

I.1.Introduction

Tout système électrique (câble, ligne, transformateur, moteur, éclairage, ...) utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive [1].

L'ensemble d'appareils destinés à la production, au transport, à la distribution à partir de la centrale de génération jusqu'aux centrales industrielles et résidentielles est un réseau.

Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent l'acheminement de l'énergie depuis ces unités vers les lieux de consommation à travers des lignes électriques (aériennes/ou souterraine) [2].

On passe par les exigences suivantes pour que l'énergie électrique soit utilisable :

- Une énergie à un prix raisonnable.
- Une tension et une fréquence stables.
- Une puissance voulue.
- Une sécurité forte.

I.2.Généralités sur la compensation d'énergie réactive

I.2.1.Energie active, réactive, apparente

L'énergie active consommée (kWh); Résulte de la puissance active P (kW) des récepteurs. Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes).

L'énergie réactive consommée (kvar) ; Sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive Q (kvar) des récepteurs.

L'énergie apparente (kva) ; Est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente S (kva) des récepteurs, somme vectorielle de P (kW) et Q (kvar). [1] [3]

I.2.2.La problématique de l'énergie réactive en milieu industriel

Dans l'environnement industriel actuel, la prolifération des charges sur les réseaux de distribution électrique entraîne une dégradation du facteur de puissance.

Les principaux consommateurs d'énergie réactive concernent :

- Les moteurs asynchrones ordinaires,
- Les lampes à ballast magnétiques à fluorescence ou à décharge,

- Les fours à induction et à arc,
 - Les machines à souder.
- Les conséquences de cette énergie réactive sont nombreuses :
- pénalités (en tarif vert) par le fournisseur d'électricité,
 - augmentation de la puissance souscrite au fournisseur d'énergie, des pertes Joules et des chutes de tension dans les circuits,
 - surcharge au niveau du transformateur et des câbles d'alimentation,
 - surdimensionnement et précaution au niveau des protections,
 - dégradation de la qualité de l'installation électrique [4].

I.2.3.Objectifs

La circulation des puissances active réactive provoque des pertes actives et des chutes de tension dans les conducteurs. Les pertes actives réduisent le rendement global des réseaux et les chutes de tension sont néfastes au maintien d'une bonne tension que doit la distribution à ces clients. Ainsi est-il donc préférable sur le plan technique de les produire le plus près possible des lieux de consommation.

est plus économique de produire l'énergie active d'une manière centralisée et de la distribuer ensuite aux clients, le cout de transport est moins élevé que le surcout d'une production réalisée localement.

En revanche pour la puissance réactive, il est économiquement plus intéressant de la produire localement par des générateurs d'énergie réactive. Cette pratique est appelée compensation de l'énergie électrique [5] [6].

I.2.4.Amélioration du facteur de puissance

Lorsque le facteur de puissance est proche de l'unité, il optimise le fonctionnement d'une installation et indique une faible consommation d'énergie réactive. Une consommation d'énergie réactive assez grande pour une installation électrique va intensifier ses courants en ligne bien que sa puissance active n'est pas troquée. On doit installer des compensatrices sources d'énergie réactive en parallèle pour limiter les courants en ligne et donc l'énergie réactive.

On introduit cette technique par compensation de l'énergie réactive. L'amélioration du facteur de puissance $\cos \varphi$ et due à cette compensation. Cette dernière a plusieurs faveurs :

- Une chute de tension réduite.
- Une section de câbles diminue.
- Des pertes en ligne diminuent.
- L'accroissement de la puissance active disponible du transformateur [5] [6] [7].

I.3.La compensation traditionnelle de l'énergie réactive

I.3.1.Différents types de compensation

Les condensateurs peuvent être installés à différents niveaux :

I.3.1.1Compensation globale

La batterie de condensateur est installée au départ de l'installation. Ce type de compensation convient pour une installation simple de moyenne puissance, elle permet de supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive, de soulager le poste de transformation toutefois ce mode de compensation ne soulage pas les installations en aval car la totalité du courant réactif est présente dans les câbles jusqu'au récepteurs.

I.3. 1.2 Compensation partielle

Les condensateurs sont installés aux départs de chaque atelier. Cette compensation est conseillée lorsque la puissance est importante ou lorsque les ateliers fonctionnent à des régimes différents. Ce type de compensation en plus des avantages de la compensation globale permet de soulager les câbles alimentant les différents ateliers. la totalité du courant réactif n'est plus présente que dans les câbles allant de l'armoire de distribution de l'atelier aux récepteurs.

