الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement
/...../...../...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الالية والكهروميكانيك
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Licence professionnelle

Domaine : Sciences et technologies,
Filière : Energies renouvelables
Spécialité : Energies renouvelables et environnement

Thème

Étude De rôle du Transformateur Intelligent (SST) dans la stabilité du réseau électrique

Présenté par :
- **Oumaima BOULEFAA**

Soutenue publiquement le : 20 Mai 2025

Devant le jury composé de :

Mohcene BECHOUAT	PROF	Univ de Ghardaia	Président(e)
Tahar LAAMAYAD	MCA	Univ de Ghardaia	Encadreur
Abdelhake BOUCHAKOUR	MCB	Univ de Ghardaia	Co-encadreur
Fouzi AKERMI	MAA	Univ de Ghardaia	Examinateur(trice)

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Je remerci tout d'abord Dieu le Tout -puissant de
m'avoir donné la patience,la volonté et le courage
nécessaires pour mener à bien ce mémoire.
J'adresse un remerciement spécial à Monsieur
TAHAR LAAMAYAD(Enseignant au département de
Automatique et électromécanique de l'université de -GHARDAIA-) pour avoir accepté de m'encadrer, pour
son intérêt constant qui m'a guidée tout au long de ce
travail, ainsi que pour ses précieux conseils au cours de
ce mémoire
Je remercie chaleureusement les membres du Jury pour
l'honneur qu'ils me font en acceptant
d'évaluer mon travail.
Enfin , j'exprime toute ma gratitude à l'ensemble des
enseignants et du personnel de la faculté des sciences et Technologie

الملخص:

تتناول هذه المذكرة دراسة دور المحول الذكي في استقرار الشبكة الكهربائية، وذلك من خلال ثلاث فصول رئيسية. في الفصل الأول، يتم التعريف بالمحولات التقليدية والذكية، مع بيان الفروقات بينهما. أما في الفصل الثاني، يتم التركيز على دور المحولات الذكية في دعم استقرار الشبكة الكهربائية، خاصة في سياق دمج الطاقات المتجددة. وفي الفصل الثالث، يتم إجراء نمذجة لمحول لتوضيح بعض الجوانب النظرية. تقليدي ثلاثي الطور باستخدام برنامج MATLAB/Simulink

كلمات المفتاحية:

محول

استقرار

شبكة

إلكترونيات

ذكي

تقليدي

طاقات

Résumé

Cette thème traite du rôle du transformateur intelligent (SST) dans la stabilité du réseau électrique, à travers trois chapitres principaux. Dans le **chapitre 1**, une présentation des transformateurs classiques et intelligents est faite, en soulignant les différences entre eux. Le **chapitre 2** se concentre sur le rôle des SST dans le soutien à la stabilité du réseau électrique, particulièrement en ce qui concerne l'intégration des énergies renouvelables. Enfin, le **chapitre 3** présente une modélisation d'un transformateur classique triphasé sous MATLAB/Simulink pour illustrer certains aspects théoriques.

MOTS CLES :

- Transformateur
- Réseau
- Stabilité
- Électronique
- Énergies

- harmonique
- Régulation
- Filtrage
- classiques
- intelligent

Abstract

This topic addresses the role of the Smart Solid-State Transformer (SST) in power grid stability, through three main chapters. Chapter 1 presents both conventional and smart transformers, highlighting the differences between them. Chapter 2 focuses on the role of SSTs in supporting power grid stability, particularly with regard to the integration of renewable energy sources. Finally, Chapter 3 presents a modeling of a conventional three-phase transformer using MATLAB/Simulink to illustrate certain theoretical aspects.

Key words

- Transformer
- Stability
- Network
- Electronics
- Smart
- Conventional
- Energies
- Harmonics
- Regulation
- Filtering

Sommaire

Table des matières

Liste de figures 8
Liste des Tableaux 9
Introduction générale 1
Chapitre 01 : Généralités sur les transformateurs classiques et Intelligents 3
1.1 Introduction 4
1.2 Transformateur classique 4
1.3 Structure du Transformateur Classique 5
1.3.1 Enroulements primaires et secondaires 6
1.3.2 Noyau magnétique 7
1.3.3 Isolation 7
1.3.4 Bobinages 7
1.3.5 Flux magnétique 7
1.3.6 Dispositifs de refroidissement 7
1.3.7 Bornes et connexions 8
1.3.8 Boîtier ou enveloppe 8
1.4 Les différents types de transformateurs 8
1.4.1 Transformateur de puissance 8
1.4.2 Transformateur de distribution 9
1.4.3 Transformateur de mesure 9
1.4.4 Autotransformateur 10
1.4.5 Transformateur de Protection 10
1.5.1 Loi de FARADAY 11
1.5.2 Formule de Boucherot: 11
1.5.3 Résumé des pertes dans un transformateur 12
1.5.4 Le rendement 13
1.6 Fonctionnement du transformateur Triphasé : 14
1.6.1.1 Fonctionnement à vide en régime équilibré: 14
1.6.1.2 Fonctionnement en charge: 15
1.6.1.3 Fonctionnement en régime déséquilibré: 16

1. 6.1.4 Choix du couplage 16
1.6.2 Cahier de charge d'un transformateur Triphasé 17
1.6.2.1 Puissance apparente par colonne 18
1.6.2.2 Tension dans les enroulements 19
1.6.2.3 Enroulement primaire (HT) 19
1.6.2.4 Enroulement secondaire (BT) 19
1.6.2.5 Courants dans les enroulements 20
1.6.2.6 Courant dans l'enroulement primaire 20
1.6.2.7 Courant dans l'enroulement secondaire 20
1.6.2.8 Tension de court-circuit 20
1.7 Aventage et inconvinient de transformateur classique 21
1.8 Transformateur intelligent- solid state transformateur (SST) 22
1.8.1 composant de transformateur (SST) 23
1.8.2 Topologie sst 24
1.8.3 Principe de fonctionnement d'un SST à trois étages 26
1.8.4 Conception d'un SST à trois étages 27
1.8.5 Avantages et inconvénients des transformateurs à semi-conducteurs (SST) 28
1.9 comparaison entre les Transformateurs Classiques (LFT) et les Transformateurs (SST) 29
1.9.1 Caractéristique techniques des transformateurs LFT et SST 30
1.9.2 l'intégration de l'énergie éolienne 31
1.9.3 station de charge DC 32
1.10 Conclusion 33
Chapitre 02 : Le rôle des transformateurs (SST) dans la stabilité du réseau électrique 34
2.1 Introduction 35
2.2 Généralités sur les Réseaux Electriques 35
2.3 Définition 36
2.4 Les types des réseaux électriques 37
2.5 Définition de la stabilité d'un réseau électrique : 37
2.6 Classification de la stabilité des réseaux électriques 37
2.6.1 Stabilité de l'angle du rotor (angulaire) 39
2.6.1.1 Stabilité angulaire aux petites perturbations 39
2.6.1.2 Stabilité transitoire 40
2.6.2 Stabilité de tension 40

2.6.2.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations 40
2.6.2.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations 41
2.6.3 Stabilité de fréquence 41
2.7 Les causes d'instabilité du réseau électrique 41
2.8 Rôle du Transformateur intelligent dans la stabilité du réseau électrique 41
2.8.1 Régulation de tension 42
2.8.2 isolation des défauts 42
2.8.2.5 Réduction de l'impact des défauts sur le réseau : 44
2.8.3 Filtrage des harmoniques 45
2.8.5 Intégration des sources d'energie renouvelable 47
2.9 Applications générales du SST 49
2.9.1 Réseaux intelligent 49
2.9.2 Locomotives et autres systèmes de traction 50
2.10 Le réseau intelligent comme solution future pour la stabilité 51
2.11 Conclusion 53
Chapitre 03 : Simulation/matlab de transformateur classique triphasé 54
3.1 Introduction 55
3.2 Description du modèle simulé 55
3.3 Résultats de simulation et analyse 56
3.3.1 Résultats en régime normal 56
3.3.2 Test de court-circuit 61
3.4 Conclusion 64
Conclusion Générale 66

Liste de figures

Chapitre01 :

Fig(1.1) : structure de transformateur……..……....5

Fig(1.2) : Photo graphie des enroulements d'un transformateur triphasé……...…6

Fig (1.3) :transformateur de puissance……..…….…..9

Fig(1.4) : Structure de base d'un transformateur monophasé……..…….….10

Fig(1.5) : Trois de transformateurs monophasés pour adapter les niveaux de tension d'une ligne triphasée…..14

Fig(1.6) : Transformateur Triphasé ……..…….15

Fig(1.7) :Schémas de couplage des transformateur triphasés :(Y) /(D)/(Z)…….…….17

Fig(1.8) :Transformateur 630KVA/30KV……..……...…18

Fig(1.9) : Couplage des enroulements……..……..19

Fig(1.10) : Schéma fonctionnel d'un redresseur…….…….…..24

Fig(1.11) : schéma de principe de l'onduleur……..……...……24

Fig(1.12) : schéma de principe de convertisseur DC/DC……..……25

Fig (1.13) : SST à un seul étage- type A……..…….25

Fig(1.14) : SST à deux étages- type B……..…….26

Fig :(1.15) : . SST à deux étages avec une sortie MVDC- type C……..……...…26

Fig(1.16) : SST à trois étages- type D……..…….…….27

Fig(1.17) : Principe de fonctionnement d'un SST……..……...……28

Fig(1.18) : Configuration d'un SST à 03 étages ….…….……..…..29

Fig (1.19): Application De (SST) Dans l'energie renouveleable……..32

Fig(1.20) :Application de SST dans un station charge DC…….……..33

Fig(1.21) ;comparaison de transformateur classique et SST…….34

Chapitre02 :

Fig(2.1) : Structure générale du réseau électrique…….……..……..37

Fig(2.2) : Classification de la stabilité des réseaux électriques…….……39

Fig (2.3) :Transistor MOSFET et IGBT ……..……...……..45

Fig(2.4) :les filtres harmoniques……..…….…….47

Fig(2.5) : SST dans un réseau intelligent……..…….51

Fig(2.6) : SST appliqué sur Un locomotif……...…….….52

Fig (2.7) : SST dans le réseau électrique intelligent pour intégrer les énergies renouvelables……..……....53

Chapitre 03 :

Fig(3.1) : Le modèle du transformateur developpé sur Matlab simulink……..…57

Fig(3.2) : Courbe de la tension d'entrée du transformateur……..…58

Fig(3.3) : Courbe de le courant d'entrée du transformateur…….….58

Fig (3.4) : Puissance instantanée en entrée du transformateur……59

Fig(3.5) : Courbe de la tension de sortie du transformateur……..……60

Fig(3.6) : Courbe du courant de sortie du transformateur……..……60

Fig(3.7) : Courbe de la puissance instantanée en sortie…….61

Fig(3.8) : Le modèle du transformateur (Tests de Court-circuit)……62

Fig(3.9) : Tension mesurée lors du court-circuit triphasé……...……63

Fig(3.10) : Courant de court-circuit……64

Liste des Tableaux

Tableau 1 :comparaison (LFT)vs(SST)……...…….……31

Tableau 1 : comparaison (SST)vs(LFT) dans l'intégration de l'énergie éolienne…….32

Tableau 3 :comparaison entre (LFT)vs(SST) dans une station de charge DC…….…….33

Liste des abréviations

SST	Solid-State Transformer (Transformateur à semi-conducteurs)
LFT	Low Frequency Transformer (Transformateur à basse fréquence)
HFT	High Frequency Transformer
TE	Transformateur Élévateur
TA	Transformateur Abaisseur
HF	Haute Fréquence
HT	Haute Tension
MT	Moyenne Tension
BT	Basse Tension
HTB	Haute Tension B (Très haute tension)
HTA	Haute Tension A
BTB	Basse Tension B
BTA	Basse Tension A
AC	Courant alternatif
DC	Courant continu
MVAC	Courant alternatif moyenne tension
MVDC	Courant continu moyenne tension
LVAC	Courant alternatif basse tension
LVDC	Courant continu basse tension
PWM	Modulation de largeur d'impulsion
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
SVC	Compensateur statique de puissance réactive
Y/D1	Couplage Étoile / Triangle avec décalage 30°

Sn	Puissance nominale du transformateur
Pu	Puissance utile
cos(φ)	Facteur de puissance
Vcc	Tension de court-circuit
Icc	Courant de court-circuit
N_1, N_2	Nombre de spires primaire / secondaire
U_1, U_2	Tension au primaire / secondaire
I_1, I_2	Courant au primaire / secondaire
f	Fréquence (Hz)
τ	Taux de charge
Φ	Flux magnétique (Wb)
P	Puissance active (W)
S	Puissance apparente (VA ou kVA)
Q	Puissance réactive (VAR)
η	Rendement (%)
Z	Impédance
Δ	Triangle (couplage)
Y	Étoile (couplage)

Introduction générale

Le secteur de l'énergie électrique connaît ces dernières années une évolution rapide, marquée par l'intégration progressive de solutions technologiques avancées et par la numérisation croissante des systèmes de surveillance et de gestion des réseaux. Ces transformations ont mis en évidence les limites des réseaux électriques traditionnels, qui peinent à répondre efficacement aux fluctuations de la charge et aux perturbations du système, menaçant ainsi la stabilité globale du réseau.

Face à ces défis, il est devenu nécessaire d'adopter des technologies plus performantes, capables d'assurer un contrôle optimal du flux d'énergie, de stabiliser la tension et la fréquence, et de réduire l'impact des dysfonctionnements. Parmi ces technologies émergentes, le transformateur intelligent ou Solid-State Transformer (SST) se distingue par sa capacité à combiner les fonctions classiques de transformation avec des capacités avancées de surveillance, de régulation en temps réel et de communication au sein du réseau.

Dans ce contexte, une problématique centrale se pose :
Dans quelle mesure le transformateur intelligent (SST) peut-il contribuer à renforcer la stabilité d'un réseau électrique, en comparaison avec les transformateurs traditionnels, notamment en matière de régulation de la tension, de la fréquence et de réponse aux perturbations ?

À partir de cette problématique, ce mémoire vise à atteindre les objectifs suivants :

- Présenter une étude comparative entre les transformateurs conventionnels et les transformateurs intelligents en termes de structure, de fonctionnement et de capacités de contrôle.
- Analyser le rôle que joue le transformateur intelligent dans l'amélioration de la stabilité du réseau électrique, notamment en ce qui concerne la régulation dynamique des paramètres critiques et sa réponse aux conditions perturbées.
- Modéliser un transformateur triphasé sous MATLAB/Simulink, afin d'évaluer ses performances et d'observer son comportement dans différents scénarios.

Ce travail a été structuré en trois chapitres principaux comme suit :

- Chapitre 1 : Présente les généralités sur les transformateurs classiques et intelligents, dans un premier temps on présentera les différentes structures des transformateur classiques et intelligents, puis nous avons passé au choix de couplage des transformateurs et nous avons finalisé avec les avantages et les inconvénients des transformateurs.

- Chapitre 2 : Présente les généralités du réseau électrique, nous avons commencé par les types des réseaux électriques avec leurs différentes types de stabilités, puis nous avons passé à la régulation des tensions du réseau et l'intégration des énergies renouvelables au réseau, en finalisant ce chapitre par applications des transformateur SST.

- Chapitre 3: S'intéressera à la validation des différents résultats de simulations des transformateurs. On présentera le système complet sous le logiciel Matlab Simulink.

Et à la fin on présentera une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre 01 :

Généralités sur les transformateurs classiques et Intelligents

1.1 Introduction

Les transformateurs électrique constituent des éléments fondamentaux des systémes d'énergie, jouant un rôle essentiel dans la conversion des niveaux de tension et de courant pour répondre aux exigences du transport et de la distribution d'électricité.Ils garantissent le fonctionnement efficace des réseaux électriques en améliorant leur stabilité et en réduisant les pertes d'énergie lors du transport sur de longues distances.Avec l'évolution rapide des technologies énergétiques la nécessité de solution plus avancées s'est imposée afin d'adapter les réseaux électriques aux nouvelles exigences, notamment l'intégration croissante des énergies renouvelables et la transition vers des systémes plus intelligents et performants .

Dans ce contexte, les transformateurs électroniques à semi-conducteurs, appelés **Solid-State Transformaters (SST)** ,ont émergé comme une alternative innovante aux transformateurs conventionnels. Ces dispositifs reposent sur l'électronique de puissance avancée pour assurer un contrôle dynamique plus précis de la la tension et du courant, améliorant ainsi les performances du réseau électrique tout en réduisant les pertes énergétiques. Ils offrent plusieurs avantages, notamment une meilleure stabilité du réseau, une amélioration de la qualité de l'énergie et une intégration plus efficace des sources renouvelables par rapport aux transformateurs classiques.

Ce chapitre vise à présenter une analyse approfondie des transformateurs électriques, en comparent les modéles traditionnels aux **SST.** L'accent sera mis sur leur structure, leur principe de fonctionnement et leurs principales applications. L'etude technique permettra de mettre en lumiére les avantages et les limites de chaque type, fournissant ainsi une compréhension globale de l'impact de cette technologie sur l'optimisation des réseaux électriquesCette analyse servira de base pour étudier ,par la suite, son rôle dans l'amélioration de la stabilité du réseau.

1.2 Transformateur classique

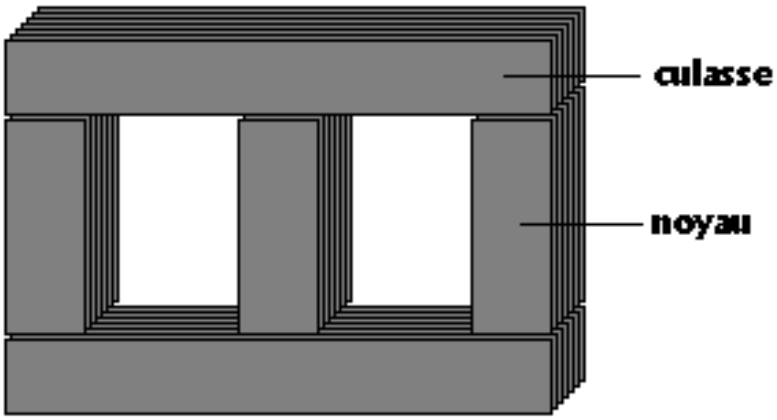
les transformateurs classiques sont des dispositifs électriques permettent de modifier la tension et le courant entre deux circuits sans conexion directe. Ils fonctinnent selon le principe de l'induction électromagnétique. En utilisant un noyau magnétique en fer ou en ferrite et de deux enroulements (primaire et secondaire)r transférer l'énergie électrique . Il est principalement utilisé avec le courant alternatif (AC) et jouent un rôle essentiel dans le transport et la distribution de l'électricité.

1.3 Structure du Transformateur Classique

Le transformateur est constitué de deux composants principaux : le circuit magnétique et les enroulements (fig1.1) [1].

Le circuit magnétique d'un transformateur est soumis à un champ magnétique variant en fréquence et en amplitude. Pour les transformateurs connectés au réseau de distribution, cette fréquence est généralement de 50 ou 60 hertz. Afin de réduire les pertes dues aux courants de Foucault, qui dépendent de l'intensité et de la fréquence du signal, le circuit magnétique est généralement constitué de tôles laminées. Dans les transformateurs standards, ces tôles prennent les formes de "E" et "I", ce qui permet d'intégrer les bobines dans les fenêtres du circuit magnétique ainsi formé

(A)



(B)

(A) Vue en coupe d'un transformateur triphasé MT/BT

(B) circuit magnétique

Fig(1.1) : structure de transformateur

Les transformateurs de haute qualité possèdent des circuits magnétiques sous forme de tore. Cependant, en raison de la complexité du bobinage des tores, le coût de ces transformateurs est généralement plus élevé.

