الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Option : Réseaux Electriques

THEME

Amélioration de la qualité de l'énergie électrique à l'aide d'un dispositif DVR (Dynamic voltage restorer)

Proposé et dirigé par :

Mr. Dine Mohamed

Préparé et présenté par :

Mégateli Ayoub

Barat Oussama

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

Au terme de ce travail, nous adressons nos vifs remerciements à tous nos professeurs de la faculté des sciences et de la technologie qui ont contribué à notre formation.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur monsieur DINE Mohamed d'avoir dirigé ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à monsieur le président de jury et les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font d'avoir assistés à notre soutenance.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A 'mes très chers parents et surtout à ma mère

Qu'elle a beaucoup sacrifie pour moi et qu'elle n'a jamais cessée de m'encourager.

A 'mes frères (ahmed_zouhir_rafik) et toute ma grande famille.

A 'mon binôme : O-barat et sa famille.

Ames amis (Abdeslam –ilyes –sidali-abdesamie-emad-) et mes collègues.

A 'mes amis de la section de

Génie électrique.

Ayoub

Dédicaces

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur

Je dédie aussi ce travail à :

A 'mes frères (Raouf-Mouhamed) et ma petite sœur (Ratil) et toute ma grande famille.

A 'mon binôme : A-megateli et sa famille.

Ames amis (zakaria-abde latif) et mes collègues.

A 'mes amis de la section de

Génie électrique.

oussama

SOMMAIRE GÉNÉRALE

Sommaire générale	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste Des Abréviations	
Remerciements	
Dédicaces	
Introduction Générale----------	**-1-**
Chapitre I : Généralités sur les perturbations dans les réseaux électriques-------	**-3-**
I.1. Introduction----------	**-3-**
I.2. Généralités sur les réseaux électriques----------	**-3-**
I.2.1. Le réseau de transport----------	**-4-**
I.2.2. Le réseau de répartition----------	**-4-**
I.2.3. Le réseau de distribution (HTB-BT) ----------	**-5-**
I.2.3.1. Réseau HTB----------	**-5-**
I.2.3.2. Réseau BT----------	**-5-**
I.3. Stratégie de fonctionnement des réseaux électriques----------	**-5-**
I.3.1. La prévision journalière de la consommation----------	**-6-**
I.3.2. La Maîtrise des transits----------	**-6-**
I.3.3. Le réglage de la fréquence----------	**-6-**
I.3.4. Le réglage de la tension----------	**-7-**
I.3.5. Les protections----------	**-7-**
I.4. Stabilité des réseaux électriques----------	**-7-**
I.4.1. Limite de stabilité en régime permanent----------	**-8-**
I.4.2. La stabilité dynamique----------	**-8-**

I.4.3. La stabilité transitoire----------	**-9-**
I.5. Les perturbations sur les réseaux électriques----------	**-9-**
I.5.1. Creux de tension et coupures brèves----------	**-12-**
I.5.1.1. Définition, origine et conséquences----------	**-12-**
I.5.1.2 Représentation dans le plan complexe----------	**-13-**
I.5.2. Fluctuation de la tension----------	**-14-**
I.5.3. Fluctuation de la fréquence----------	**-14-**
I.5.4. Surtension transitoire----------	**-14-**
I.5.5. Bosse de tension----------	**-15-**
I.5.6. Chute de tension----------	**-15-**
I.5.7. Déséquilibre de tension----------	**-16-**
I.5.8. Perturbations harmoniques----------	**-16-**
I.5.8.1. Harmoniques----------	**-17-**
I.5.8.1.1. Convertisseurs statiques----------	**-17-**
I.5.8.1.2. Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire---	**-18-**
I.5.8.2. Inter-harmoniques----------	**-18-**
I.5.9. Techniques d'amélioration de la qualité de puissance----------	**-19-**
I.6. Conclusion----------	**-19-**
Chapitre II : Les systèmes FACTS----------	**-20-**
II.1. Introduction----------	**-20-**
II.2. Compensations traditionnelles----------	**-21-**
II.2.1. Compensateur synchrone----------	**-21-**
II.2.2. Batteries de condensateurs----------	**-21-**
II.2.2.1. Batteries de condensateurs HT----------	**-21-**
II.2.2.2. Batteries de condensateurs MT----------	**-21-**
II.2.3. Les PSS (Power System Stabiliser) ----------	**-22-**
II.3. Dispositifs FACTS----------	**-22-**
II.3.1. Compensateurs parallèles----------	**-23-**

II.3.1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors----------	**-23-**
a) TCR (Thyristor Controlled Reactor) ----------	**-23-**
b) TSR (Réacteur à Thyristor de Commutation) ----------	**-24-**
c) TSC (Thyristor Switched Capacitor) ----------	**-24-**
d) SVC (Static Var Compensator) ----------	**-25-**
e) TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor) ----------	**-26-**
II.3.1.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors----------	**-27-**
II.3.2. Compensateurs séries----------	**-29-**
II.3.2.1. Compensateurs séries à base de thyristor----------	**-29-**
a) TCSC (thyristor controlled sériés capacitor) ----------	**-29-**
b) TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) ----------	**-30-**
c) TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) ----------	**-30-**
d) TSSR (Thyristor Switched Series Reactor) ----------	**-31-**
II.3.2.2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors----------	**-31-**
a) SSSC (Static Synchronous Series Compensator) ----------	**-31-**
II.3.3. Compensateurs hybrides (série - parallèle) ----------	**-32-**
II.3.3.1. Compensateurs hybrides à base de thyristors----------	**-32-**
a) TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) ----------	**-32-**
II.3.3.2. Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors----------	**-34-**
a) IPFC (Interline Power Flow Controller) ----------	**-34-**
b) UPFC (Unified Power Flow Controller) ----------	**-34-**
II.3.4. HVDC (High-Voltage Direct-Current) ----------	**-36-**
II.4. Apports et Avantages des dispositifs FACTS----------	**-38-**
II.5. Conclusion----------	**-38-**
Chapitre III : Etude théorique d'un DVR----------	**-39-**
III.1. Introduction----------	**-39-**
III.2. Besoins de DVR au marché----------	**-40-**
III.2.1. Possibilité de compensation des creux de tension----------	**-40-**

III.2.2. Fiabilité et disponibilité----------	**-40-**
III.2.3. Pertes d'énergie----------	**-40-**
III.2.4. Commande et protection----------	**-41-**
III.2.5. Harmoniques----------	**-41-**
III.2.6. Surveillance----------	**-41-**
III.3. Description générale d'un DVR----------	**-41-**
III.3.1. Circuit de commande----------	**-42-**
III.3.2. Convertisseur de source de tension VSC----------	**-43-**
III.3.3. Système de stockage d'énergie----------	**-44-**
III.3.3.1. Source d'énergie indépendante----------	**-45-**
III.3.3.2. Source d'énergie dépendant de la charge protégée----------	**-45-**
III.3.4. Système de filtrage----------	**-46-**
III.3.5. Transformateur d'injection----------	**-47-**
III.4. Principe de fonctionnement d'un DVR----------	**-48-**
III.4.1. Modélisation de DVR----------	**-49-**
III.4.2. Les modes de fonctionnement d'un DVR----------	**-50-**
III.4.2.1. Mode de protection----------	**-51-**
III.4.2.2. Mode veille (VDVR= 0) ----------	**-51-**
III.4.2.3. Mode Injection / Boost (VDVR>0) ----------	**-52-**
III.5. Stratégie de commande----------	**-52-**
III.5.1. La méthode de compensation au pré-défaut----------	**-52-**
III.5.2. La méthode de compensation dans la phase----------	**-53-**
III.5.3. La méthode de la compensation par l'avancement de phase--------	**-53-**
III.6. Conclusion----------	**-54-**
Chapitre IV : Simulation et Interprétation des Résultats----------	**-55-**
IV.1. Introduction----------	**-55-**
IV.2. Description du réseau étudié----------	**-55-**
IV.3. Système de commande----------	**-56-**

IV.4. Essais et simulations----------	**-57-**
IV.4.1. Simulation sans défaut sans DVR----------	**-57-**
IV.4.2. Simulation avec défaut sans DVR----------	**-58-**
a) Défaut monophasé (phase A) ----------	**-59-**
b) Défaut biphasé (phases A et phases B) ----------	**-60-**
c) Défaut biphasé (phases A, phases B et phases C) ----------	**-60-**
IV.4.3. Simulation des défauts avec DVR----------	**-61-**
a) Défaut monophasé----------	**-62-**
b) Défaut biphasé----------	**-62-**
c) Défaut triphasé----------	**-63-**
IV.4.4. Simulation de surcharge sans DVR----------	**-64-**
IV.4.5. Simulation de surcharge avec DVR----------	**-65-**
IV.5. Conclusion----------	**-67-**
Conclusion Générale----------	**-68-**

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les perturbations dans les réseaux électriques

Figure I.1 : Puissance transmissible en fonction α----------	**-9-**
Figure I.2 : Amplitude d'un creux de tension provoqué par a)Un court-circuit, b)Le démarrage d'un moteur de forte puissance----------	**-12-**
Figure I.3 : Creux de tension (a) et sa signature dans le plan complexe (b)----------	**-13-**
Figure I.4 : Fluctuation de la tension----------	**-14-**
Figure I.5 : Surtension transitoire----------	**-15**
Figure I.6 : Déséquilibre de tension----------	**-16-**
Figure I.7 : Représentation temporelle d'une distorsion harmonique (harmonique de rang 5) --	**-17-**

Chapitre II : Les systèmes FACTS

Figure II.1 : Schéma du TCR----------	**-24-**
Figure II.2 : Schéma du TSC----------	**-24-**
Figure II.3 : Le SVC----------	**-25-**
Figure II.4 : Caractéristique d'un SVC----------	**-26-**
Figure II.5 : Schéma du SVC et TCBR----------	**-26-**
Figure II.6 : Schéma de base d'un STATCOM----------	**-27-**
Figure II.7 : Diagramme vectoriel de STATCOM----------	**-28-**
Figure II.8 : Topologie du condensateur série contrôler par un thyristor (TSSC)----------	**-29-**
Figure II.9 : Le TSSC----------	**-30-**
Figure II.10 : Structure du TCSR----------	**-31-**
Figure II.11 : Schéma de base du SSSC----------	**-31-**
Figure II.12 : Caractéristique statique du SSSC----------	**-32-**
Figure II.13 : Schéma du TCPAR----------	**-33-**
Figure II.14 : Diagramme vectoriel du TCPAR----------	**-33-**
Figure II.15 : Schéma de base de l'IPFC----------	**-34-**
Figure II.16 : Schéma de base de l'UPFC----------	**-35-**

Figure II.17 : Schéma de principe d'une liaison en courant continu----------	**-36-**

Chapitre III : Etude théorique d'un DVR

Figure III.1 : Schéma simplifié d'un Restaurateur Dynamique de tension----------	**-42-**
Figure III.2 : Contrôleur PI----------	**-43-**
Figure III.3 : Représentation schématique d'un VSC----------	**-44-**
Figure III.4 : Convertisseur reliant deux sources de nature complémentaires----------	**-44-**
Figure III.5 : Alimentation indépendante, a) Par génératrice, b) Par des batteries----------	**-45-**
Figure III.6 : Alimentation à partir de la ligne de la charge protégée----------	**-46-**
Figure III.7 : Schéma d'emplacement d'un filtre passe-bas----------	**-46-**
Figure III.8 : Schéma d'emplacement de transformateur d'injection----------	**-47-**
Figure III.9 : schéma simplifié de la tension injecté par le DVR dans le système d'alimentation----------	**-48-**
Figure III.10 : (a) Schéma typique d'un DVR, (b) son circuit équivalent----------	**-50-**
Figure III.11 : Mode de protection (création d'un autre chemin pour le courant) ----------	**-51-**
Figure III.12 : diagramme vectoriel de la compensation au pré-défaut----------	**-51-**
Figure III.13 : diagramme vectoriel de la compensation au pré-défaut----------	**-52-**
Figure III.14 : diagramme vectoriel de la compensation dans la phase----------	**-53-**
Figure III.15 : diagramme vectoriel de la compensation par la méthode d'avancement de phase----------	**-54-**

Chapitre IV : Simulation et Interprétation des Résultats

Figure IV.1 : Schéma du réseau à étudier----------	**-56-**
Figure IV.2 : Schéma de commande----------	**-57-**
Figure IV.3 : Schéma du réseau sans défaut sans DVR----------	**-57-**
Figure IV.4 : Résultat de la simulation sans défaut----------	**-58-**
Figure IV.5 : Schéma du réseau avec un bloc de défaut----------	**-59-**
Figure IV.6 : Défaut monophasé (A)----------	**-59-**
Figure IV.7 : Défaut biphasé (A-B) ----------	**-60-**
Figure IV.8 : Défaut triphasé (A-B-C) ----------	**-60-**

Figure IV.9 : Schéma du réseau avec DVR----------	**-61-**
Figure IV.10 : Défaut monophasé (phase A) ----------	**-62-**
Figure IV.11 : Défaut biphasé (phases A-B) ----------	**-63-**
Figure IV.12 : Défaut triphasé (A-B-C) ----------	**-63-**
Figure IV.13 : Schéma du réseau de surcharge----------	**-64-**
Figure IV.14 : Cas de surcharge----------	**-65-**
Figure IV.15 : Schéma du réseau de surcharge avec DVR----------	**-66-**
Figure IV.16 : Surcharge avec et sans DVR----------	**-67-**

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Vue d'ensemble des principales perturbations électrique----------	**-11-**
Tableau II.1 : Le rôle de chaque type de FACTS----------	**-37-**

Liste des abréviations

D-STATCOM: Distribution-Static Compensator
DVR: Dynamic Voltage Restore
FACTS: Flexible alternating current transmission Systems
PSS: Power System Stabiliser
GTO: Gate Tum Off thyristor
IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor
TCR: Thyristor Controlled Reactor
TSR: Réacteur à Thyristor de Commutation
TSC: Thyristor Switched Capacitor
SVC: Static Var Compensator
TCBR: Thyristor Control Breaking Resistor
STATCOM: Static Compensator
STATCON: Static Condenser
ASVC: Advanced Static Var Compensator
SVG: Static Var Generator
TCSC: Thyristor controlled séries capacitor
TSSC: Thyristor Switched Series Capacitor
TCSR: Thyristor Controlled Series Reactor
TSSR: Thyristor Switched Series Reactor
SSSC: Static Synchronous Series Compensator
TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator

IPFC: Interline Power Flow Controller
UPFC: Unified Power Flow Controller
HVDC: High-Voltage Direct-Current

ملخص

تعد جودة الطاقة أحد الشواغل الرئيسية لمورد الكهرباء في العصر الحالي. لقد أصبح من المهم خاصة مع إدخال أجهزة متطورة، التي يكون أداءها شديد الحساسية لجودة مزود الطاقة. مشكلة جودة الطاقة هي حدث يتجلى في شكل اضطرابات مختلفة مثل انخفاض جهد وعدم الاتزان في الجهد وتشويه الإشارة وتقلبات الجهد وتغيرات التردد. لحل هذه المشكلة يتم استخدام الأجهزة المخصصة. أحد هذه الأجهزة هو منظم الجهد الديناميكي (DVR) والذي يعتبر من أكثر الأجهزة الحديثة كفاءة المستخدمة في شبكات توزيع الطاقة.

سيركز هذا المشروع النهائي على كيفية تنظيم منظم الجهد الديناميكي (DVR) للجهد من أجل الحفاظ على توازنه وثباته في القيمة المقدرة في النظام. أظهرت المحاكاة باستخدام برنامج ما تلاب / سيمولينك أن منظم الجهد الديناميكي (DVR) يوفر فرصا أفضل نسبيا للسيطرة على الجهد بالانزعاج في شبكات التوزيع، بغض النظر عن قيمة انخفاض الجهد.

Résume

La qualité de l'énergie est l'une des principales préoccupations du fournisseur d’énergie électrique à l'ère actuelle. Elle est devenue importante, en particulier, avec l'introduction d'appareils sophistiqués, dont les performances sont très sensibles à la qualité de l'alimentation. Le problème de qualité de puissance est un événement qui se manifeste sous la forme de diverses perturbations telles que la chute de tension déséquilibre de tension, distorsion du signal, fluctuations de la tension et variations de fréquence. Pour résoudre ce problème, des dispositifs personnalisés sont utilisés. L'un de ces appareils est le restaurateur dynamique de tension (DVR), qui est considérer permet les dispositifs moderne les plus efficace utilisé dans les réseaux de distribution d'énergie.

Ce projet de fin d’étude se concentrera sur la façon dont le DVR peut réguler la tension afin de la maintenir équilibrée et constante à la valeur nominale dans le système. Les simulations effectuées à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink ont prouvé que le DVR fournit des possibilités relativement meilleures de réglage de la tension perturbée dans les réseaux de distribution, quelle que soit la valeur de la chute de tension.

Abstract

Energy quality is one of the main concerns of the electricity supplier in the current era. It has become important, in particular, with the introduction of sophisticated devices, whose performance is very sensitive to the quality of the power supply. The power quality problem is an event that manifests itself in the form of various disturbances such as voltage drop, voltage imbalance, signal distortion, voltage fluctuations and frequency variations. To solve this problem, custom devices are used. One of these devices is the Dynamic Voltage Restorer (DVR), which is considering allows the most efficient modern devices used in energy distribution networks.

This end-of-study project will focus on how the DVR can regulate voltage in order to keep it balanced and consistent at face value in the system. Simulations using the MATLAB/Simulink software have shown that the DVR provides relatively better possibilities for adjusting disturbed voltage in distribution networks, regardless of the value of the voltage drop.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les systèmes de l'alimentation électrique sont des réseaux complexes qui ont des centaines de stations de production, des milliers de centres de charge et des réseaux de distribution qui sont reliés ensemble par des longues lignes de transport d'énergie. Le souci principal des consommateurs à des divers centres de charge où ils sont situés c'est la qualité et la fiabilité d'énergie. Idéalement, les systèmes de distribution d'énergie devraient fournir aux clients une énergie non interrompue d'une tension sinusoïdale en l'amplitude et rigide en fréquence. Cependant, dans la pratique, et particulièrement les systèmes de distribution ont des nombreuses charges non linéaires qui affectent de manière significative la pureté de la forme d'onde des tensions et la perte de l'alimentation électrique. Ceci produit beaucoup de problèmes de qualité d'énergie des charges critiques et sensibles.

Les exigences croissantes qu'impose l'industrie à la qualité de l'énergie électrique ainsi que la diversification de cette même qualité, amenée par la libération du marché de l'électricité ont provoqué un besoin de dispositifs qui, par leur garantie d'une qualité supérieure de la tension d'alimentation, prémunissent les charges sensibles contre pannes et arrêts de production.

Une des solutions possibles pour faire face à ces problèmes est l'utilisation de composants FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems, ou système de transmission Flexible à courant alternatif) qui peuvent contribuer à atténuer les problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides, ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

Plusieurs types de FACTS, différents sur les plans architectural et technologique, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont le SVC (Compensateur statique de l'énergie réactive), le TCSC (compensateur série contrôlé par Thyristor), le STATCOM (compensateur Synchrone statique), UPFC (Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance), IPFC (Contrôleur de flux de puissance d'interligne) et SSSC (Compensateur série synchrone statique), et DVR (restaurateur dynamique de tension). Chacun de ces dispositifs possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. Le choix du dispositif approprié est donc essentiel et dépend des objectifs à atteindre.

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier l'utilité d'un DVR dans les systèmes de distribution électrique pour protéger les charges critiques et sensibles contre les différentes perturbations affectant la tension d'alimentation.

Pour cela, notre étude est organisée comme suite :

Le premier sera consacré à la présentation des différents types de perturbation, leurs origines, leurs conséquences sur les équipements des réseaux électriques.

Dans le 2ème chapitre, nous présentons une bref description des nouvelles technologies des compensateurs basés sur les composants de l'électronique de puissance dits *«FACTS »*.

Dans le 3ème chapitre, nous présentons une étude théorique sur le DVR.

Et dans le 4ème et dernier chapitre nous présentons nos simulations et nous discutons les résultats trouvés.

Enfin, une conclusion générale clôturera ce mémoire.

CHAPITRE I :

Généralités sur les perturbations dans les réseaux électriques

Chapitre I : Généralités sur les perturbations dans les réseaux électriques

I.1. Introduction :

Les réseaux électriques sont des systèmes dynamiques complexes. Ils doivent faire face à des variations, parfois brusques, des tensions et des courants.

Ces changements sont dus aux diverses perturbations causées par l'ensemble des charges non linéaires connectées, d'une part, et à tous les incidents divers qui peuvent survenir sur le réseau, d'autre part.

Avec une utilisation croissante des composants semi-conducteurs de puissance chez la plupart des utilisateurs, les réseaux électriques sont pollués par des courants harmoniques importants.

Ces courants causent des effets néfastes sur le mode de fonctionnement normal du réseau ou des dispositifs raccordés, sans compter les pertes économiques engendrées.

Ce chapitre est consacré à la présentation des différents problèmes liés aux harmoniques entre autres, et il est organisé de la manière suivante : dans un premier temps nous présenterons les perturbations principales, en particulier les harmoniques de tension et de courant.

I.2. Généralités sur les réseaux électriques :

Il ne suffit pas de produire l'énergie électrique dans les centrales, il faut aussi l'amener jusqu'à l'utilisateur final (industriels ou particuliers), cet acheminement se fait via les réseaux électriques. Pour assurer la qualité de ces réseaux, il est nécessaire de coordonner l'utilisation de matériels (câbles, lignes, appareillages, transformateurs, etc.) avec une bonne gestion de la transmission de l'information [04,03].

La structure électrique d'un pays est généralement décomposée en plusieurs niveaux correspondant à différents réseaux électriques. Il est à noter qu'il n'existe pas une structure unique à travers le monde, et que le découpage en plusieurs réseaux avec les niveaux de tension associés peut être différent selon les pays [04].

On distingue trois types des réseaux :

I.2.1. Le réseau de transport :

La dispersion géographique entre les lieux de production et les centres de consommation, l'irrégularité de cette consommation et l'impossibilité de stocker l'énergie électrique nécessitent un réseau électrique capable de la transporter sur de grandes distances et de la diriger à travers des lignes. Ses lignes atteignent des milliers de kilomètres, par exemple 11 000 km pour le réseau 400kV.

La finalité de ce réseau est :

- Une fonction de « transport » dont le but est d'acheminer l'électricité des centrales de production aux grandes zones de consommation.
- Une fonction « d'interconnexion nationale » qui gère la répartition de l'offre en orientant la production en fonction de la répartition géographique et temporelle de la demande.
- Une fonction « d'interconnexion internationale » pour gérer des flux d'énergie entre les pays en fonction d'échanges programmés ou à titre de secours.

La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien. Les tensions sont généralement comprises entre 225 et 400 kV, quelques fois 800 kV (ex : 765 kV en Afrique du sud) [04].

I.2.2. Le réseau de répartition :

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation. Ces centres de consommation sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution HTB.
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HTA.

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 25 kV et 275 kV [04].

I.2.3. Le réseau de distribution (HTB-BT) :

I.2.3.1. Réseau HTB :

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de moyenne consommation (supérieure à 250 KVA). Ces points de consommation sont :

- Soit du domaine public, avec accès aux postes de distribution publique HTB/BT.
- Soit du domaine privé, avec accès aux postes de livraison aux abonnés à moyenne consommation.

La structure est de type aérien ou souterrain. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre quelques kilovolts et 40 kV [04].

I.2.3.2. Réseau BT :

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTB aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique [04].

Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 100 et 440 V.

I.3. Stratégie de fonctionnement des réseaux électriques :

Les grands réseaux électriques interconnectés fonctionnent à partir d'une stratégie particulière qui consiste à assurer à la fois l'équilibre « production/consommation » et la sûreté des systèmes (c'est-à-dire leur immunité par rapport aux avaries communes et aux variations globales de la consommation).Cette stratégie est basée sur un ensemble de réaction précise, en réponse aux fluctuations de la fréquence et des tensions qui sont les conséquences des évolutions de la consommation et de l'apparition de défaut [05].

