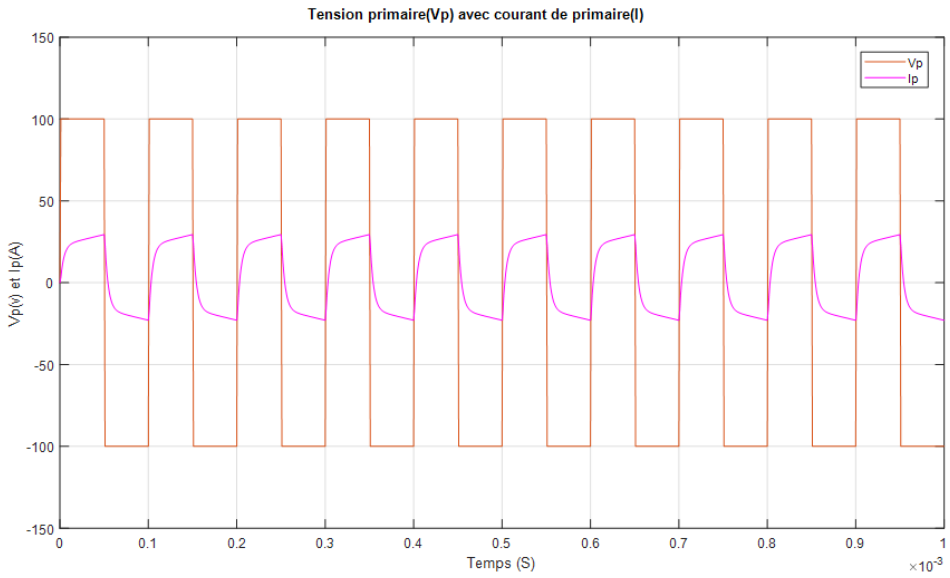


Figure. III.9. La tension et le courant primaire en charge.

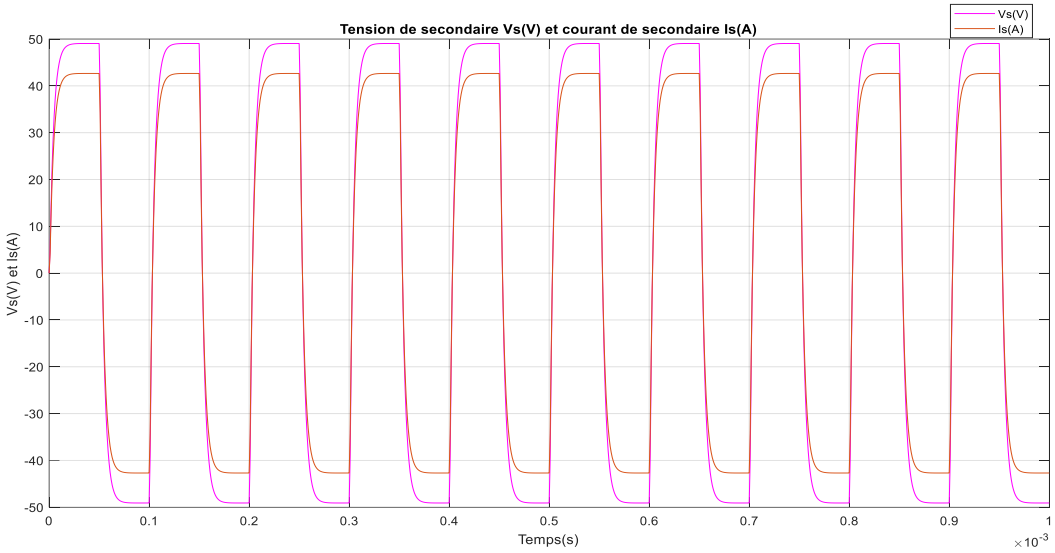


Figure. III.10. La tension et le courant secondaire en charge.

IV- Résultats expérimentaux

La figure 12 montre le prototype du transformateur HF réalisé dans ce projet en utilisant les résultats obtenus lors de l'étape de dimensionnement.