Concernant les enroulements des transformateurs, le choix du conducteur électrique dépend des besoins spécifiques de chaque application. Le cuivre est généralement privilégié pour les applications à forte puissance. Les fils de chaque spire doivent être isolés les uns des autres pour permettre la circulation du courant dans chaque tour. Pour des applications de faible puissance, des conducteurs émaillés suffisent pour assurer l'isolation. En revanche, pour des puissances plus élevées, l'isolation est réalisée avec du papier diélectrique imprégné d'huile minérale. Dans le cas des applications à très haute puissance, on utilise des conducteurs multibrins pour réduire l'effet de peau et les pertes dues aux courants de Foucault.

Les enroulements du primaire ou du secondaire peuvent comporter des prises à des points intermédiaires, permettant ainsi de sélectionner un rapport de tension spécifique. Ces prises peuvent être reliées à un changeur automatique pour ajuster la tension du circuit de distribution.

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

1.3.1 Enroulements primaires et secondaires

Les transformateurs traditionnels sont composés de deux enroulements de fil conducteur, appelés enroulement primaire et enroulement secondaire, comme montré à la Fig. (1.2). Lorsqu'un courant alternatif est appliqué au circuit primaire, un champ magnétique variable est généré. Ce champ induit des courants ainsi que des forcélectromotrices dans le circuit secondaire.

Fig(1.2) : Photo graphie des enroulements d'un transformateur triphasé.

1.3.2 Noyau magnétique

Le noyau magnétique est généralement fabriqué à partir de tôles d'acier laminé. Il sert à fournir un chemin pour le flux magnétique créé par le courant alternatif circulant 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.

1.3.3 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.

1.3.4 Bobinages

Les enroulements sont généralement fabriqués en fil de cuivre afin de réduire les pertes ohmiques. Ils sont agencés de manière à optimiser le couplage magnétique entre les enroulements primaire et secondaire. Cette

disposition permet une meilleure efficacité du transformateur en minimisant les pertes d'énergie dues à la résistance du matériau.

1.3.5 Flux magnétique

Lorsque le courant alternatif traverse l'enroulement primaire, il génère un champ magnétique variable. Ce champ induit une force électromotrice (FEM) dans l'enroulement secondaire, selon le principe de l'induction électromagnétique. Le noyau magnétique joue un rôle crucial en concentrant et en guidant le flux magnétique, ce qui permet d'améliorer l'efficacité du transfert d'énergie entre le primaire et le secondaire, réduisant ainsi les pertes et optimisant la performance du transformateur.

1.3.6 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.

1.3.7 Bornes et connexions

Des bornes et des connexions sont prévues pour permettre l'intégration du transformateur au réseau électrique. Ces points de connexion facilitent non seulement la mise en service du transformateur, mais aussi son raccordement à d'autres équipements du système, assurant ainsi une communication et une transmission efficaces de l'énergie électrique. Ils garantissent également la sécurité et la fiabilité du transformateur lorsqu'il est utilisé dans des installations plus vastes.

1.3.8 Boîtier ou enveloppe

Certains transformateurs sont enfermés dans des boîtiers ou des enveloppes afin d'assurer leur sécurité et leur protection. Ces enveloppes peuvent être hermétiquement scellées pour empêcher l'humidité d'infiltrer, ce qui préserve les composants internes du transformateur et améliore sa durabilité. De plus, elles peuvent être équipées de dispositifs d'extinction d'arc pour intervenir en cas de court-circuit ou de défaut, afin de limiter les risques d'incendie et d'endommagement de l'équipement.

1.4 Les différents types de transformateurs

Il existe plusieurs types de transformateurs, chacun conçu pour répondre à des besoins spécifiques en fonction des exigences de tension, de fréquence et de puissance. Parmi les plus courants, on trouve [1] :

1.4.1 Transformateur de puissance

Un transformateur de puissance est un dispositif électrique crucial dans les réseaux de distribution d’énergie. Il permet de transférer l’énergie en ajustant la tension du courant alternatif de manière efficace. Ce transformateur se compose de deux bobines, appelées enroulements, entourées d'un noyau magnétique. Le champ magnétique généré par l'enroulement primaire est transmis à l'enroulement secondaire, où il induit une tension. Le rapport de transformation, c’est-à-dire la variation de la tension entre l'entrée et la sortie, dépend du nombre de spires présentes dans chaque enroulement

Fig (1.3) :transformateur de puissance

1.4.2 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.

1.4.3 Transformateur de mesure

Le transformateur de mesure, également connu sous les noms de transformateur de courant ou transformateur de potentiel, est un dispositif essentiel dans les systèmes électriques pour garantir une mesure précise et sûre des courants et des tensions. Ce type de transformateur fonctionne selon le même principe que les transformateurs

de puissance, mais il réduit les niveaux de courant et de tension à des valeurs adaptées aux instruments de mesure, permettant ainsi un suivi et un contrôle efficaces de l'énergie dans les réseaux.

1.4.4 Autotransformateur

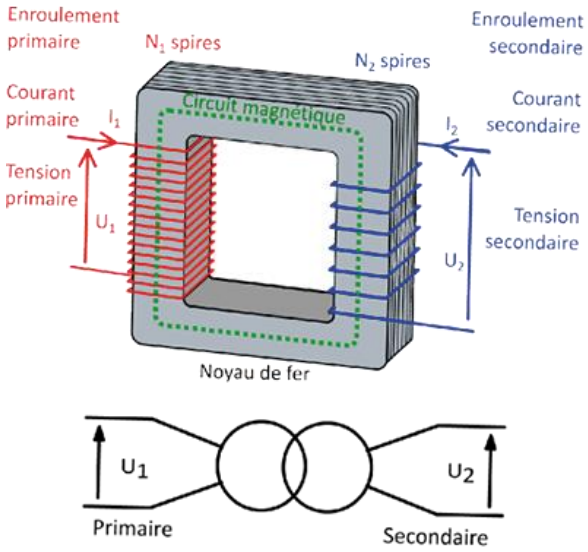
: Cet appareil présente l'avantage d'un dimensionnement plus faible que celui d'un transformateur, à puissance traversant égale, il se distingue du transformateur par le fait qu'il existe un point commun aux enroulements primaire et secondaire, étant donné qu'il n'y a plus d'isolation galvanique entre les enroulements primaire et secondaire, tout défaut se manifestant sur un réseau se propage immédiatement sur le second, dans la présente étude sur le diagnostic de défauts, les autotransformateurs de puissance seront assimilés aux transformateurs de puissance dont la construction et le fonctionnement sont très proches .

1.4.5 Transformateur de Protection

Les transformateurs de protection, également appelés transformateurs de courant ou de potentiel, jouent un rôle crucial dans les systèmes de protection électrique. Ils détectent les courants associés aux défauts électriques, tels que ceux des courts-circuits, et déclenchent les actions nécessaires, garantissant ainsi une réponse rapide

et précise aux anomalies électriques. Ces transformateurs sont largement utilisés dans les réseaux de distribution, les sous-stations et d'autres installations critiques, contribuant ainsi à la stabilité et à la fiabilité du système.

1.5 Principe du fonctionnement des transformateurs



Fig(1.4) : Structure de base d'un transformateur monophasé.

D'une manière générale, un transformateur est un dispositif électrique statique, c'est-à-dire qu'il ne comporte pas de pièces mobiles. Son rôle principal est de convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre, comme son nom l'indique. Ce fonctionnement repose sur le principe de l'induction électromagnétique, formulé par la loi de Faraday. Comme illustré dans la figure (1.4), l'enroulement primaire est la bobine qui reçoit l'énergie d'une source de courant alternatif, tandis que l'enroulement secondaire, qui alimente une charge lorsqu'une connexion est établie, est appelé l'enroulement secondaire.

Lorsqu'une alimentation en courant alternatif est connectée au côté primaire, elle génère un flux magnétique alternatif dans le noyau. Ce flux fluctuant dans le noyau traverse les enroulements secondaires, induisant une force électromotrice dans chaque bobine. En général, cette force électromotrice est similaire pour les enroulements primaire et secondaire. Grâce à leurs caractéristiques statiques et à l'application des lois de l'induction électromagnétique, le circuit secondaire peut recevoir de l'énergie provenant du primaire, lorsque le flux magnétique qui relie les enroulements primaire et secondaire dans le noyau augmente et diminue. De ce fait, un transformateur ne peut fonctionner qu'avec un courant alternatif.

1.5.1 Loi de FARADAY

La force électromotrice induite dans un circuit fermé est proportionnelle au taux de variationdu flux du champ magnétique traversant la surface délimitée par le circuit par rapport autemps.

L’expression de la f.é.m. est donnée par :

$$E = -\frac{d\emptyset}{dt} \qquad [I.1]$$

(Exprimé en volts)Si on considère une boucle conductrice constituée de N spires, on obtient :

$$E = -N\frac{d\emptyset}{dt} = -\frac{d(N\emptyset)}{dt} \qquad [I.2]$$

1.5.2 Formule de Boucherot:

Le générateur impose la tension primaire ainsi que la fréquence. Le nombre de spires N_1 étant fixé par condition, le flux a sa valeur imposée en module et en phase par le générateur selon la relation :

$$U_1 = \sqrt{2}\pi N f \emptyset_{max} \quad [I.3]$$

Soit :

$$U_1 = 4.44\ N_1 f \emptyset_{max} \quad [1.4]$$

Où

- U_1 : est la valeur efficace de la tension au primaire
- N_1 : désigne le nombre de spires de l'enroulement primaire
- F : est la fréquence du flux
- Φ_{max} : l'amplitude (valeur maximale) du flux magnétique

La puissance du transformateur s'exprime en VA (voltampère), kVA (*kilo* voltampère) ou MVA (*méga* voltampère) selon la puissance.

Le calcul des puissances se fait comme suit :

- La puissance active P = U × I × cos(φ) s'exprime en kW.
- La puissance réactive : Q=U×I×sin (φ) s'exprime en kVar.
- La puissance apparente : S=U×I s'exprime en kVA.

En triphasé, on multiplie les puissances par √ 3

1.5.3 Résumé des pertes dans un transformateur

- Pertes fer : constituées de pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Ce sont des pertes indépendantes de la charge.
- Pertes cuivre : causées par la circulation du courant dans les enroulements des transformateurs. Elles dépendent de la charge.
- Pertes dues aux auxiliaires (ventilateurs, pompes…) : définies par la consommation énergétique des auxiliaires.
- Pertes dues aux harmoniques: émanant des charges non linéaires qui absorbent descourants riches en composantes harmoniques.

1.5.4 Le rendement

Dans un transformateur, on distingue deux types de pertes

Les pertes à vide, ou pertes fer qui sont pratiquement indépendantes de la charge

Les pertes dues à la charge, ou pertes joule qui sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

L'intensité du courant de charge, de même que la puissance utile du transformateur étant proportionnelles

au taux de charge, le rendement varie avec ce dernier. Il s'exprime en fonction de ces pertes et est compris entre 94% et 99% pour un transformateur de distribution

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + P_f + P_j} \qquad avec: P_u = \pi * S_n * Cos\varphi \qquad [I.5]$$

T : est le taux de charge du transformateur.

S_n : est la puissance nominale du transformateur.

Cos φ : est le facteur de puissance des charges alimentées par le transformateur.

Pu : est la puissance utile du transformateur.

Les transformateurs sont des composants d'articulation dans le réseau électrique . Ils permettent d'adapter la tension d'un niveau à un autre pour assurer la connexion entre les différentes sections du réseau, à savoir : les moyens de production (MT), le réseau de transport (THT, HT), le réseau de distribution (HT, MT) et le réseau de distribution finale (MT, BT).

Outre les contraintes liées à la conception des transformateurs classiques, ceux utilisés dans les systèmes de transfert de technologie (SST) nécessitent des considérations supplémentaires pour fonctionner efficacement à haute fréquence. Cela inclut notamment le choix du matériau magnétique et la section des conducteurs utilisés dans les bobines.

1.6 Fonctionnement du transformateur Triphasé :

Les transformateurs triphasés sont utilisés dans l'industrie afin d'adapter les valeurs des tensions et des courants dans les lignes d'alimentations triphasées aux charges triphasées. Il est plus souvent utilisé trois transformateurs monophasés raccordés de façon appropriée plutôt qu'un seul transformateur triphasé (Fig1.5)

Fig(1.5) : Trois de transformateurs monophasés pour adapter les niveaux de tension d'une ligne triphasée.

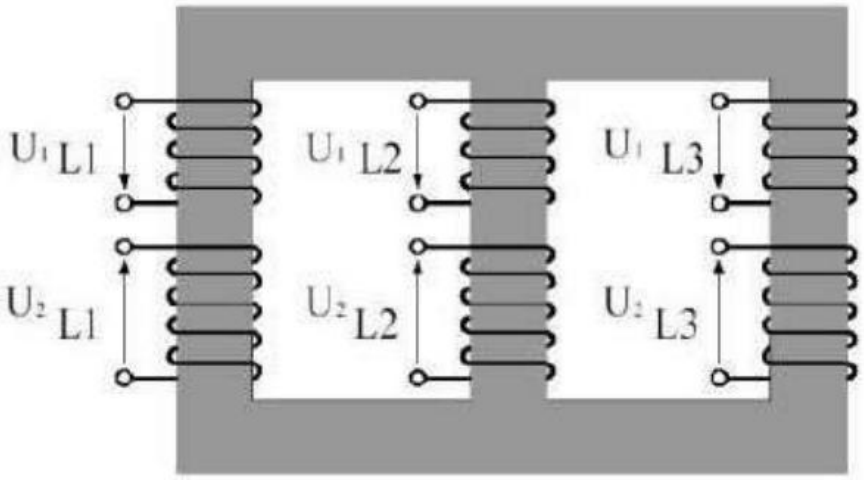
1.6.1.1 Fonctionnement à vide en régime équilibré:

Considérons un transformateur triphasé dont les enroulements possèdent : fig(1.6)

- Par phase : **N1** spires au primaire et **N2** spires au secondaire.
- Des couplages variés : pouvant être en étoile ou en triangle.

Appliquons aux bornes des phases du primaire des tensions sinusoïdales équilibrées :

U_1L1 [V], U_1L2 [V] et U_1L3 [V].



Fig(1.6) : Transformateur Triphasé

Les flux magnétiques engendrés dans le noyau du transformateur induisent des tensions sinusoïdales équilibrées dans les trois phases du secondaire. Ces tensions sont de **même fréquence** que celles du primaire mais de **sens opposé**, conformément à la loi de Lenz, qui stipule que le courant induit s'oppose à la cause qui lui a donné naissance.

1.6.1.2 Fonctionnement en charge:

Dans ce cas, on connecte les trois phases du secondaire à trois récepteurs identiques, chacun ayant un facteur de puissance cos(ϕ).

- Définition des courants :
    - $I_1L1[A], I_1L2[A], I_1L3[A]$: courants dans les trois phases du primaire.
    - $I_2L1[A], I_2L2[A], I_2L3[A]$: courants dans les trois phases du secondaire.

Analogie avec le transformateur monophasé :

Chaque colonne du transformateur triphasé peut être vue comme un transformateur monophasé parfait, fonctionnant avec un **rapport de transformation** donné par :

$$m = \frac{U_{2L1}}{U_{1L1}} = \frac{U_{2L2}}{U_{1L2}} = \frac{U_{2L3}}{U_{1L3}} \qquad [I.6]$$

Conséquence en régime équilibré :

Lorsque le système fonctionne en régime équilibré, la théorie du transformateur monophasé s'applique phase par phase. Cela signifie que chaque phase du primaire correspond à une phase du secondaire, et que l'étude peut être menée de manière individuelle pour chaque colonne du transformateur.

En resume :

Un transformateur triphasé équilibré peut être analysé comme trois transformateurs monophasés indépendants, à condition de considérer chaque phase séparément.

1.6.1.3 Fonctionnement en régime déséquilibré:

Le cas le plus fréquent du fonctionnement d'un transformateur triphasé en régime déséquilibré concerne les réseaux de distribution électrique. Le choix du couplage des enroulements primaires et secondaires est crucial

pour garantir un fonctionnement optimal. Pour déterminer le couplage adéquat, considérons un transformateur dont : [2]

- le primaire est alimenté par une ligne à trois fils avec des tensions équilibrées, tandis que le secondaire possède un neutre accessible.

Ce transformateur est soumis aux conditions limites suivantes :

- la phase du secondaire bobinée sur la première colonne est chargée.
- les deux autres phases du secondaire sont à vide.

Dans ce contexte, le couplage étoile (Y) au primaire est souvent privilégié afin de maintenir un bon équilibre des tensions et réduire les courants de circulation dans le neutre. Pour le secondaire, un couplage en étoile avec neutre accessible (Y) est recommandé pour assurer une distribution stable des tensions, tout en permettant le passage

du courant de déséquilibre via le neutre. Ce choix de couplage minimise l'impact du déséquilibre de charge et garantit une meilleure régulation des tensions dans le réseau de distribution.

1. 6.1.4 Choix du couplage

s'effectuera à partir de nombreux critères ; citons quelques règles générales :[3]

- Dimensionnement des enroulements :

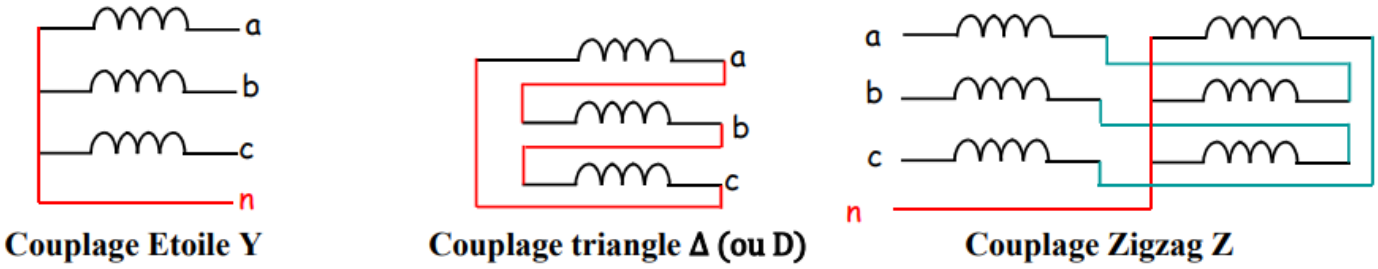
• Aux très hautes tensions, on aura intérêt à choisir un couplage étoile pour que chaque bobine n'ait à supporter que : V' = U / √3

• Pour les très forts courants, on préférera le montage triangle où chaque enroulement n'est parcouru que par un courant d'intensité : J = I / √3

Le comportement du transformateur dépendra également du niveau de déséquilibre :

• Aux faibles déséquilibres (I neutre ≤ 10%.I ligne), primaire et secondaire seront couplés en étoile avec conducteurs neutres :

• Si le déséquilibre est plus important, le primaire restera en étoile mais le secondaire sera connecté en zigzag ; • Si le déséquilibre et la puissance sont importants, on utilisera un montage triangle-étoile pour économiser du cuivre au secondaire Fig(1.7)



Fig(1.7) :Schéma de couplage des transformateur triphasés :(Y) /(D)/(Z)

1.6.2 Cahier de charge d'un transformateur Triphasé :

Puissance nominale : S_n= 630 KVA

Tension nominal primaire : U_{1n}= 30 KV

Couplage primaire Triangle : (D)

Tension nominal secondaire : U_{2n}= 0,4 KV

Couplage secondaire Étoile : (y)

Indice horaire : 11

Fréquence : 50Hz

Pertes à vide : P_0=1,4 kW + 15%

pertes en charge : P_{cc}= 10,5 kW + 15%

Fig(1.8) :Transformateur 630KVA/30KV

1.6.2.1 Puissance apparente par colonne :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$S_c = \frac{S_n}{n_c}[KVA] \qquad [I.8]$$

S_n : Puissance apparente nominale du transformateur.

n_c : Nombre de colonnes égal à 3.

$$S_c = \frac{630}{3} = 210$$

$\boldsymbol{S_c}$= 210 KVA

1.6.2.2 Tension dans les enroulements :

La tension de phase dépend du mode du couplage de l'enroulement. Le couplage de notre transformateur est Dyn11(voir la figure IV. 1).