De façon assez simplifiée, il est possible de classer les différents principes de fonctionnement des réseaux en plusieurs points particulier :

- La prévision journalière de la consommation.
- La maîtrise des transits.
- Le réglage de la fréquence.
- Le réglage des tensions.
- Les protections.

I.3.1. La prévision journalière de la consommation :

De façon à mobiliser, chaque jour, un ensemble suffisant de moyen de production, les exploitants des réseaux électriques s'appuient sur des prévisions de consommation. Ces prévisions journalières sont réalisées par des services spécialisés, en concordance avec des données météorologiques, les statistiques et enregistrements de consommation.

I.3.2. La Maîtrise des transits :

Les réseaux électriques permettant d'acheminer l'ensemble de puissances active et réactive, depuis les groups de production vers les lieus de consommation. Le terme « transit » représente la répartition de ces puissances sur les lignes (ou encore la répartition des courants associée). La répartition des transites dépende de façon prépondérante de [03] :

- La configuration du réseau à un instante t.
- Les impédances des lignes et câbles en service à l'instante t.
- Les échanges internationaux (interconnexion commerciale) à chaque instant t.
- Les emplacements des moyens de compensation à l'instante t.

I.3.3. Le réglage de la fréquence :

Sur les grands réseaux interconnectés la fréquence est gérée de telle manière à être quasiment constante malgré les fluctuations de consommation. La constante de la fréquence signifie une adaptation constante du niveau de production à la demande des charges [03,05].

Pour se faire, il existe trois moyens d'action :

- Le réglage primaire de la fréquence consiste à des régulations rapides des vitesses des alternateurs permettant de rattraper en « temps réel » les excursions de fréquence.
- Le réglage secondaire consiste, après la contre réaction rapide produite par le réglage primaire, en une action plus fin sur l'écart résiduel de la fréquence, associée au rétablissement des échanges liés à l'interconnexion.
- Il est possible que les réglages précédents ne permettant pas d'atteindre la fréquence de référence. Pour éviter que cela puisse se reproduire, il est nécessaire de disposer d'une puissance de réserve, c'est -à-dire de- prévoir la mobilisation de moyens de production (ou de consommation) de pointe pouvant opérer très rapidement. C'est ce qui constitue le « réglage tertiaire ».

I.3.4. Le réglage de la tension :

Si la fréquence est uniforme sur les réseaux électriques, les tensions associées aux différents niveaux normalisés constituent en réalité des grandeurs tout à fait « locales ». La présence des impédances des lignes, des câbles, des transformateurs qui forment les ouvrages de transport imposent des chutes de tension qui dépendent principalement des puissances réactives qui transitent sur les lignes. Pourtant, il est nécessaire de garantir le fait que les différentes tensions évoluent dans des plages assez restreintes (environ ± 5% autour des valeurs nominales) afin d'assurer :

- La sûreté du fonctionnement du réseau, en particulier par rapport au phénomène d'écroulement de tension.
- Le respect des plages de tension contractuelle.
- Le respect des plages de tension propre aux différents appareillages.
- La minimisation des pertes, une moindre sensibilité à la puissance réactive ainsi que l'optimisation des puissances maximales transmissible.

Le réglage des tensions est en réalité réparti sur tous les niveaux de tension qui constituent le réseau [05].

I.3.5. Les protections :

Les protections sont constituées de l'ensemble des disjoncteurs et des organes de coupure permettant d'interrompre l'alimentation d'un organe lors d'un défaut d'isolement ou de surcharge [03].

I.4. Stabilité des réseaux électriques :

Un système est stable s'il a tendance à continuer à fonctionner dans son mode normal (celui pour lequel il a été conçu) en régime permanent et s'il a tendance à revenir à son mode de fonctionnent à la suite d'une perturbation. Une perturbation sur un réseau peut être une manœuvre prévue, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou non prévue comme un court-circuit causé par la foudre entre une phase et la terre par exemple [06].

Lors de la perturbation, l'amplitude de la tension aux différentes barres du réseau peut varier ainsi que la fréquence. La variation de la fréquence est due aux variations de la vitesse des rotors des alternateurs. Un réseau d'énergie électrique est stable s'il est capable, en régime permanent à la suite d'une perturbation, de fournir la puissance qu'exigent les consommateurs tout en maintenant constantes et prés des valeurs nominales de la fréquence, donc la vitesse de rotation des alternateurs, et l'amplitude de la tension aux différents barres du réseau [07].

On définit trois types de stabilité :

- La limite de stabilité en régime permanent.
- La stabilité dynamique.
- La stabilité transitoire.

I.4.1. Limite de stabilité en régime permanent :

Soit un alternateur connecté sur un réseau qui alimente une charge par l'intermédiaire des lignes de transport. Si la charge augmente graduellement, suffisamment lentement pour maintenir le système en régime permanent, l'alternateur fournit la puissance requise par la charge tout en maintenant sa vitesse de rotation constante [06].

Toutefois, il existe une limite de puissance active qui peut être fournie à la charge de façon stable, c'est-à-dire en maintenant constante la vitesse de rotation de l'alternateur. Si, à partir de cette limite, on veut fournir encore plus de puissance à la charge, en ouvrant les vannes d'amenée d'eau d'une turbine par exemple, l'impédance de la machine et celle des lignes limitent le transfert de puissance à la charge [06].

L'excès de puissance est absorbée par l'alternateur ce qui provoque l'accélération de son rotor. Il y a donc rupture de la stabilité en régime permanent. Dans le cas où plusieurs alternateurs sont en service sur le réseau, il y a une perte de synchronisme entre eux. La puissance maximale que le groupe d'alternateurs peut fournir à la charge tout en maintenant le synchronisme est appelée la limite de stabilité en régime permanent [06].

Dans le but d'avoir une bonne marge de manœuvre en cas de perturbations, les alternateurs et les lignes sont conçu de façon à opérer, en régime permanent nominal, à un niveau de puissance inférieur à cette limite de stabilité en régime permanent.

I.4.2. La stabilité dynamique :

Si une perturbation mineure est effectuée sur le réseau, à partir d'un régime permanent stable, et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal en régime permanent, le réseau est dit dynamiquement stable. Pour un réseau d'énergie électrique, on entend par perturbation mineure des manœuvres ou des opérations normales sur le réseau, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou des variations mineures de la charge [06].

I.4.3. La stabilité transitoire :

Lorsqu'il y a une perturbation majeure sur le réseau et que le réseau retrouve son mode de fonctionnement normal après la perturbation, alors le réseau est dit transitoirement stable. Les perturbations majeures sont les courts-circuits, les pertes de lignes, les bris d'équipements majeurs comme les transformateurs de puissance et les alternateurs [07].

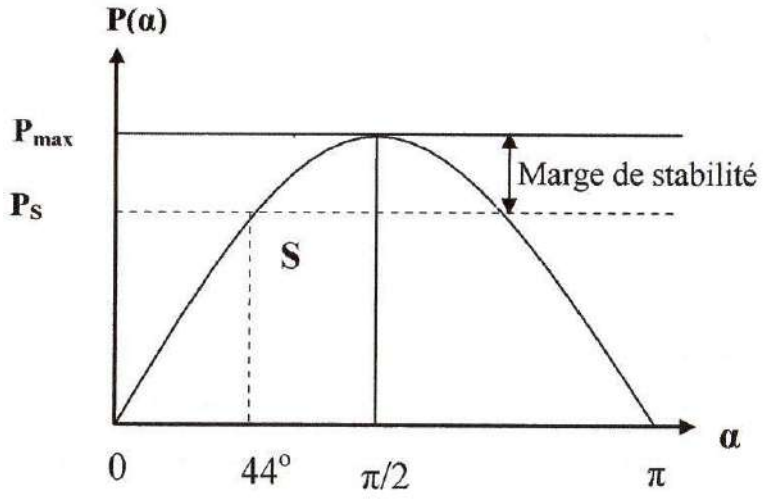


Figure I.1 : Puissance transmissible en fonction α.

I.5. Les perturbations sur les réseaux électriques :

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques [08] :

- les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker),
- les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter harmoniques, bruits),
- la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée :

- les perturbations transitoires,
- les perturbations de courte durée,
- les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi période de la fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.

Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

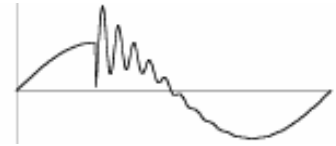
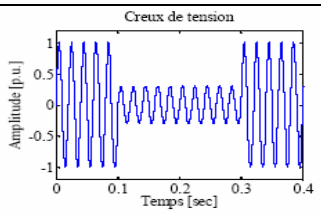
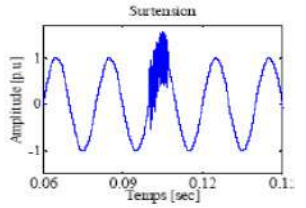
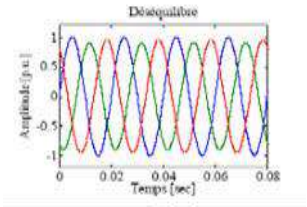
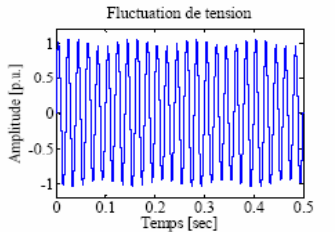
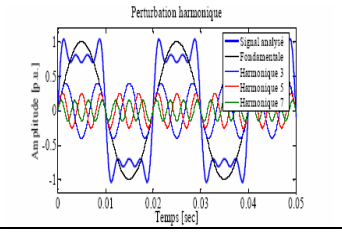
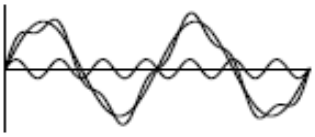
- les défauts au sein des réseaux électriques,
- la présence de charges non linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, …),
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Le **Tableau I.1** récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la tension est également indiquée en pu (per units) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude.

Tableau I.1 : Vue D'ensemble Des Principales Perturbations Electriques.

Types de Perturbations		Amplitude	Origine	Conséquence
Transitoires) (impulsions et oscillations		-	Déclenchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutations.	Dysfonctionnemens gênants.
Creux de tension		0.1-0.9 pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs.	Arrêts d'équipement, pertes de production.
Coupures brèves		<0.1 pu	Courts-circuits	Arrêts d'équipement, pertes de production.
Surtensions		1.1-1.8 pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes.	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels
Déséquilibre		-	Charges asymétriques ou monophasées.	Echauffements des machines tournantes, vibrations
Fluctuation de tension		0.1-7%	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
Harmoniques		0-20%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels.
Inter harmoniques		0-2%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
Variations de la fréquence		-	Déséquilibres entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

I.5.1. Creux de tension et coupures brèves :

I.5.1.1. Définition, origine et conséquences :

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min.

Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min.

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (voir **Figure I.2a**). Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale.

Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (voir **Figure I.2b**).

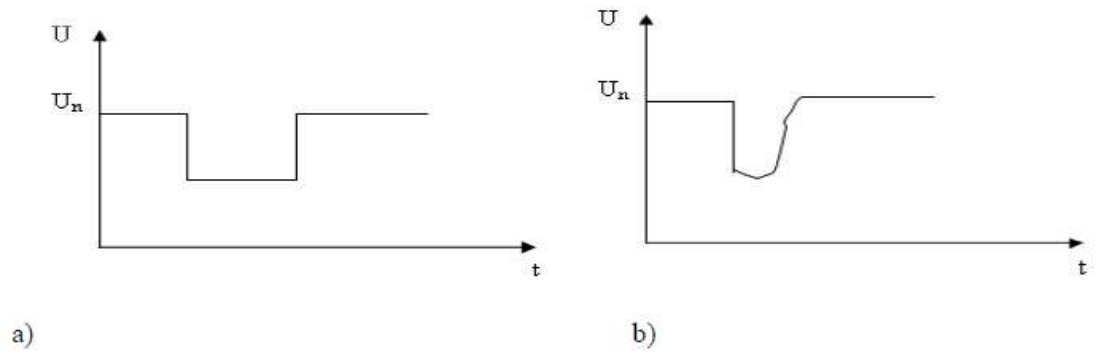


Figure I.2 : Amplitude d'un creux de tension provoqué par

a) un court-circuit

b) le démarrage d'un moteur de forte puissance.

Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.

Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.

I.5.1.2 Représentation dans le plan complexe :

Les creux de tension monophasés se caractérisent principalement par leur amplitude et leur phase.

L'amplitude des creux de tension est liée à leur proximité par rapport au défaut, la nature du défaut et la puissance de court-circuit du réseau. La durée du creux de tension est liée au temps d'élimination du court-circuit par les protections du réseau ou des installations raccordées.

En plus de la durée et de l'amplitude, les creux de tension triphasés se caractérisent par le déphasage entre les tensions de phase qui dépend de la nature et de l'endroit du défaut.

Les creux de tension triphasés sont souvent analysés dans le plan complexe, où les trois grandeurs sont représentées sous forme des vecteurs caractérisés par leur amplitude et leur phase, appelés également phaseurs. La relation entre les phaseurs dans le plan complexe est appelée signature ou type du creux de tension. Par exemple, le creux de tension de figure I.3a se caractérise par la signature présentée en **Figure I.3b.**

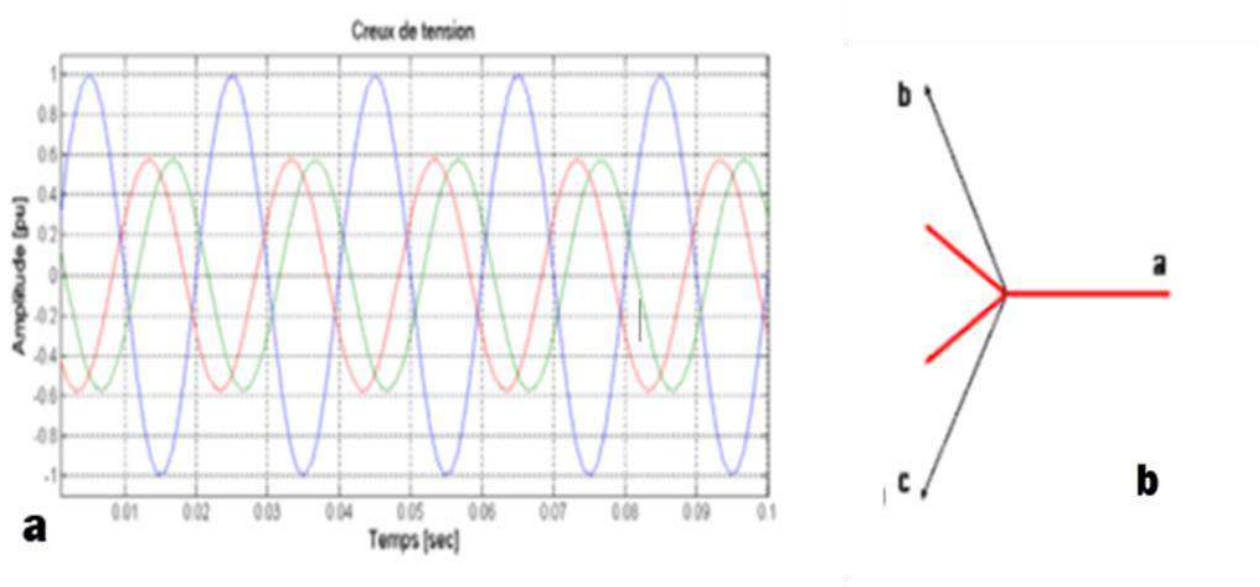


Figure I.3 : Creux de tension (a) et sa signature dans le plan complexe (b)

I.5.2. Fluctuation de la tension :

Fluctuation lente de la tension est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10% (**Figure.I.4**). La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0,5 et 25 Hz.

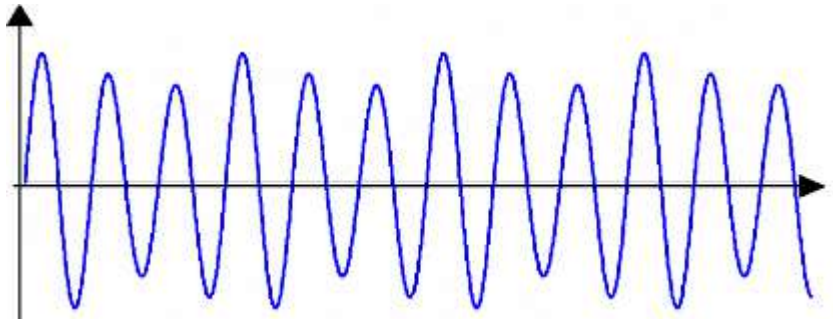


Figure I.4 : Fluctuation de la tension.

Le phénomène est provoqué par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, …etc.

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent [07,09].

I.5.3. Fluctuation de la fréquence :

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz ±1% [08].

I.5.4. Surtension transitoire :

Les surtensions transitoires illustrées (**Figure I.5**) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde. Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants/tensions transitoires [07].

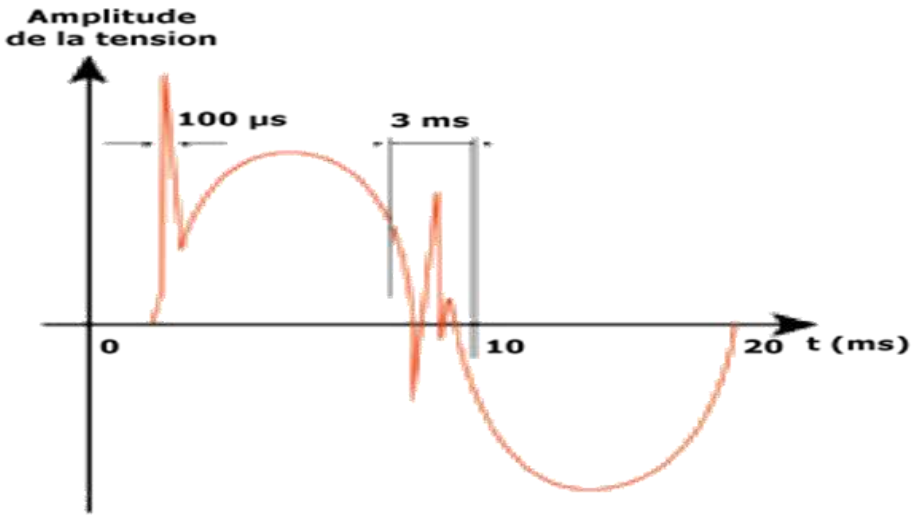


Figure I.5 : Surtension transitoire

Les surtensions sont de trois natures [03] :

- Les surtensions à la fréquence industrielle prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre.
- Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau.
- Les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

I.5.5. Bosse de tension :

La bosse de tension est une augmentation de la tension au dessus de la tension nominale 1.1 p.u pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants [08].

I.5.6. Chute de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

Le fait que la tension ne soit pas identique en tout point du réseau, il faut que cette différence soit compensée par des réglages de tension réalisés dans les postes de transformation, cela permet de garantir que la tension reste dans la plage admissible en tout point de livraison [10].

I.5.7. Déséquilibre de tension :

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau **(Figure I.6)**. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [07].

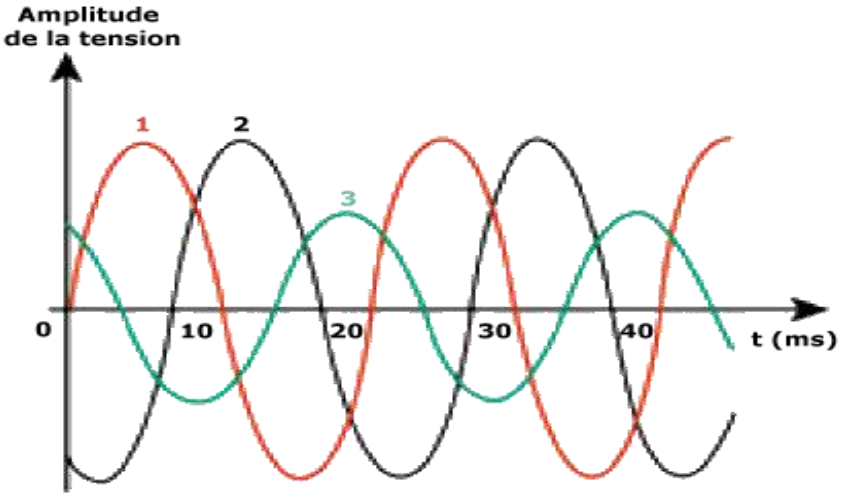


Figure I.6 : Déséquilibre de tension.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120°.

I.5.8 Perturbations harmoniques :

Les composantes sinusoïdales d'un signal de fréquences multiples de sa fréquence fondamentale s'appellent harmoniques. L'harmonique de fréquence $kf0$, où $f0$ est la fréquence fondamentale et k est un nombre réel positif est dit de rang k.

Les composantes sinusoïdales dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence fondamentale du signal sont nommées les inter-harmoniques.

Les composantes sinusoïdales, dont la fréquence est inférieure à la fréquence fondamentale sont appelées infra-harmoniques.

Les perturbations harmoniques sont dues à l'insertion au réseau des charges non linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, etc.). Les harmoniques provoquent des échauffements qui, à terme,

diminuent la durée de vie des équipements. Ils peuvent également être à l'origine de troubles fonctionnels (synchronisation, commutation) et d'erreurs de mesure.

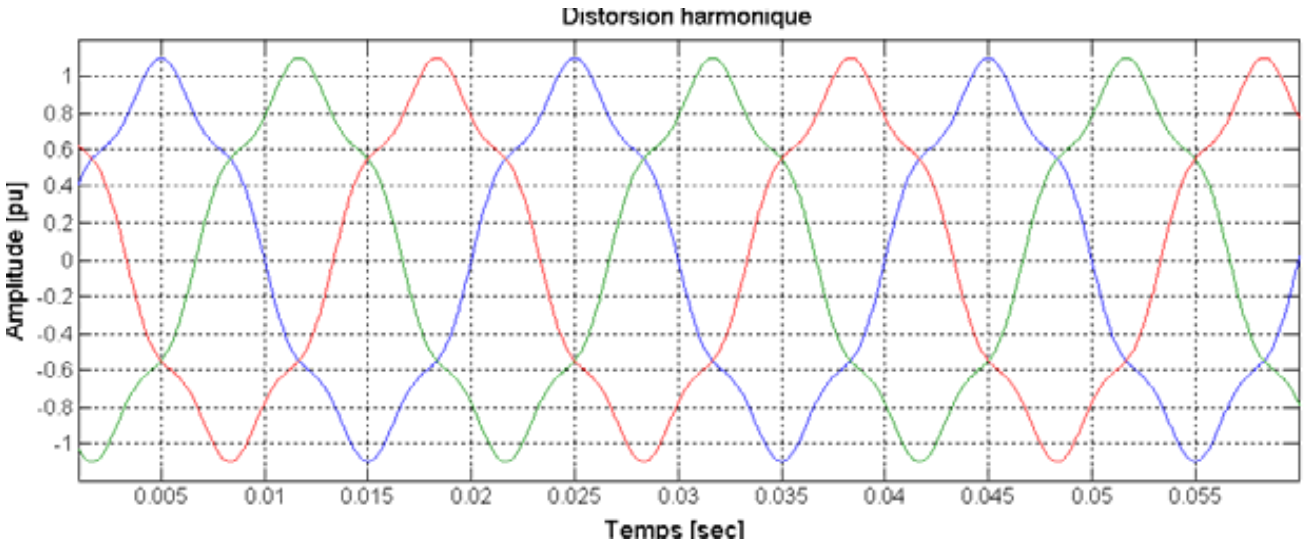


Figure I.7 : Représentation temporelle d'une distorsion harmonique (harmonique de rang 5).

I.5.8.1. Harmoniques :

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.) [11].

I.5.8.1.1. Convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée. Un redresseur commandé en pleine onde de p pulsations engendre, du côté continu, des harmoniques de rang pn, (n=1, 2,3…) et du côté alternatif, des harmoniques de rang $pn \pm 1$. Un redresseur commandé en MLI synchrone engendre des harmoniques de rang pair du côté continu et de rang impair du côté alternatif, si l'indice de modulation $m = fMLI / f0$ est impair et des harmoniques pairs et impairs de deux côtés si m est pair.