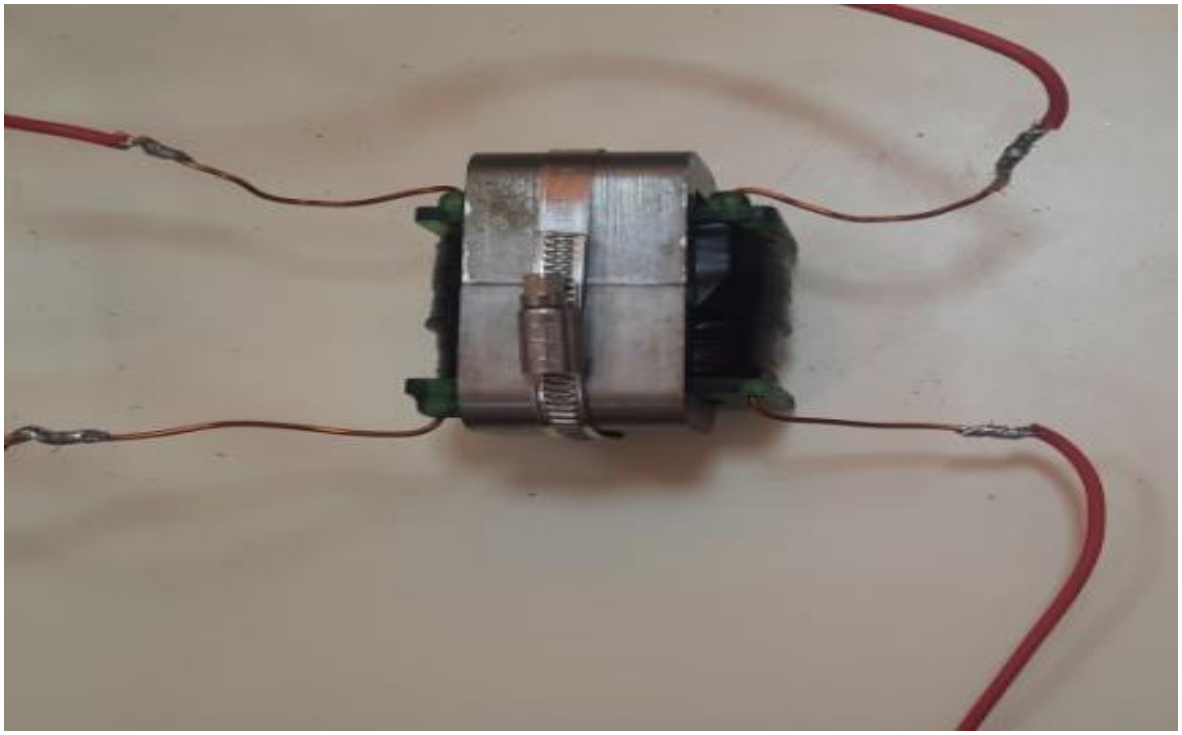


Figure. III.11. Le prototype du transformateur HF réalisé.

Pour tester et valider l'efficacité du transformateur réalisé, un petit banc d'essai a été réalisé au niveau du laboratoire de recherche en électrotechnique et en automatique. Ce banc d'essai comprend les éléments suivants (Fig. III.12) :

- ***Transformateur haute fréquence***
- ***DSP***
- ***laptop***
- ***IGBT***
- ***Driver***
- ***OSCOLOSCOOUP***
- ***Capteur de courant L25***
- ***Charge résistive***
- ***Fil électrique***