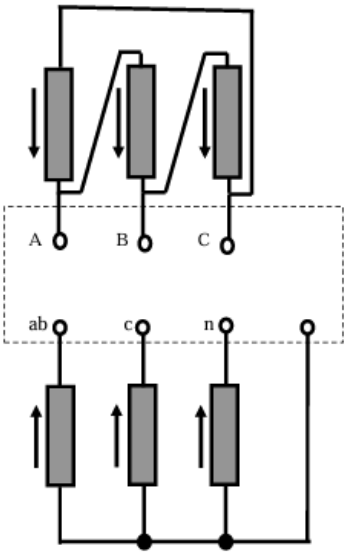
Oùles lettres:

« D » indique que l'enroulement primaire est couplé en triangle.

« y » indique que l'enroulement secondaire est couplé en étoile.

« n » désigne que le neutre est distribué au niveau du secondaire.

« 11» Indique que la tension secondaire est en retard de $\frac{11\pi}{6}$ sur la tension primaire.



Fig(1.9) : Couplage des enroulements

1.6.2.3 Enroulement primaire (HT) :

La tension de phase de l'enroulement primaire est :

$$U_{ph1} = U_{1n}\ [KV] \qquad [I.9]$$

$$U_{Ph1} = 30\ KV$$

U_{1n} : Tension composée primaire nominale.

1.6.2.4 Enroulement secondaire (BT) :

$$\boldsymbol{U_{Ph2} = \frac{U_{n2}}{\sqrt{3}}\ [V]} \quad \text{[I.10]}$$

$$\boldsymbol{U_{Ph2} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94\ \text{V}}$$

1.6.2.5 Courants dans les enroulements :

Le courant nominal dépend du mode de couplage, de la puissance nominale et de la tension appliquée aux bornes de chaque enroulement.

1.6.2.6 Courant dans l'enroulement primaire :

$$\boldsymbol{I_{Ph1} = \frac{S_n}{\sqrt{3}.U_{1n}}} \quad \textbf{[I.11]}$$

$$\boldsymbol{I_{Ph1} = \frac{630 \times 10^3}{30 \times 10^3 \times \sqrt{3}}}$$

$$\boldsymbol{I_{Ph1} = 12,12\ A}$$

1.6.2.7 Courant dans l'enroulement secondaire :

$$\boldsymbol{I_{Ph2} = \frac{S_n}{\sqrt{3}.U_{2n}}} \quad \textbf{[I.12]}$$

$$\boldsymbol{I_{Ph2} = \frac{630 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400}}$$

$$\boldsymbol{I_{Ph2} = 909,32\ A}$$

1.6.2.8 Tension de court-circuit :

La tension de court-circuit est la tension qu'il faut appliquer au primaire d'un transformateur, son secondaire étant court-circuité, afin de faire circuler les courants nominaux primaire et secondaire dans les enroulements. Elle s'exprime en pourcentage de la tension nominale U_{1n}. Elle est donnée par la relation suivante **:**

$$\boldsymbol{U_{cc} = \sqrt{U_{cca}^2 + U_{ccr}^2}}[\%] \quad \text{[I.12]}$$

U_{cca} : composante active, elle est donnée par la formule suivante :

$$U_{cca} = \frac{P_{cc}}{S_n} \times 100\ [\%] \quad \text{[I.13]}$$

$$U_{cca} = \frac{8820}{630 \times 10^3} \times 100\ [\%]$$

$$U_{cca} = 1.4\ \%$$

U_{ccr} : composante réactive, elle est donnée par la formule suivante

$$U_{ccr} = \sqrt{U_{cc}^2 - U_{cca}^2} \qquad [I.14]$$

$$U_{ccr} = \sqrt{(6^2 - 1.4^2)}$$

1.7 Aventage et inconvinient de transformateur classique :

Bien que les transformateurs classiques présentent de nombreux atouts pour la transmission et la distribution de l'électricité, ils ne sont pas exempts d'inconvénients, notamment en ce qui concerne les pertes d'énergie, l'encombrement, le coût et certains impacts environnementaux. Cependant, les avancées technologiques permettent progressivement de réduire ces limites. Leurs bénéfices incluent ce qui suit :

- 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 .

- La robustesse
- La fiabilité : La fiabilité des transformateurs de puissance est primordiale, car ils représentent un élément clé du réseau électrique , En maintenant la stabilité du système et en assurant une alimentation continue

  en énergie, ils contribuent au bon fonctionnement de la chaîne d'approvisionnement et répondent aux besoins des utilisateurs finaux.
- L'isolation électrique : Ces transformateurs assurent une séparation efficace entre les différentes parties du réseau, garantissant ainsi la sécurité des utilisateurs et une protection fiable contre les surtensions.

Cependant, malgré ces atouts, les transformateurs classiques présentent plusieurs inconvénients, parmi lesquels [4,5] :

- Pertes d'énergie : Bien que leur rendement soit élevé, les transformateurs dissipent inévitablement une partie de l'énergie sous forme de chaleur, ce qui peut nécessiter des systèmes de refroidissement supplémentaires.
- Taille et poids : Leur encombrement et leur masse importante peuvent compliquer leur installation dans des espaces réduits et exiger une infrastructure de support adaptée.
- Coût initial : La fabrication et l'installation des transformateurs, en particulier ceux de grande puissance, représentent un investissement financier conséquent.
- Maintenance : Malgré leur fiabilité, ces équipements requièrent un entretien régulier afin d'assurer leur performance optimale et prolonger leur durée de vie.
- Impact environnemental : Certains modèles utilisent des huiles isolantes qui, en cas de fuite, peuvent entraîner des risques écologiques.
- Limites face aux nouvelles technologies : Les transformateurs classiques ne sont pas adaptés à l'intégration optimale des énergies renouvelables, des véhicules électriques et des systèmes de stockage d'énergie.
- Absence de régulation de la tension : La tension de sortie dépend directement de la tension d'entrée et du courant de charge, sans possibilité de correction pour les problèmes de qualité du réseau, tels que les harmoniques ou le facteur de puissance.
- Pas de capacité de stockage d'énergie
- Pas de port DC

1.8 Transformateur intelligent- solid state transformateur (SST)

Le SST (Solid-State Transformer) remplit une fonction similaire à celle d'un transformateur traditionnel, mais sa structure et son mode de fonctionnement sont fondamentalement différents. En effet, la tension alternative à basse fréquence (50 ou 60 Hz) est d'abord convertie en une tension à haute fréquence grâce à des convertisseurs à base d'électronique de puissance, avant d'être appliquée sur le côté primaire d'un transformateur à haute fréquence spécialement conçu pour cela.

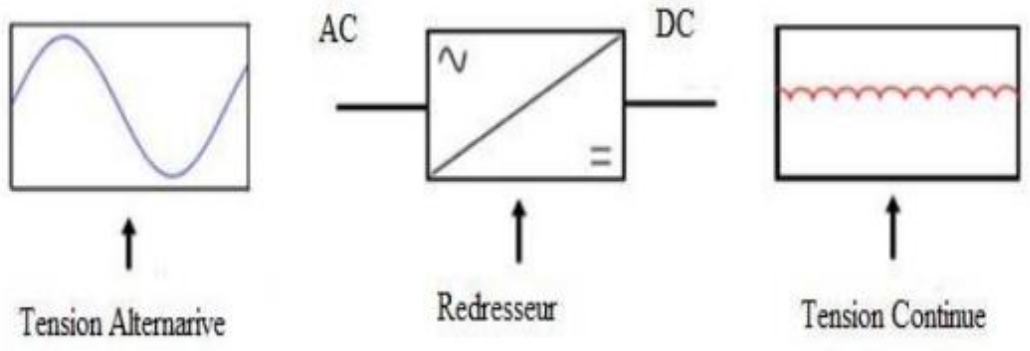
Ce processus se déroule en deux étapes : d'abord, la tension est redressée, puis elle est découpée pour générer la tension à haute fréquence. L'étape inverse se produit sur le côté secondaire du transformateur à haute fréquence, permettant ainsi d'obtenir un courant alternatif ou une tension

continue, , selon les besoins de la charge. L'utilisation de fréquences plus élevées pour le transfert de puissance permet de réduire à la fois le poids et la taille du transformateur [6,7,8].

1.8.1 composant de transformateur (SST) :

1. convertisseur (Redresseur AC/DC) :

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue[9].



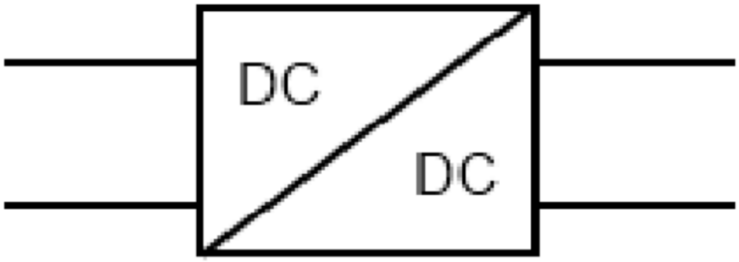
Fig(1.10) : Schéma fonctionnel d'un redresseur.

2. Transformateur à haute fréquence (Transformateur HF)

Fonction : Assure l'isolation galvanique et adapte le niveau de tension à une fréquence élevée (ce qui réduit la taille et le poids).

3. Onduleur (Inverter DC/AC) :[10]

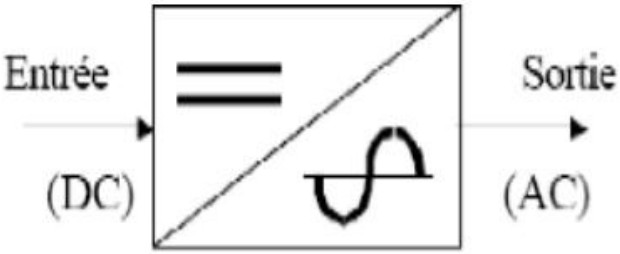
Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternatif alimenté en continue, il modifie de façon périodique la connexion entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie



Fig(1.11) : schéma de principe de l'onduleur

4.Convertisseur AC/DC (dans certains cas)

Fonction : Ajuste la tension continue à différents niveaux selon les besoins.



Convertisseur Continu (DC) - Alternatif (AC)

Fig(1.12) : schéma de principe de convertisseur DC/DC

5. Filtres (Filtres passifs ou actifs)

Fonction : Réduisent les harmoniques et assurent la qualité du signal de sortie

6. Système de commande et de contrôle (Système de contrôle numérique)

Fonction : Supervise le fonctionnement du SST, ajuste les paramètres en temps réel et assure la protection.

1.8.2 Topologie sst :

Au fil de son évolution, le Système de Transfert de Tension (SST) a adopté plusieurs configurations avant d'atteindre une structure optimale et performante. Parmi celles-ci, on distingue principalement quatre configurations majeures [8,11] :

1-La configuration SST à un étage (sans capacités de liaison en courant continu - CC) : ce système permet de convertir directement la moyenne tension alternative (MVAC) en basse tension alternative (LVAV), en utilisant un transformateur à haute fréquence (HF) comme élément d'isolation (Fig 1.13).

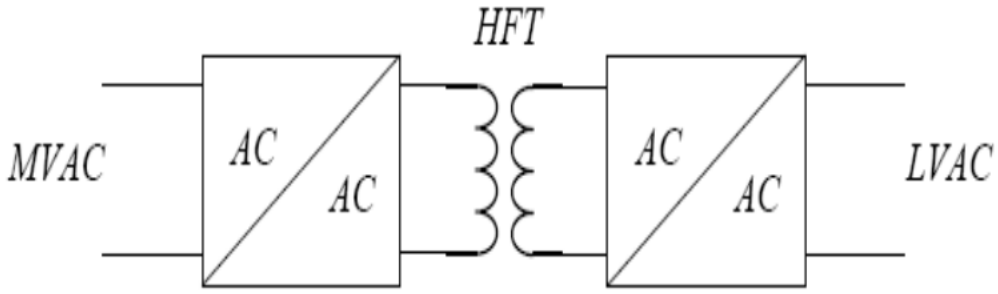
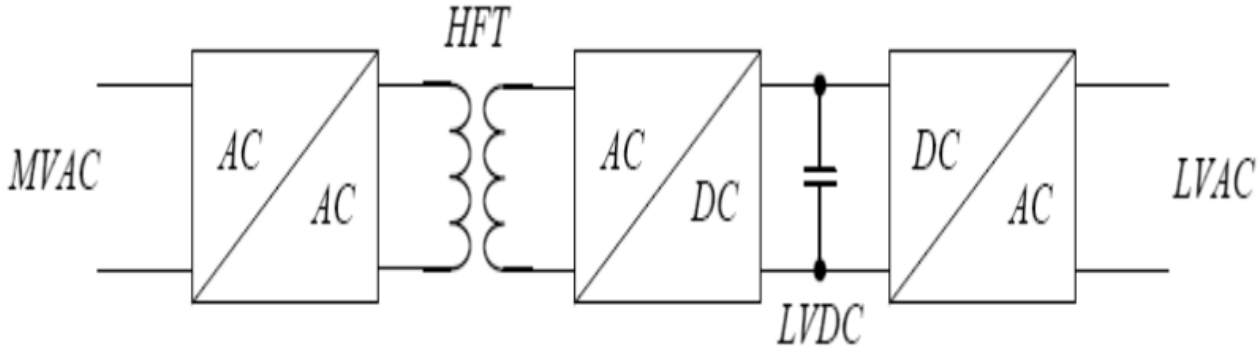


Fig (1.13) : SST à un seul étage- type A

2-SST à deux étages (avec liaison DC du côté BT : Le MVAC est converti en LVDC au premier stade, puis le F LVDC est converti en LVAC par un onduleur.Fig(1.14)



Fig(1.14) : SST à deux étages- type B

3-SST à deux étages (avec liaison CC du côté MT): au premier étage, le convertisseur MVAC est converti à MVDC par le redresseur AC / DC, puis au deuxième étage, le MVDC est converti en LVAC sans utiliser la capacité du circuit intermédiaire basse tension (Fig. 1.15).

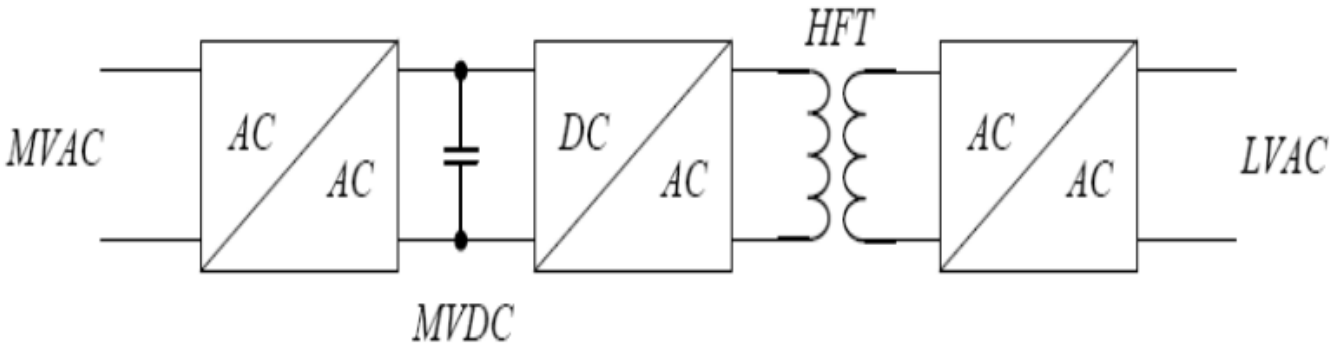
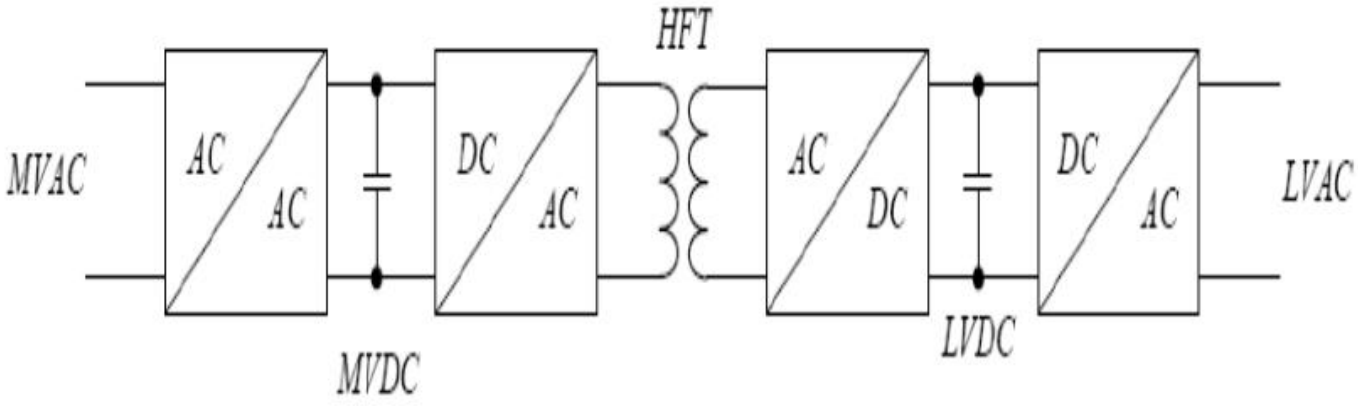


Fig :(1.15) : . SST à deux étages avec une sortie MVDC- Type C

4- SST à trois étages : 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.Fig(1.16)

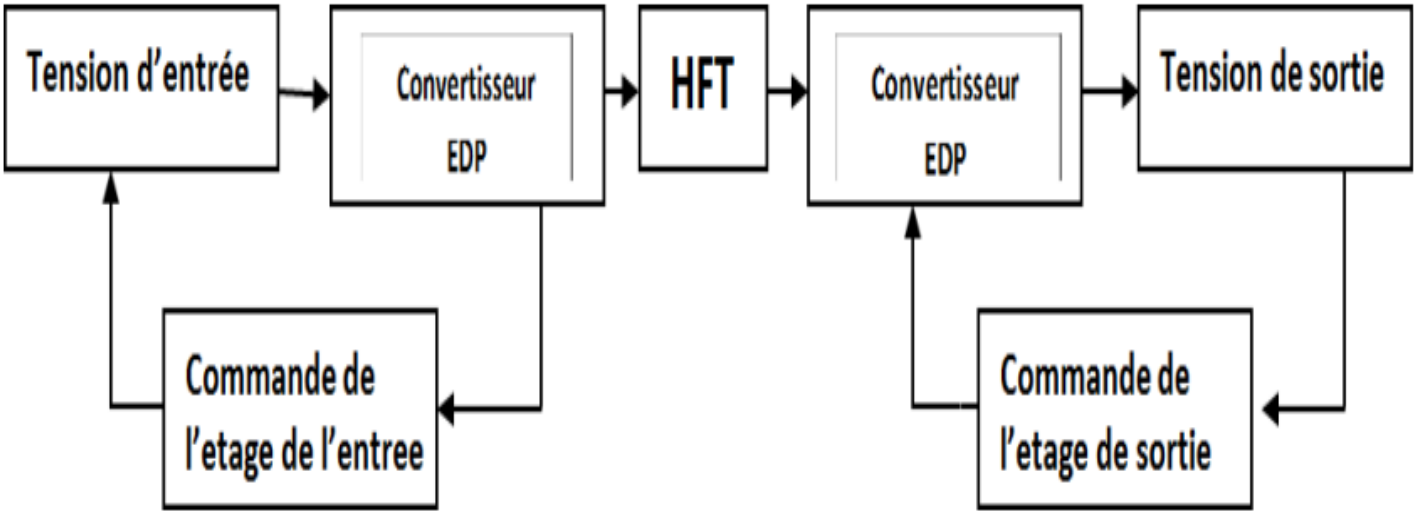


Fig(1.16) : SST à trois étages- type D

1.8.3 Principe de fonctionnement d'un SST à trois étages :[12]

La figure (1.17) illustre le principe de fonctionnement du transformateur à semi-conducteurs. Comme le montre cette figure, les convertisseurs électroniques de puissance transforment d'abord la tension d'entrée à fréquence industrielle en une tension alternative à haute fréquence. Ensuite,

une induction électromagnétique transfère cette tension alternative à haute fréquence vers le secondaire. Dans ce dernier, les convertisseurs électroniques de puissance reconvertissent la tension alternative à haute fréquence en une tension de sortie désirée. Afin d'assurer la stabilité de cette tension malgré d'éventuelles fluctuations de charge, des boucles de régulation sont intégrées aux bornes d'entrée et de sortie.