- Les cyclo convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif. Ils génèrent des spectres complexes, généralement riches en fréquences et dépendant de leur structure et de leur commande.

- Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.

Les gradateurs génèrent des harmoniques dont l'amplitude et la phase dépendent de l'angle d'allumage des thyristors.

I.5.8.1.2. Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire :

Parmi les dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire on distingue :

- Les fours à arc. Les fours à arc sont connectés directement au réseau de transmission, généralement sans recours à un filtrage adéquat. Leur impédance varie de manière aléatoire et elle est particulièrement asymétrique. Par ailleurs les fours à arc génèrent des harmoniques de toutes les fréquences, ainsi que des inter-harmoniques dont les amplitudes dépassent nettement le bruit de fond.

- Les inductances saturées. De telles inductances ont leur impédance en fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de ce fait provoquent par contre-réaction des déformations notables de ce courant.

- Les transformateurs. A cause de leur caractéristique tension-courant non linéaire, les transformateurs génèrent des harmoniques qui dépendent sensiblement de l'amplitude et de la forme de la tension d'alimentation.

- Les machines tournantes. Elles engendrent des harmoniques d'amplitudes souvent négligeables. Les petites machines synchrones sont toutefois génératrices de tensions harmoniques de rang 3.

I.5.8.2. Inter-harmoniques :

L'analyse harmonique des courants et des tensions nous indique qu'en plus des harmoniques de rang entier, il existe des inter-harmoniques. Ceux-ci ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande.

Les inter-harmoniques ont principalement pour origine :

- les imperfections du convertisseur et de sa commande (chutes de tension dans les thyristors, variation ou inégalité des angles de commutation, variation de l'impédance vue du côté continu du redresseur [Car-99]),

- l'association de plusieurs convertisseurs fonctionnant à des fréquences différentes : variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif [Bon-00, Ros-02],

- les convertisseurs statiques de commande non périodique,

- les fours à arc et les cyclo-convertisseurs.

I.5.9. Techniques d'amélioration de la qualité de puissance :

Les charges non linéaires génèrent des courants harmoniques qui peuvent se propager vers plusieurs emplacements dans le système d'alimentation et revenir finalement à la source. Par conséquent, la propagation du courant harmonique crée des tensions harmoniques dans tous les systèmes d'alimentation.

De nombreuses techniques d'atténuation ont été proposées et mises en œuvre pour maintenir les tensions et courants harmoniques dans les niveaux recommandés telles que :

1. Conception de matériel de haute qualité
2. Utilisation de ligne ou transformateur dédié
3. Choix optimale de l'emplacement et du calibre des banques de condensateurs
4. L'élimination des harmoniques par l'utilisation des filtres électriques (passifs, actifs, hybrides) et des périphériques d'alimentation personnalisés tels que le DVR et le DSTATCOM.

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons traité les différentes perturbations qui peuvent subir les réseaux électriques et leurs conséquences sur les équipements électroniques, électriques et électrotechniques, tel que les perturbations magnétiques et électriques d'origine naturelles ou artificielles. Une attention particulière est portée aux perturbations les plus gênantes et les plus communément rencontrées, c'est-à-dire les creux de tension, les coupures brèves, les variations de tension et les harmoniques.

CHAPITRE II :

Les systèmes FACTS

CHAPITREII : Les systèmes FACTS

II.1. Introduction :

L'un des problèmes les plus importants lors de l'étude d'un réseau d'énergie électrique (R.E.E) complexe, est celui de sa stabilité. Ceci est dû au développement important des réseaux ces dernières années, mais aussi à l'objectif de ce type d'étude qui est d'examiner le comportement du réseau face à des faibles ou importantes perturbations. Les variations continues de charge sont un exemple de petites perturbations, les défauts comme les courts- circuits et la perte de synchronisme d'un générateur de forte puissance sont des exemples de grandes perturbations [03].

L'amélioration des systèmes de courant alternatif existants augmenterait de manière significative avec l'utilisation des compensateurs réactifs électroniquement commandés extrêmement rapides qui ont été développés dans le cadre des systèmes flexibles de transmission à courant alternatif « alternative current A.C ». Cette nouvelle génération de compensateurs est appelée FACTS : « flexible alternating current transmission System ».

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes, leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. Les FACTS peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant la stabilité des réseaux. Ils peuvent être classés en trois catégories [03] :

- Les compensateurs parallèles.
- Les compensateurs séries.
- Les compensateurs hybrides (série - parallèle).

Dans ce chapitre nous présenterons ces compensateurs en général afin d'envisager leurs applications pour améliorer la stabilité des réseaux électriques.

II.2. Compensations traditionnelles :

II.2.1. Compensateur synchrone :

Les compensateurs synchrones sont des moteurs synchrones tournant à vide, dont l'excitation est réglée pour fournir ou absorber la puissance réactive qui permet, par son transit en un point du réseau, d'ajuster la tension de ce point.

Avec les performances dynamiques qu'exige un haut niveau de sûreté du réseau, les compensateurs synchrones sont des moyens d'actions privilégiés.

Très employés en France dans les années 1950 et 1960, les compensateurs ont été délaissés ensuite au profit des condensateurs qui sont devenus plus compétitifs par suite des progrès techniques réalisés dans les films diélectriques très minces.

Les compensateurs synchrones ont toutefois conservé un rôle important dans les pays à lignes longues et peu maillées où, en plus d'un programme d'échange d'énergie réactive, ils assurent le maintien de la stabilité dynamique par leurs caractéristiques mieux adaptées à ce rôle que celles des condensateurs (inertie, réactance transitoire faible, régulation rapide d'excitation). Ils sont encore utilisés aux États-Unis, au Canada, en Russie et au Brésil où ils ont atteint, vers 1975, environ 10 % de la puissance apparente du réseau, mais, même dans ces pays, ils sont progressivement supplantés par les compensateurs statiques.

II.2.2. Batteries de condensateurs :

Elles ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive fixe consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels [12] :

II.2.2.1. Batteries de condensateurs HT :

Ces batteries raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT compensent les pertes réactives sur les réseaux HT et THT et les charge. Leur puissance est de 20 à 30MVAR.

II.2.2.2. Batteries de condensateurs MT :

Raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT et THT/MT, elles compensent l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport.

Ces batteries sont fractionnées en gradins de 2.4 ou 3 MVAR (selon la puissance du transformateur HT/MT). Chaque gradin commandé séparément est dimensionné pour limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barre MT au moment de la manœuvre d'un gradin [12].

II.2.3. Les PSS (Power System Stabiliser) :

La structure du stabilisateur de puissance est une structure classique qui consiste en un gain, un filtre passe-haut et un ou plusieurs blocs de compensation de phase. Ces Stabilisateurs de puissance sont un moyen efficace et économique d'amélioration de la stabilité dynamique d'un système électrique.

Un choix adéquat des paramètres des PSS engendre un bon amortissement des oscillations induites par les perturbations et améliore la stabilité de l'ensemble du système [12].

II.3. Dispositifs FACTS :

"FACTS" est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT...), Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

Ces équipements contrôlent dynamiquement ensemble ou séparément les différents paramètres du réseau : tension, impédance, la phase du réseau….

Ils sont utilisés pour améliorer, d'une façon générale les performances d'un réseau (stabilité, capacité de transport...) Les FACTS (abréviation anglaise de *Flexible AC Transmission Systems*), sont définis comme suit :

Ceux sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance. Ils peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettant un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions crées par des variations rapides de la demande de puissance

réactive et ainsi d'augmenter les productions. Il existe trois types de FACTS :

Les dispositifs parallèles : appelés aussi compensateurs de puissance réactive (par le contrôle du flux de puissance réactive dans la ligne), ils permettent de maintenir la tension du réseau au point de connexion dans une plage bien déterminée pour le bon fonctionnement du réseau.

Les dispositifs séries : où compensateurs d'impédance, par l'ajustement de l'impédance de la ligne, ce type de dispositifs, est capable de contrôler le transit de puissance active dans la ligne.

Les dispositifs hybrides (série - parallèle) : Ces compensateurs modifient la répartition des puissances active et réactive, sur une ligne en changeant seulement son angle électrique de transport.

II.3.1. Compensateurs parallèles :

La compensation shunt est utilisée pour soulager les lignes existent, augmenter la puissance transmise durant le régime statique et contrôle la tension le long de la ligne.

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable.

Cette injection de courant modifie les puissances réactives et actives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont [03] :

II.3.1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors :

Il s'agit de :

a. TCR (Thyristor Controlled Reactor) :

Est formé d'une inductance shunt reliée à la ligne et deux thyristors montée en tète bêche **Figure II.1**. La valeur efficace de la réactance est changée d'une façon continue par la commande de la valeur de l'angle d'amorçage du thyristor. Le courant dans l'inductance peut être commandé de son maximum à zéro en réglant l'angle d'amorçages de thyristor. Pour un angle d'amorçage est égale à 90°, l'amplitude de courant est à sont maximum, et pour un angle d'amorçage de 180°, l'amplitude est minimale [13].

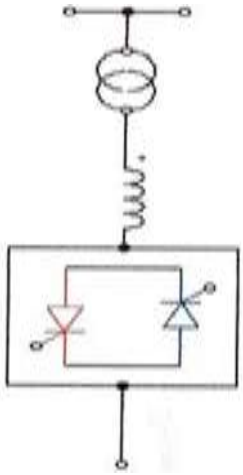


Figure II.1 : Schéma du TCR.

b. TSR (Réacteur à Thyristor de Commutation) :

Est défini comme : une inductance et un thyristor commuté reliant en shunt dont la réactance efficace est changée d'une façon par étapes à pleine fonctionnement ou à zéro conduction de la valve de thyristor [14].

c. TSC (Thyristor Switched Capacitor):

Le condensateur commuté par thyristors TSC est composé d'un condensateur fixe C branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle **Figure II.2** [13].

Le condensateur n'est ainsi pas commandé en phase, mais simplement enclenché et déclenché [13].

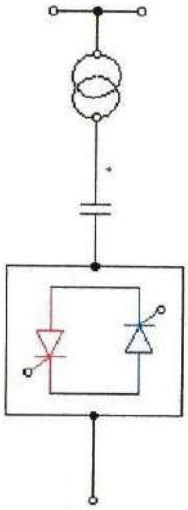


Figure II.2 : Schéma du TSC.

d. SVC (Static Var Compensator) :

L'association des dispositifs TCR, TSC, et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) (**Figure II.3**) dont le premier exemple a été installé en 1979 en Afrique du Sud [13].

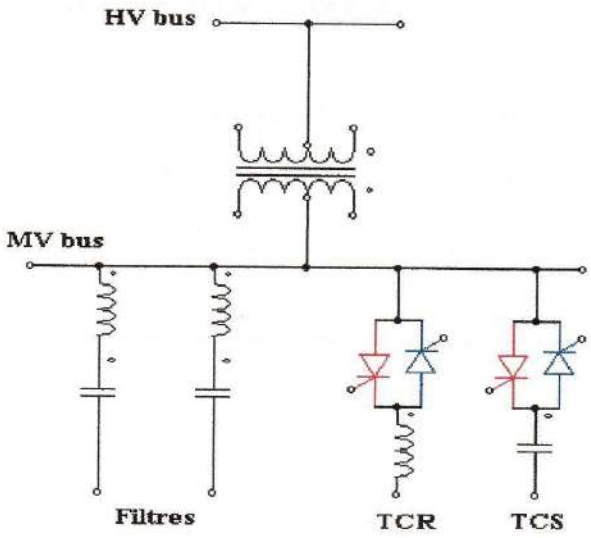


Figure II.3 : Le SVC.

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternative (FACTS).

Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique.

L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension.

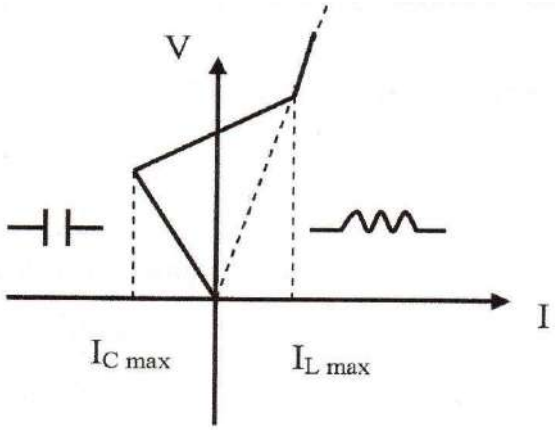


Figure II.4 : Caractéristique d'un SVC.

La caractéristique statique est donnée sur la **Figure II.4**. Trois zones de fonctionnement sont distinctes [14] :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.
- Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
- Une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés.

e. TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor):

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations. La **Figure II.5** représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique [13].

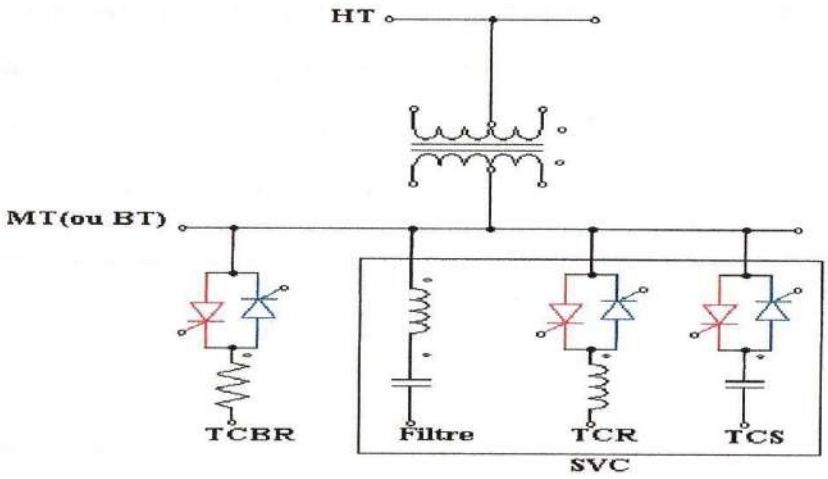


Figure II.5 : Schéma du SVC et TCBR.

II.3.1.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors :

Il s'agit du STATCOM (STATIC COMPENSATOR) qui a connu jusqu'à présent différentes appellations [15] :

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (Static Condenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVClight
- SVCplus

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70 mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance.

Le STATCOM présente plusieurs avantages à savoir [16] :

- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
- Performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique.

La **Figure II.6** représente le schéma de base d'un STATCOM.

Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de GTO et de diode en antiparallèle.

Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau.

Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [15].

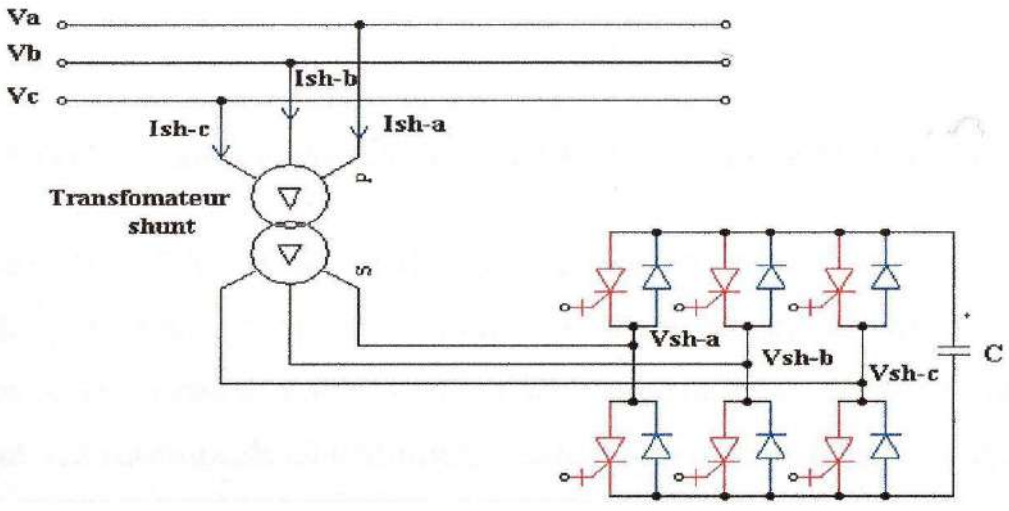


Figure II.6 : Schéma de base d'un STATCOM.

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_{sh}, laquelle est en phase avec la tension du réseau V (**Figure II.7**).

Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

- Si la tension V_{sh}< V, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de -90 par rapport à la tension V ce qui donne un courant inductif (**Figure II.7.a**).
- Si la tension V_{sh}> V, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de + 90 par Rapport à la tension V ce qui donne un courant capacitif (**Figure II. 7.b**).
- Si la tension V_{sh} = V, le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

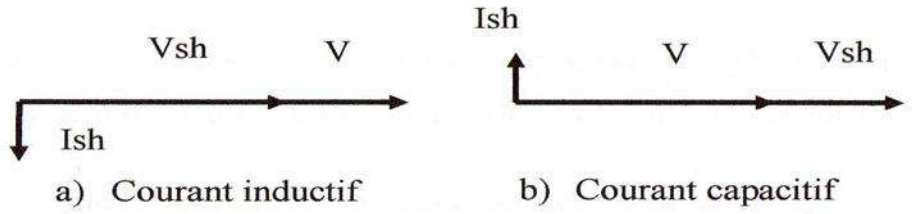


Figure II.7 : Diagramme vectoriel de STATCOM.

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau.

D-STATCOM (Distribution-Static Compensator):

Originellement le STATCOM, dédié au réseau de transport, a été utilisé pour la compensation de puissance réactive, le maintien d'un niveau de tension par échange de courant réactif avec le réseau et parfois pour l'amortissement de certaines oscillations.

Le D-STATCOM, dédié pour les réseaux de distribution, réalise les mêmes fonctions que le STATCOM [03].

Cependant, les fréquences de commutations de ses interrupteurs de puissances (généralement des IGBT) permettent d'assurer des trajectoires de courant plus élaborées, ouvrant donc des possibilités plus larges : filtrage actif de courant, réglage découplé des puissances actives et réactives échangées avec le réseau, etc...

II.3.2. Compensateurs séries :

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable.

En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci [03].

II.3.2.1. Compensateurs séries à base de thyristor :

Les compensateurs série à base de thyristors les plus connus sont :

a. TCSC (thyristor controlled sériés capacitor) :

Le TCSC est un dispositif série qui permet le contrôle de l'énergie active transitant dans une ligne de transport et cela par l'introduction d'une réactance variable en série avec l'impédance de la ligne. Ce système utilise des condensateurs à valeurs fixes placés en parallèle sur des inductances contrôlées par un variateur de courant à thyristors, de maniére à rendre le réglage de la compensation capacitive ou inductive, respectivement. Au-delà et en deçà de la fréquence de résonance

Le schéma de principe d'un TCSC est décrit par la **Figure II.8**.

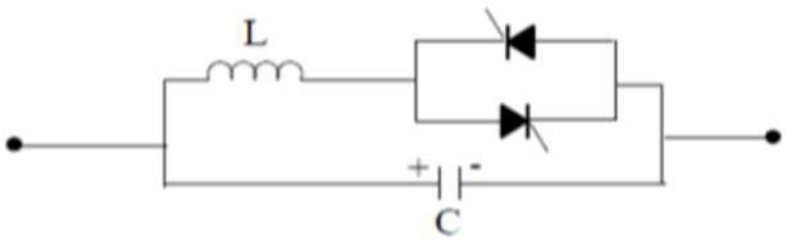


Figure II.8 : Topologie du condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC).

Le TCSC est composé d'une réactance couplée à un variateur de courant à thyristors composant un TCR qui est mis en parallèle avec un condensateur à capacité fixe. Ce dispositif permet un contrôle continu de la réactance offerte par le TSCS.

Avec l'introduction de cette réactance $X_{TCSC,}$ la réactance équivalente du TSCS peut être calculée comme suit :

$$X_{TCSC} = (X_L (\alpha) X_C) / (X_L (\alpha) + X_C)$$

Le TCSC présente les mêmes modes de fonctionnement que le SVC, à savoir :

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC présente une impédance fixe égale à celle du condensateur C.

Si les thyristors sont commandés en pleine conduction, l'impédance apparente du TCSC est celle de la mise en parallèle de l'inductance et de la capacité.

Si les thyristors sont commandés en phase (angle), le TCSC présente une réactance variable en fonction de l'angle α.

b. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor):

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage peut être soit de 90° soit de 180° (**Figure II.9**) [03].

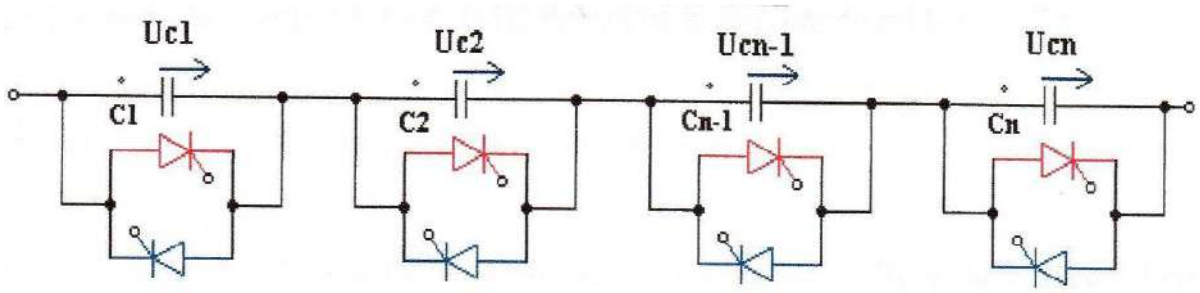


Figure II.9: Le TSSC.

c. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor):

Le schéma de base d'un TCSR est présenté sur la **Figure II.10**. Le TCSR un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable [03].

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X1 agit comme un limiteur de courant de défaut.

Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances [03].

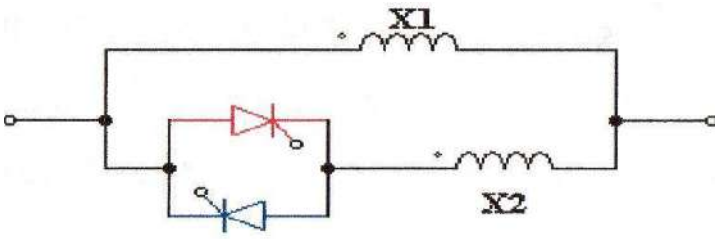


Figure II.10 : Structure du TCSR.

d. TSSR (Thyristor Switched Series Reactor):

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° [14].

II.3.2.2. Compensateurs séries à base de GTO thyristors :

Le compensateur série à base de GTO thyristors le plus connu est le :

a. SSSC (Static Synchronous Series Compensator):

C'est un convertisseur à source de tension placé en série avec la ligne de transport d'énergie électrique à travers un transformateur, ce type de compensateur est le dispositif le plus important de cette famille.

Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne.

La **Figure II.11** montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport [14].