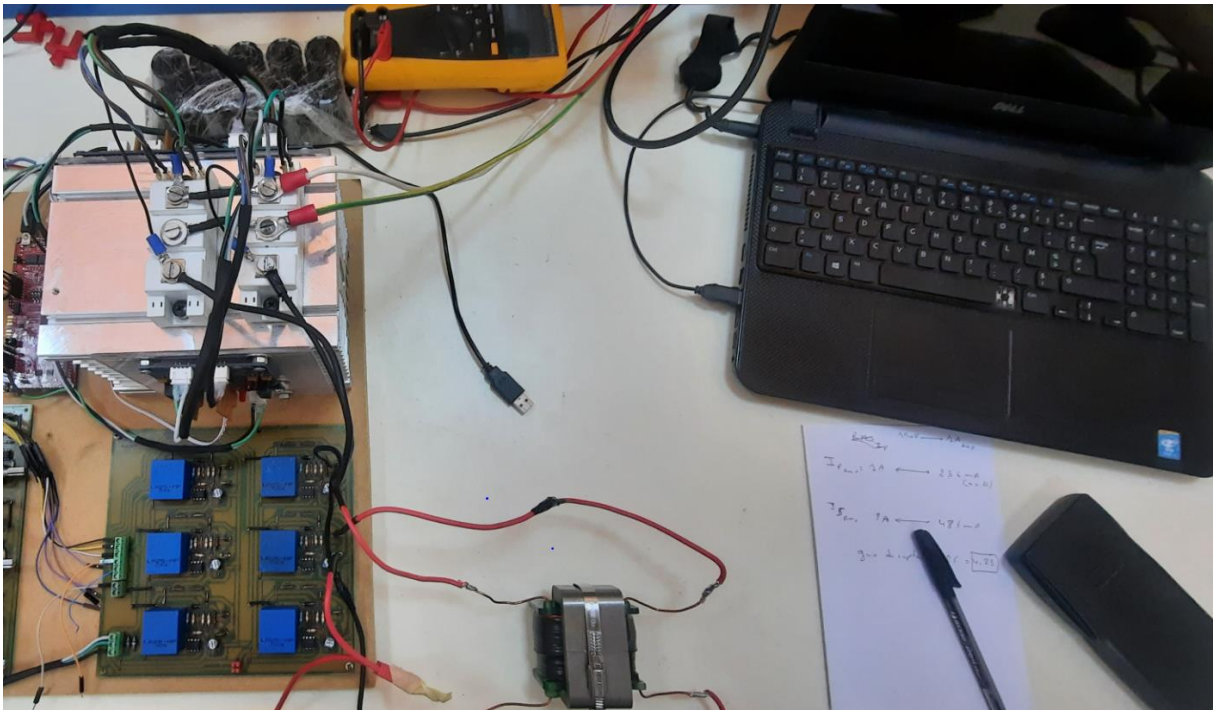


Figure. III.12. Le banc d'essai du transformateur HF

L'alimentation du transformateur HF s'effectue à travers un pont complet à IGBT commandé pour délivrer une tension d'amplitude de 100V avec une fréquence de 10KHz. Les courants primaire et secondaire sont obtenus via les capteurs de courant tandis que les tensions primaire et secondaire sont capturées par l'oscilloscope.

Les figures 13 et 14représente les tensions primaires et secondaires à vide et en charge respectivement. Nous constatons clairement que les résultats expérimentaux coïncidents parfaitement avec les résultats de simulation précédents. La figure (III.15) montre aussi que le rapport de transformation est respecté pour les courants. Les performances du transformateur sont résumées dans le tableau (III.6).

Tableau III.5:L'efficacité du transformateur HF, test expérimental

Variable	v_{peff}	v_{seff}	I_{peff}	I_{seff}	*Efficacité*
Valeur	100V	51 .7V	1.095	1.962	88.86 %

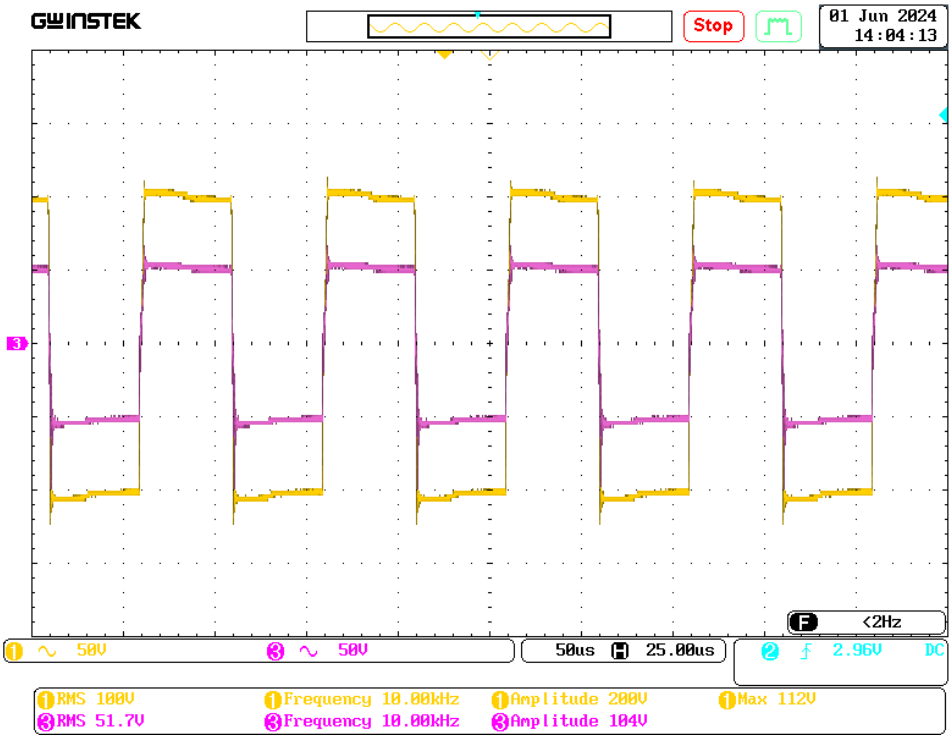


Figure. III.13. Les tensions d'entrée et de sortie du transformateur HF à vide.