I.3. 1.3 Compensation locale

La batterie de condensateur est raccordée directement à l'appareil ; cette compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance souscrite. Ce type de compensation est techniquement idéal puisqu'il introduit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée [5]

I.3.2 Les moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension

Il y a plusieurs sources qui sont capables de produire de l'énergie réactive, ce qui permet d'utiliser ces dernières comme des moyens de compensation d'énergie réactive et peut les classer comme suit:

- Les compensateurs rotatifs : qui sont les moteurs synchrones.
- Les compensateurs statiques : qui sont les batteries de condensateurs.

Les mécanismes de compensations de l'énergie réactive et de réglage de la tension sont :

- Les condensateurs et inductances fixes;
- Les compensateurs synchrones;
- Les compensateurs statiques;
- Les transformateurs à prises variables (en charge ou à vide);
- Les groupes générateurs [8]

I.3.2.1 Condensateurs et inductances fixes :

Les bancs de condensateurs installés en dérivation peuvent atteindre quelques Mvar fractionnables par gradins de 2 à 4 Mvar, voire 10 Mvar. Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance au niveau de charges inductives mais ayant certains inconvénients Parmi lesquels:

- la puissance réactive produite diminue lorsque la tension diminue alors qu'elle devrait augmenter
- sursensions et surintensités à l'enclenchement.

Les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins mis en ou hors tension par disjoncteurs ou actuellement par thyristors (ce qui supprime toute usure du matériel et accroît la vitesse de réponse), commandés par relais Var métrique qui mesure l'erreur entre valeur de consigne et puissance fournie.

Des bancs de condensateurs peuvent être insérés en série avec les conducteurs d'une ligne afin de diminuer sa réactance. On diminue aussi la chute de tension entre la source et la charge comme indiquée sur la figure (1.7). On voit que ce type de compensation [9]

- diminue l'angle de transport « θ » et agit donc aussi sur le transit de puissance active
- augmente la limite de puissance transmissible

- Améliore de la stabilité du réseau [10]

Les inductances sont utilisées pour absorber la puissance réactive produite par les lignes longues à très haute tension à faible charge ou des réseaux de câbles. Elles sont généralement raccordées au tertiaire de transformateurs et leur puissance peut aller de 50 Mvar (via un transformateur à trois enroulements) à 400 Mvar en raccordement direct sur des lignes de très haute tension [7] [11].

I.3.2.2. Compensateurs synchrones

Un compensateur synchrone était une machine synchrone sans charge, spécifiquement conçue pour la production ou l'absorption de puissance réactive en ajustant l'excitation.

Les groupes de production sont les sources de tension du réseau et peuvent produire ou consommer de l'énergie réactive : une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur. En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance. Vu l'éloignement électrique entre centres de production et de consommation, les groupes ne compensent pas les charges mais peuvent faire face aux besoins en réactif du réseau [8].

La fourniture de puissance réactive en surexcitation est limitée par le courant rotorique maximum et en absorption par la stabilité de la machine synchrone. Cette limite peut varier avec des régulateurs de tension [11].

Le grand avantage par rapport aux condensateurs ou inductances passives est leur grande flexibilité sous toutes conditions de charge (réglage continu), par contre leur coût est élevé tant en investissement qu'en maintenance [7].

I.3.2.3. Compensateurs statiques

Ils sont constitués de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors montés en tête-bêche. On aura ainsi par la mise en parallèle d'une inductance réglable par thyristors (TCR : *Thyristor Controlled Reactor*) et de batteries de condensateurs commutables également par thyristors, un réglage continu de l'inductance par modification de l'angle d'amorçage des thyristors. [12].

Les compensateurs statiques peuvent être utilisés pour le réglage de la tension, et pour l'amélioration de la stabilité du réseau. [12], [8]. Ils sont de bonne performance dynamique (temps de réponse de quelques dixièmes de seconde). Ils sont capables d'atténuer les fluctuations de tension, en particulier dans les zones éloignées des centres de production [13].

I.3.2.4. Transformateurs avec prises réglables en charge

Un régulateur en charge modifie le rapport de transformation à l'intérieur d'une plage déterminée en augmentant ou diminuant le nombre de spires de l'enroulement haute tension. Il faut prendre garde de ne pas interrompre le courant ni mettre des spires en court-circuit lors de la commutation. Cela est réalisé par l'insertion temporaire d'une inductance ou d'une résistance. La plage de réglage est typiquement de $\pm 15\%$ avec une vingtaine de prises (échelon entre 1 et 2 %). Par rapport au réglage nominal, un changement de prises correspond à une injection d'une tension additionnelle au point d'insertion du transformateur, ce qui implique une modification de la répartition de la puissance réactive dans la zone concernée [8] [14].

I.4 Classification des compensateurs

I.4.1 Compensateur à éléments passifs

Principalement on distingue les inductances et les transformateurs. Les éléments peuvent être branchés en parallèle ou shunt, mais aussi en série selon le genre grandeur influencer.