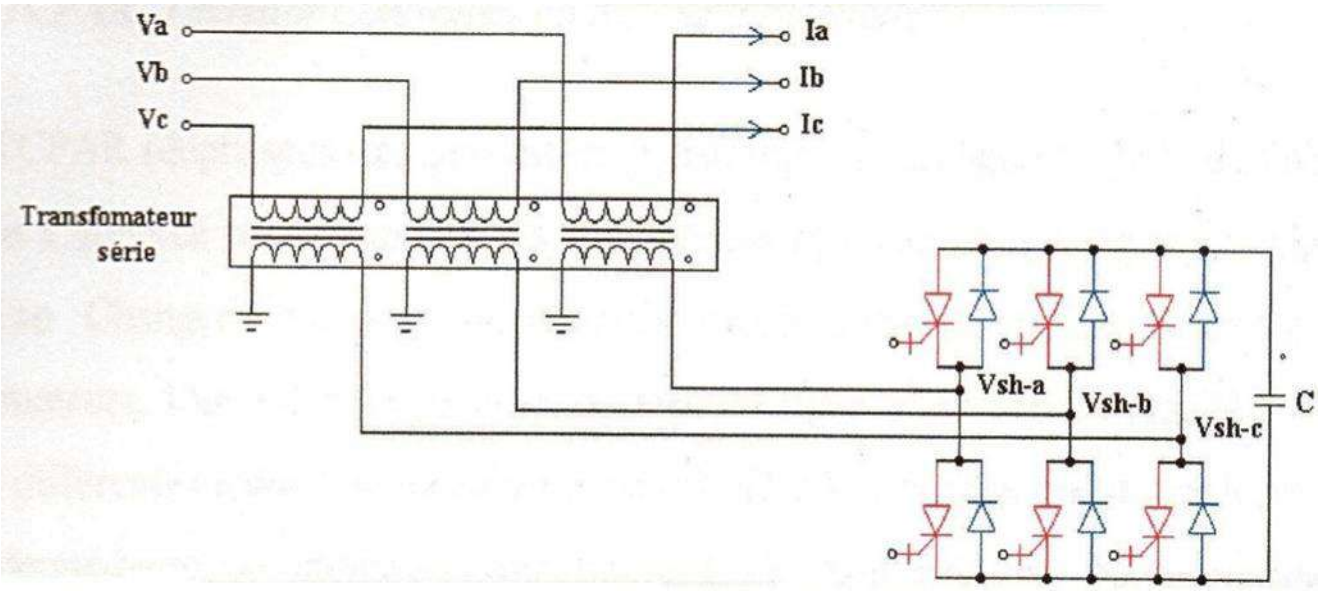


Figure II.11 : Schéma de base du SSSC.

Un SSSC est capable d'échanger de la puissance réactive et de la puissance active (en insérant un système de stockage d'énergie), avec le réseau, La caractéristique statique d'un SSSC est donnée par la **Figure II.12** [14] :

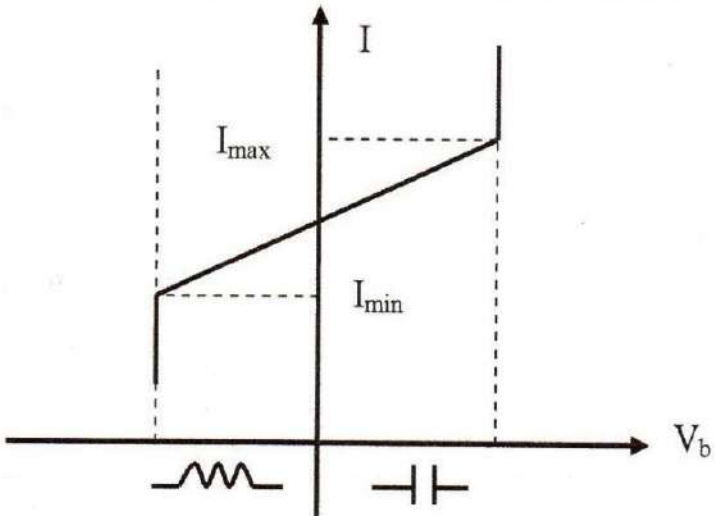


Figure II.12 : Caractéristique statique du SSSC

Le SSSC est appliqué pour la commande dynamique du flux de puissance et de la tension ainsi que pour la stabilité de l'angle de transport. Le fait que le SSSC puisse produire autant de tensions capacitives qu'inductives sur une ligne ceci élargit le domaine d'application de ce dispositif. Lors de la commande du flux de puissance, un SSSC peut être utilisé pour augmenter ou réduire ce flux [14].

II.3.3. Compensateurs hybrides (série - parallèle) :

II.3.3.1. Compensateurs hybrides à base de thyristors :

a. TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator):

Le TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif à été créé pour remplacer les transformateurs déphaseurs à régleur en charge (**LTC Load Tap Changer**) qui sont commandés mécaniquement, il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle.

Ce dernier possède différents rapports de transformation (**n1, n2, n3**).

Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire de thyristors (**Figure II.13**). Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension en quadrature avec la tension à déphaser.

Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, seule une étude est actuellement menée afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nord-ouest du Minnesota et du nord de l'Ontario [16].

Le TCPAR a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction.

Par contre comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'y adjoindre un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation [16].

L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont n1, n2, n3 Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre jusqu'à 27 valeurs différentes [16].

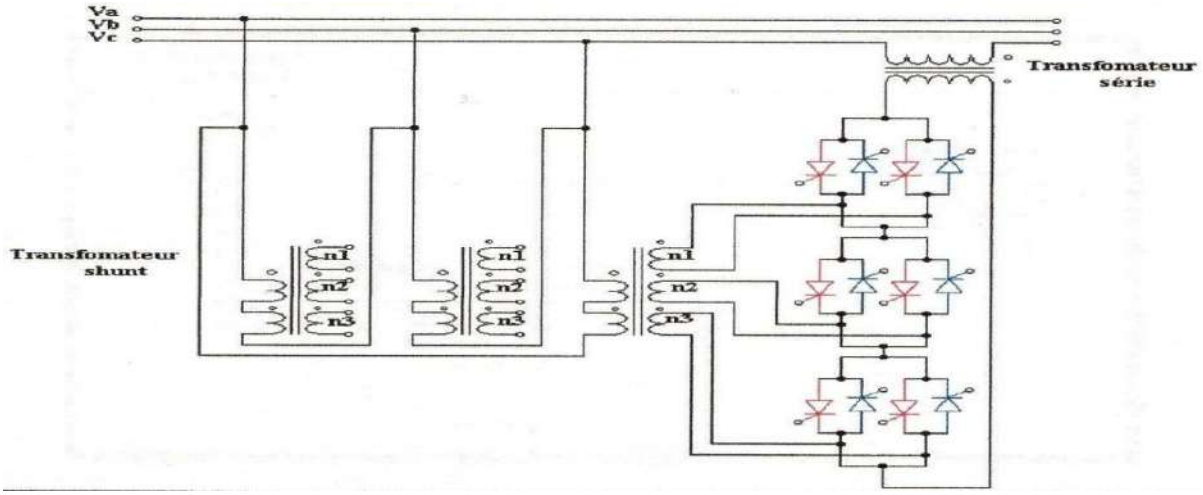


Figure II.13 : Schéma du TCPAR.

Un déphasage α est alors introduit et l'angle de transport total de la ligne devient (δ± α). Par contre avec ce compensateur, le module de la tension en aval n'est pas égal à celui de la tension en amont. La caractéristique statique d'un tel compensateur est présentée sur la **Figure II.14**.

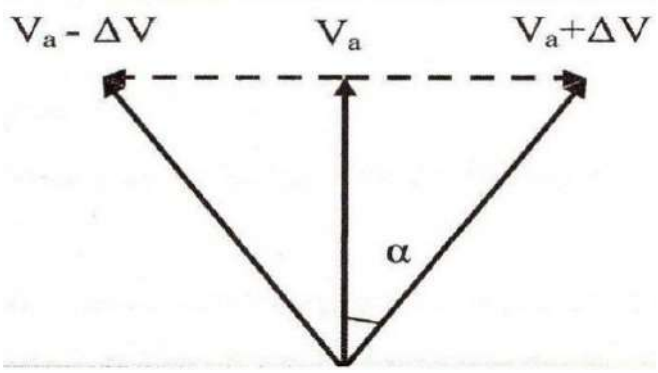


Figure II.14 : Diagramme vectoriel du TCPAR.

II.3.3.2. Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors :

a. IPFC (Interline Power Flow Controller):

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station.

Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser.

En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC **Figure II.15**. Nous pouvons l'utiliser afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau [14].

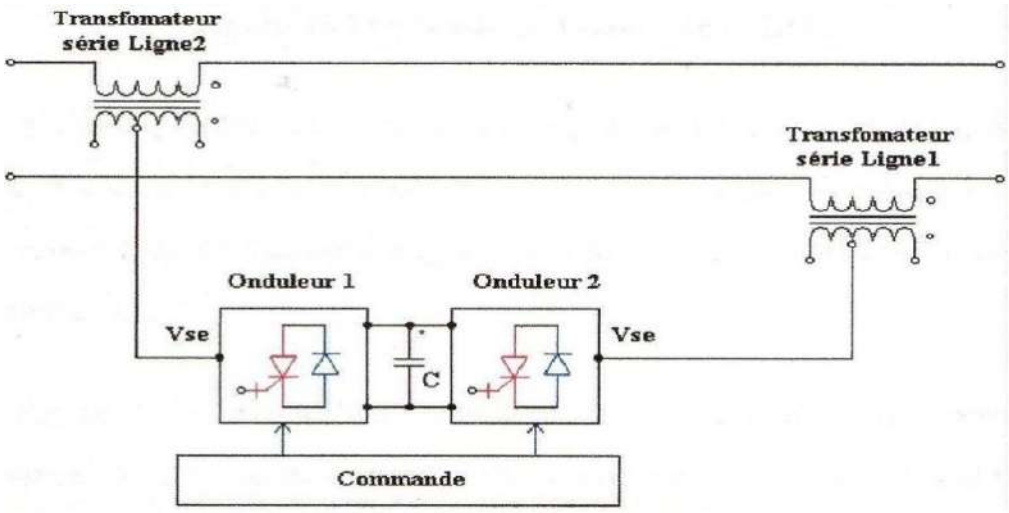


Figure II.15 : Schéma de base de l'IPFC.

b. UPFC (Unified Power Flow Controller):

Le contrôleur de transit de puissance universel UPFC est l'union de deux compensateurs, l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle. Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. Son schéma de base est donné par la **Figure II.16**. L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur [14].

Le premier concept a été présenté par Gyugyi en 1999.L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne, il est capable d'accomplir les fonctions des autres

dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance. Dans la **Figure II.16** l'onduleur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur (2). L'onduleur (2) injecte la tension (V_b) et fournit les puissances actives et réactives nécessaires à la compensation série. L'UPFC offre une flexibilité énorme qui permet le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne par un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés.

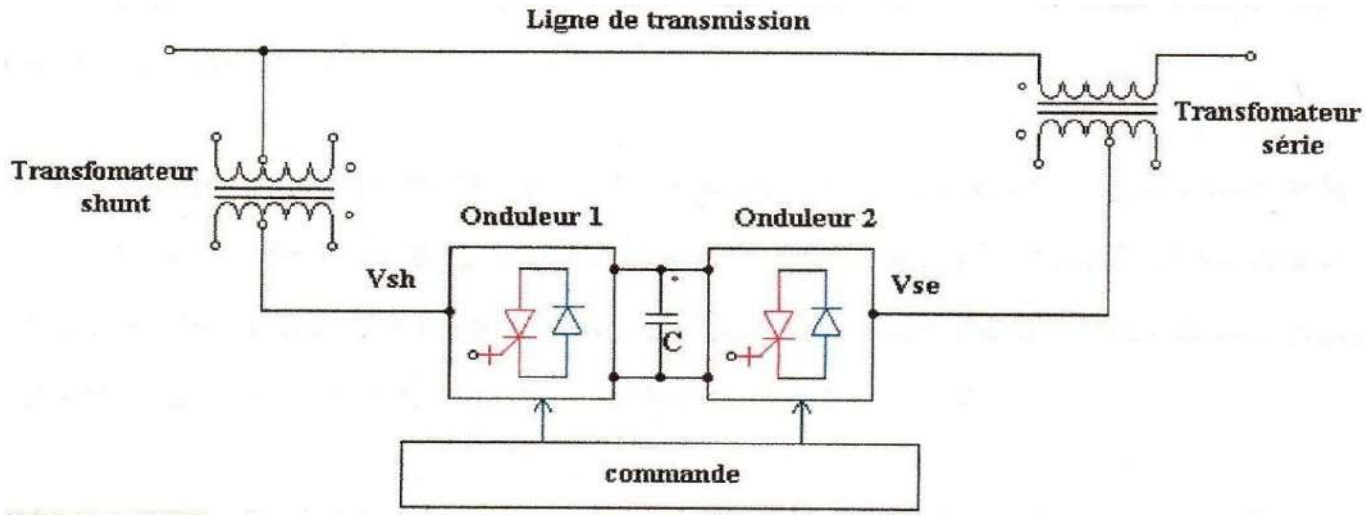


Figure II.16 : Schéma de base de l'UPFC.

Les principales applications du contrôleur de puissance universel sont :

- La commande des transits de puissances sur les lignes ;
- L'amélioration de la stabilité des réseaux électriques ;
- L'exploitation à pleine capacité des équipements et des lignes ;
- L'interconnexion des réseaux ;
- Le réglage de la tension ;
- L'amélioration des flux de puissances active et réactive ;
- La limitation des courants de court-circuit ;
- L'amortissement des oscillations de puissance ;

II.3.4. HVDC (High-Voltage Direct-Current):

Les centrales de production et de consommation sont généralement éloignées.

Les distances de transport de l'énergie électrique accroissent alors d'autant le besoin de compensation réactive, la marche en synchronisme des alternateurs et stabilité devient particulièrement difficile à assurer. Les quelques considération qui précédent permettent de bien situer les domaines d'application du courant continu.

Ces domaines concernent le transport mais pas la production, ni la distribution ou les changements de tension sont nécessairement multiples [17].

Aux très haute puissances et pour de très longues distances, la transmission en courant continu (HVDC) est préférable à la transmission en courant alternatif.

Il y a donc une distance critique à partir de laquelle la transmission en courant continu est plus économique que celle en courant alternatif.

Cette limite est de l'ordre de 600 km [17].

Le transport en courant continu présente plusieurs avantages à savoir :

- Le problème de régulation est moins complexe.
- La stabilité n'est plus un problème majeur.
- Les lignes à courant continu (CC) peuvent interconnecter n'imports qu'elle système de différente fréquence.

Un système de transport à courant continu haute tension utilise une ligne CC pour relier deux réseaux à courant alternatif. La **Figure II.17** montre les parties essentielles du système [17].

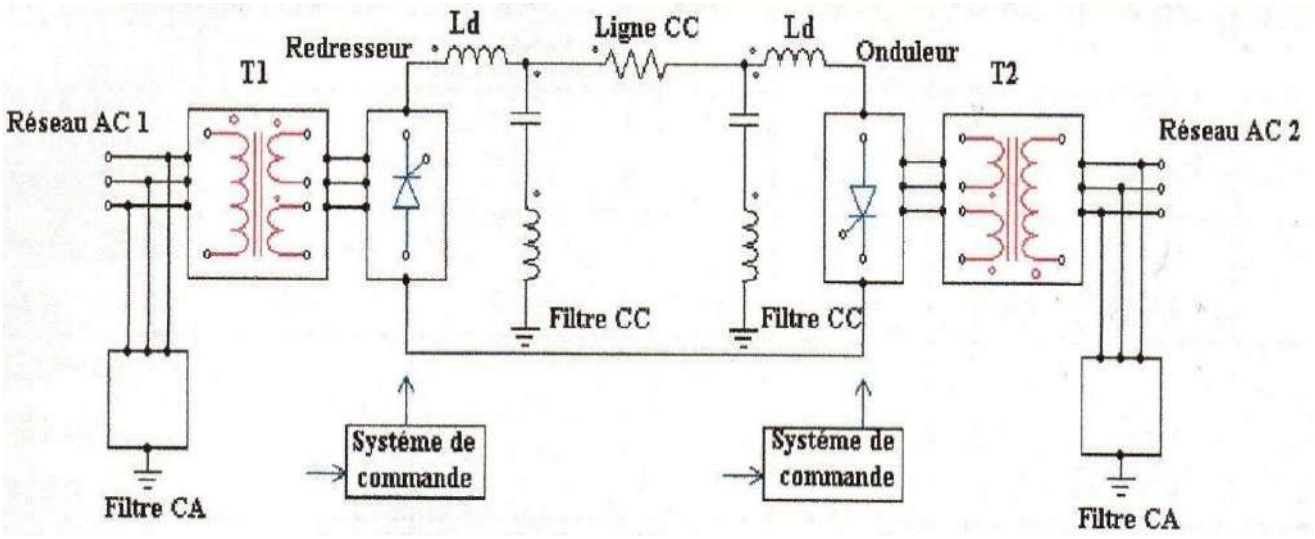


Figure II.17 : Schéma de principe d'une liaison en courant continu**.**

Les deux réseaux en tension alternative sont reliés à travers une liaison en courant continu, constituée d'un poste de conversion de départ dans lequel s'opère la conversion de la tension alternative en continu, une ligne de transport composée de deux conducteurs dans lequel passe le courant qui alimente le deuxième réseau et un poste de conversion d'arrivée dans lequel s'opère la conversion de la tension continue en alternative.

Une connexion de retour est nécessaire pour assurer la fermeture du circuit et donc le flux du courant [17].

Afin de supporter la haute tension imposée par la ligne de transport et le réseau AC, chaque thyristor est en réalité composé de plusieurs thyristors connectés en série.

Cet ensemble de thyristors est appelé « valve ». Par exemple, une valve de 50 kV peut être composée de 50 thyristors raccordée en série.

Les dispositifs FACTS citées dans ce chapitre possèdent leurs propres caractéristiques tant en régime permanant qu'en régime transitoire. Dans le tableau suivant nous présentons les avantages techniques des principaux dispositifs FACTS :

Tableau II.1 : Le rôle de chaque type de FACTS.

Dispositif	Contrôle du transit de puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire	Stabilité statique
SVC	+	+++	+	++
STATCOM	+	+++	++	++
TCSC	++	+	+++	++
SSSC	++	+	+++	++
UPFC	+++	+++	+++	+++
HVDC	++	+	+++	+++
IPFC	+	+++	++	+

Influence

+ petite

++ Moyenne

+++ forte

II.4. Apports et Avantages des dispositifs FACTS :

Les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée ;
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire voire supprimé les surcharges dans les lignes ou les transformateurs. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

Les bénéfices des contrôleurs FACTS :

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. Ce contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- Améliorer la stabilité dynamique du système : entre autre des fonctions des FACTS l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive : Réduction de l'écoulement de puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquence réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité d'énergie.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté une vue globale sur les dispositifs FACTS (leurs classification et différentes catégories) avec des schémas qui structurent chaque dispositifs.

De plus on a présenté l'utilisation de chaque dispositif FACTS à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique, puis on a mentionné quelque avantage des FACTS et application pratiques des dispositifs FACTS.

CHAPITRE III :

Etude théorique d'un DVR

CHAPITRE III : Etude théorique d'un DVR

III.1. Introduction :

Les systèmes de distribution alimentent des charges non linéaires (commutation des circuits électroniques, démarrage des moteurs...), qui affectent de manière significative la qualité d'énergie des consommateurs sensibles [18].

L'incrément de tension des équipements des charges sensibles a rendu des processus industriels beaucoup plus vulnérables à la dégradation de la qualité d'énergie, qui est associée à un nombre étendu de phénomènes électromagnétiques dans les systèmes d'alimentation avec une large gamme des tranches de temps telles que les variations de longue ou de courte durée, et d'autres perturbations. Ces perturbations peuvent causer des ruptures graves de processus à des résultats de la perte économique substantielle. Par conséquent, les solutions rentables, qui peuvent aider de telles charges sensibles, montent momentanées par des perturbations électriques, ce qui en attire beaucoup d'attention de recherches. Parmi les multiples dispositifs de la commande de puissance de roman, le DVR est une invention récente pour améliorer la qualité de puissance dans les systèmes de distribution d'énergie [18].

Le DVR est un dispositif de la commande de puissance qui peut avoir une excellente exécution dynamique, capable de protéger une charge sensible contre la majeure partie de perturbation comme : les creux de tension, les coupures brèves, les surtensions, les fluctuations et le déséquilibre de tension. Le DVR est un dispositif basé sur le principe de l'électronique de puissance qui est utilisé pour injecter des tensions en série et en synchronisme avec les tensions d'alimentation afin de compenser les anomalies de tension. Il se compose d'un VSC, un transformateur d'injection, un filtre et un système de stockage d'énergie. Une meilleure compréhension de ce dispositif est importante pour atténuer ces problèmes de la qualité d'énergie, ceci nous permettrait de nous servir d'une meilleure manière des fonctions de tels dispositifs avec des techniques efficaces de commande [19].

III.2. Besoins de DVR au marché :

En raison de la réglementation d'énergie du marché, la demande de DVR comme nouvel équipement pour protéger des appareils sensibles contre le desserrage électrique. Pour assurer l'opération appropriée du DVR, le client met plusieurs conditions sur l'équipement. Ces conditions peuvent concerner les points suivants [20] :

- La possibilité de compensation des creux de tension
- La fiabilité et disponibilité
- Les pertes
- La commande et la protection
- Les harmoniques
- La surveillance

III.2.1. Possibilité de compensation des creux de tension :

La possibilité de compensation des creux de tension appartient aux mesures de ces perturbations qui peuvent conclure la région dans laquelle le DVR doit fonctionner [20].

III.2.2. Fiabilité et disponibilité :

La fiabilité et la disponibilité sont des articles très importants dans la conception d'un DVR. Habituellement le DVR fonctionne en mode 'attente', il attend le défaut ; donc c'est un équipement très crucial et fiable. Une disponibilité élevée peut être réalisée en réduisant le nombre de composants, qui sont employés dans le DVR. Aujourd'hui, la disponibilité est supérieure à 98.5% avec l'utilisation d'IGCT [20].

III.2.3. Pertes d'énergie :

L'évaluation et les spécifications des pertes devraient être liées pendant l'opération de secours, en considérant tous les auxiliaires, qui sont en fonction Ceci signifie : les pertes de transformateur, les pertes de convertisseur, les pertes de lien de C.C et les pertes des auxiliaires [20].

III.2.4. Commande et protection :

Toutes les fonctions de protection de DVR devraient être mises en application avec un logiciel d'un PC industriel à un enregistreur des événements qui servira de noter et montrer les diverses étapes de DVR lors du fonctionnement. La protection différentielle courante du transformateur, ou la protection du courant de court-circuit de la charge sont seulement deux exemples qui peuvent avoir une possibilité de beaucoup de fonctions de protection du DVR. Selon la condition de panne particulière, la commande et la protection rapides peuvent commuter le DVR dans une déviation si elle devient inopérable [20].

III.2.5. Harmoniques :

En mode 'attente', le DVR ne devrait générer aucune harmonique, les valves doivent être en mode de court-circuit établissant seulement le chemin de court-circuit pour l'enroulement secondaire du transformateur d'injection. Sous le mode 'intervention', le DVR produira des harmoniques qui sont presque négligeables avec une configuration de convertisseur de trois niveaux à 12 impulsions.

III.2.6. Surveillance :

Aujourd'hui, le système de surveillance locale est réalisé par un modem téléphonique qui est installé à distance pour obtenir des caractéristiques de l'opération. Tout l'itinéraire de communications est fait par un PC local d'un logiciel approprié pour l'opération, l'entretien, et détection de défaut [20].

III.3. Description générale d'un DVR :

Le DVR est conçu pour protéger les équipements sensibles et critiques contre de telles perturbations comme les creux de tension, ainsi, il est spécifiquement conçu pour des grandes charges (de 2MVA à 10MVA) servies à la tension de distribution [21].