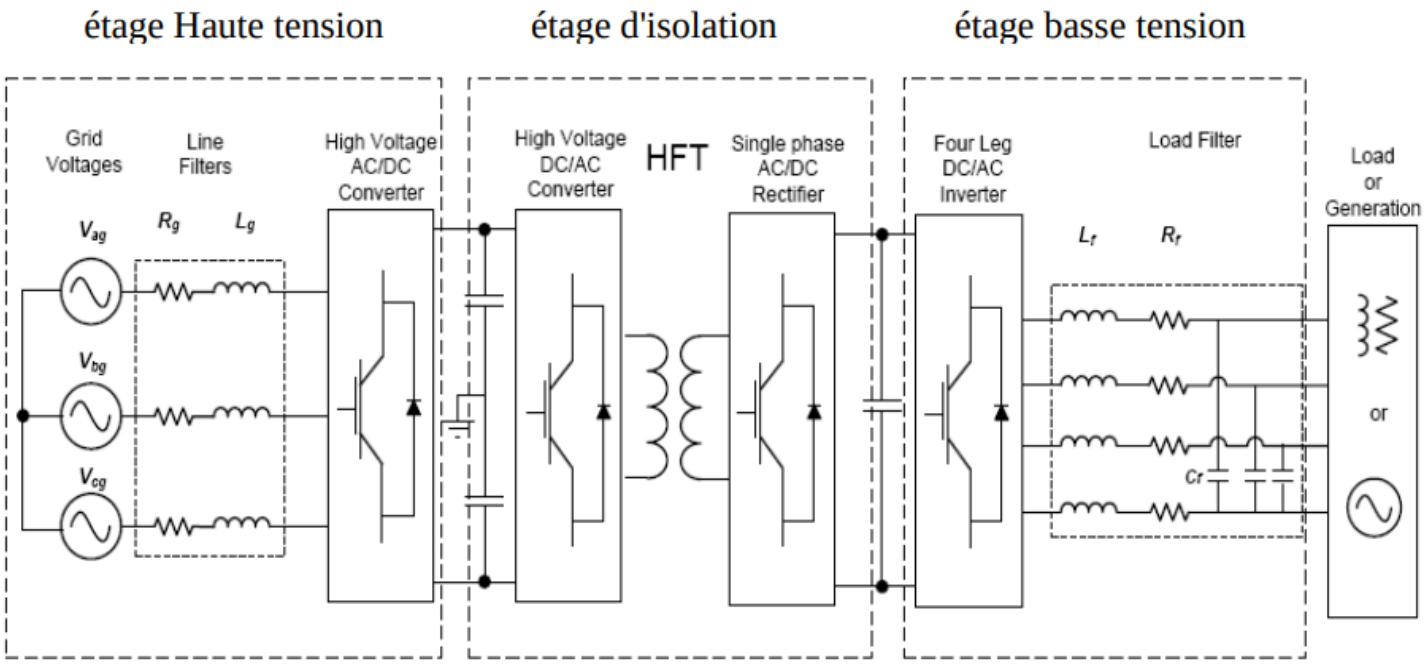
Fig(1.17) : Principe de fonctionnement d'un SST.

1.8.4 Conception d'un SST à trois étages :

La conception du SST à trois étages peut être représentée comme illustré dans la (Fig. 1.18). Ce système repose sur deux convertisseurs électroniques de puissance et un transformateur situé entre eux. Le premier convertisseur, connecté au côté moyenne tension (MT), transforme la tension alternative triphasée de 50 ou 60 Hz en une tension continue à travers un circuit intermédiaire. Cette tension continue est ensuite reconvertie en courant alternatif à une fréquence plus élevée grâce à la seconde partie du pont convertisseur MT. L'augmentation de la fréquence permet une meilleure utilisation des propriétés magnétiques du noyau du transformateur, réduisant ainsi considérablement sa taille tout en maintenant sa capacité de puissance.Du côté basse tension, un deuxième pont convertisseur convertit la tension alternative haute fréquence en une tension continue, qui est ensuite retransformée en tension alternative à fréquence standard à l'aide d'un

d'un onduleur triphasé. Il est également possible d'utiliser directement la tension continue du côté basse tension pour alimenter des charges en courant continu.

Les SST utilisent des convertisseurs électroniques de puissance avec un transformateur haute fréquence pour convertir une tension moyenne ou haute en une tension basse en sortie. Cette approche améliore le contrôle de la gestion de l'énergie dans le réseau électrique, tout en réduisant significativement la taille et le poids du système.



Fig(1.18) : Configuration d'un SST à 03 étages

En plus de la transformation de la tension, la structure du SST, grâce à la commande de ses différents blocs, permet d'accomplir plusieurs autres fonctions. Parmi celles-ci figurent le filtrage et l'amélioration de la qualité de l'énergie, ainsi que le contrôle du flux de puissance, offrant ainsi une meilleure gestion et optimisation du réseau électrique.

1.8.5 Avantages et inconvénients des transformateurs à semi-conducteurs (SST)

Les SST offrent plusieurs avantages notables par rapport aux transformateurs classiques :

- Réduction significative de la taille et du poids.
- Contrôle rapide et bidirectionnel du flux de puissance active.
- Amélioration de la qualité de l'alimentation électrique.

- Intégration facilitée des énergies renouvelables.
- Correction efficace du facteur de puissance.
- Gestion optimisée de la puissance réactive sur les deux côtés du transformateur.
- Capacité d'auto-équilibrage et fonctionnement à fréquence variable.
- Régulation instantanée de la tension pour une meilleure stabilité du réseau.
- Compensation des variations de tension et réduction des harmoniques.
- Isolation des pannes entre les côtés primaire et secondaire, renforçant ainsi la fiabilité.
- Ces dernières années, les dispositifs électroniques de puissance haute performance et à faibles pertes sont devenus plus accessibles financièrement. L'association des avantages des SST avec la diminution du coût de ces composants renforce leur viabilité économique en tant qu'alternative aux transformateurs classiques[4].

Cependant, malgré ces nombreux atouts, les SST présentent également certains inconvénients :

- Une conception plus complexe, nécessitant davantage de composants et de périphériques, ce qui peut impacter leur fiabilité.
- D'autre part, la synergie entre ces différents aspects, combinée aux capacités et aux avantages offerts par ce dispositif, a stimulé un important effort de recherche visant à développer et optimiser l'application des SST [5].

1.9 comparaison entre les Transformateurs Classiques (LFT) et les Transformateurs (SST) :

Dans cette partie, une comparaison entre les transformateurs traditionnels et les transformateurs intelligents sera effectuée à travers des tableaux mettant en évidence leurs différences. L'objectif de cette comparaison est de montrer l'impact positif des transformateurs intelligents sur le réseau par rapport aux transformateurs traditionnels[13].

1.9.1 Caractéristique techniques des transformateurs LFT et SST

Tableau 1 : comparaison (LFT) et (SST)

Caractéristique	**Transformateurs Conventionnels (LFT)**	**Transformateurs (SST)**
Structure	Simple	Complexe
Poids et Volume	Grand et lourd	Réduit (grâce à la haute fréquence)
Fiabilité	Très élevée, adaptés aux conditions sévères	Moins fiable (technologie émergente)
Efficacité	90% à 98.1%	98.5% à 99.5%
Perte à vide	Présente	Faible à inexistante
Réduction de la consommation	Pas de compensation de facteur de puissance	Correction du facteur de puissance possible
Sources d'alimentation	Seulement AC	AC et DC, possibilité de fournir des charges DC
Utilisation d'huile	Nécessite de l'huile (risques environnementaux)	Pas d'huile, plus respectueux de l'environnement
Saturation du noyau	Peut entraîner des problèmes d'harmoniques	Moins de risques de saturation
Coût	Moins cher	Plus coûteux, mais baisse attendue avec les progrès technologiques
Integration énergies Renouvelables	Difficile	Facile Integration direct possible
Réaction aux changements de charge	Affecte directement la sortie en fonction des variations d'entrée	Contrôle de la sortie indépendamment des variations d'entrée

-Le tableau suivant présent une comparaison entre transformateur a semi-conducteur (SST) et classique dans l'intégration de l'énergie éolienne:

1.9.2 l'intégration de l'énergie éolienne:[14]

Intégration de l'energie éolienne (LFT)	Intégration de l'energie éolienne basée sur le (SST)
Taille et poids augmentés, avec un volume important	Taille et poids et volume réduits
Nécssite un grand nombre de dispositifs électroniques de puissance tels que les transformateurs, STATCOMs, convertisseurs, elc….	Tout les dispositifs sont remplacés par une unité-le SST
Fiable densité de puissance	Haute densité de puissance
Coûte élevé	Coûte réduit

Tableau 2 : comparaison (SST)vs(LFT) dans l'intégration de l'énergie éolienne

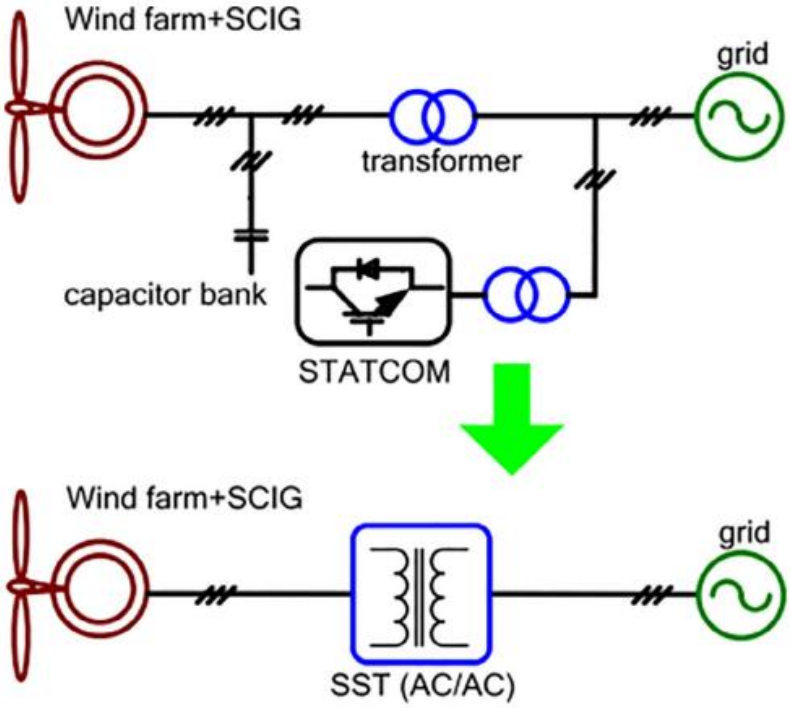
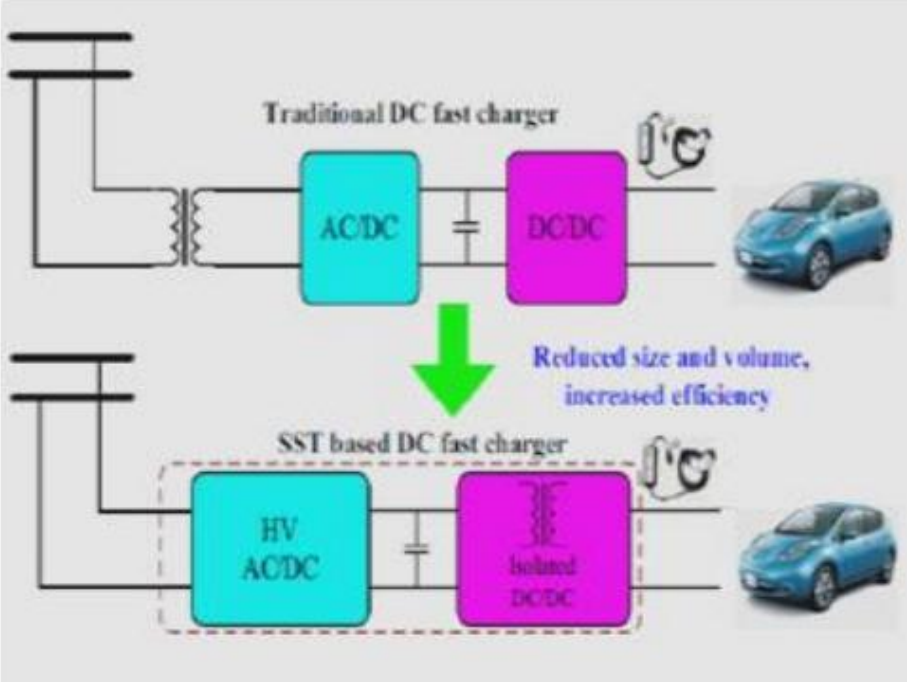


Fig (1.19): Application De (SST) Dans l'energie renouveleable

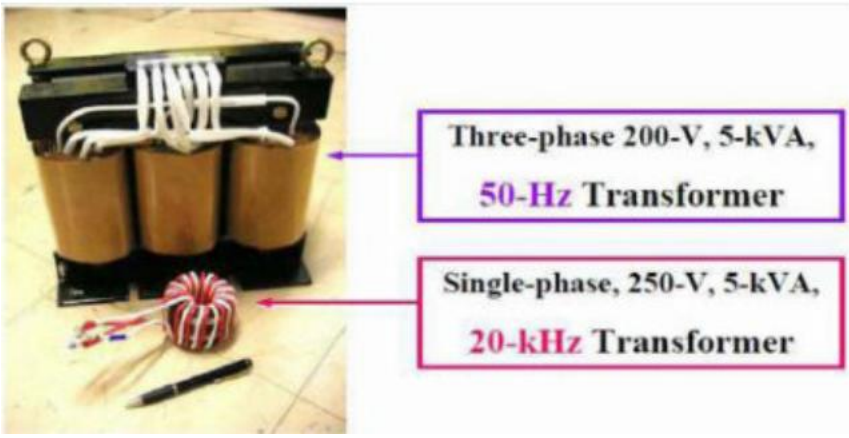
1.9.3 station de charge DC :[14]

Transformateur classiques dans une station de charge DC	Station de charge DC a basede SST
Efficacité: environ 90%	Efficacité: environ 95%
Taille globale augmentée avec un poids et un volume élevé	Taille , poids et volume réduit
Fiable densité de puissance	Haute densité de puissance
Coûte élevé	Coûte est réduit de moitié par rapport a l'utilisation de traditionnel
Qualité de puissance faible	Haute qualité de puissance grâce aux propriétés du SST

Tableau 3 :comparaison entre (LFT)vs(SST) dans une station de charge DC



Fig(1.20) :Application de SST dans un station charge DC



Fig(1.21): comparaison transformateur classique et SST

1.10 Conclusion :

Les transformateurs intelligents (SST) offrent plusieurs avantages par rapport aux transformateurs conventionnels, notamment une réduction significative de la taille et du poids, facilitant ainsi leur transport, leur installation et réduisant les coûts associés. Grâce à l'utilisation des semi-conducteurs, ces transformateurs améliorent la stabilité du réseau électrique en optimisant la conversion d'énergie, en contrôlant la qualité de l'alimentation et en facilitant l'intégration des sources d'énergie renouvelable. De plus, leur vitesse de commutation élevée permet une meilleure gestion du flux d'énergie, renforçant ainsi la fiabilité et la stabilité du réseau.

Ainsi, le prochain chapitre se concentrera sur l'analyse du rôle des transformateurs intelligents dans l'amélioration de la stabilité du réseau électrique, avec une étude comparative approfondie de leurs performances par rapport aux transformateurs classiques.

Chapitre 02 :

Le rôle des transformateurs (SST) dans la stabilité du réseau électrique

2.1 Introduction :

Les réseaux électriques font partie des systèmes essentiels qui garantissent une fourniture continue et fiable d'énergie électrique aux consommateurs. Avec l'évolution des besoins en énergie et l'augmentation de la dépendance aux sources d'énergie renouvelables, les réseaux électriques font face à de grands défis concernant le maintien de la stabilité du système. La stabilité électrique est la capacité de maintenir l'équilibre de la tension et de la fréquence dans le réseau, assurant ainsi la continuité du service face aux perturbations ou aux changements soudains.

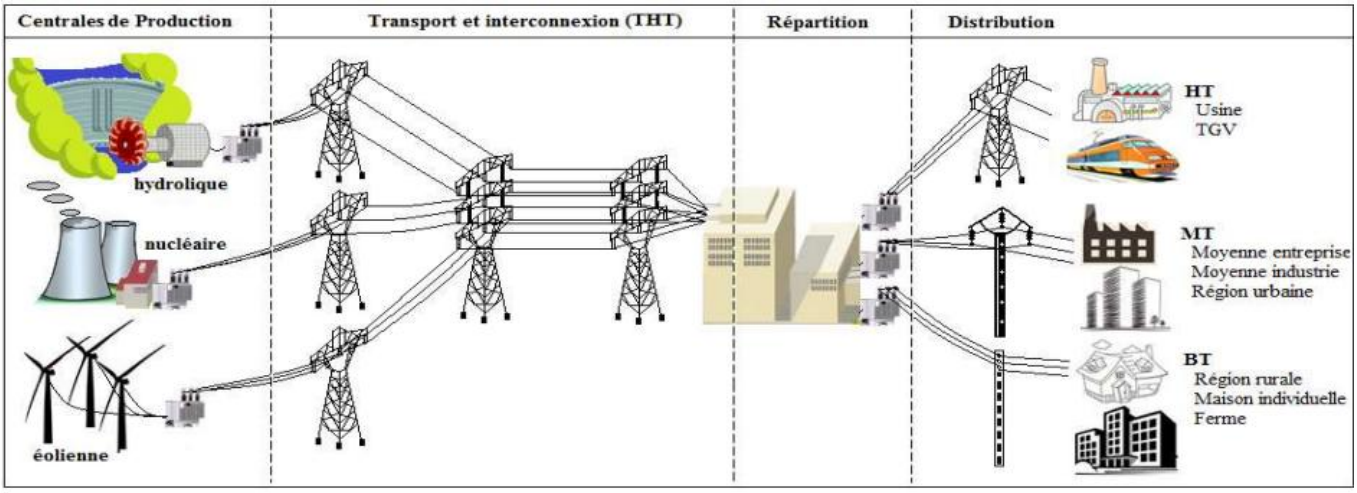
Les transformateurs intelligents (SST) représentent une avancée majeure dans le domaine des réseaux électriques, car ils permettent au système de réagir plus rapidement et avec plus de précision aux événements imprévus. Grâce à des technologies avancées de surveillance et de contrôle, les transformateurs intelligents contribuent à améliorer la stabilité du réseau en régulant le flux d'énergie, en ajustant la tension et en réagissant immédiatement aux variations de charge ou aux pannes.