I.4.2 Compensateur parallèle

Ces compensateurs sont placés sur la ligne en parallèle. Ils peuvent être alternativement connectés ou déconnectés selon la puissance demandée.

I.4.3 Compensateur série

L'élément est inséré dans la ligne. Dans ce cas, il peut être court-circuité au cas où son utilisation n'est pas nécessaire.

I.4.4 Transformateur Régulateur

L'insertion d'une autre source de tension dans la ligne est le principe de ce transformateur. Mais le réglage est mécanique. Le transformateur régulateur permet de

corriger les tensions de ligne avec une tension additionnelle $\pm \Delta V$. Cette dernière est en phase avec la tension de ligne par suite la tension effective est égale à $V \pm \Delta V$.

I.4.5 Transformateur Déphaseur

Le transformateur déphaseur agit toujours comme une source de tension insérer dans la ligne. La tension additionnelle $\pm \Delta V$ est d'abord déphasée de 90° par rapport à la tension de ligne.

Il permet aussi de corriger l'angle δ des tensions avec une variation de $+\sigma$, ainsi le contrôle de la puissance active est possible [5] [7].

I .5 Le système FACTS

I .5.1 Définition et le rôle d'un dispositif FACTS :

Le concept FACTS « Flexible Alternative Currents Transmission Systems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....).

Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique tension, impédance, la phase du réseau etc.

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie.

I .5.2 Nécessité des systèmes FACTS

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classique utilisent soit des batteries de condensateurs soit des bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes ne sont pas efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé.

I.5.3 Classification des systèmes FACTS :

Les dispositifs FACTS peuvent être classés selon plusieurs critères. Parmi lesquels, on peut citer les deux critères les plus utilisés.

Le premier critère consiste à les classer selon la présence ou l'absence du port DC au niveau des convertisseurs. Les dispositifs sans port DC sont soumis à des courants et tensions alternatifs.

Le second critère consiste à classer les dispositifs FACTS selon le mode d'injection dans les systèmes électriques [14] [15].

On peut classer les systèmes FACTS en trois catégories :

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

I.5.3.1 Compensateurs parallèles

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux.

Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds [8] [15] [17].

L'avantage de ces derniers permet d'éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction assez lente, et d'avoir un temps de réponse très court [18].

Ce type de compensateur est très utilisé pour le contrôle de tension lorsque la variation de la charge est lente. De plus le compensateur shunt placé au point milieu de la ligne de transmission donne des solutions aux problèmes de la stabilité [8].

Les compensateurs shunts les plus connus sont :

I.5.3.1.1 Compensateur parallèle à base de thyristor²⁵

- *TCR (Thyristor Controlled Reactor)*

Le TCR ou RCT : (Réactances Commandées par Thyristors),

Ce circuit est composé d'une inductance branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelles. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [10] [20].

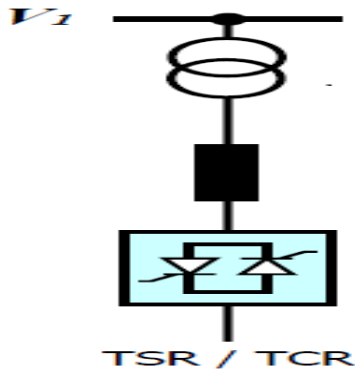


Figure .I. 1 : Schéma du TCR

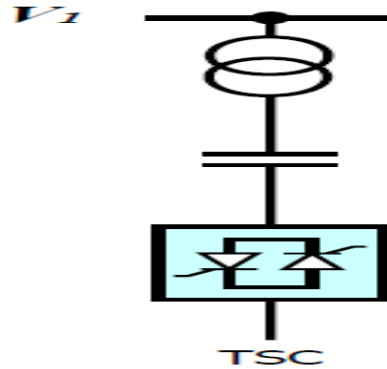


Figure .I.2: Schéma du TSC

➤ *TSC (Thyristor Switched Capacitor)*

Le TSC ou CCT : (Condensateurs Commandés par Thyristor), un TSC comprend un condensateur branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle et une inductance d'atténuation. La fonction principale de commutateur à thyristors consiste à enclencher et à déclencher le condensateur pour un nombre entier de demi-cycle de la tension appliquée.

L'inductance du circuit TSC sert à limiter le courant sous des conditions anormales ainsi qu'accorder le circuit à la fréquence voulue.

➤ *SVC (Static Var Compensator)*

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtre d'harmoniques constitue le compensateur statique d'énergie réactive. Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud.

Avec une coordination appropriée de l'interrupteur des condensateurs et le contrôle des bobines, la puissance réactive de sortie peut être variée continuellement entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement [22].

Le SVC est basé sur des éléments inductifs et capacitifs ordinaires, et le contrôle se fait à travers des éléments à base d'électronique de puissance (thyristors ordinaires).