La **Figure III.1** montre un diagramme schématique d'un DVR incorporé dans à un réseau de distribution. Le DVR se compose de : un convertisseur VSC à MLI, un bloc de commande, un dispositif de stockage d'énergie de C.C, et un transformateur d'injection reliant en série au système à C.A [22]. Ce dispositif est approprié à résoudre une variété de problèmes de qualité et de fiabilité de puissance comprenant :

- Creux de tension
- Surtension
- Déséquilibres de tension et compensation de phase
- Harmoniques de tension
- Pannes

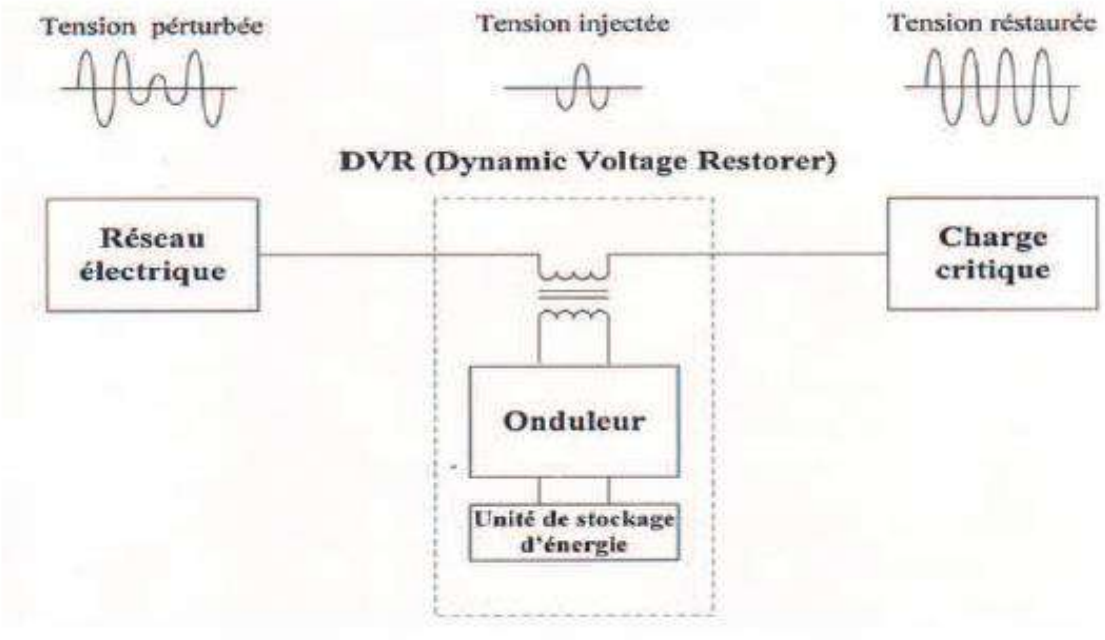


Figure III.1 : Schéma simplifié d'un Restaurateur Dynamique de tension.

Le DVR peut avoir une excellente exécution dynamique et capable d'une protection critique d'une charge sensible contre les différentes perturbations de tension. Une meilleure compréhension de ce dispositif est importante pour atténuer ces problèmes de la qualité de l'énergie, ceci nous permettrait de nous servir d'une meilleure manière des fonctions de tels dispositifs avec des techniques efficaces de commande.

III.3.1. Circuit de commande :

Le but de circuit de commande est de maintenir l'amplitude de tension constante, au point de raccordement d'une charge sensible sous des perturbations de système. Le système de commande mesure seulement la valeur efficace de la tension au point de transition, c.à.d. aucune mesure de la puissance réactive n'est exigée. Ce circuit de commande est basé sur des contrôleurs pour ajuster les résultats, parmi ces contrôleurs, on spécifie notre étude sur les contrôleurs PI [21].

Le contrôleur PI est représenté par deux structures de régulation, l'une proportionnelle, et l'autre intégrale, dont les gains sont respectivement K_p et K_i. L'objectif de ce régulateur est de régler le signal de modulation qui conduit le modulateur de largeur d'impulsion MLI. Ceci a été modelé par une combinaison en cascade de deux blocs séparés [23].

L'entrée de contrôleur PI est un signal d'erreur obtenu à partir de la comparaison entre la valeur efficace de la tension mesurée V_m et la tension de référence V_{ref}. La sortie de contrôleur PI est un signal traité d'angle δ, comme représenté dans la **(Figure III.2)**. Ce qui est fourni au générateur MLI. Ce signale d'angle δ est exigé pour conduire l'erreur à zéro, c-à-d., la tension efficace de la charge est apportée de nouveau à la tension de référence [24].

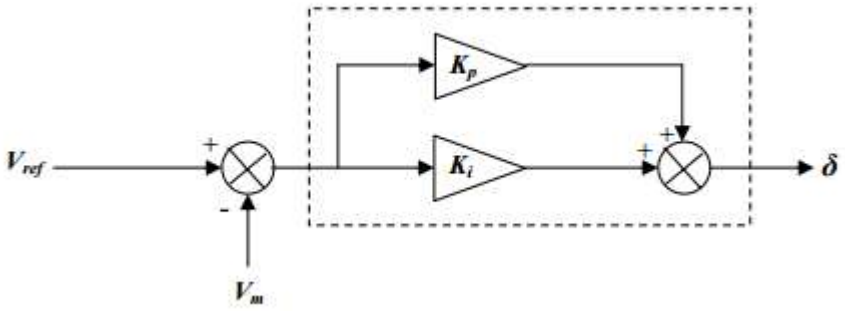


Figure III.2 : Contrôleur PI.

III.3.2. Convertisseur de source de tension VSC :

Un convertisseur de source de tension est un dispositif de l'électronique de puissance basé sur des commutateurs à semi-conducteurs, comme illustré dans la **(Figure III.3)**. Le VSC peut produire une tension sinusoïdale avec n'importe quel angle exigé d'amplitude, de fréquence et de phase. Il est largement répandu dans la commande de la vitesse réglable. Il est relié à un certain genre d'équipement de stockage d'énergie, qui fournira une tension en C.C, mais peut être également employé pour atténuer les chutes de tension, c.à.d. il est employé complètement pour absorber ou injecter la tension absente, cette tension est résulté par la différence entre la tension nominale et la tension réelle [24]. La stratégie de la commutation de VSC est basée sur la technique de la commande MLI qui offre la simplicité et la bonne réponse optimale.

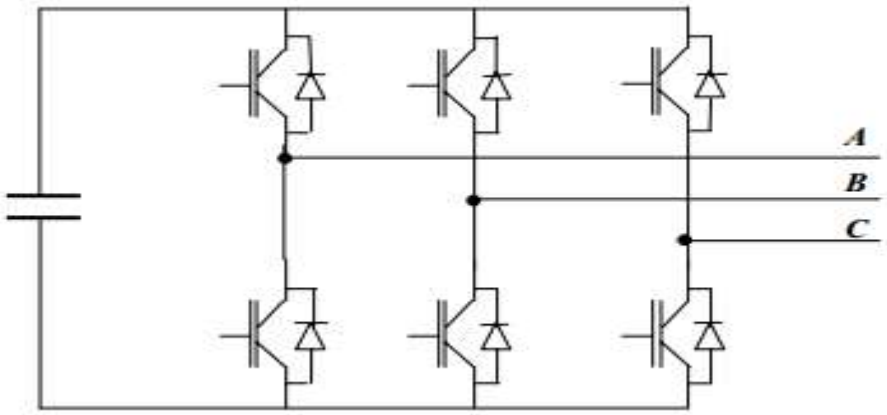


Figure III.3 : Représentation schématique d'un VSC.

Le fonctionnement en mode complètement commandé d'un système à VSC de natures complémentaires **(Figure III.4)** impose certaines restrictions tant au niveau des interrupteurs constituant le convertisseur qu'au niveau des sous-systèmes que celui-ci relie [25].

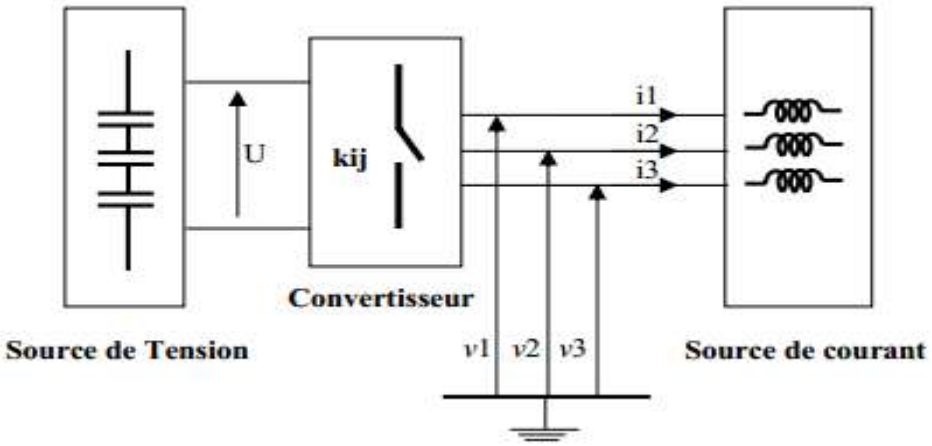


Figure III.4 : Convertisseur reliant deux sources de nature complémentaires.

III.3.3. Système de stockage d'énergie :

Le système de stockage d'énergie est basé sur deux paramètres plus importants pour avoir des possibilités de fournir l'énergie continue au VSC. Premièrement, la tension aux bornes de VSC de coté continu soit toujours suffisamment élevée pour générer la tension de compensation nécessaire. Deuxièmement, le dimensionnement du système de stockage d'énergie doit être conçu aux types de perturbations [26]. Les systèmes de stockage d'énergie ont pour but de charger le bus continu

reliant le VSC. Dans l'industrie, l'utilisation des différents types de ces systèmes sont selon les besoins techniques étudiés.

III.3.3.1. Source d'énergie indépendante :

La fourniture de l'énergie est assurée via une ligne indépendante ou bien par une source d'énergie indépendante qui n'est pas donc affectée par les perturbations agissantes sur la ligne à protéger. La **Figure III.5** donne des exemples sur des sources indépendantes alimentant le DVR.

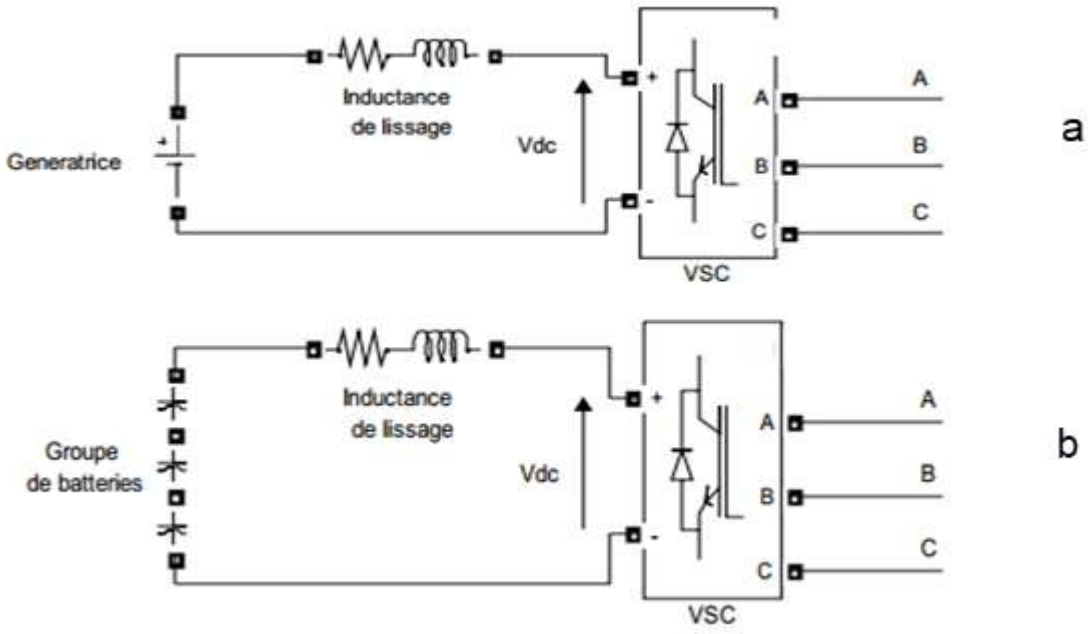


Figure III.5 : Alimentation indépendante ; a) par génératrice, b) par des batteries.

III.3.3.2. Source d'énergie dépendant de la charge protégée :

Dans ce cas, cette source est réalisée sous forme d'une boucle fermée à l'aide d'un redresseur comme montré dans la **Figure III-6**, de façon que l'alimentation triphasée de redresseur soit obtenue par la ligne de la charge protégée pour assurer une tension continue propre et suffisante pour compenser les perturbations agissant sur le réseau d'alimentation.

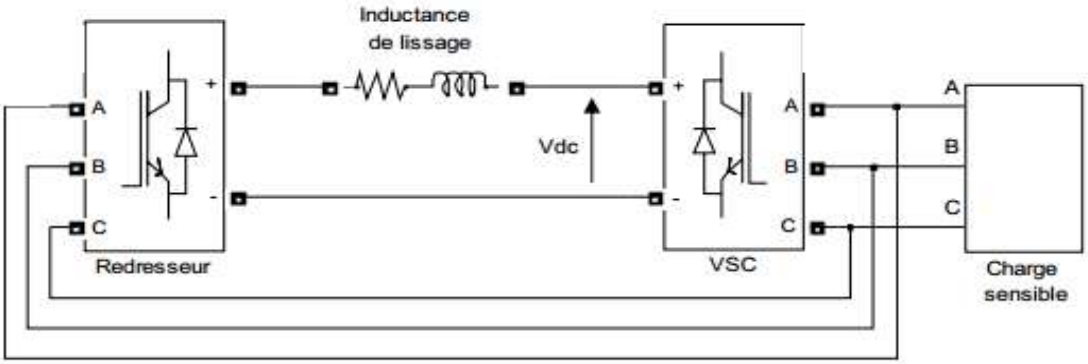


Figure III.6 : Alimentation à partir de la ligne de la charge protégée.

Dans le cas d'un redresseur à diodes, on peut le placer dans les deux côtés d'un DVR : côté réseau ou côté charge. Cependant, lors d'une perturbation, le bus se chargera pendant les pics de courant du redresseur, tandis que dans le reste de la période il se déchargera. Ainsi, il y aura un équilibre dans lequel la charge accumulée pendant les pics sera égale à celle libérée pendant le reste de la période, et la tension moyenne restera constante. Le seul inconvénient réside dans son coût.

III.3.4. Système de filtrage :

Le système de filtrage est un circuit électrique qui comporte des inductances et des capacitances, son but est d'éliminer les harmoniques de découpage et d'obtention d'une tension compensatrice de bonne qualité. Ce système est placé entre le convertisseur VSC et le transformateur d'injection **(Figure III.7)**, pour éviter l'injection des harmoniques et protéger les composantes de transformateur contre les atténuations dues aux commutations de l'onduleur [27].

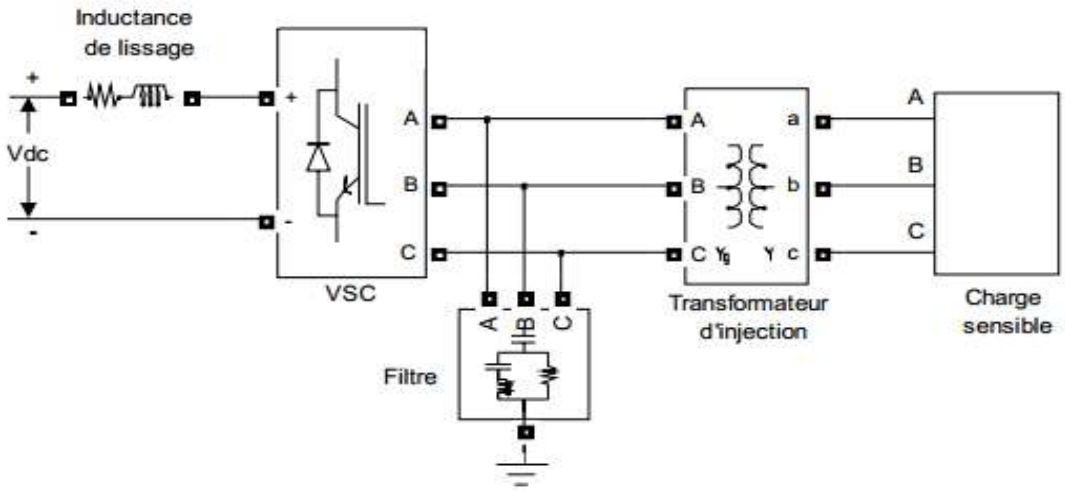


Figure III.7 : Schéma d'emplacement d'un filtre passe-bas.

III.3.5. Transformateur d'injection :

Le transformateur d'injection ou dit aussi d'accouplement est un élément de raccordement en série des équipements de compensations avec le réseau d'alimentation d'une part, d'autre part permet l'injection des tensions souhaitées produites par le VSC en série dans ce réseau. La **Figure III.8** présente un schéma d'emplacement de transformateur d'injection dans un tel système de distribution [29,28].

L'utilisation de ces transformateurs impose des soucis économiques via leurs coûts élevés, et techniques à cause de chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite L_f, avec le développement des semi-conducteurs et des topologies multi-niveaux des VSC, les technologies de raccordement direct au réseau sont en évolution.

L'étude économique et technique d'un transformateur à tenir en compte spécialement ses dimensions et choix, ces règles sont basées sur deux aspects de son fonctionnement, l'une le fonctionnement en régime déséquilibré, et l'autre en chute de tension. Le couplage se fait en étoile pour compenser correctement toutes les perturbations, malgré que le couplage en triangle permet une optimisation de la tension continue [30, 31,32].

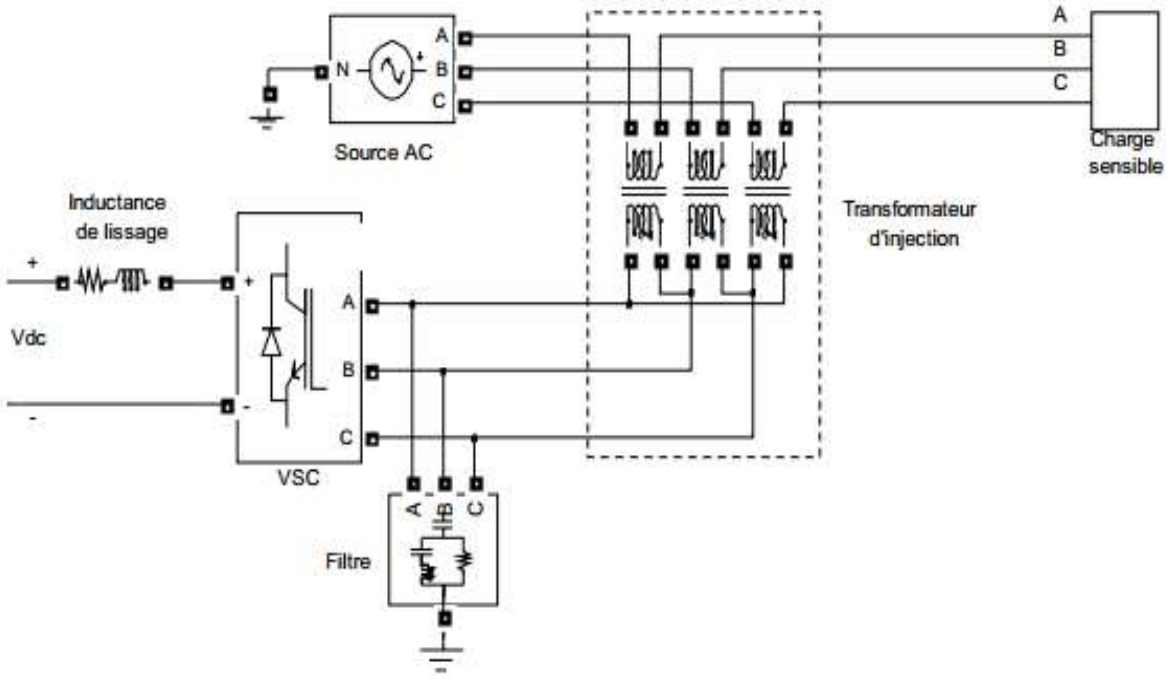


Figure III.8 : Schéma d'emplacement de transformateur d'injection

III.4. Principe de fonctionnement d'un DVR :

Le DVR est un dispositif qui injecte une tension absente et dynamiquement commandée $V_{inj}(t)$ en série dans le système de distribution qui contient des charges que l'on veut protéger contre les défauts néfastes qui influent sur la tension de ces charges $V_{ch}(t)$, comme les creux de tension et les surtensions qui sont invisibles par ces charges. Quand le DVR détecte une perturbation de tension comme montrée dans la **Figure III.9(a)**, le système de commande du DVR fait une comparaison entre la tension de référence et la tension perturbée afin d'obtenir une tension appropriée à la tension perdue **(Figure III.9(b))**, qui sera injectée par le DVR pour maintenir la tension de charge **(Figure III.9(c))**, cette différence de tension exige une certaine quantité de la puissance active et réactive de DVR [19,33].

La puissance réactive troquée entre le DVR et le système de distribution est produite intérieurement par les composants de VSC à semi-conducteur de DVR. La puissance active échangée sur les bornes de sortie de DVR à C.A est fournie par l'équipement de stockage d'énergie.

En outre, la technique de commande MLI est employée pour commander les variations de tension, ainsi le filtre est utilisé pour éliminer les harmoniques de la fréquence élevée produites par les commutations de convertisseur [34, 19,35].

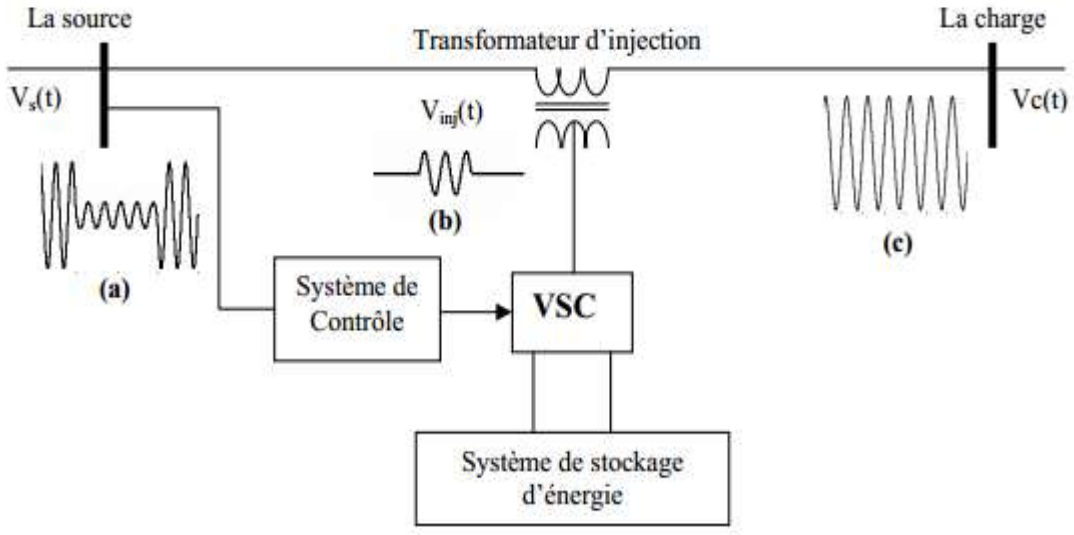


Figure III.9 : schéma simplifié de la tension injecté par le DVR dans le système d'alimentation.

Dans la plupart des cas pratiques, une conception plus économique d'un DVR peut être réalisée pour compenser seulement les composants d'ordre positif et négatif de perturbation de tension. Cette option est raisonnable, parce que pour une configuration typique de jeu de barre de distribution, la composante d'ordre zéro ne traversera pas les transformateurs abaisseurs en raison de l'existence d'une impédance infinie dans ces transformateurs. Pendant la plupart du temps, le DVR, même mis en repos (V_{inj} (t) = 0), surveille la tension des charges aux bornes de raccordement au système d'alimentation [36,19].

La restauration idéale doit rendre les tensions de charge inchangées. Quand le DVR reconstitue des grandes perturbations de tension, la puissance active devrait être injectée par le DVR au système de distribution. Si les possibilités du stockage d'énergie de DVR étaient infinies, le DVR pourrait maintenir la tension de charge sans changement idéalement pendant n'importe quel genre de défauts. Cependant, l'énergie stockée dans le DVR est limitée pratiquement par la limite de la capacité de lien de C.C de DVR. À savoir, le DVR ne peut pas reconstituer la tension de charge constamment quand la tension à travers le lien de C.C est descendue, par la suite, l'énergie stockée est épuisée pendant une chute profonde de tension avec une longue durée. Par conséquent, il est nécessaire de réduire au minimum l'injection d'énergie de DVR [33].

La possibilité de compenser le défaut de tension peut être limitée par un certain nombre de facteurs comprenant l'estimation de puissance finie de DVR, les différentes conditions de charge, et les différents types de tension perturbée. Quelques charges sont très sensibles et d'autres sont tolérantes au changement d'angle de phase. Le dispositif de commande de DVR peut manipuler la plupart des défiances de tension par une exécution qui doit être maximisée selon l'équipement inséré, cela donne au DVR une réussite à son fonctionnement. Autrement, le DVR n'a aucun pouvoir d'éviter le déclenchement, et causer même des perturbations additionnelles aux charges.