Dans ce chapitre, nous discuterons du rôle des transformateurs intelligents dans l'amélioration de la stabilité du réseau électrique, en examinant la définition de la stabilité électrique, ses différents types, ainsi que les facteurs qui influent sur celle-ci. De plus, nous mettrons en lumière la manière dont les transformateurs intelligents peuvent renforcer la stabilité du système.

2.2 Généralités sur les Réseaux Electriques

La production d'énergie électrique ne se fait pas toujours à proximité des zones de consommation, car les conditions nécessaires à sa génération ne sont pas toujours réunies sur place. En général, cette énergie est produite par des groupes électrogènes « G » sous une moyenne tension variant entre 5,5 kV et 15,5 kV, dans des sites souvent éloignés des centres urbains. Elle est ensuite élevée à une haute tension (90 kV, 150 kV, 225 kV, etc.) grâce à des transformateurs élévateurs « TE » placés à la sortie des générateurs. L'énergie ainsi produite – en totalité ou en surplus – est transportée sur de longues distances, parfois de plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres, à travers des lignes électriques « L » sous haute tension, jusqu'à atteindre les zones de consommation. À l'arrivée, la tension est abaissée par des transformateurs « TA » pour être redistribuée sous une moyenne tension (30 kV, 10 kV, etc.), rendant l'électricité accessible aux usagers finaux [15].

Le réseau électrique est structuré en trois niveaux principaux selon la tension : le réseau de transport, le réseau de répartition et le réseau de distribution. Des postes sources et des transformateurs marquent les frontières entre ces différents niveaux, assurant la transition et l'équilibre entre les diverses étapes du transport d'énergie[16].



Fig(2.1) : Structure générale du réseau électrique

2.3 Définition

Un réseau électrique a pour mission principale de produire l'énergie nécessaire et de la transporter efficacement jusqu'aux utilisateurs finaux, tout en maintenant une tension et une fréquence stables, une qualité optimale de l'électricité et une alimentation continue**.**

Un système électro-énergétique se compose généralement de deux circuits essentiels. Le premier est le circuit de puissance, qui inclut :

- Groupes de production.
- Postes de transformation.
- Des Lignes de transport et distribution.

Le second est le circuit de terre, qui comprend :

- Les prises de terres des groupes de production.
- Les prises de terre des postes de transformation.
- Les prises de terres des pylônes [17].

2.4 Les types des réseaux électriques

D'une façon générale, Les type de réseaux sont classes par rapport les niveaux de tension comme suit :

- Un réseau de transport HTB
- Un réseau de répartition HTA
- Un réseau de distribution BTB
- Un réseau de livraison BTA

Cette hiérarchie varie considérablement d'un pays à l'autre [18].

2.5 Définition de la stabilité d'un réseau électrique

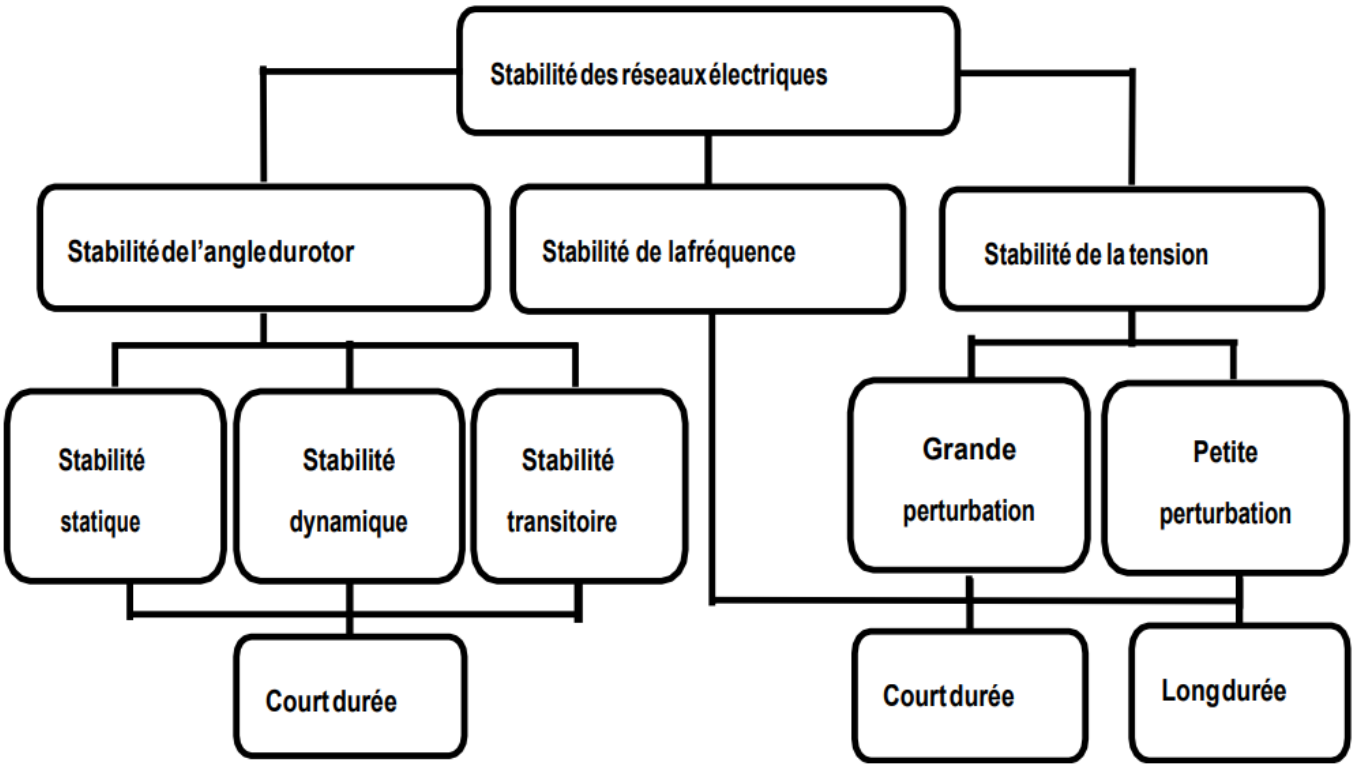
La stabilité d'un réseau électrique de HT est une propriété d'un système de puissance qui lui permet de rester dans un état d'équilibre dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un état acceptable d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation [19].

2.6 Classification de la stabilité des réseaux électriques

On peut examiner la stabilité en analysant la topologie du réseau sous divers aspects. Le fonctionnement d'un réseau électrique est décrit en termes de grandeurs.

physiques, comme l'amplitude et l'angle de phase du tension à chaque point de connexion, ainsi que la puissance active/réactive transmise via chaque ligne et la fréquence de rotation de la machine synchrone. Si elles manquent de constance, on considère que le réseau électrique est considéré comme étant en perturbations [20].

La stabilité peut être classifiée selon la nature de la perturbation : stabilité de l'angle du rotor, stabilité de la tension et stabilité de la fréquence. La stabilité peut être classifiée en petite et grande amplitude de perturbation en fonction d'origine et de l'ampleur du défaut. Par rapport au temps d'évaluation, la stabilité peut être à court ou à long durée, tel qu'il est décrit dans la Figure (2.2)



Fig(2.2) : Classification de la stabilité des réseaux électriques

On distingue trois types de stabilité :

- la stabilité de l'angle de rotor
- la stabilité de tension.
- la stabilité de fréquence.

Les différentes formes d'instabilité ne peuvent être pleinement comprises ni traitées simultanément de manière efficace. En raison de la complexité et de la dimensionnalité élevée des problèmes liés à la stabilité des réseaux électriques, une classification permet de simplifier l'analyse en se concentrant sur des types spécifiques d'instabilité. Cette approche favorise une représentation adaptée du système et l'utilisation de techniques analytiques appropriées. L'étude de la stabilité, notamment l'identification des principaux facteurs contribuant à l'instabilité, est grandement facilitée par cette classification. Elle constitue ainsi un outil essentiel pour une analyse pertinente et une résolution efficace des problèmes de stabilité des réseaux électriques.

La classification de la stabilité proposée ici est basée sur la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude des perturbations. On peut donc Classifier les types de la stabilité comme suit :

2.6.1 Stabilité de l'angle du rotor (angulaire)

Dans un réseau électrique, la stabilité de l'angle du rotor désigne la capacité d'un ensemble de générateurs synchrones interconnectés à maintenir leur synchronisme, que ce soit en conditions normales ou après une perturbation. Un système est considéré comme instable lorsque l'écart entre les angles rotoriques des

générateurs s'accroît indéfiniment ou lorsque les oscillations transitoires induites par une perturbation ne s'amortissent pas suffisamment dans le temps d'évaluation.

Selon l'intensité de la perturbation, la stabilité de l'angle du rotor peut être étudiée sous deux angles distincts[21].

2.6.1.1 Stabilité angulaire aux petites perturbations

Elle se réfère à la capacité du système à préserver son synchronisme face à des variations mineures, telles qu'une légère fluctuation de charge ou de production, ou encore une manœuvre d'équipement. Ce type de perturbation se manifeste sur une échelle de temps de quelques secondes.

a) Stabilité statique

La stabilité statique concerne l'analyse des régimes d'équilibre du système. Elle permet d'évaluer les niveaux de tension et les flux de puissance transitant entre les différents bus du réseau. Cette étude est essentielle dans la phase de dimensionnement des éléments passifs du réseau, tels que les câbles et les dispositifs de protection, afin d'optimiser leur conception et leur implantation [21].

b) La Stabilité Dynamique

Si une légère perturbation est apportée au réseau, depuis un état stable de régime permanent, et que le réseau regagne son état normal de fonctionnement en régime permanent. On dit qu'il est dynamiquement stable. Pour un réseau électrique, une perturbation mineure fait référence à des actions ou interventions normales sur le réseau, telles que l'activation d'une inductance shunt ou des changements mineurs de charge [22].

2.6.1.2 Stabilité transitoire

On dit qu'un réseau électrique est en régime de stabilité transitoire par rapport à un cycle de grandes perturbations (court-circuit, rupture d'ouvrages, etc.) si suite à cela. Finalement, il se remet dans un état de fonctionnement continu en synchronisation. L'analyse de la stabilité transitoire d'un réseau vise à établir si le synchronisme du réseau est préservé lorsqu'il subit une perturbation majeure. Ce genre de perturbation peut entraîner un effondrement total du réseau (blackout) [23].

2.6.2 Stabilité de tension

La stabilité de tension représente la capacité d'un système électrique à maintenir des niveaux de tension acceptables en régime normal ou après une perturbation. L'instabilité de tension survient lorsque le réseau de production et de transport ne parvient plus à satisfaire la demande en puissance des charges, ce qui se traduit généralement par une décroissance progressive de la tension [24,25]. Cette instabilité peut se manifester sous forme d'une diminution ou d'une augmentation progressive des tensions à certains nœuds du réseau. L'un des effets possibles est la perte de charges dans certaines zones ou encore le déclenchement des lignes de transport et d'autres équipements via leurs systèmes de protection, pouvant conduire à des pannes en cascade [26].

En fonction de l'ampleur des perturbations, on distingue deux types de stabilité de tension : celle liée aux petites perturbations et celle associée aux grandes perturbations. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'instabilité de tension, parmi lesquels :[24]

1. Une augmentation de la charge entraînant l'atteinte des limites de puissance réactive par les générateurs, les condensateurs synchrones ou les systèmes de compensation statique (SVC).
2. Une panne de générateur, une perte de charge importante ou le déclenchement d'une ligne de transport.
3. Une perte d'une source de puissance réactive, comme les condensateurs ou les machines synchrones.
4. **2.6.2.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations**

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production, etc [25]

2.6.2.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations

Elle est définie comme étant la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit,.. . etc [24,25].

2.6.3 Stabilité de fréquence :

La stabilité de fréquence concerne la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale, suite à un incident sévère ayant ou non conduit à un morcellement du système. La stabilité de fréquence est étroitement liée à l'équilibre global entre la puissance active produite et consommée [27].

2.7 Les causes d'instabilité du réseau électrique

Les causes sont diverses et variées. Elles peuvent provoquer directement l'instabilité ou aggraver l'état du système[28].

- Les court-circuit
- Les surcharges
- Les défaillances d'une protection
- Les pertes des générateurs
- Les harmoniques
- Le vieillissement des équipements (transformateur,disjoncteurs,lignes de transport….)
- Integration des sources d'energie renouvelable [29]

2.8 Rôle du Transformateur intelligent dans la stabilité du réseau électrique

À l'ère de la transition énergétique et de la modernisation des réseaux, les transformateurs intelligents (Solid State Transformers – SST) s'imposent comme une solution révolutionnaire. Bien plus que de simples appareils de conversion, ils deviennent des éléments stratégiques au cœur du système électrique. Capables de surveiller, d'analyser et de réagir en temps réel, ils offrent une régulation précise de la tension, un filtrage efficace des harmoniques, une isolation fiable en cas de défaut, tout en facilitant l'intégration harmonieuse des énergies renouvelables. Ce chapitre met en lumière ces fonctions clés qui font du SST un acteur majeur dans l'amélioration de la stabilité et de la performance du réseau électrique.

2.8.1 Régulation de tension [30]

La régulation de la tension constitue l'une des fonctions les plus importantes du transformateur intelligent (Solid-State Transformer – SST). Elle joue un rôle central dans l'amélioration de la stabilité du réseau électrique. Contrairement au transformateur traditionnel, qui repose uniquement sur une conversion électromagnétique fixe, le transformateur intelligent utilise des technologies avancées en électronique de puissance, lui permettant de contrôler de manière efficace et précise la valeur de la tension de sortie.

Le SST est composé de trois étapes électroniques interconnectées :

1. Conversion du courant alternatif en courant continu (AC/DC) :

Cette étape permet de redresser le courant alternatif d'entrée et de le convertir en courant continu.

2. Conversion continue à continue (DC/DC) :

C'est à ce niveau que la régulation de la tension est réalisée avec une grande précision. Des techniques telles que le Boost (élévation de la tension) ou le Buck (abaissement de la tension) sont utilisées, contrôlées par des algorithmes comme la modulation de largeur d'impulsion (PWM), permettant une régulation rapide et dynamique.

3. Conversion du courant continu en courant alternatif (DC/AC) :

Cette dernière étape permet de reformer un courant alternatif avec les caractéristiques requises (tension, fréquence, et forme d'onde), afin d'alimenter les charges de manière efficace et sécurisée.

L'intégration de ces trois étapes permet au SST de surveiller et d'analyser la tension en temps réel. En cas de fluctuation (hausse ou baisse soudaine de la tension), l'étage DC/DC intervient automatiquement pour ajuster la tension, ce qui permet au transformateur de réagir rapidement à tout changement survenant dans le réseau ou au niveau des charges connectées.

Ainsi, le SST ne se limite pas à la conversion de l'énergie, mais joue également un rôle actif dans l'amélioration de la qualité de l'alimentation électrique et dans le renforcement de la fiabilité du réseau.

2.8.2 isolation des défauts

Les transformateurs à semi-conducteurs (Transformateurs à état solide - SST) offrent des capacités de détection et d'isolation des défauts nettement supérieures à celles des transformateurs traditionnels, grâce à l'utilisation de composants électroniques avancés et de systèmes de contrôle intelligents. Voici comment ces transformateurs fonctionnent pour isoler les défauts dans un réseau électrique :[31,32]

2.8.2.1 Détection rapide des défauts et isolation

Les SST intègrent des composants électroniques comme les IGBT (Transistors Bipolaires à Grille Isolée) et MOSFET (Transistors à Effet de Champ à Semiconducteur Métal-Oxyde), qui permettent un contrôle en temps réel des paramètres électriques tels que la tension, le courant et la fréquence.

Ces composants peuvent détecter rapidement les anomalies telles que les courts-circuits ou les surcharges et isoler la section défectueuse en quelques millisecondes. Cela est beaucoup plus rapide que les transformateurs traditionnels, qui dépendent de composants mécaniques et prennent plus de temps pour réagir.

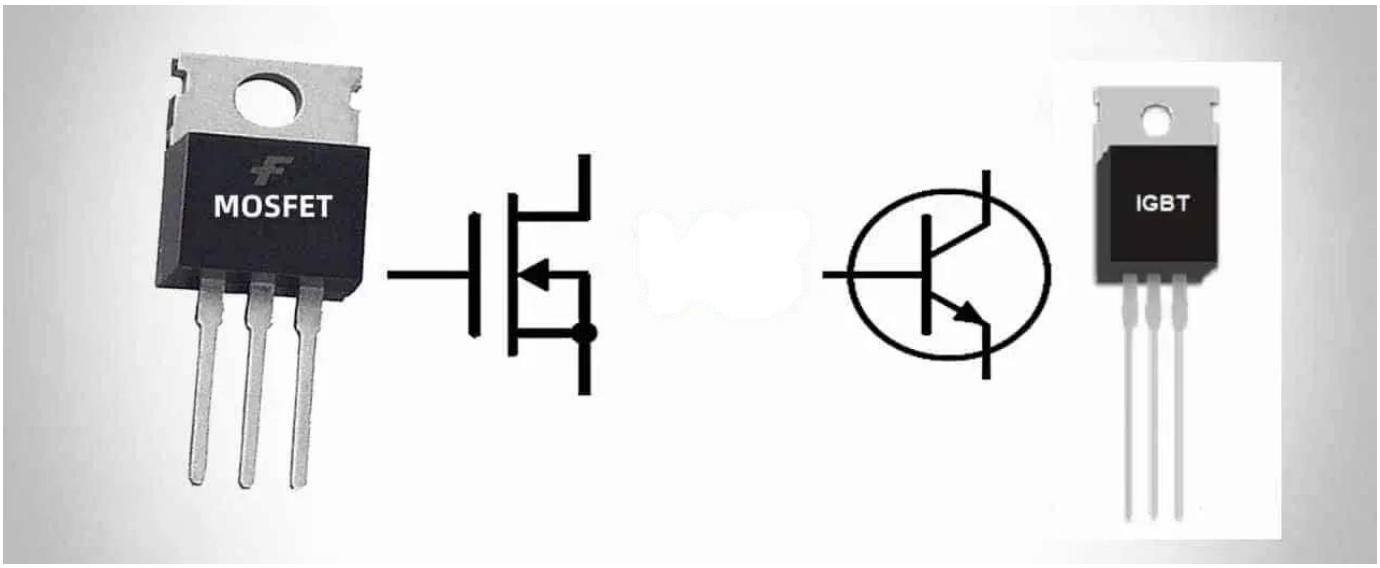


Fig (2.3) :Transistor MOSFET et IGBT

2.8.2.2 Isolation dynamique des défauts

Lorsqu'un défaut se produit, le SST peut ajuster ses algorithmes de contrôle pour isoler la partie du système affectée. Cela lui permet de couper l'alimentation de la zone défectueuse tout en maintenant le fonctionnement du reste du réseau [32].