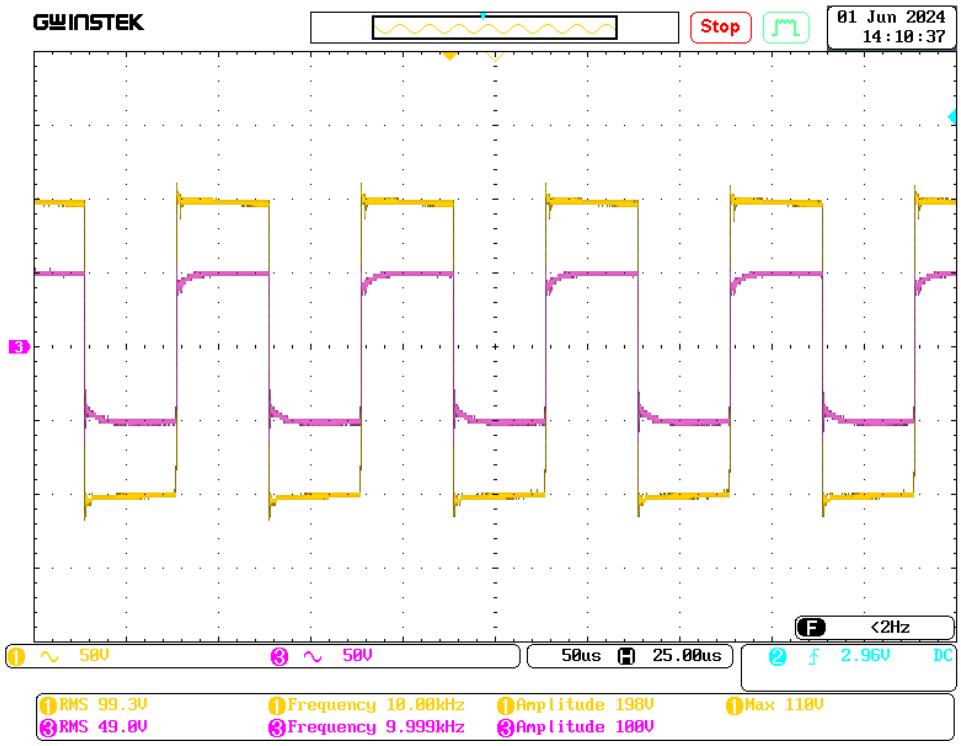


Figure. III.14. Les tensions d'entrée et de sortie du transformateur HF en charge.