III.4.1. Modélisation de DVR :

DVR capable de régler le flux de puissance actif et réactif dans des limites imposées par son estimation, la **Figure III.10** représente un schéma typique d'un DVR et son circuit équivalent [22].

Le modèle de flux de puissance de DVR est basé sur le concept d'une source de tension reliée en série.

$$V_{DVR} = |V_{DVR}| (\cos\delta + j \sin\delta)$$

L'amplitude de tension et l'angle de phase δ du modèle de DVR sont ajustés en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire un flux de puissance actif et réactif indiqué à travers le DVR.

Les limites maximum et minimum existeront pour l'amplitude de tension $|V_{DVR}|$, ce qui est une fonction de l'estimation de condensateur de DVR. D'autre part, l'angle de phase de tension δ peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 2π radians [22].

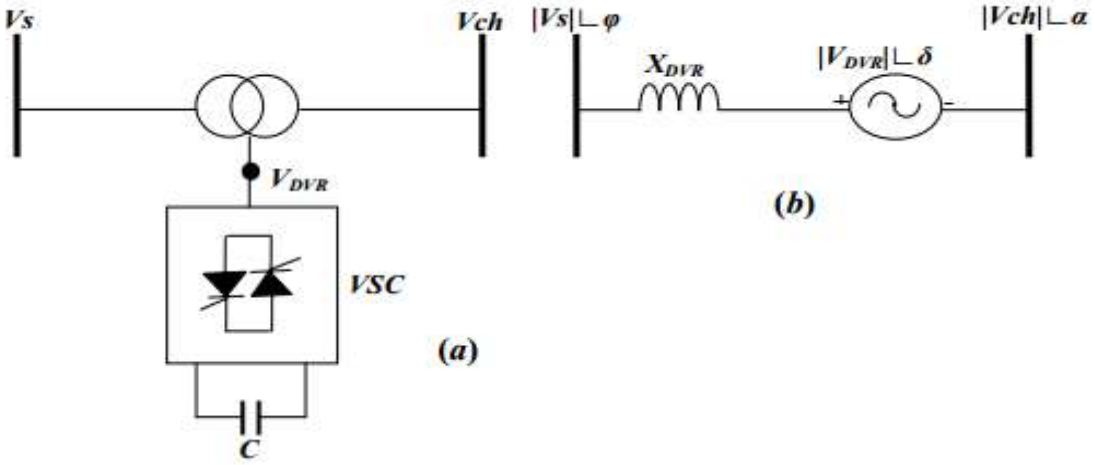


Figure III.10 : (a) Schéma typique d'un DVR, et (b) son circuit équivalent

Quand la tension du système est trouble, le DVR injecte immédiatement une tension V_{DVR} en série par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de sorte que l'amplitude désirée de la tension de charge V_{ch} doit être maintenue.

La tension injectée par le DVR peut être écrite :

$$V_{DVR} = V_{ch} + Z_{ch} I_{ch} - V_s$$

Le courant de charge I_C est donné par :

$$I_{ch} = (P_{ch} + j * Q_{ch}) / V_{ch}$$

III.4.2. Les modes de fonctionnement d'un DVR :

Le DVR dispose de trois modes de fonctionnement : mode protection, mode veille, mode injection / boost.

III.4.2.1. Mode de protection :

Si la surintensité du côté de la charge dépasse une limite admissible en raison d'un court-circuit sur le Charge ou grand courant d'appel, le DVR sera isolé des systèmes en utilisant les commutateurs de dérivation (S2 et S3 s'ouvriront) et fournira un autre chemin pour le courant (S1 sera fermé).

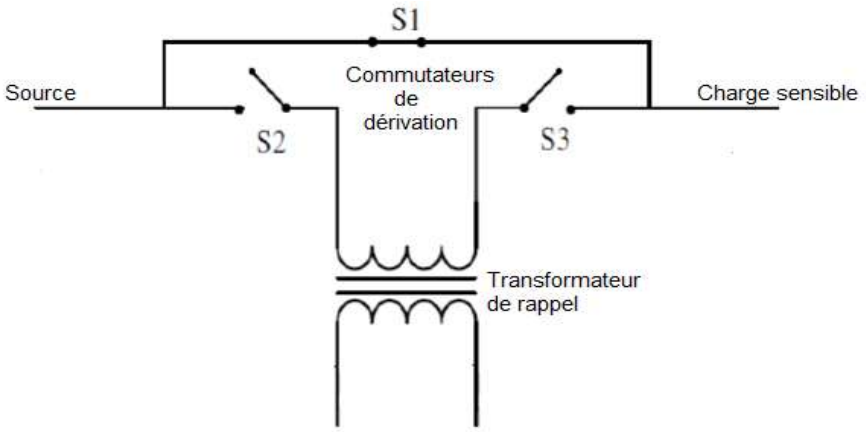


Figure III.11 : Mode de protection (création d'un autre chemin pour le courant)

III.4.2.2. Mode veille (V_{DVR}= 0) :

En mode veille, l'enroulement basse tension du transformateur d'injection est court-circuité à travers le convertisseur.

Aucune interruption des semi-conducteurs ne se produit dans ce mode de fonctionnement et le courant à pleine charge passe par le primaire.

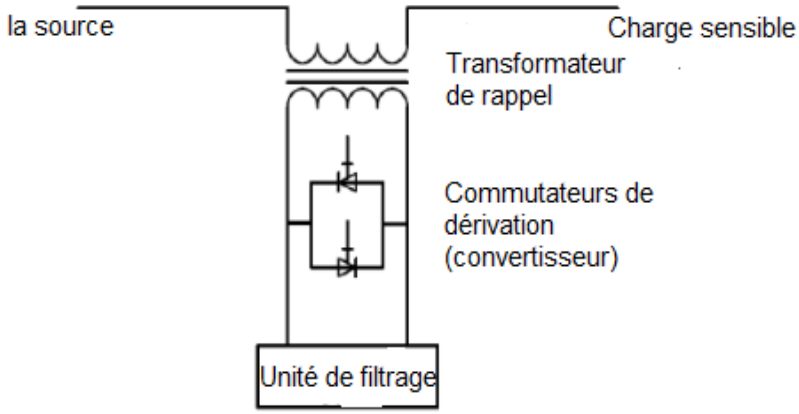


Figure III.12 : mode veille.

III.4.2.3. Mode Injection / Boost (V_{DVR}>0) :

En mode Injection / Boost, le DVR injecte une tension de compensation à travers le transformateur d'injection en raison de la détection d'une perturbation de la tension d'alimentation.

III.5. Stratégie de commande :

La stratégie de commande dépend du type de caractéristiques de charge, et devrait compenser n'importe quelle perturbation de tension, et d'observer aussi la limitation de DVR. Il y a plusieurs méthodes qui définissent comment injecter la tension d'atténuation de défaut par le DVR au système de distribution telles que : compensation pré-défaut, compensation dans la phase, et compensation par l'avancement de phase. En prend I comme courant de charge, et φ, δ et α respectivement comme angle de facteur de puissance de charge, angle de phase de tension d'alimentation, et angle d'avancement de tension de charge [35,33].

III.5.1. La méthode de compensation au pré-défaut :

Cette méthode dépiste la tension d'alimentation sans interruption et compense la tension de charge pendant l'état de pré-défaut de perturbation. La **Figure III.10** montre un diagramme de vecteur de compensation au pré-défaut.

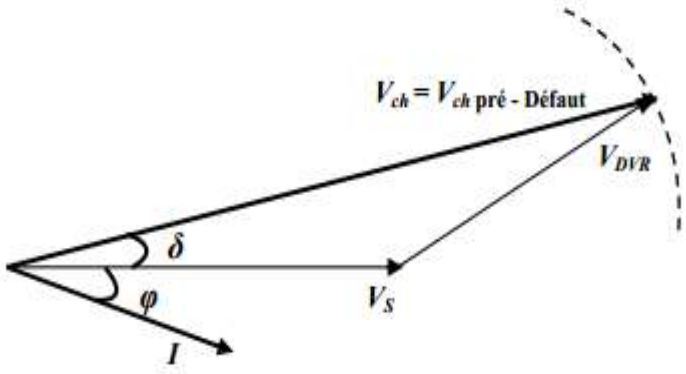


Figure III.13 : diagramme vectoriel de la compensation au pré-défaut.

Dans cette méthode, la tension de charge peut être reconstituée idéalement, mais la puissance active injectée ne peut pas être commandée, elle est déterminée par des conditions externes telles que le type des défauts et la condition de charge [35,33].

III.5.2. La méthode de compensation dans la phase :

La compensation dans la phase signifie que le DVR injecte une tension dans la phase avec la tension d'alimentation et la tension de pré-défaut, tel que la tension d'alimentation est mesurée indépendamment de la charge courante **(Figure III.11)**. L'avantage de cette méthode est que l'importance de la tension injectée de DVR est réduite au minimum pour la grandeur constante de tension de charge [35,33].

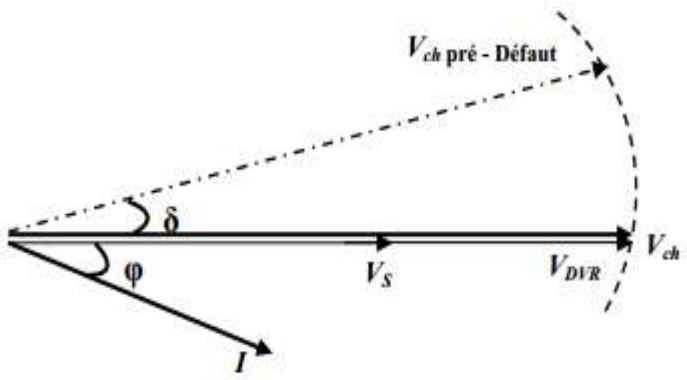


Figure III.14 : diagramme vectoriel de la compensation dans la phase.

III.5.3. La méthode de la compensation par l'avancement de phase :

Cette méthode est faite pour contrôler l'énergie injectée et remettre la puissance active à zéro de telle sorte que le vecteur de la tension soit perpendiculaire au vecteur de courant de charge **(Figure III.12)**. Cette méthode peut réduire la consommation de l'énergie stockée dans le dispositif de stockage de C.C, par l'injection de la puissance réactive au lieu de la puissance active.

La réduction de la consommation d'énergie signifie que cela monte à travers des capacités, et augmente quand la capacité de stockage d'énergie est fixe. D'autre part, l'importance de la tension injectée de cette méthode est plus grande que les deux méthodes précédentes, le déphasage de tension peut causer la discontinuité de forme d'onde de tension, le passage à zéro imprécis, et l'oscillation de la puissance de charge.

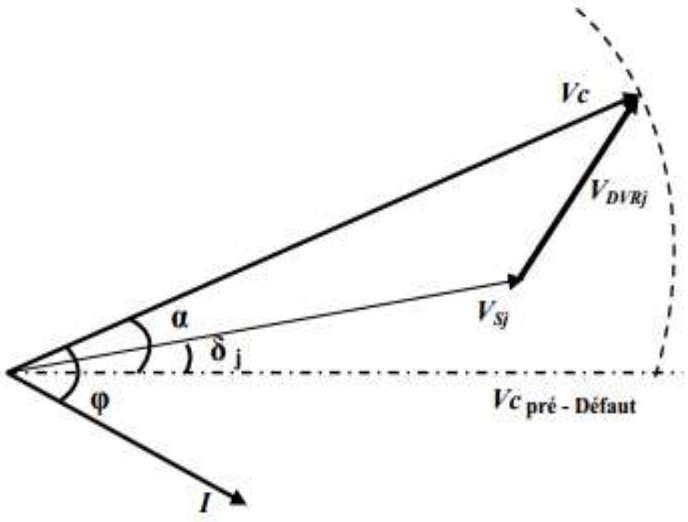


Figure III.15 : diagramme vectoriel de la compensation par la méthode d'avancement de phase.

Les méthodes de compensation au pré-défaut et dans la phase doivent injectées une puissance active aux charges presque à tout moment. Cependant, la quantité possible de la puissance active injectée est confinée à l'énergie stockée dans le dispositif de C.C, qui est l'un des composants les plus chers de DVR en raison de la limite de la capacité de stockage d'énergie dans ce dispositif de C.C qui confine le temps de restauration et d'exécution de DVR.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié de façon approfondie le DVR, à cause de ces forces dynamiques, il est capable de compenser les différentes perturbations de tension, comme les creux de tension, les surtensions, les tensions déséquilibrées, les fluctuations de tensions, …etc. Il est classé parmi les meilleures solutions pour protéger les charges sensibles contre les perturbations, qui sont des gênes au fonctionnement usuel de l'industrie.

CHAPITRE IV :

Simulation et Interprétation des Résultats

Chapitre IV : Simulation et Interprétation des Résultats

IV.1. Introduction :

Le problème de la qualité de l'énergie électrique est une préoccupation majeure et nécessite une observation quotidienne des utilisateurs d'énergie. Pour y remédier, le DVR apporte une solution efficace et fiable pour faire face à cette situation. L'objectif de ce travail sera focalisé sur l'étude de l'impact du régulateur de la tension le DVR dans les réseaux électriques.

On commencera ce chapitre par la description du réseau étudié avec le DVR, un descriptif sur la commande du compensateur et les blocs de contrôle.

On a utilisé le logiciel MATLAB SIMULINK pour exécuté les simulations qui permettent de visualiser le comportement du DVR en mode régulation de la tension comme suit :

- Perturbation (monophasé – biphasé – triphasé).
- Surcharge.

IV.2. Description du réseau étudié :

Le système d'essai du DVR (Figure IV.1) est composé d'une source de tension de 13 kV, alimentant deux lignes de transmission à travers un transformateur élévateur à trois enroulements (Y/Δ/Δ, 13/115/115). Ces lignes de transmission alimentent deux réseaux de distribution à travers deux transformateurs abaisseur connectés en Δ/Y, 115/11 kV. Le DVR est branché en série avec le réseau de distribution un.

Le réseau étudié est représenté dans la figure suivante :

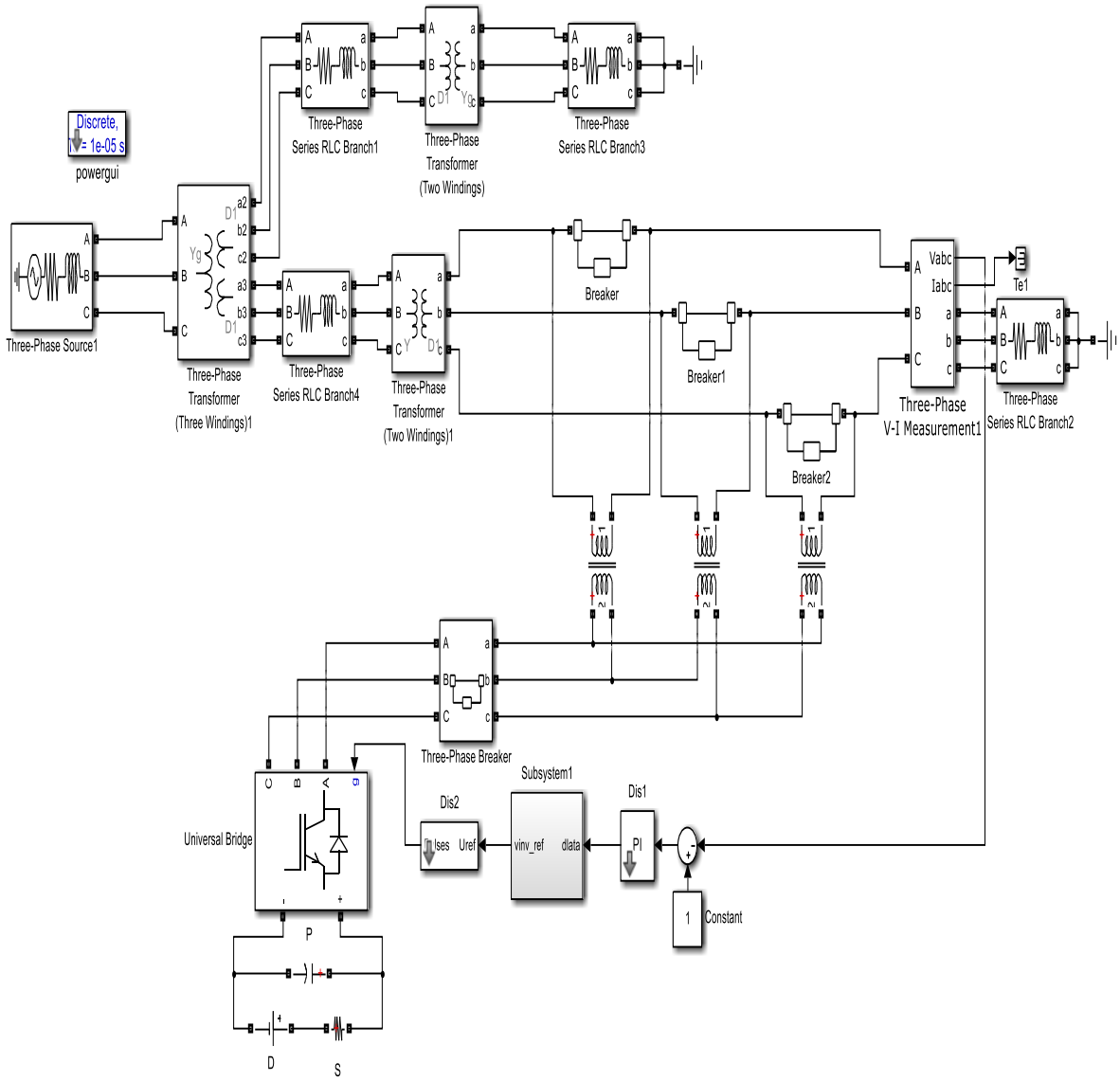


Figure IV.1 : Schéma du réseau à étudier.

IV.3. Système de commande :

Le système de commande est une partie du système de distribution. La **Figure IV.2** montre le schéma de commande du DVR tel que :

- Le régulateur proportionnel intégral PI conduira le système commander une somme pondéré du signal d'erreur qui est définie comme la différence entre la sortie et la valeur consigne désirée.
- Le mécanisme de commande est un angle de commande de modulation de phase.
- Le générateur PWM est utilisé pour générer la forme d'onde sinusoïdale ou d'un signal PWM.

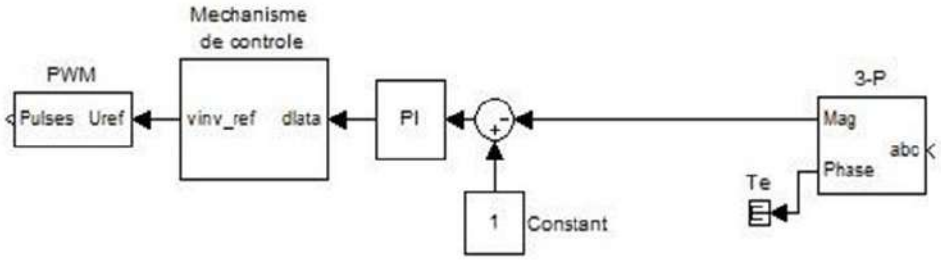


Figure IV.2 : Schéma de commande.

IV.4. Essais et simulations :

La simulation du système est faite sans et avec l'installation d'un DVR.

IV.4.1. Simulation sans défaut sans DVR :

On exécute la simulation de notre système sans DVR pour voir la valeur efficace de la tension dans le réseau sans défaut.

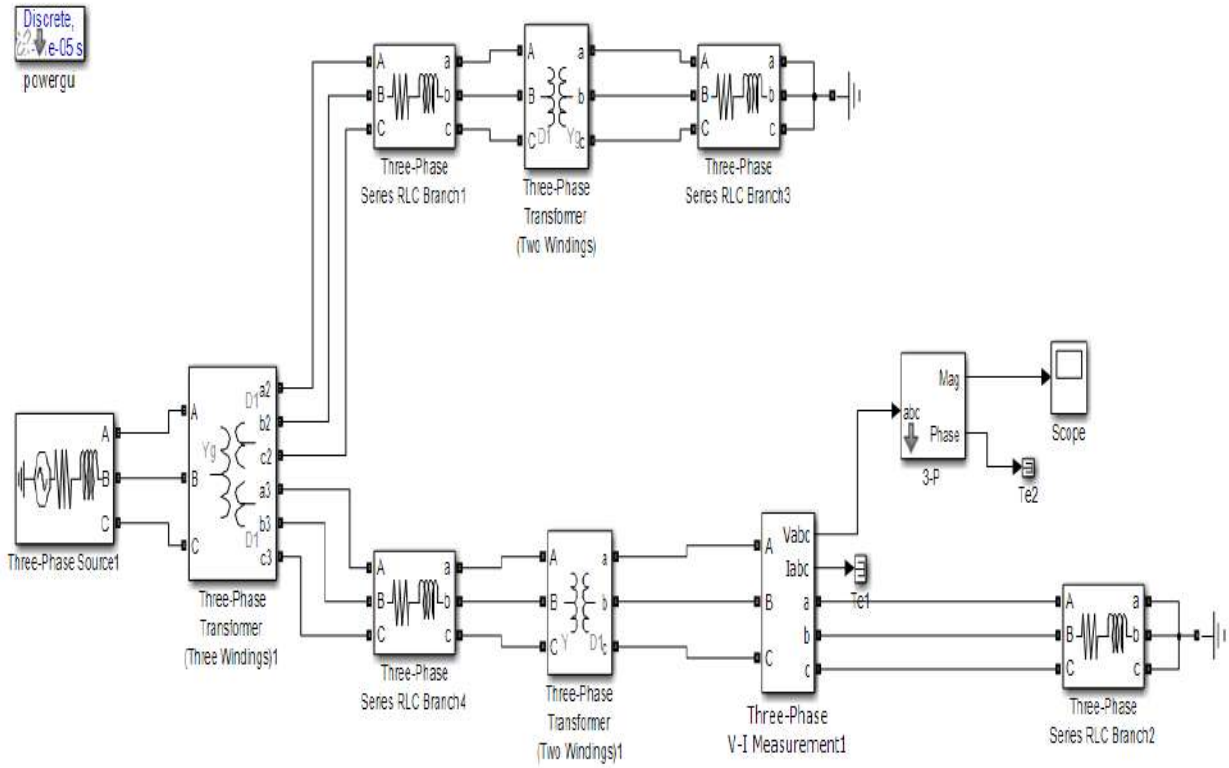


Figure IV.3 : Schéma du réseau sans défaut sans DVR**.**

Après l'exécution on obtient le résultat suivant :

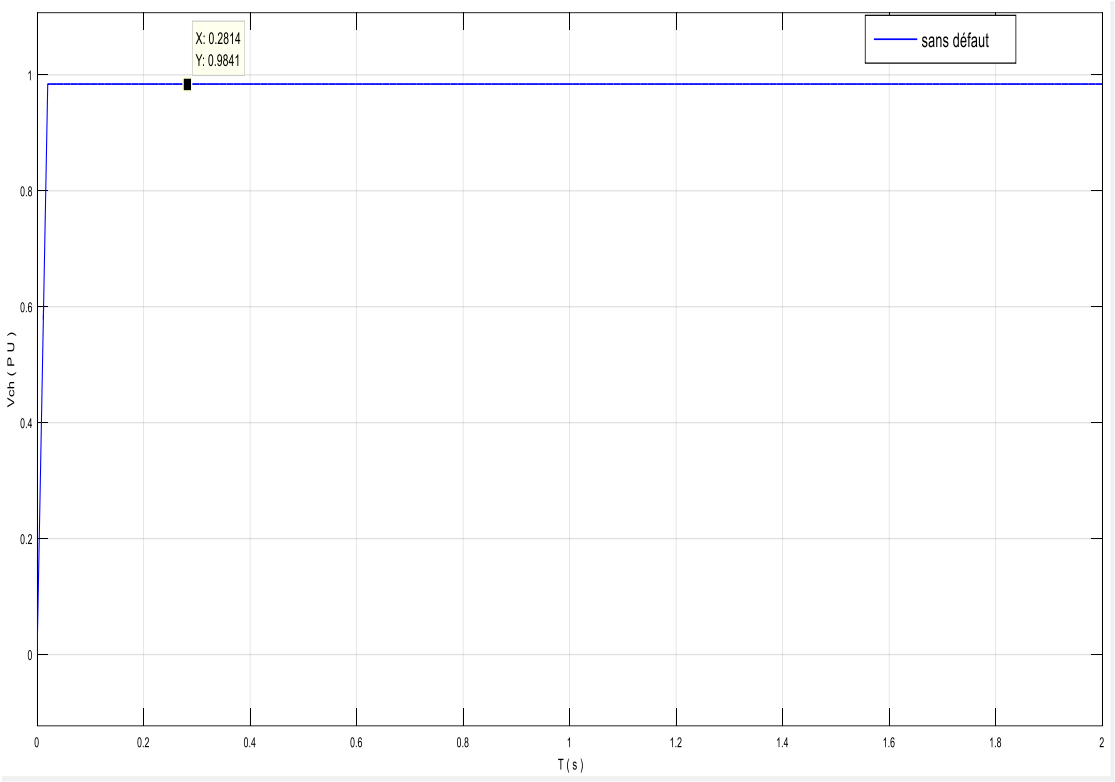


Figure IV.4 : Résultat de la simulation sans défaut.