La protection contre les surintensités est appliquée électroniquement, permettant au SST de réduire ou de couper l'alimentation de la zone défectueuse sans avoir besoin de déconnecter physiquement des disjoncteurs ou des fusibles.

2.8.2.3 Tolérance aux défauts et auto-récupération

Les SST peuvent être conçus avec des mécanismes de redondance et des capacités d'auto-récupération, leur permettant de se remettre rapidement des défauts en reconfigurant le flux d'énergie après avoir détecté et isolé le défaut.

Ils peuvent également communiquer avec d'autres composants du réseau intelligent pour localiser les défauts et activer des systèmes de secours.

2.8.2.4 Amélioration de la stabilité du système

Grâce à leur réponse rapide et à leur isolation précise des défauts, les SST contribuent à améliorer la stabilité globale du système électrique en empêchant la propagation des défauts. Dans les systèmes traditionnels,

Les défauts peuvent rapidement se propager à d'autres parties du réseau, provoquant des pannes étendues. Les SST préviennent cela en agissant localement et rapidement.

2.8.2.5 Réduction de l'impact des défauts sur le réseau

Puisque les SST peuvent isoler la section défectueuse tout en maintenant l'alimentation des autres zones du réseau, ils réduisent le risque de pannes étendues et améliorent la résilience du réseau électrique.

En résumé, les capacités d'isolation des défauts des transformateurs à semi-conducteurs constituent un avantage majeur par rapport aux transformateurs traditionnels. Ils permettent une détection rapide des défauts, une isolation dynamique et une récupération rapide, contribuant à un fonctionnement plus efficace et fiable des réseaux électriques modernes.

2.8.3 Filtrage des harmoniques

Les harmoniques représentent l'un des facteurs les plus perturbateurs pour la stabilité des réseaux électriques, notamment avec l'intégration croissante de dispositifs électroniques de puissance tels que les onduleurs et les convertisseurs dans les systèmes d'énergies renouvelables.

Les harmoniques sont des signaux électriques dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale du réseau (50 Hz). Elles sont générées principalement par le fonctionnement des charges non linéaires. Leur présence entraîne une distorsion de la forme d'onde du courant ou de la tension, ce qui compromet la qualité de l'énergie et nuit à la stabilité du réseau.

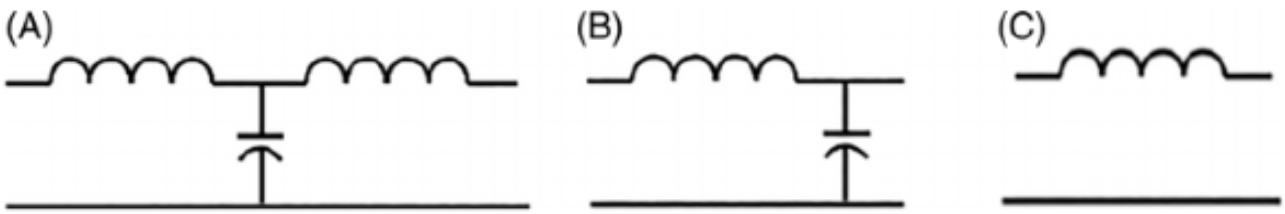
Les principaux effets négatifs des harmoniques incluent :

- L'augmentation des pertes d'énergie dans les générateurs et les transformateurs.
- Une surchauffe des câbles et des moteurs.
- Des perturbations sur la précision des systèmes de protection et de contrôle.
- L'apparition de phénomènes de résonance électrique.
- La détérioration des condensateurs et des équipements sensibles [33].

Dans ce contexte, les transformateurs intelligents jouent un rôle essentiel dans la détection et l'atténuation des harmoniques. Grâce à leurs capacités de surveillance en temps réel des paramètres électriques, ils permettent de :

- Identifier avec précision les distorsions causées par les harmoniques.
- Alerter les systèmes de commande pour une réaction corrective immédiate.
- Améliorer le facteur de puissance et réguler la tension afin de minimiser les impacts des harmoniques
- Appliquer des techniques de filtrage actif pour réduire le niveau des harmoniques

Comme le montre la figure (2.4), les types les plus courants de ces filtres sont : L, LC, LCL [34].



Fig(2.4) :les filtres harmoniques

(A) Filtre LCL
(B) Filtre LC
(C) Filtre L

La compensation de la puissance réactive est une fonctionnalité essentielle des transformateurs à semi-conducteurs **SST**. Elle est réalisée principalement au niveau de l'étage redresseur (rectifier stage) du SST.

Selon la valeur de référence de la puissance réactive qui est définie en fonction des besoins du réseau, le SST est capable de :[17]

- Fournir de la puissance réactive au réseau (générer de la puissance réactive),
- ou absorber de la puissance réactive du réseau.

Rôle et avantages de cette fonction :

1. Soutien de la tension (Voltage Support)

Lorsque la tension du réseau chute, le SST peut injecter de la puissance réactive pour aider à rehausser la tension. Cela permet de maintenir une tension stable pour les équipements électriques.

2. Réduction des pertes dans les lignes de transmission

En ajustant dynamiquement le niveau de puissance réactive, le SST permet de réduire le courant circulant dans les lignes de transport. Moins de courant signifie moins de pertes par effet Joule, ce qui améliore le rendement énergétique du réseau.

1. Amélioration de la stabilité du réseau électrique

La gestion active de la puissance réactive permet de stabiliser la tension sur les lignes, surtout lors de variations brusques de charge ou d'événements perturbateurs (comme les courts-circuits ou les démarrages de moteurs). Cela contribue à renforcer la fiabilité et la résilience du réseau.

2.8.5 Intégration des sources d'energie renouvelable

Le transformateur (SST) ne constitue pas seulement une alternative technologique au transformateur conventionnel, mais représente une avancée majeure intégrant la conversion d'énergie, le contrôle intelligent et l'intégration fluide avec les sources d'énergie renouvelables. Pour expliquer son intégration, le processus peut être divisé en plusieurs étapes fonctionnelles interconnectées, comme illustré : [32,35]

2.8.5.1 Intégration avec les systèmes photovoltaïques (PV)

Les panneaux solaires produisent un courant continu (DC) avec une tension variable selon le rayonnement solaire et la température.

Ce courant est d'abord injecté dans une étape DC/DC à l'intérieur du SST, qui assure la régulation de la tension et le suivi du point de puissance maximale (MPPT).

Une fois la tension régulée, le courant passe par une étape DC/AC, où il est converti en courant alternatif (AC) avec une tension et une fréquence compatibles avec le réseau électrique.

Enfin, le SST est connecté directement au réseau ou aux charges locales, garantissant un flux énergétique stable et sécurisé.

2.8.5.2 Intégration avec les éoliennes (Wind Turbines) [35]

Les éoliennes produisent un courant alternatif (AC) dont la fréquence et la tension varient en fonction de la vitesse du vent.

Ce courant est d'abord redressé via une étape AC/DC à l'intérieur du SST, pour être converti en courant continu.

Ensuite, il est reconverti en courant alternatif stable à travers une étape DC/AC, permettant une intégration optimale au réseau.

Cette structure permet d'éliminer les fluctuations et d'assurer une stabilité de la tension et de la fréquence, quelle que soit la variabilité du vent [36].

2.8.5.3 Contrôle et supervision intelligents

Le SST est équipé de contrôleurs numériques (Digital Controllers) basés sur des technologies avancées telles que DSP ou FPGA.

Ces unités assurent la surveillance en temps réel de toutes les grandeurs électriques (tension, courant, fréquence) et transmettent les commandes nécessaires pour le pilotage interne du processus de conversion.

Le SST peut être programmé pour fonctionner automatiquement selon des priorités prédéfinies (par exemple : alimenter la charge locale en priorité, stocker l'énergie, ou injecter l'excédent dans le réseau).

2.8.5.4 Connexion au réseau ou aux systèmes de stockage

La sortie du SST peut être connectée directement au réseau électrique (Grid-connected).

Elle peut également être reliée à des batteries de stockage ou à des systèmes hybrides intégrant plusieurs sources d'énergie, ce qui permet la création de micro-réseaux (Microgrids).

Cette intégration permet d'optimiser l'exploitation des énergies renouvelables et d'assurer une alimentation de secours en cas de coupure du réseau principal.

2.8.5.5 Protection et conformité avec le réseau

Le SST intègre des dispositifs de protection électronique avancés (protection contre les surtensions, surintensités, etc.).

Il peut également communiquer avec les systèmes de contrôle du réseau (SCADA) afin de garantir sa conformité avec les normes de qualité et de sécurité du réseau électrique.

2.9 Applications générales du SST

D'importants efforts de recherche et de développement ont été consacrés à l'amélioration des performances des SST et à leur intégration dans divers secteurs, notamment :[13]

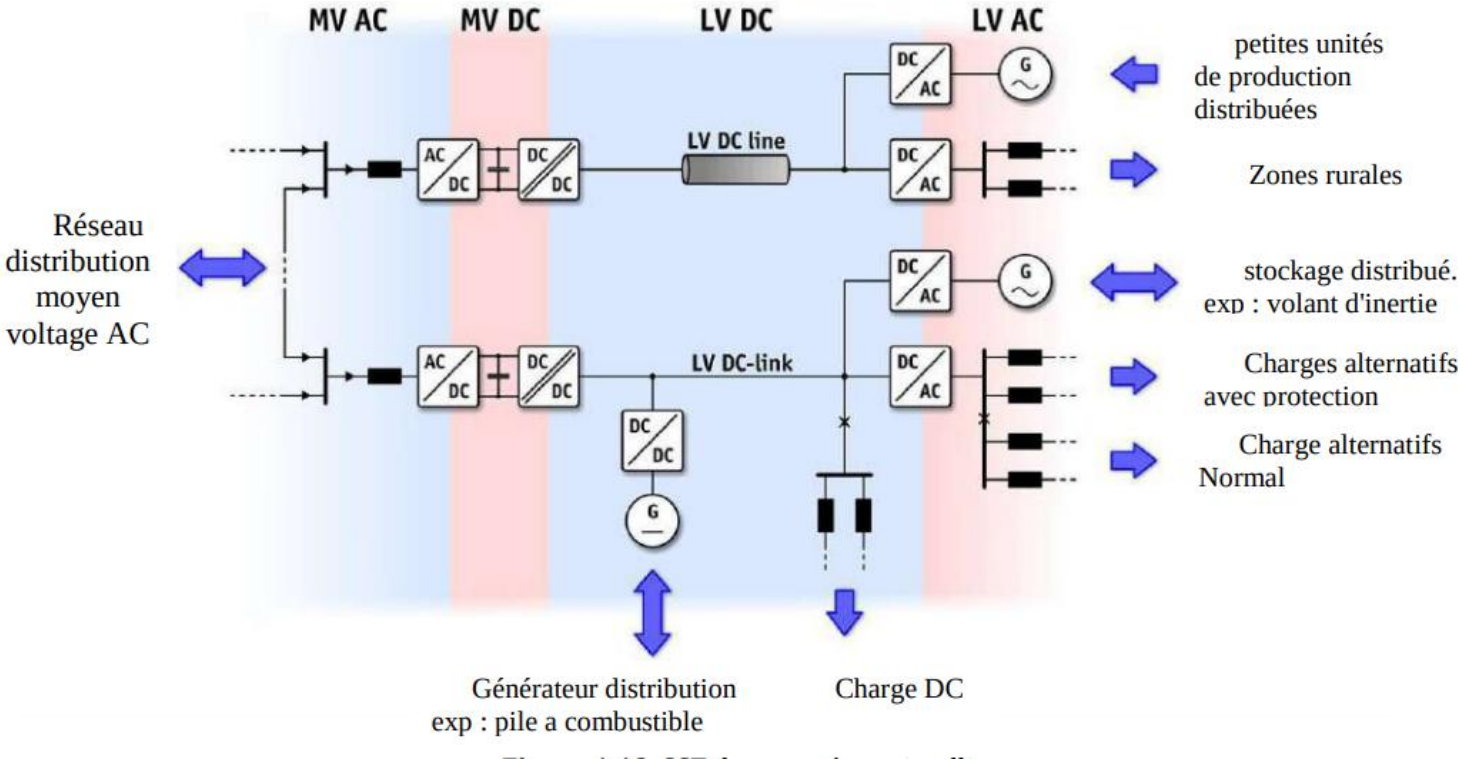
- Le secteur des transports : Utilisation des SST dans les systèmes de traction ferroviaire et les véhicules électriques pour une conversion et une gestion optimisées de l'énergie.
- L'intégration des énergies renouvelables : Facilitation de l'interconnexion des sources d'énergie renouvelable au réseau en améliorant la stabilité et l'efficacité énergétique.
- Les stations de recharge DC : Optimisation des infrastructures de recharge pour véhicules électrique grâce à une meilleure conversion et distribution de l'énergie.
- Les réseaux intelligents (Smart Grid) : Contribution à la modernisation des réseaux électriques en assurant une gestion plus flexible et efficace de l'énergie.

2.9.1 Réseaux intelligent :

Dans les futurs réseaux électriques, l'essor des énergies renouvelables exigera une approche de gestion de l'énergie fondamentalement différente des méthodes traditionnelles. Afin d'assurer une adaptation rapide et

efficace aux variations des charges et des sources,le SST peut être utilisé pour ajuster de manière dynamique la distribution d'énergie dans le réseau (Fig 2.5). Dans ce contexte, sa fonction est

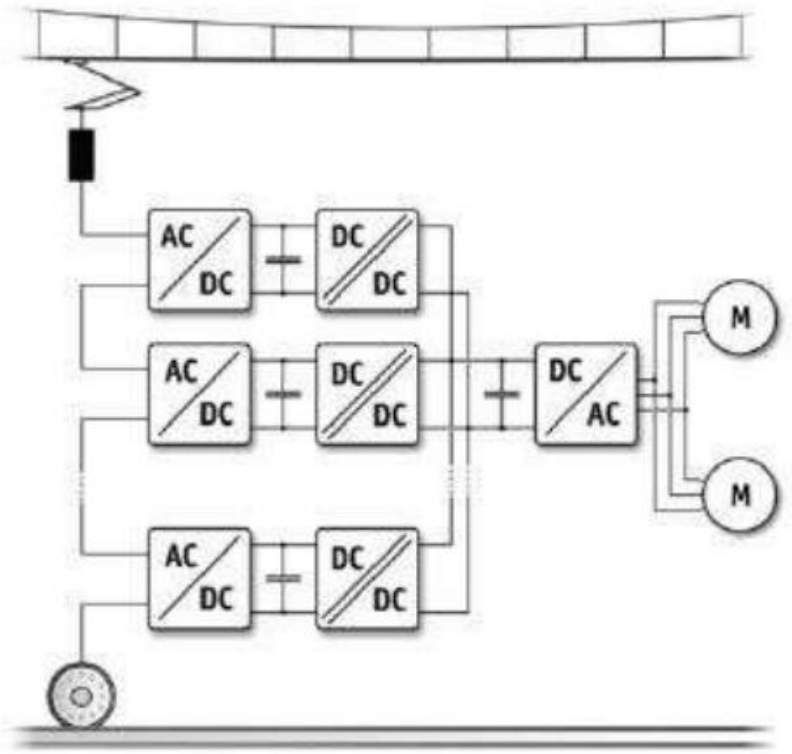
comparable à celle d'un routeur, mais au lieu de gérer des données, il contrôle le flux d'énergie. C'est pour cette raison que le SST est parfois désigné sous le terme de **« routeur d'énergie »**[37].



Fig(2.5) : SST dans un réseau intelligent

2.9.2 Locomotives et autres systèmes de traction :

Le transformateur actuellement utilisé dans les locomotives fonctionne à une fréquence de 16,7 Hz et représente environ **±15 %** du poids total de la locomotive. Le transformateur à semi-conducteurs **(SST)** permet une réduction significative du poids (Fig 2.6). De plus, il contribue à améliorer l'efficacité et à réduire les émissions électromagnétiques **(**CEM**)**, les harmoniques et le bruit acoustique [38].



Fig(2.6) : SST appliqué sur Un locomotif

2.10 Le réseau intelligent comme solution future pour la stabilité [13,36]

Face aux transformations majeures que connaît le secteur de l'énergie, notamment avec l'intégration croissante des sources d'énergies renouvelables telles que le solaire et l'éolien, il devient de plus en plus difficile pour les réseaux électriques traditionnels de maintenir la stabilité du système. Cela s'explique par la nature intermittente et variable de ces sources. Dans ce contexte, le réseau intelligent (Smart Grid) apparaît comme une solution technologique prometteuse, capable d'améliorer l'efficacité, la fiabilité et surtout la stabilité du réseau électrique.

Le réseau intelligent repose sur l'utilisation de technologies numériques avancées, de capteurs, de systèmes de surveillance et de contrôle en temps réel. Ces outils permettent au réseau de réagir rapidement aux variations de tension, de fréquence ou de charge, assurant ainsi une meilleure stabilité.

Cependant, pour atteindre cet objectif, la présence de transformateurs intelligents est essentielle.

Contrairement aux transformateurs traditionnels, les transformateurs intelligents ne se contentent pas de transférer l'énergie, mais jouent un rôle actif dans la surveillance, l'analyse et la régulation du flux électrique. En cas de perturbation ou de variation soudaine, le transformateur intelligent est capable d'agir automatiquement pour ajuster la tension ou rediriger l'énergie, réduisant ainsi les impacts sur le réseau et maintenant sa stabilité.

Ce rôle devient encore plus important avec l'introduction des énergies renouvelables, car les transformateurs intelligents aident à équilibrer la production et la consommation, en gérant les surplus ou les manques d'énergie causés par les changements climatiques (comme la couverture nuageuse ou la variation du vent).

Lorsque ces transformateurs sont intégrés dans un réseau intelligent, la réponse du système devient plus rapide et plus précise. Le réseau collecte et analyse continuellement les données, puis transmet des instructions aux transformateurs pour qu'ils effectuent les ajustements nécessaires, le tout de manière automatique et en temps réel.

Ainsi, l'association entre le réseau intelligent et les transformateurs intelligents constitue une solution efficace et durable aux problèmes d'instabilité dans les réseaux électriques, en particulier dans un avenir où les énergies renouvelables occuperont une place de plus en plus importante.

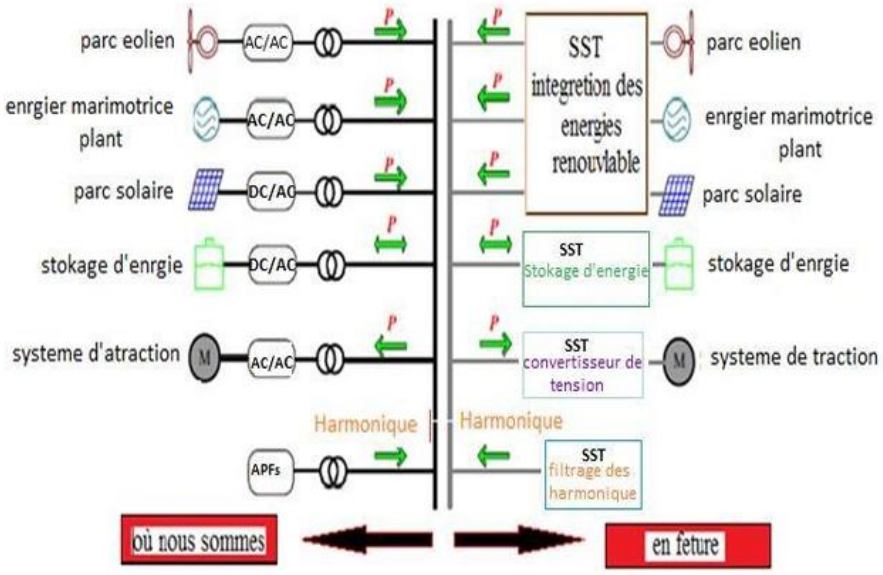


Fig (2.7) : SST dans le réseau électrique intelligent pour intégrer les énergies renouvelables.