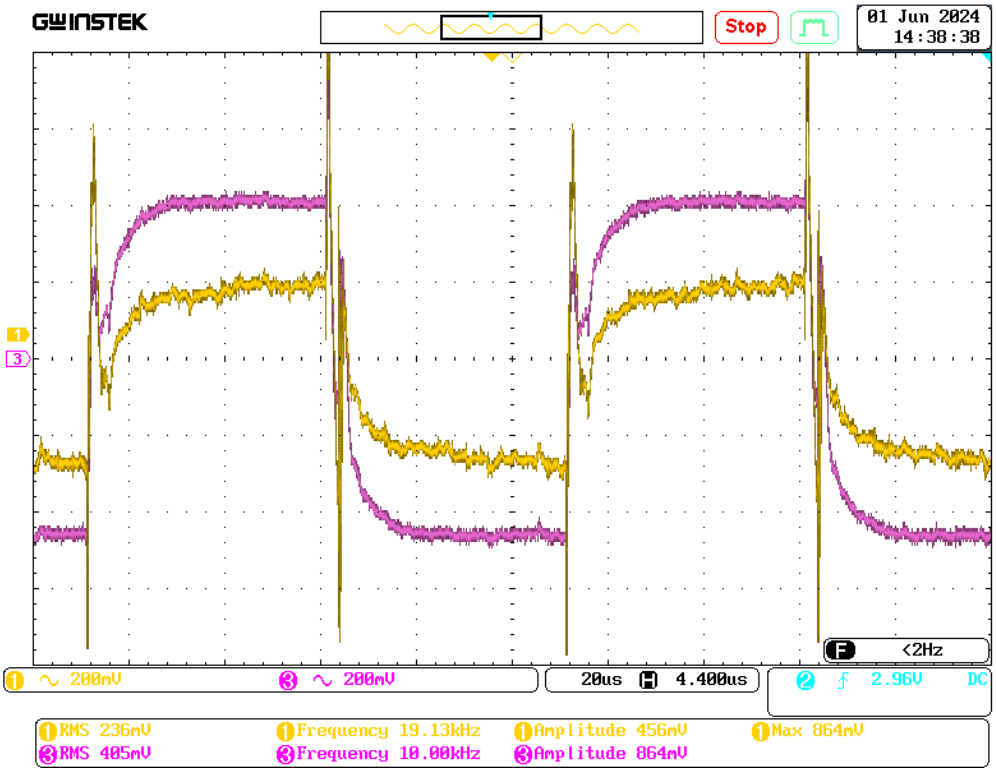


Figure. III.15. Les courants primaire et secondaire du transformateur en charge.

V- Conclusion

Dans ce chapitre, un prototype du transformateur HF de puissance a été réalisé et testé expérimentalement et par simulation. Au premier lieu, les différents composants du transformateur ont été dimensionnés ce qui a conduit au choix du matériau magnétique, le type du conducteur et le nombre de spire des bobine primaire et secondaire. Par la suite, une identification du transformateur a été effectuée afin d'avoir un modèle de simulation permettant de tester le transformateur dimensionnée. Dans la dernière étape, le prototype du transformateur HF a été réalisé et testé expérimentalement à travers un banc d'essai conçu pour cet objectif. Les résultats obtenus que ça soit par simulation ou par test expérimental montre clairement la validité du prototype du transformateur HF réalisé

Conclusion Générale

Conclusion générale

En raison de la tendance mondiale à la production d'énergie propre, la pénétration des sources d'énergie renouvelables dans l'infrastructure électrique existante et les exigences spécifiques des clients devraient augmenter de manière significative au cours des prochaines années. Il s'agit là d'un défi majeur qui nécessite une gestion intelligente et des technologies très avancées basées sur l'électronique de puissance. Dans ce contexte, cette étude a présenté une vision d'un convertisseur à semi-conducteurs (SST) avec une solution à haute fréquence, qui est considérée comme une solution prometteuse pour la gestion intelligente du système électrique et le contrôle du flux d'énergie.

Le contenu de ce mémoire est divisé en trois parties. Au début, l'étude clarifie la différence entre le transformateur classique et intelligent. La recherche sur le transformateur intelligent à base de l'électronique de puissance et des transformateurs de puissance HF vaut mieux que le classique en termes de taille, en termes de performance et en terme de flexibilité.

La deuxième partie du travail a été consacré à la description de l'élément clé du transformateur intelligent ou le SST qui est le transformateur HF. Nous avons vu ses différents composants, le matériau à partir duquel il est fabriqué ; le type et la forme du circuit magnétique, le type de conducteur utilisé pour les bobinages primaire et secondaire. Il a été conclu pour les matériaux magnétiques que chaque matériau diffère par son caractère. Pour une utilisation comme la notre, la ferrite et le nanocristallin peuvent résister à des fréquences élevées jusqu'à 50 kHz. Pour les types de connecteurs, le type de matériau, la section du conducteur, la forme du conducteur dépendent de la fréquence et la puissance du transformateur/

Dans ladernière partie, nous avons passé à la réalisation pratique d'un prototype du transformateur HF de puissance. Cette réalisation passe par trois étapes :

- Le choix et le dimensionnement des différents composants du transformateur HF tel sue le type et la forme du circuit magnétique, le type de conducteur à utiliser, le nombre de spires primaire et secondaire, etc.
- L'identification des paramétrés du transformateur HF en utilisant les résultats de dimensionnement et un schéma équivalent du transformateur. l'identification fournie d'avoir un modèle de simulation qui permet de tester le transformateur avant de passer à la réalisation pratique.
- La réalisation du prototype du transformateur HF et la validation de ses performances. Le transformateur réalisé a été testé à vide et en charge à travers un banc d'essai conçu pour cet objectif.

Les résultats obtenus que ça soit par simulation ou par test expérimental sont prometteurs et montrent clairement la validité du prototype du transformateur HF réalisé

Références bibliographies:

[1] N.HadjsaïdandJ.C.Sabonnadière(Eds.),SmartGrids,JohnWiley-ISTE,London(UK) – Hoboken (NJ, USA), 2012.