La valeur efficace de la tension dans le réseau sans défaut est égale 0.9841 pu.

IV.4.2. Simulation avec défaut sans DVR :

On branche un bloc de défaut dans le réseau du coté charge, puis on injecte un défaut (monophasé, biphasé et triphasé) dans le réseau pendant 0.8s (de 0.6 à 1.4s) et on exécute la simulation sans DVR pour voir l'influence du défaut sur le réseau (**Figure IV.5**).

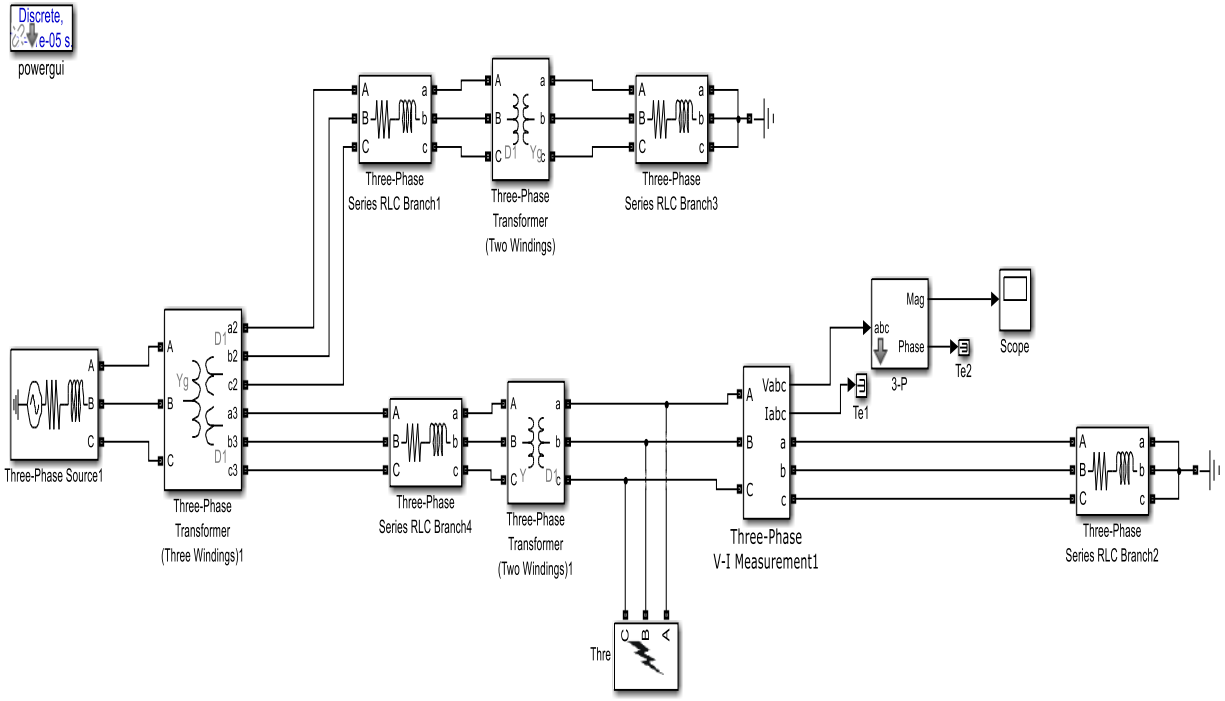


Figure IV.5 : Schéma du réseau avec un bloc de défaut.

Après l'exécution on obtient les résultats suivants :

a) Défaut monophasé (phase A) :

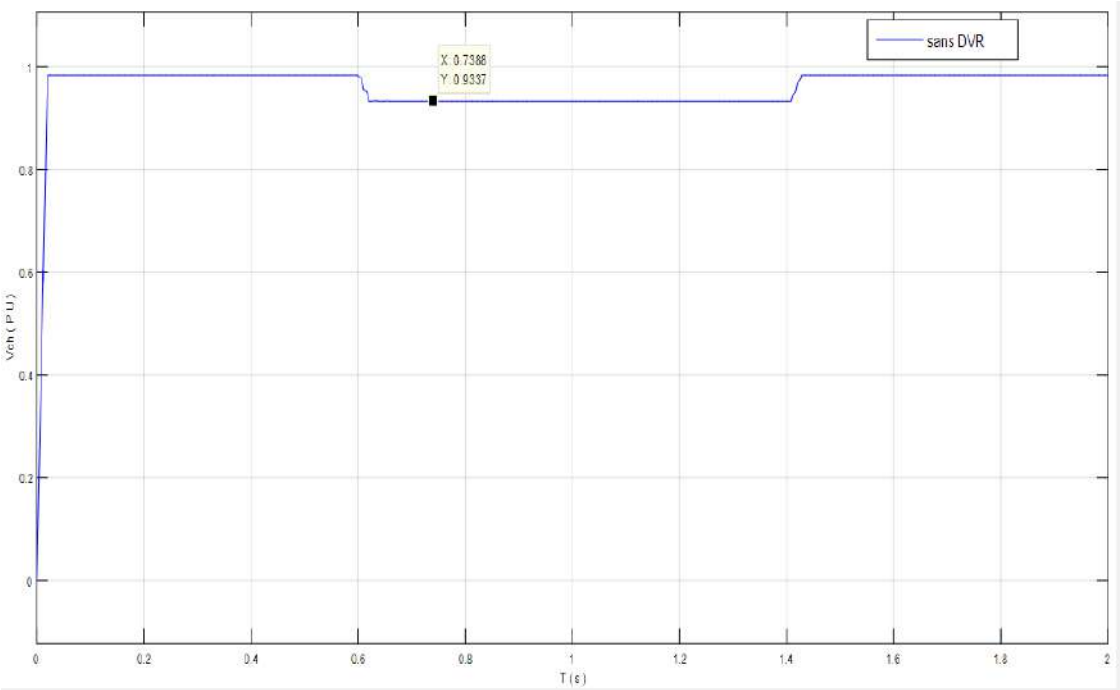


Figure IV.6 : Défaut monophasé (phase A- terre).

Le défaut baisse la tension jusqu'à la valeur de 0.9337 pu.

b) Défaut biphasé (phases A et phases B) :

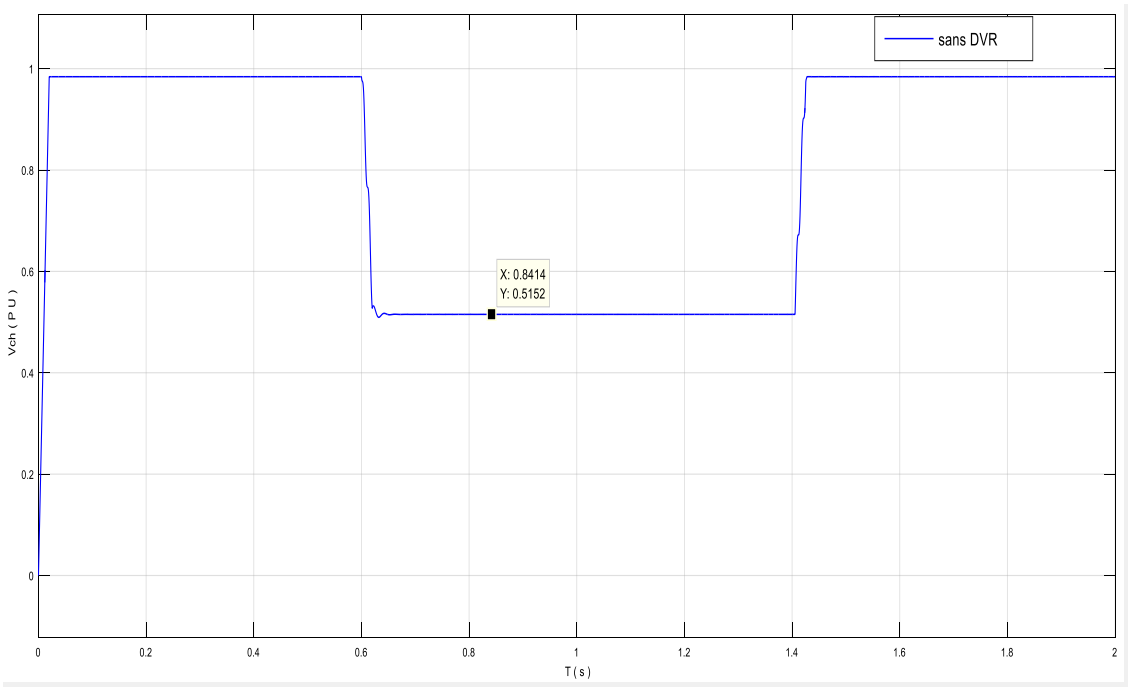


Figure IV.7 : Défaut biphasé (A-B).

Le défaut baisse la tension jusqu'à la valeur de 0.5152 pu.

c) Défaut biphasé (phases A, phases B et phases C) :

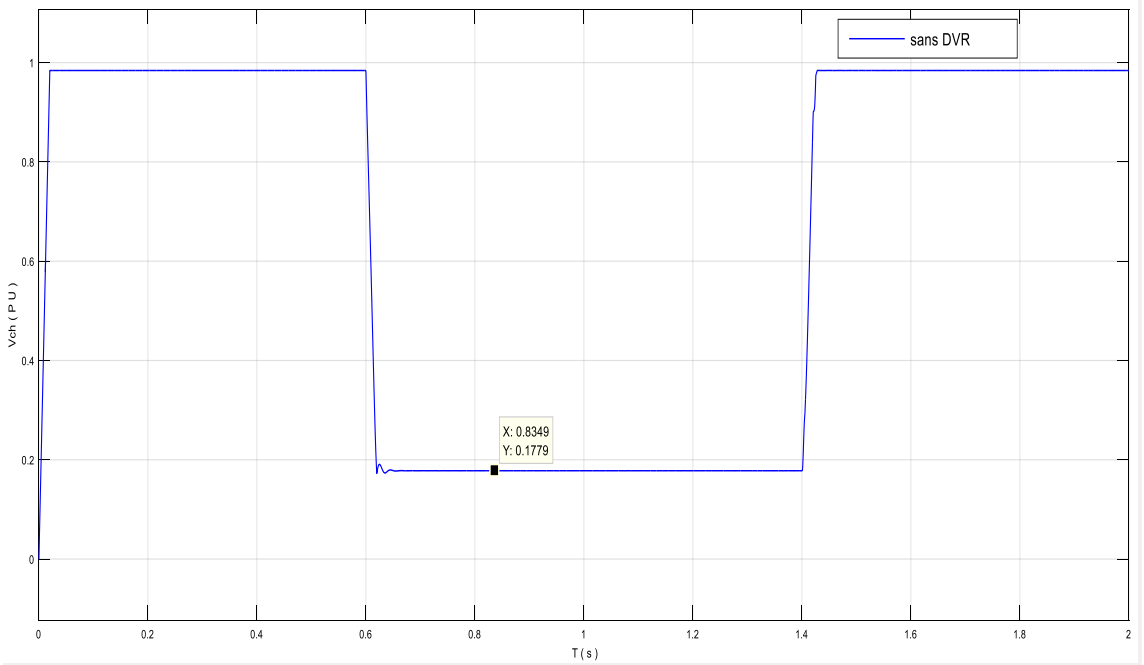


Figure IV.8 : Défaut triphasé (A-B-C).

Le défaut baisse la tension jusqu'à la valeur de 0.1779 pu.

IV.4.3. Simulation des défauts avec DVR :

Pour montrer l'efficacité du DVR dans la régulation de la tension, des simulations ont été réalisées avec et sans DVR connecté au système. Pour cela, on applique deux types de test pour notre modèle. Le premier test concerne les défauts est comprend les trois types de défaut possible (monophasé, biphasé et triphasé) et dans le deuxième test une charge supplémentaire est connecté au secondaire du transformateur pour créer une surcharge pour voir le comportement du DVR contre les surcharges.

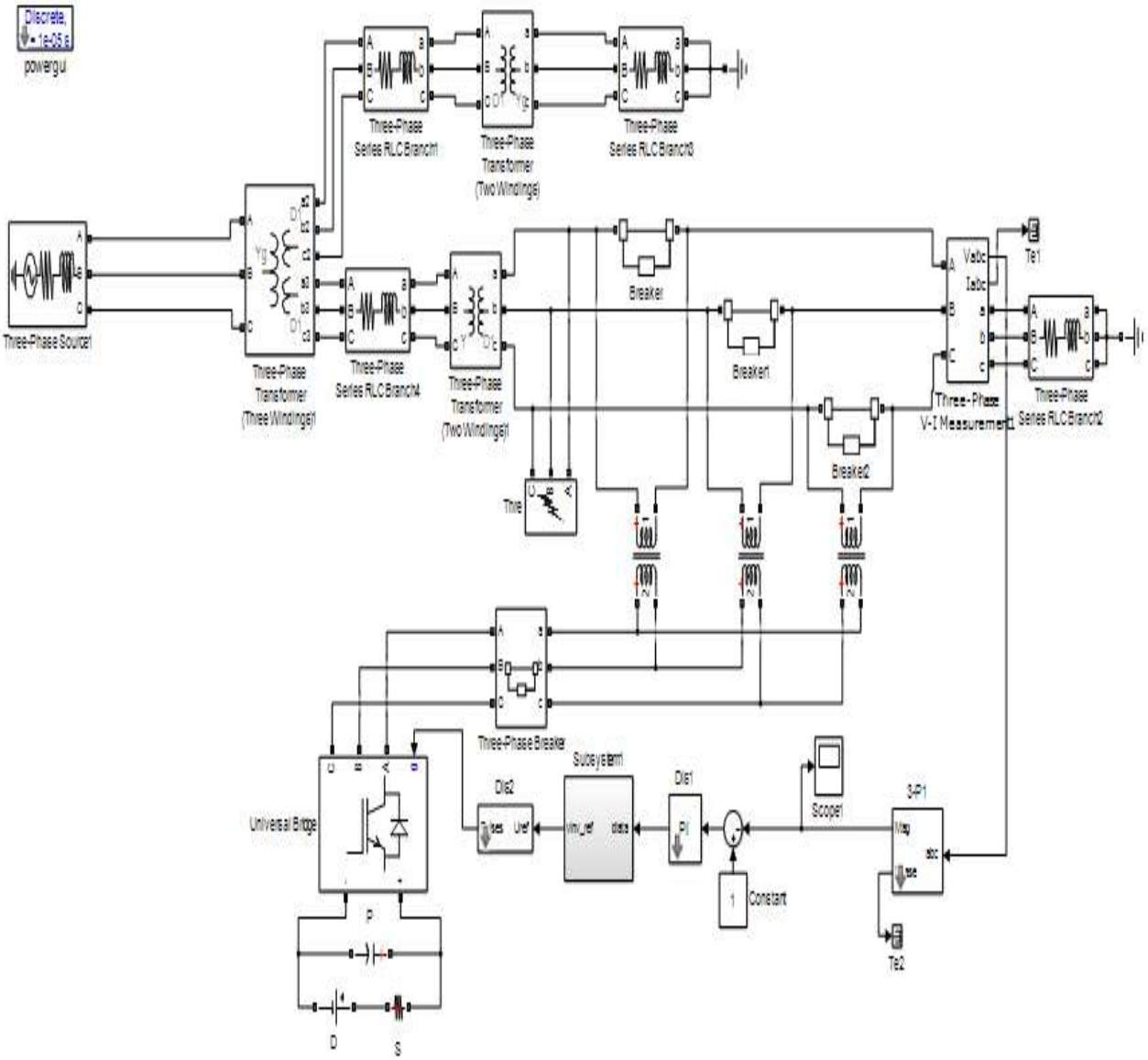


Figure IV.9. Schéma du réseau avec DVR.

a) Défaut monophasé :

La **Figure IV.10** représente les résultats de simulation en cas défaut monophasé (phase A à la terre), Ces résultats montre que le DVR à bien réagit et à permet d'augmente la tension en cas de défaut jusqu'à la valeur de 0.9879 pu donc il a réussi d'améliorer la tension de 5.42 % et de la garder en dessus de la valeur admissible.

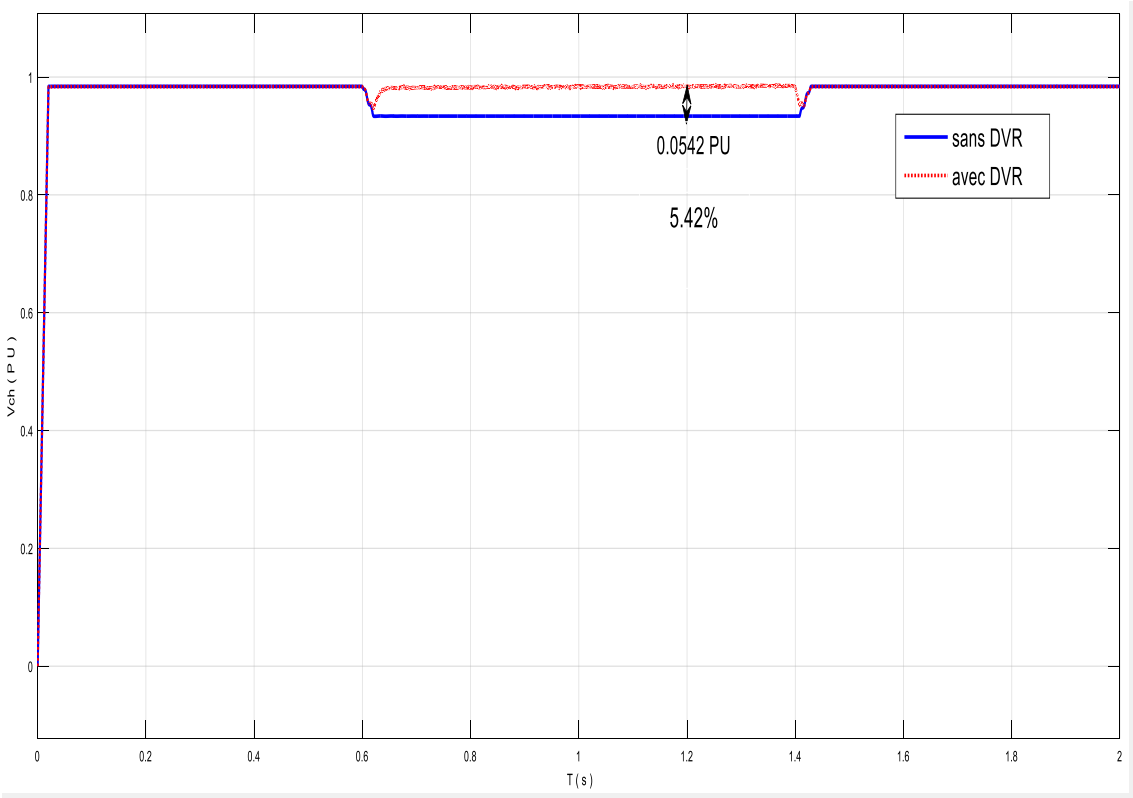


Figure IV.10 : Défaut monophasé (phase A-terre).

b) Défaut biphasé :

Dans le cas d'un défaut biphasé on remarque que la chute de tension est très importante est elle représente presque la moitié de la tension nominale, mais malgré sa le DVR a réussi de remonté la tension jusqu'à la valeur de 0.7529 pu et donc il permet d'améliorer la tension de 23.77 %.

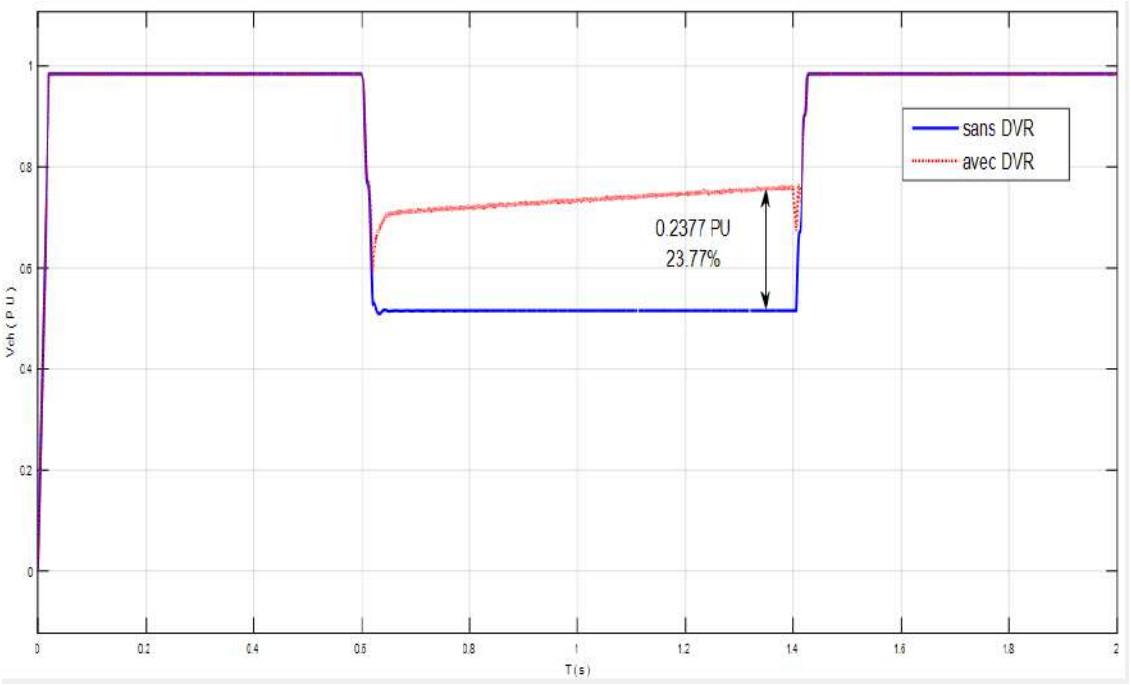


Figure IV.11 : Défaut biphasé (phases A-B).

c) Défaut triphasé :

Enfin dans le cas d'un défaut triphasé même constatation pour le défaut biphasé, la aussi la chute de tension est très importantes et le DVR à remplir sans tache parfaitement en remontant la tension du défaut jusqu'à la valeur de 0.7048 pu. Donc il permet d'améliorer la tension de 52.69 %.