2.11 Conclusion

À travers l'étude et l'analyse réalisées dans ce chapitre, il est devenu évident que la stabilité du réseau électrique est l'une des questions fondamentales auxquelles sont confrontés les systèmes électriques modernes. Avec l'augmentation de la demande en énergie et l'expansion de l'utilisation des énergies renouvelables intermittentes telles que l'énergie solaire et éolienne, maintenir la stabilité du réseau est devenu de plus en plus complexe. Par conséquent, les solutions traditionnelles ne suffisent plus pour faire face à ces défis. C'est pourquoi ce chapitre a souligné l'importance d'adopter des technologies avancées telles que les transformateurs intelligents, qui représentent une avancée majeure dans la gestion des réseaux électriques. Les transformateurs intelligents ont prouvé leur capacité à améliorer la stabilité du réseau grâce à leurs technologies avancées,

notamment leur réponse rapide aux pannes, leur capacité à réguler précisément la tension,à réduire les harmoniques nuisibles, ainsi que leur soutien considérable à l'intégration des énergies renouvelables de manière

Sur et efficace. Ces caractéristiques font des transformateurs intelligents bien plus que de simples éléments techniques traditionnels ; ils contribuent de manière significative à renforcer la flexibilité du réseau, améliorer son efficacité et garantir sa pérennité face aux évolutions rapides du secteur énergétique.

Avec l'évolution des technologies des réseaux intelligents, les transformateurs intelligents apparaissent comme une composante essentielle des solutions futures. Les tendances mondiales montrent que les réseaux intelligents seront capables de répondre de manière plus efficace aux défis futurs, notamment l'augmentation de la dépendance aux sources d'énergie renouvelable. Ainsi, les transformateurs intelligents joueront un rôle clé dans la création de réseaux plus durables et flexibles, représentant une étape cruciale vers la réalisation d'une stabilité à long terme et une amélioration continue de l'efficacité opérationnelle du réseau.

Chapitre 03 :

Simulation/matlab de transformateur classique triphasé

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats de la simulation d'un transformateur triphasé abaisseur, modélisé sous MATLAB/Simulink. L'objectif est d'évaluer les performances du transformateur en analysant les grandeurs électriques telles que le courant d'entrée, le courant de sortie et la puissance. Cette étude permet de vérifier le bon fonctionnement du modèle dans des conditions normales d'exploitation.

Dans le cas d'un transformateur **abaisseur**, la tension au secondaire est inférieure à celle du primaire, tandis que le courant augmente proportionnellement (en négligeant les pertes).

Formules fondamentales :

1. **Rapport de transformation** :

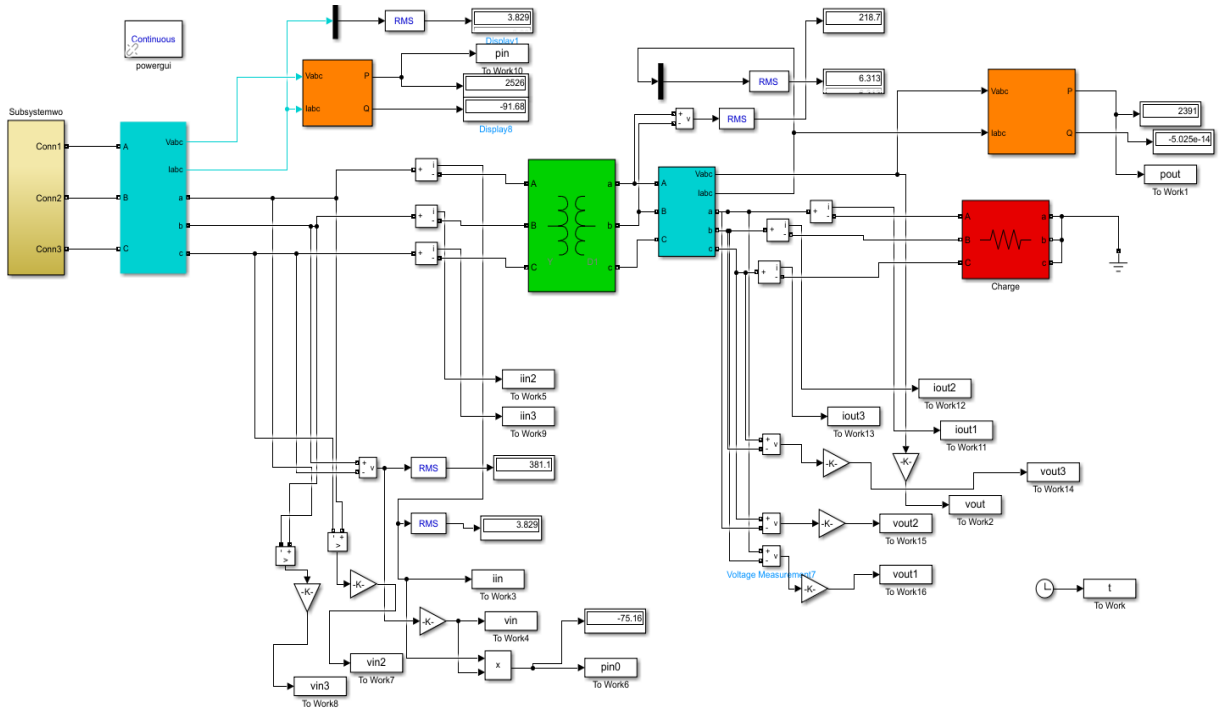
$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

- N_1,N_2: nombre de spires au primaire et secondaire
- V_1,V_2: tension primaire et secondaire
- I_1,I_2: courant primaire et secondaire

3.2 Description du modèle simulé

Le modèle simulé représente un transformateur triphasé abaisseur, dont le couplage est **Étoile/Delta (Y/D1)**. Le modèle a été développé pour convertir une tension d'entrée de **380 V** à une tension de sortie de **220 V**, ce qui correspond à une application typique dans les réseaux de distribution basse tension.

- **Environnement de simulation** : MATLAB/Simulink
- **Type** : Transformateur triphasé abaisseur
- **Fréquence** : 50 Hz
- **Tension d'entrée** : 380 V
- **Tension de sortie** : 220 V
- **Connexion** : Étoile/Delta (Y/D1)



Fig(3.1) : Le modèle du transformateur developpé sur Matlab simulink

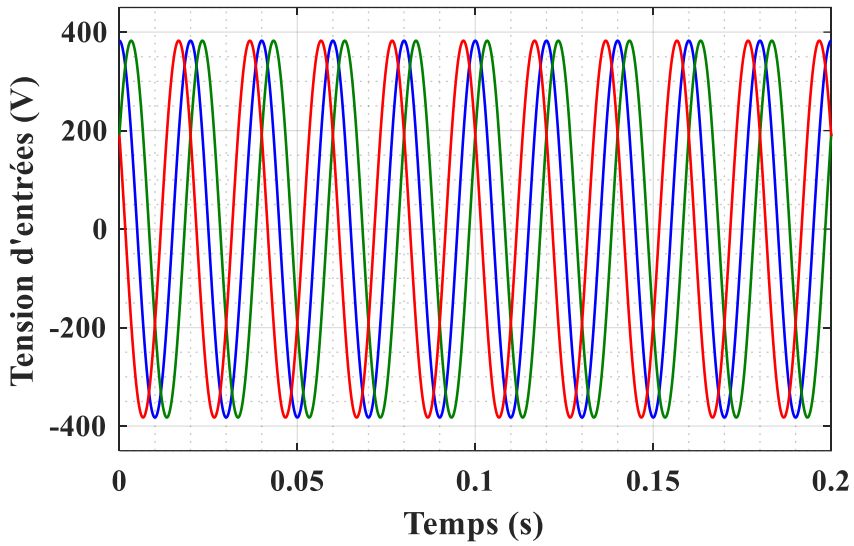
3.3 Résultats de simulation et analyse

3.3.1 Résultats en régime normal

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation obtenus en régime normal de fonctionnement du transformateur.

3.3.1.1 Tension d'entrée

La tension appliquée au primaire du transformateur est de forme sinusoïdale, avec une amplitude stable. Cette onde représente la source alternative alimentant le système. La régularité de la courbe confirme une alimentation saine et adaptée au modèle simulé.



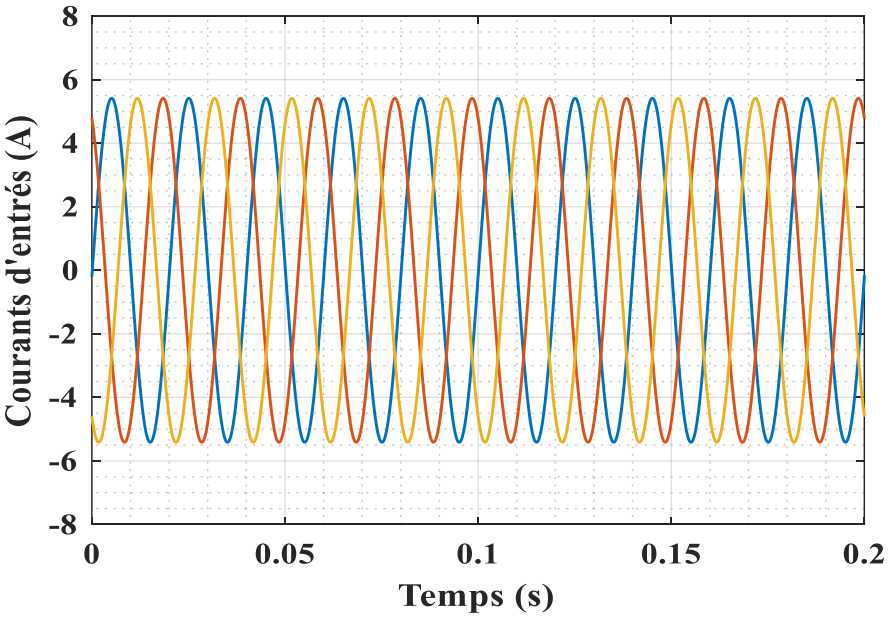
Fig(3.2**) :** Courbe de la tension d'entrée du transformateur

3.3.1.2 Courant d'entrée

D'après les résultats de simulation, le courant mesuré à l'entrée du transformateur est :

$I_{entrée}$= 5,36 A

Il suit également une onde sinusoïdale. La forme du courant est en phase avec la tension, indiquant un facteur de puissance élevé (proche de 1), ce qui traduit un fonctionnement optimal sans surcharge ni déséquilibre apparent.



Fig(3.3**) :** Courbe de le courant d'entrée du transformateur

3.3.1.3 Puissance d'entrée

La courbe de puissance présente une double fréquence caractéristique de la multiplication entre tension et courant sinusoïdaux. Elle illustre clairement les cycles d'alimentation active, avec des pics réguliers. Cette puissance est utilisée pour alimenter la charge secondaire avec un rendement efficace.

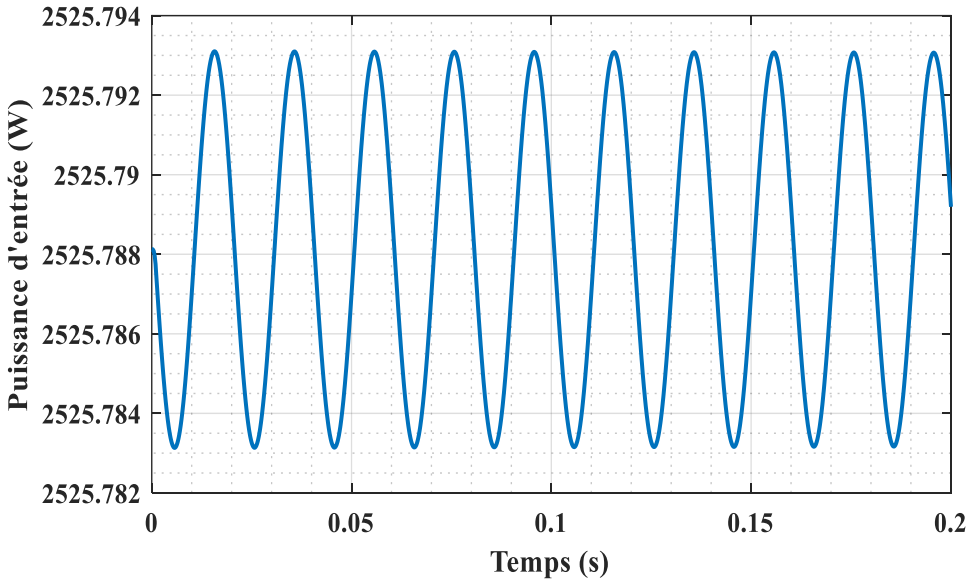
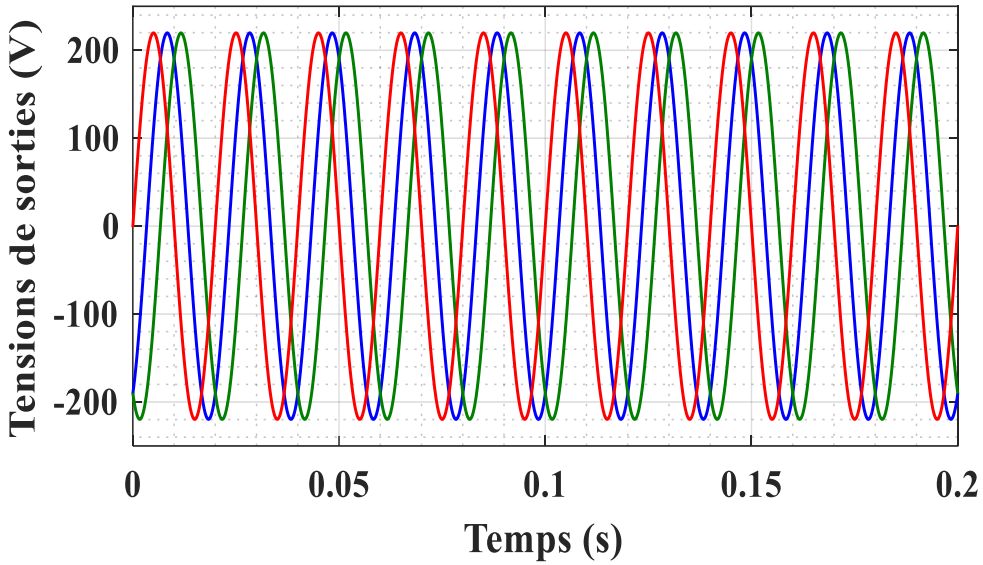


Figure (3.4) **:** Puissance instantanée en entrée du transformateur.

3.3.1.4 Tension de sortie

La tension mesurée au secondaire est inférieure à celle d'entrée, ce qui confirme que le transformateur est de type **abaisseur**. L'onde reste sinusoïdale et régulière, signe d'une conversion sans distorsion notable.

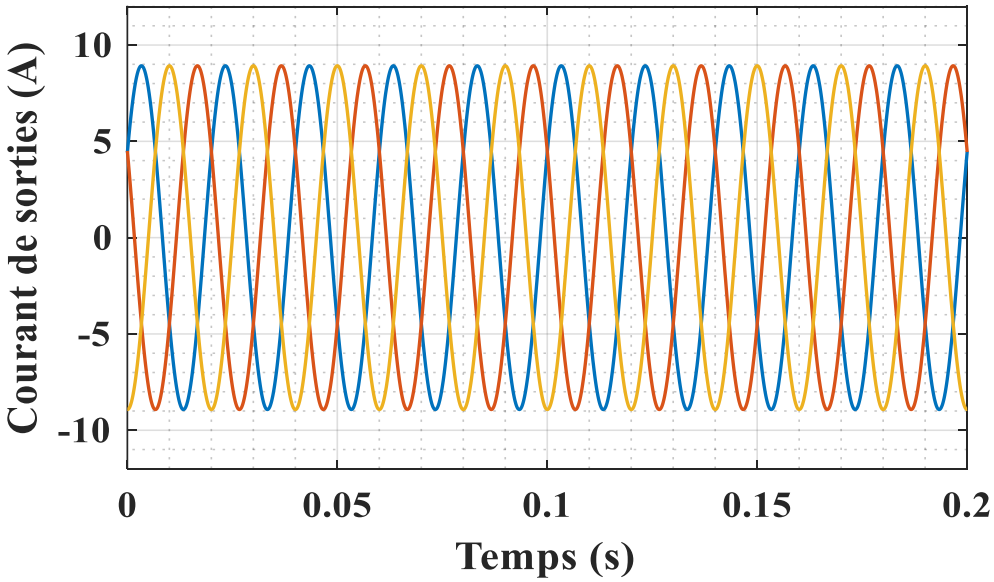


Fig(3.5) : Courbe de la tension de sortie du transformateur

3.3.1.5 courant de sortie

Le courant en sortie atteint environ 8.92 A dans chaque phase. Cette augmentation par rapport au primaire est attendue en raison de la réduction de la tension, et elle est conforme à la conservation de la puissance dans un transformateur triphasé, selon la formule :

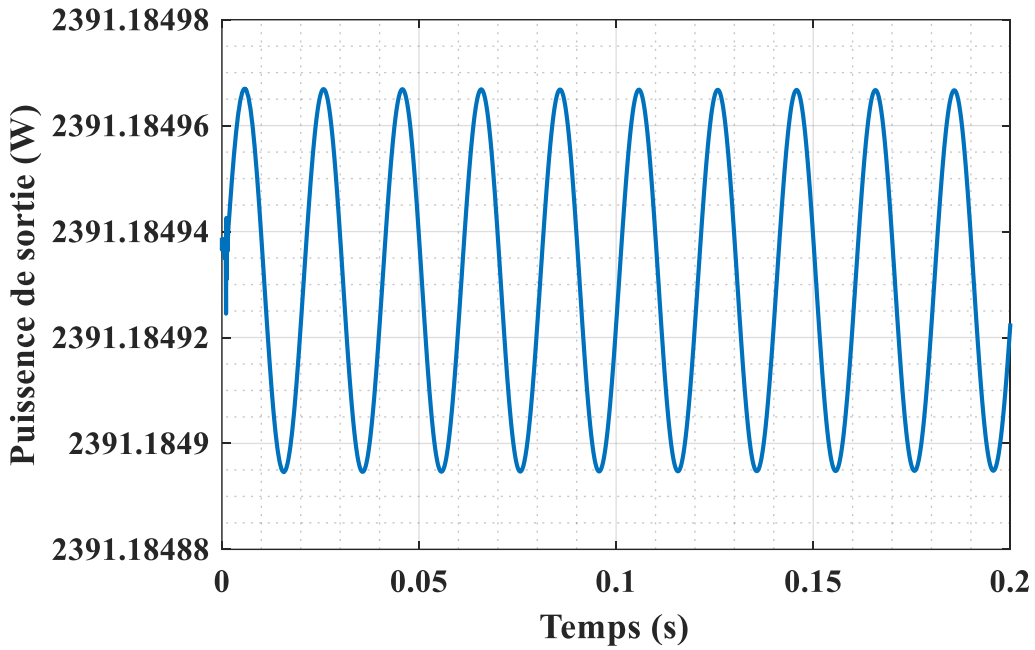
$$P=\sqrt{3}\cdot V\cdot I\cdot \cos\varphi$$