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

[3] A. Sundaram, "Solid state transformer (SST): Concepts, modeling, applications, advantages&challenges,"CourseonPowerElectronicsforGridConnectedRenewable Energy Systems (PEGRES), Calicut (Kerala, India), 2015.

[4]W.McMurray,"Powerconvertercircuitshavingahighfrequencylink,"U.S.Patent3 517 300, June 1970.

[5]A.Shiri,"Asolidstatetransformerforinterconnectionbetweenthemediumandthelow voltage grid design," Master Thesis, Delft University of Technology,Netherlands, October 2013.

[6] S.D. FalconesZambrano, "ADC-DC multiport converter based solid state transformer integratingdistributedgenerationandstorage",PhDThesis,ArizonaStateUniversity,August2011.

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

[8] 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.

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

[10] M.A.Perez,S.Bernet,J.Rodriguez,S.Kouro,andR.Lizana,"Circuittopologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters,"*IEEE Trans. power Electron.*, vol. 30, no. 1, pp. 4–17, 2014.

[11] A.ShojaeiandG.Joós,"AtopologyforthreeStageSolidStateTransformer,"in *2013IEEEPower&EnergySocietyGeneralMeeting*,2013,pp.1–5.

[12] A. Shojaei and G. Joos, "A modular solid state transformer with a single-phase medium- frequency transformer," in*2013 IEEE Electrical Power& Energy Conference*, 2013, pp. 1–5.

[13] X. Yu, X. She, X. Ni, and A. Q. Huang, “System integration and hierarchical powermanagementstrategyforasolid-statetransformerinterfacedmicrogridsystem,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 4414–4425, 2013.

[14] A.Yazdaniand R.Iravani,“Aunified dynamic modeland control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 3, pp. 1620–1629, 2006.

[15]L.HeinemannandG. Mauthe,“Theuniversalpowerelectronicsbaseddistribution transformer, unified approach,”32nd IEEE Annual Power Electron. Spec. Conf., pp. 504–509, 2001.

[16]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.

[17]M. Girard, H. Angelis, M.Girard ; « Alimentation à découpage » 2ème édition cours etexercicescorriger.EditeurDunod, 2003.

[18] **Article:D2130.** FrançoisBeauclair,JeanPierre«Transformateuretinductance».

[19] GuyMurry ;« Aidemémoiremétallurgie(métaux,alliages,propriétés) ».EditeurDunod,2eme édition, 10Juin 2004.

[20]O. Thevenot, G. Trapon, A.Bounouh ; « Fabrication et étalonnage de transformateurétalon au LNE »,à paraitre metrologia 2003,publié par Elsevier Masson SAS tous droitsréservés.

[21]Audiofaidate. (2009) Skin and Proximity effects in high frequency transformerwindings.[Online]. http://www.audiofaidate.org/it/articoli/HighFreqTrafoWindings.pdf

[22]C. R. Sullivan, "Optimal choice for number of strand in a litz wire transformerwinding," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no. 2, pp. 238-291,March1999.

[23]or Jimenez, "AC resistance evaluation of foil, round, and litz conductors inmagneticcomponents," UniversityofChalmers,Goteborg, MScThesis2013.

[24]W.G.Hurley,"High FrequencyMagneticComponents,"UniversityCollegeGalway,Galway, 1996.

[25]EdrisAgheb and Hans K. Hoidalen, "Medium frequency high powertransformers, state of art and challenges," Department of Electrical PowerEngineering,NTNU, Trondheim, 978-1-4673-2328-4, 2012.

[26]N. Hugo, P Stefanutti, and M Pellerin, "Power electronincs traction

transformer,"12thEuropean conferenceon powerelectronics, 2007.

[27]Christoph Meyer, "Key Components for Future Offshore DC Grids," Institute forPower Electronics and Electrical Drives RWTH Aachen University, Aachen,PhDThesis 2007.

[28]COLONEL WM. T. MCLYMAN, *Transformer and inductor design handbook*,Third Edition, Revised and Expanded ed. California, America: Marcel Dekker,2004.

[29]LHeinemann,"An activelycooledhighpower,highfrequencytransformerwithhigh insulation capability ," in *17th Annual IEEE Applied Power ElectronicsConferenceand Exposition*, 2002.

[30]H Akagi and S Inoue, "Medium-voltage power conversion systems in the nextgeneration," in *5th International Power Electronics and Motion ControlConference*,2006, pp. 1-8.