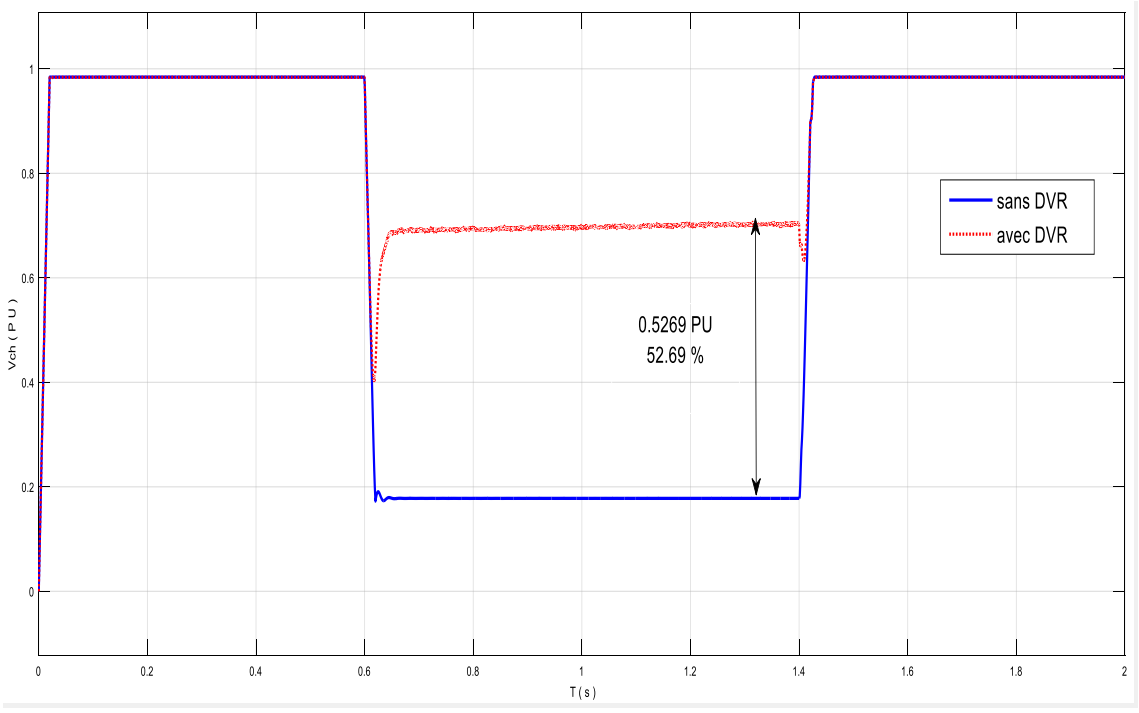


Figure IV.12 : Défaut triphasé (A-B-C).

IV.4.4. Simulation de surcharge sans DVR :

On ajoute une charge dans le réseau avec un interrupteur qui injecte une charge supplémentaire pendant 0.8s (de 0.6s à 1.4s) et on exécute la simulation sans DVR pour voir l'influence de la charge sur le réseau (**Figure IV.13**).

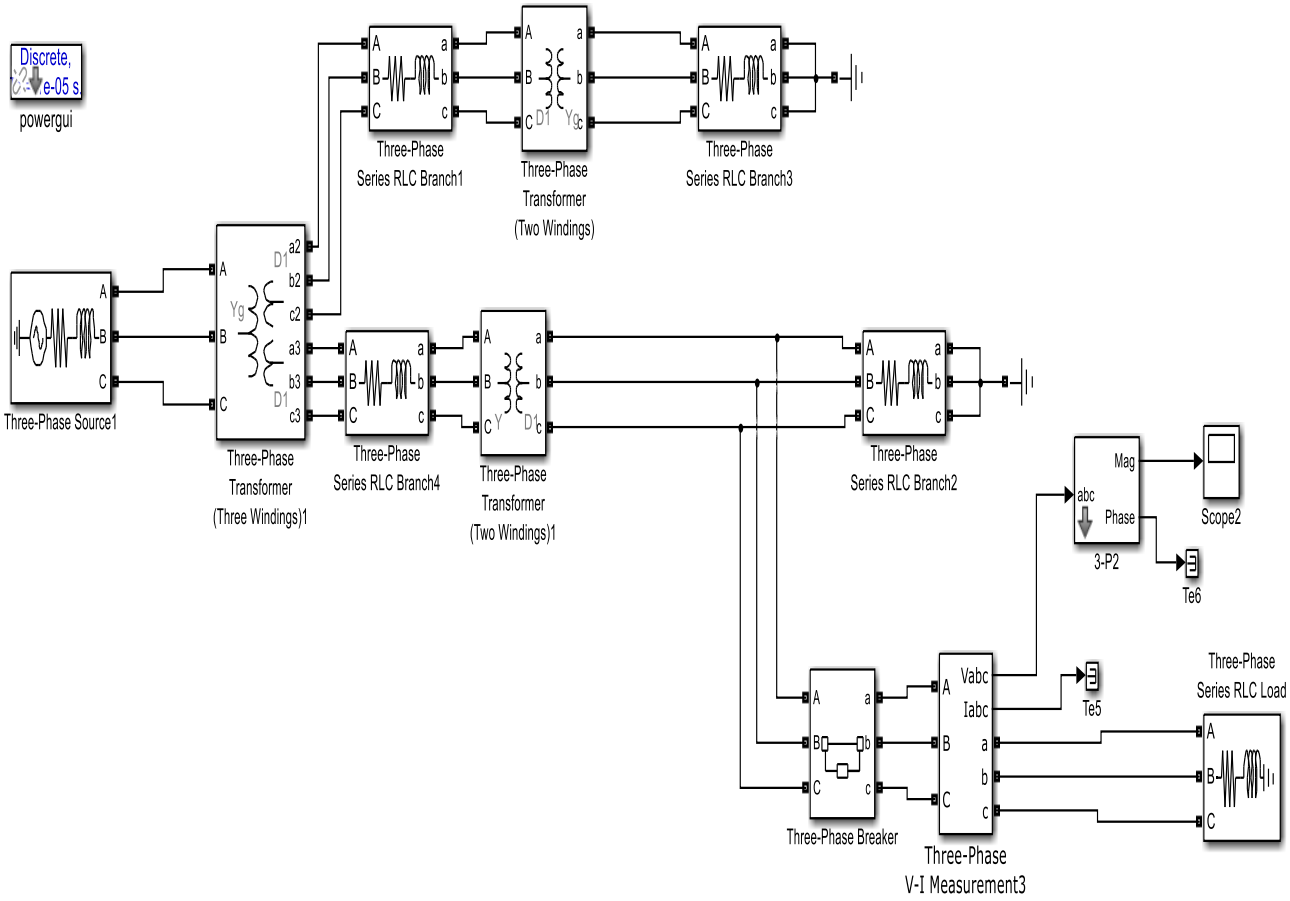


Figure IV.13 : Schéma du réseau de surcharge.

❖ Résultats obtenus :

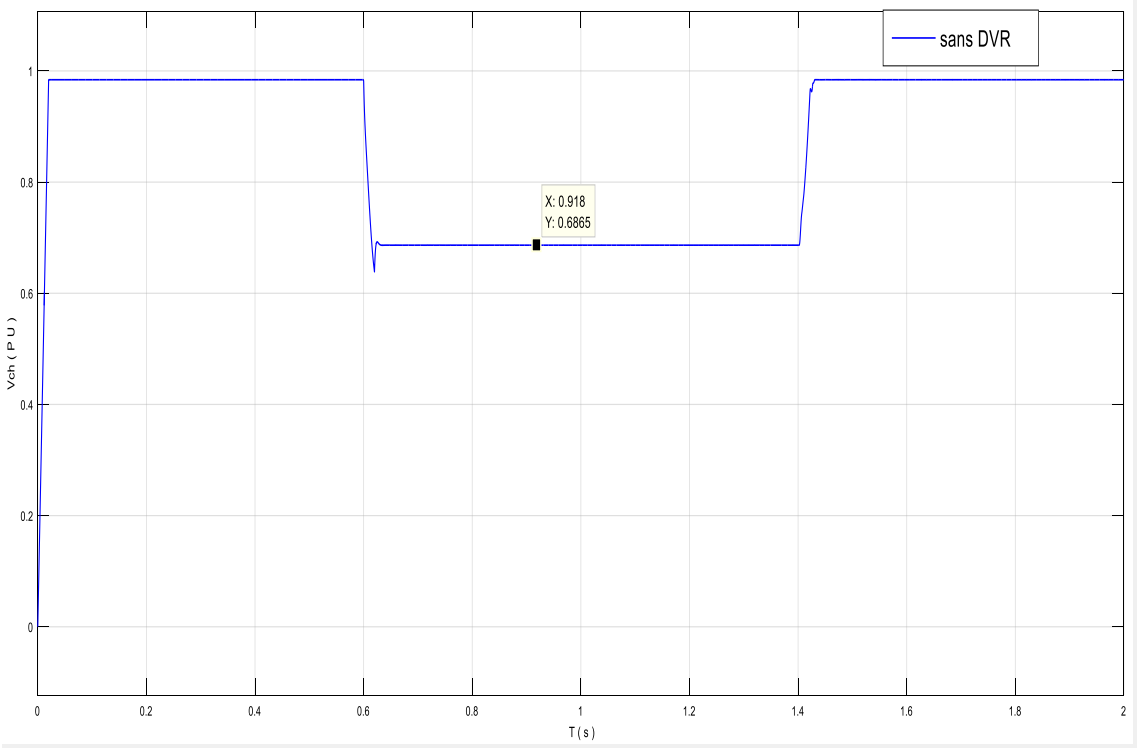


Figure IV.14 : Cas de surcharge.

D'après la figure IV.14 en remarque une chute de tension d'environ 29.76% de la valeur nominale au moment de l'introduction de la charge supplémentaire.

IV.4.5. Simulation de surcharge avec DVR :

Pour montrer l'efficacité de DVR dans la régulation de la tension en cas de surcharge, des simulations ont été réalisées avec et sans DVR connecté au système, **(Figure IV.15)**.

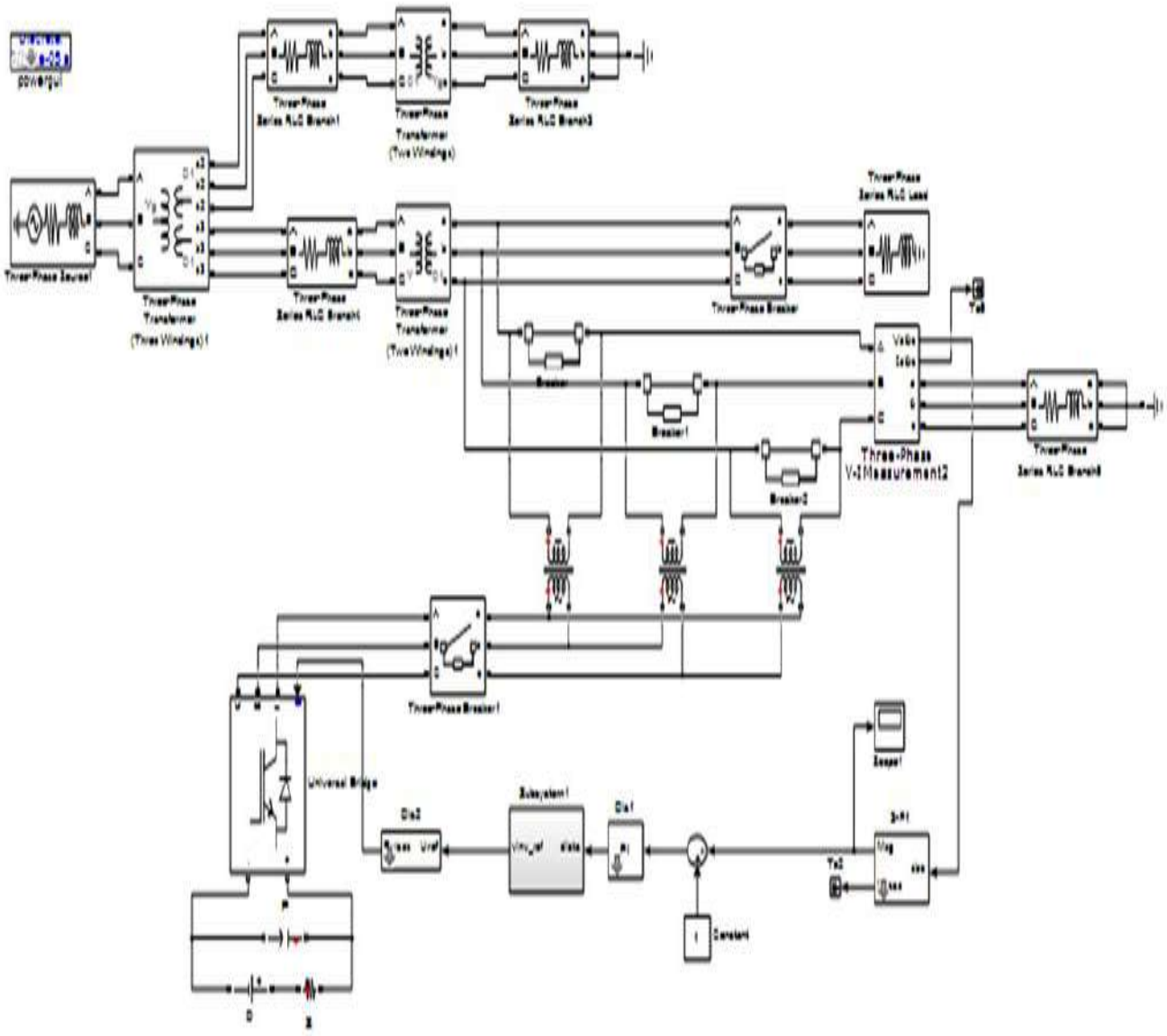


Figure IV.15 : Schéma du réseau de surcharge avec DVR.

❖ **Résultats obtenus :**

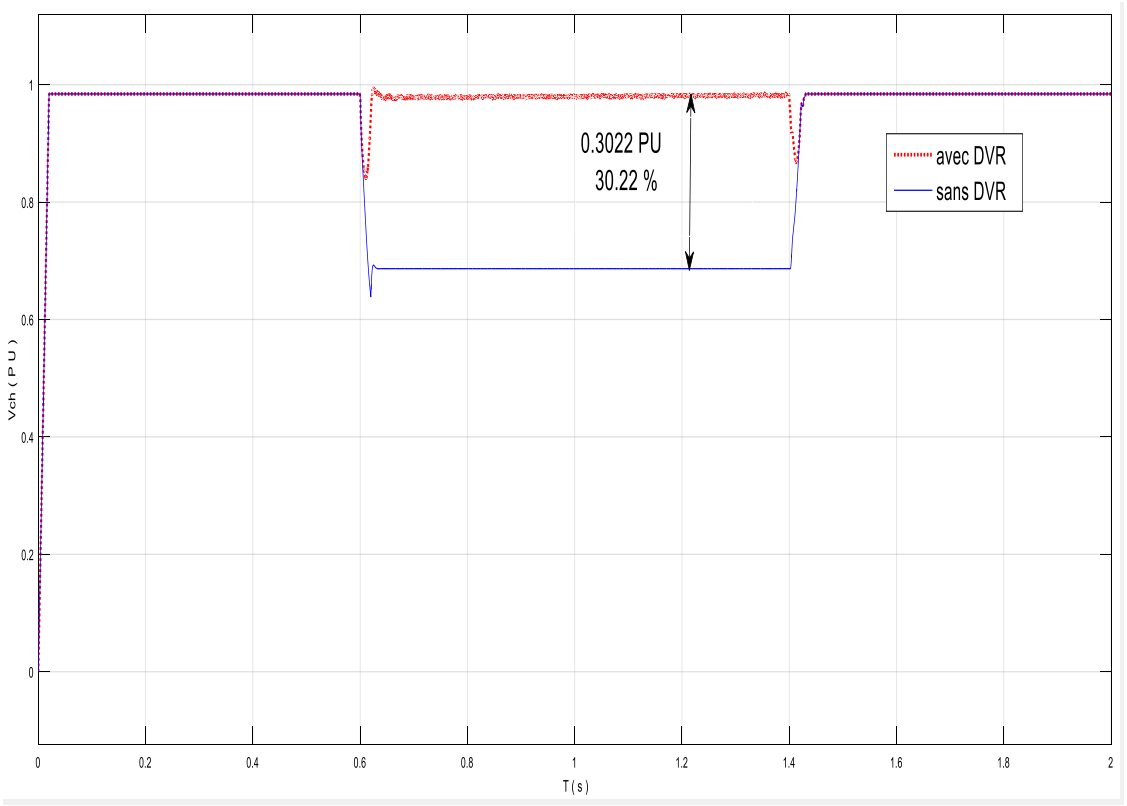


Figure IV.16 : Surcharge avec et sans DVR

Après l'exécution on remarque que le DVR a réussi à augmenté la tension jusqu'à la valeur de 0.9887 pu en cas de surcharge donc il a parfaitement assuré son rôle.

IV.5. Conclusion :

D'après les résultats obtenus on remarque que lorsque le défaut apparait dans le réseau le DVR réagit instantanément et compense la tension quel que soit la valeur de la chute de tension, et il permet de garder la tension autour de la valeur admissible (entre 0.9 et 1.1 pu) et à la fin du défaut la valeur de la tension prend la valeur nominal.

Donc on peut conclus que le DVR est un moyen efficace pour améliorer la tension dans les réseaux.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

La recherche d'une meilleure compétitivité des entreprises, la dérégulation du marché de l'énergie électrique font que la qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance, de gestion de sites tertiaires ou industriels ainsi que pour les constructeurs d'équipements. Cependant, les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité car des solutions existent. Leur définition et leur mise en œuvre dans le respect des règles de l'art, ainsi que leur maintenance par des spécialistes permettent une qualité d'alimentation personnalisée adaptée aux besoins de l'utilisateur.

Une des solutions possibles pour faire face à ces problèmes est l'utilisation de composants FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems, ou système de transmission Flexible à courant alternatif). Ces dispositifs sont capables de remplir diverses fonctions, tels que le maintien de la tension, du contrôle des flux de puissance, l'amélioration de la stabilité du réseau, l'augmentation de la puissance transmissible maximale, etc. Plusieurs types de FACTS, différents sur les plans architectural et technologique, ont été développés. Parmi les multiples dispositifs de la commande de puissance de roman, le DVR est une invention récente pour améliorer la qualité de puissance dans les systèmes de distribution d'énergie.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte sur le contrôle de la tension avec un dispositif FACTS à base d'onduleur de tension DVR. Cependant, pour une conception optimum avec une meilleure méthode de solution, nous avons effectué plusieurs essais de simulations sur un DVR insérés dans un réseau perturbé. Ces résultats ont été obtenus en utilisant MATLAB-SIMULINK, Les résultats de simulations ont vérifié l'efficacité de la stratégie de contrôle des tensions avec le DVR.

En concluant ce travail par une démonstration de l'exécution d'un DVR dans les réseaux électriques pour atténuer n'importe quelle anomalie de tension d'alimentation pour maintenir la tension de la charge à protéger équilibrée et constante à la valeur nominale, et en démontrant une flexibilité et efficacité, dans le contrôle de la majorité des paramètres du réseau. De plus la

compensation de ces dispositifs n'est pas faite par des condensateurs connectée directement au réseau ce qui élimine totalement le problème de résonance synchrone qui nuit le transport électrique.

Finalement, nous pensons qu'il pourrait être intéressant d'approfondir les études sur le DVR en particulier dans l'amélioration de la compensation et la stabilité des réseaux en cas des surtensions. Ceci pourrait constituer un futur projet.

Conclusion Générale---------- 65

BIBLIOGRAPHIE

[01]. M. Crappe, L'exploitation des r´eseaux ´electriques avec l'´electronique de puissance,Lavoisier, 2006

[02]. ABIDI A. « Flexible AC Transmission systèmes », mémoire Magister ; université de Batna, Juin 2009.

[03]. Mohamed BOUHENDIA, « Etude d'un D-STATCOM », thèse de magister, université de Djilali Liabés Sidi bel abbés, 2011.

[04]. J C. Puret « les réseaux de distribution publique MT dans le monde », Cahier technique Merlin Gerin n° 155, édition septembre 1991.

[05]. L. Lasne, Jean-Claude Gianduzzo «Les réseaux électriques», livre Electrotechnique, éditions Dunod, 2008.

[06]. N.G.Hingorani and L.Gyugyi: «Understanding FACTS», IEEE press, New York, 2000.

[07]. Samia BOUTABA, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC » thèse de magister, université Hassiba Ben Bouali Chlef, 2009.

[08]. De Vre R, Jacquet B : «Perturbations dans les installations électriques et électroniques problèmes et solutions» Note d'information.

[09]. Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet : « Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l'ingénieur D 4315.

[10]. H. Boudjella « Contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) », Mémoire de Magistère, Université de Djilali Liabés Sidi bel abbés ,2008.

[11]. Philipe Sarrand et Jean Verseille : « Compensation de l'énergie réactive et tenue de tension dans les réseaux publics », Technique de l'ingénieur, D 4305.

[12]. L.Benasla : «Compensation statique : Approche shunt et Approche série», mémoire de magister, Département d'électrotechnique, USTO, juillet 1999.

[13]. Michel Crappe «Commande et régulation des réseaux électriques», Lavoisier 2003.

[14]. DELENDI «Contrôle De L'écoulement De Puissances Active Par System FACTS», Mémoire Magistère, Université Hadji Lakhdar Batna, 2009.

[15]. K. Bclaeheheb « Contribution à V étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport », Thèse de Doctorat de l'université de Henri Poincare Nnancy I, 2001.

[16]. Petitcluir Patrice « Modélisation et commande de structures FACTS : Application au STATCOM », Thèse de Doctorat de l'INGP, 1997.

[17]. G, Glanzmann « FACTS Flexible Alternating Current Transmission Systems », EEH - Power Systems Laboratory ETH Zurich, 2005.

[18]. M. Ali.Taghikhani & A. Kazemi, "A New Phase Advanced Multiloop Control System for Dynamic Voltage Restorer", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol.3, Issue2, Article 1072, 2005

[19]. B. Paisan & M. Nadarajah, "Understanding of Dynamic Voltage Restorers through MATLAB Simulation", Thammasat Int. J. Sc. Tech., July-September 2006.

[20]. P. Daehler & R. Affolter, "Requirements and Solutions for dynamic Voltage Restorer, a Case Study", IEEE, 2000.

[21]. M.N. Khalid & M. Hasmaini, "Digital Simulation of (UPS) And (DVR) for Voltage Sag Mitigation", TNB Research Sdn.Bhd, Septembre 2006.

[22]. E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, "Power Electronic Control in Electrical Systems", NEWNES, Printed and bound in Great Britain, ISBN 0 7506 5126 1,2002.

[23]. A. BOYETTE, "Controle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.

[24]. S.V Ravi Kumar & S. Siva Nagaraju, "Simulation of D-STATCOM and DVR in Power Systems", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.2, NO.3, ISSN 1819-6608, JUNE 2007.

[25]. S. Gusia, " Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande MLI "Thèse de Doctorat, Université catholique de LOUVAIN, Septembre 2005.

[26]. S. S. Choi, D.M. Vilathgamuwa "Analysis of Series Compensation and DC-Link Voltage Controls of a Transformer less Self-Charging Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004, pp:1511 - 1518.

[27]. C. Zhan Arulampalam A., Fitzer C., Kromlidis S., Barnes M. et Jenkins N. "Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage-Space-Vector PWM Control", IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, 2001, pp :1855 - 1863.

[28]. H. Fujita, H. Akagi "Design strategy for the combined system of shunt passive and series active filters", IEEE, Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1991, 28 Sept.-4 Oct. 1991, pp: 898 - 903.

[29]. F.Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae "Compensation characteristics of the combined system of shunt passive and series active filters", IEEE, Trans. md. Appi., Vol. 29, No. 1,Jan.-Feb.1993, Page(s):144 - 152.

[30]. J. Delaballe, " La CEM : la Compatibilité électromagnétique", Cahier Technique, Schneider Electric, n°149, édition décembre 2001.

[31]. H. James Harlow, "Electric Power Transformer Engineering", CRC Press LLC, Printed in the United States of America, ISBN 0-8493-1704-5, 2004.

[32]. A. BOYETTE, "Controle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolièNne", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Décembre 2006.

[33]. S. kumar K.S., "Dynamic Voltage Restorer (DVR) and Their Control", Article in Electrical Engineering, June 2003.

[34]. W.W. Shairul & M.Y. Alias, "Voltage Sag and Mitigation using Dynamic Voltage Restorer (DVR) System", ELEKTRIKA, Vol.8, NO.2, 32-37, 2006.

[35]. A. Rai & A. K. Nadir, "Modeling & Simulation of Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Enhancing Voltage Sag", Sensors & Transducers Journal, Vol. 87, Issue 1, pp. 85-93, January 2008

[36]. M. Ali.Taghikhani & A. Kazemi, "A New Phase Advanced Multiloop Control System for Dynamic Voltage Restorer", International Journal of Emerging Electric Power Systems,Vol.3, Issue2, Article 1072, 2005