Fig(3.6) : Courbe du courant de sortie du transformateur

3.3.1.6 Puissance de sortie

la puissance délivrée au secondaire présente une dynamique proche de celle de l'entrée,



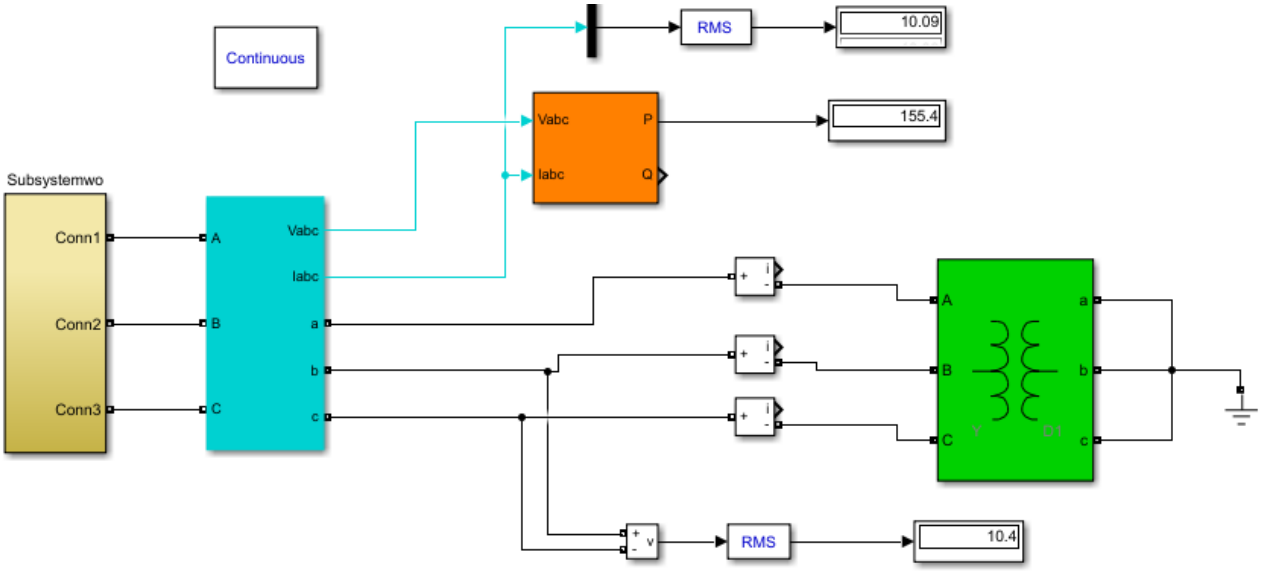
Fig(3.7) : Courbe de la puissance instantanée en sortie

Les résultats obtenus permettent de tirer plusieurs conclusions :

- Le courant de sortie est supérieur à celui d'entrée, ce qui est conforme au fonctionnement d'un transformateur abaisseur.
- Le modèle respecte la relation , en considérant les pertes faibles.
- La stabilité des courants et de la puissance indique que le modèle est fiable pour simuler un comportement réel.
- La simulation permet également d'évaluer des scénarios futurs comme la variation de la charge, l'impact des harmoniques, ou les pertes fer et cuivre.

3.3.2 Test de court-circuit

Pour évaluer la réponse du transformateur à un défaut, un test de court-circuit triphasé a été simulé. Ce test permet d'observer les variations rapides des grandeurs électriques et d'estimer les paramètres internes, notamment l'impédance équivalente

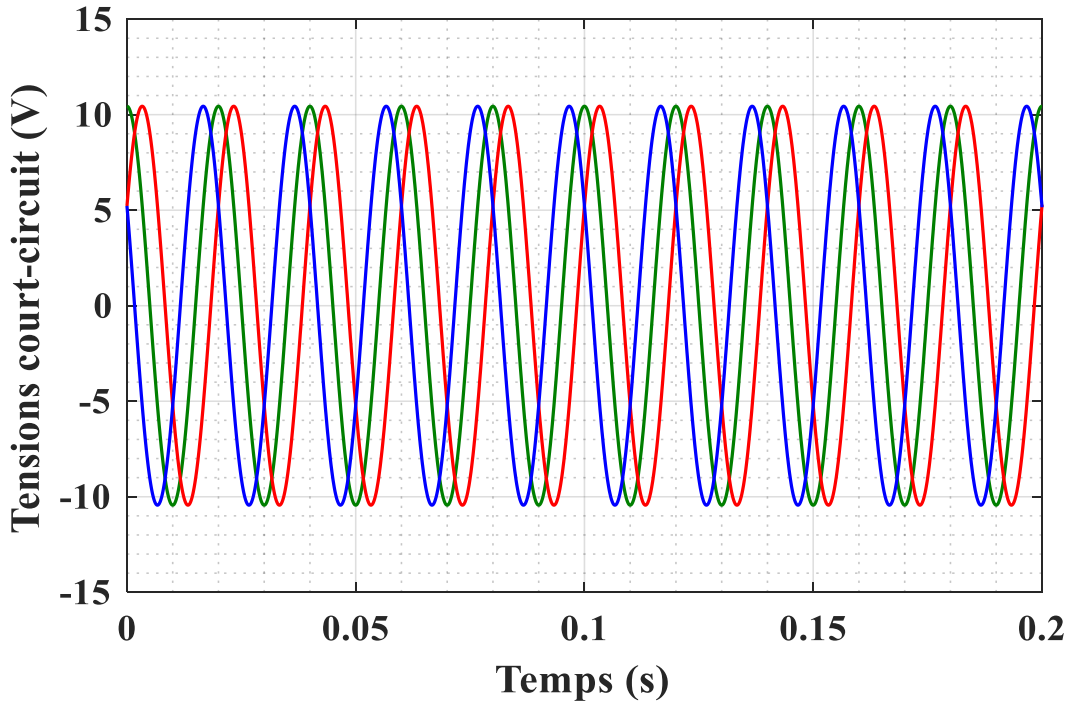


Fig(3.8) : Le modèle du transformateur (Tests de Court-circuit)

3.3.2.1 Tension pendant le court-circuit

Dès l'initiation du court-circuit, la tension chute brutalement à environ 10.4 V dans les trois phases. Cette chute est caractéristique d'un court-circuit triphasé symétrique, et met en évidence la perte quasi instantanée de tension aux bornes de la charge.

$V_{cc}=10.4V$

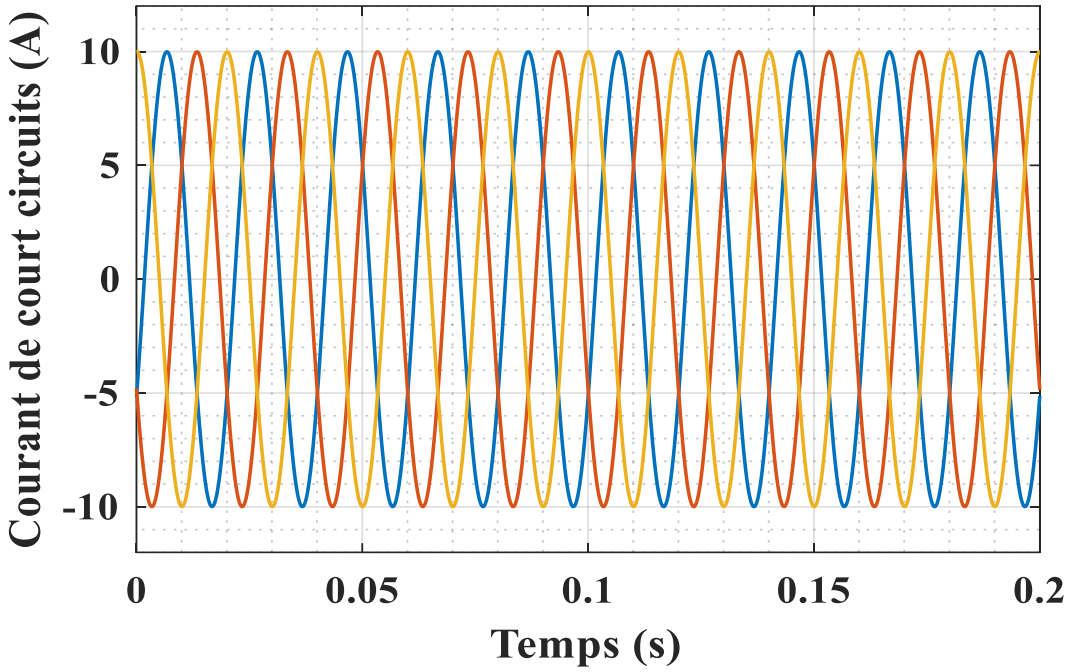


Fig(3.9) : Tension mesurée lors du court-circuit triphasé

3.3.2.2 Courant pendant le court-circuit

Le courant atteint un pic élevé de **10 A** dans chaque phase, immédiatement après le défaut. Ce comportement montre la gravité du court-circuit dans un système triphasé .

I_{cc}=10 A



Fig(3.10) : Courant de court-circuit

La simulation d'un court-circuit triphasé permet d'observer la réaction du transformateur à une situation de défaut grave. L'analyse des résultats montre :

- Chute brutale de la tension (Vcc = 10.4 V) : Lors de l'apparition du court-circuit, la tension aux bornes du secondaire chute rapidement à une valeur très faible. Cette chute traduit une réduction quasi totale de l'impédance vue par la source.
- Montée violente du courant (Icc = 10 A) : En parallèle, le courant augmente instantanément à une valeur élevée, ce qui est typique d'un court-circuit symétrique triphasé. Ce pic représente un danger réel pour les équipements si aucune protection n'est installée.
- Réalisme du modèle : Le comportement dynamique observé est cohérent avec ce qui se produit dans un système réel. Cela montre que la modélisation sous MATLAB/Simulink est

fidèle à la réalité, et peut être utilisée pour tester la réponse du système dans différentes conditions de défaut.

- Importance des dispositifs de protection : Le test souligne la nécessité d'intégrer des disjoncteurs triphasés, des relais de protection, ou d'autres systèmes de coupure rapide, afin d'éviter des dégâts irréversibles au transformateur et au reste du réseau.

3.4 Conclusion

À l'issue de ce chapitre, les résultats de la simulation du transformateur triphasé abaisseur ont permis de valider le bon fonctionnement du modèle développé sous MATLAB/Simulink. Les grandeurs mesurées, notamment les courants d'entrée et de sortie ainsi que la puissance, confirment le rôle du transformateur dans la réduction de la tension tout en augmentant le courant en sortie.

Le couplage Étoile/Delta (Y/D1) utilisé, ainsi que les tensions appliquées (380 V en entrée et 220 V en sortie), ont permis d'obtenir un comportement cohérent avec la théorie. L'analyse des courbes et des valeurs obtenues montre une stabilité du système et un transfert d'énergie efficace, avec des pertes négligeables dans le cadre de la simulation.

Conclusion Générale

Le présent mémoire a permis d'explorer en profondeur le rôle des transformateurs intelligents (Solid-State Transformers - SST) dans la stabilité des réseaux électriques modernes. Dans un contexte de transition énergétique et d'augmentation de l'intégration des sources d'énergie renouvelables, les limites des transformateurs classiques deviennent de plus en plus apparentes. Ces derniers, bien que fiables et robustes, ne sont pas adaptés aux exigences des réseaux intelligents qui nécessitent flexibilité, régulation dynamique et communication en temps réel.

À travers le premier chapitre, une comparaison détaillée entre les transformateurs classiques et intelligents a permis de mettre en lumière les avantages techniques des SST, notamment en termes de compacité, d'efficacité énergétique, de capacité de régulation de tension et de facilité d'intégration dans des systèmes hybrides AC/DC. Le deuxième chapitre a ensuite démontré que les SST jouent un rôle clé dans l'amélioration de la stabilité du réseau, grâce à des fonctions avancées telles que la régulation de tension, le filtrage des harmoniques, l'isolation des défauts et l'adaptabilité face aux fluctuations de charge. Ces caractéristiques sont essentielles pour répondre aux défis liés à la variabilité des énergies renouvelables et à l'augmentation de la consommation électrique.

Enfin, la modélisation et la simulation d'un transformateur triphasé sous MATLAB/Simulink ont permis d'illustrer les comportements électriques d'un transformateur dans différents régimes. Même si cette simulation concerne un transformateur classique, elle constitue une base importante pour une étude comparative future avec un SST.

En conclusion, les transformateurs intelligents représentent une solution d'avenir pour les réseaux électriques. Leur déploiement progressif pourrait contribuer de manière significative à la modernisation du système électrique, à l'amélioration de sa stabilité et à l'atteinte des objectifs de durabilité énergétique.

BIBLIOGRAPHIE

[1] E.Hughes, “Electrical and Electronic Technology (9th ed).pearson Education ”, 2014,pp.345-350.

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

[3] S.Chaouch,cours d’électrotechnique"Transformateur thriphase et monophase”,Université de Batna 2,2023.

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

[5] 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.

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

[7] A.Shiri,“A solid stat et ransformer forinter connection between theme diumand the low voltage grid design,” Master Thesis, Delft University of Technology,Netherlands, October 2013.

[8] S.D. Falcones Zambrano, “A DC-DC multiport converter based solid state transformer integrating distributed generation and storage”, PhD Thesis, ArizonaState University, August 2011.

[9] C.adda,B.rabeh «réalisation d’onduleur a deux niveaux» Mémoire de master, université de Ibn Khaldoun Tiaret 2020.

[10] A.zakariya,D.karim «Etude et simulation d’un onduleur de tension triphasé» mémoire de Master, Université BADJI MOKHTAR ANNABA 2021.

[11] X. She, A. Huang, and R. Burgos, “Review of solidstate transformer technologies anditheir application in power distribution systems,” IEEE Journal of, vol. 1, no. 3, pp. 186-198, 2013.

[12] D. M. O'Neill, A. M. Stankovic, and M. A. Laughton, "Three-Stage Solid-State Transformer: Design and Operation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 2, pp. 1152-1164

[13] H. Shadfar, M. G. Pashakolaei, and A. A. Foroud, “Solid-state transformers: An overview of the concept, topology, and its applications in the smart grid,” International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 31, no. 2, pp,11-24,Jul. 2021.

[14] N. Saju, V. Jegathesan, and K. P. Aiswarya, "Solid State Transformers: An Emerging Trend in Power Quality Improvement," Int. J. Eng. Res. Technol., vol. 13, no. 5, pp. 900–908, 2020.

[15] M.F CHERIF, K.E CHERIF "Calcul Des Protections D'une Ligne De Transport Electrique HTB-220KV" Mémoire Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla. Juin 2014

[16] NOUIOUA Mabrouk, ADOUI Merwan "Protection Des Réseaux Electriques HTB En Utilisant De Relais De Distance", Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Juin2017

[17] LEMDANI Soufiane "Importance Et Nécessité De L'étude De La Compensation Et De Sa Contribution A La Gestion De L'exploitation Des Longues Lignes De Transport A Extra Haut Tension", Mémoire De Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie Mohamed Boudhiaf, Oran, juin 2010

[18] ZAABOUBI Khaled "Pilotage Sous LABVIEW D'un Système De Protection A Max De Courant" Mémoire Master, Université Mohamed khider, Biskra, Juin 2013.

[19] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby ''Power System Stability and Control'' McGraw-Hill Professional, 1994.

[20] Bounouira Adlane, étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques, Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique, Université Constantine I,2014.

[21] B.Abderrahim,M.Mohammed "Etude de stabilité de la tension",Mémoire de Master université de Guelma pp.17-55,2022

[22] M'hammedi Hamid , Amélioration de la stabilité du réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS, Mémoire de magister université d'ADRAR,08 juin 2017**.**

[23] M.Moudjahed , ''Stabilité des réseaux électriques'', Cours polycopié, Master 2, Option Réseaux Electriques, Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2019/2020.

[24] CHOUABBI Moussa, DJEBABLA Mebarek "Etude De La Stabilité Transitoire Du Réseau Est Algérien Avec L'extension Du Poste Berrahal 400 KV", Mémoire Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, Juin 2017.

[25] Rabah BENABID "Optimisation Multi Objectif De La Synthèse Des FACTS Par Les Particules En Essaim Pour Le Contrôle De La Stabilité De Tension Des Réseaux Electriques", Mémoire Master, Université Amar Telidji, Laghouat, septembre 2007.

[26] MOKHNACHE Madiha "Etude De La Stabilité D'une Ferme Eolienne Connectée A Un Réseau Electrique Avec Des Dispositifs FACTS", Mémoire Master, Université Ferhat Abbas, Sétif, Aout 2012.

[27] Rabah Benabid : « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » UAT, Laghouat 2007.

[28] B.Abdelhamid et O.D Lakhdar, '' Etude de la stabilité d'un système électroénergétique par différentes techniques avancées'', mémoire master, Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued, Algérie, 2015.

[29] M.Dupont, "Les perturbations du réseau électrique dues aux énergies renouvelables", Revue d'Ingénierie Électrique, Vol. 12, No. 3, pp. 45-56,2020.

[30] N. Verma, N. Singh, and S. Yadav, "Solid State Transformer for Electrical System: Challenges and Solution," 2018 2nd International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, pp. 693–697,2018.

[31] O. Vodyakho, M. Steurer, C. Edrington, G. Karady, B. Chowdhury, and S. Bhattacharya, "Design of a solid state fault isolation device for implementation in power electronics based distribution systems," in *Proc. 41st North American Power Symposium* ,USA, Oct. 2009.

[32] Intelligent Power Today, "Solid-State Transformer Protection: A Game Changer?", Intelligent Power Today. Available: https://www.intelligent-power-today.com/electrical-protection/transformer-protection/solid-state-protection

[33] F. Fuchs. Ewald, A.S. Mohammad., Masoum, Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Academic Press, 2011.

[34] Ansari M, Gawre S, Gupta S. Solid state transformer with a LC filter for distribution network. Paper presented at: 2017 International Conference on Innovations in Control, Communication and Information Systems (ICICCI),IEEE,pp1-6, 2017.

[35] N. B.Kadandani, A.Isiyaku **,**S.Hassan solid state transformer and challenger of the future grid department oh Electrical and engineering,university of Glasgow,sept 2023.

[36] M.S.Mollik,M.A.Hannan,M.S.Reza "The Advancement of Solid-State Transformer Technology and Its Operation and Control with Power Grids A Review" Department of Electrical & Electronics Engineering, College of Engineering, Universiti Tenaga Nasional, Kajang, Malaysia,2022

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

[38] M. Claessens, D. Dujic, F. Canales, and P. Stefanutti, “Traction transformation,” pp. 1–7.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Sciences et de la Technologie

جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الالية والإلكتروميكانيك

شعبة: طاقات متجددة وبيئة
تخصص: طاقات متجددة وبيئة

غرداية في: 2025/06/03

شهادة ترخيص بالتصحيح والايداع:

انا الاستاذ(ة) : لعميد طاهر
بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ:

Étude De rôle du Transformateur Intelligent (SST) dans la stabilité du réseau électrique

من انجاز الطالب (الطلبة):
- بولفعة أميمة

التي نوقشت/قوبمت بتاريخ : 20ماي2025

اشهد ان الطالب/الطلبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

امضاء المسؤول عن التصحيح لعميد الطاهر
مصادقة رئيس القسم