Les principales fonctions d'un SVC sont :

- Le support de la tension.
- Amortissement des oscillations de la puissance.
- Amélioration des marges de stabilité statique et transitoire [22].

À partir de la caractéristique statique de compensateur SVC, on peut distinguer trois zones de fonctionnement [22]:

- Une zone (Capacitive) ou le TSC donne une énergie maximale, seule les capacités sont connectées au réseau.
- Une zone (Mixte) ou de réglage ou l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
- Une zone (Inductive) ou le TCR donne son énergie maximale (butée de réglage), les condensateurs sont déconnectés.

Malgré ces caractéristiques, le SVC présente des inconvénients dont la capacité est limitée par les éléments inductifs et capacitifs ainsi que son comportement hors de la zone de réglage

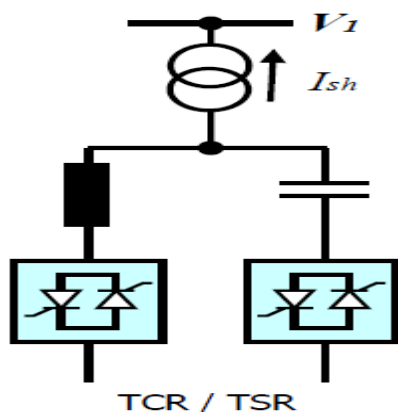


Figure .I. 3: Schéma du SVC

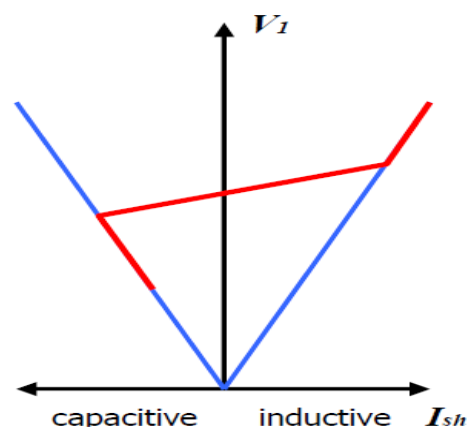


Figure .I. 4: Caractéristique d'un SVC

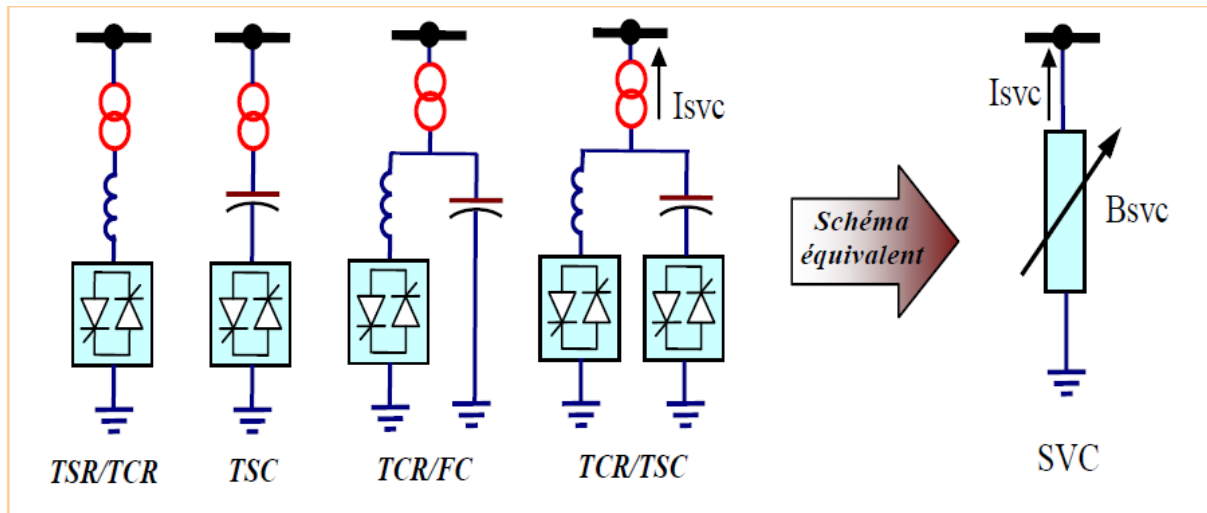


Figure.I. 5: Structure d'un SVC, schéma équivalent

➤ *TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)*

Ce type de compensateur TCBR (*Thyristor-Controlled Braking Resistor*) est connecté en parallèle il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations.

La figure (I.6) représente un TCBR qui est utilisé pour aider à la stabilisation du réseau ou pour diminuer l'accélération des générateurs en cas de perturbation en parallèle avec un SVC équipé d'un

banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique. [23]

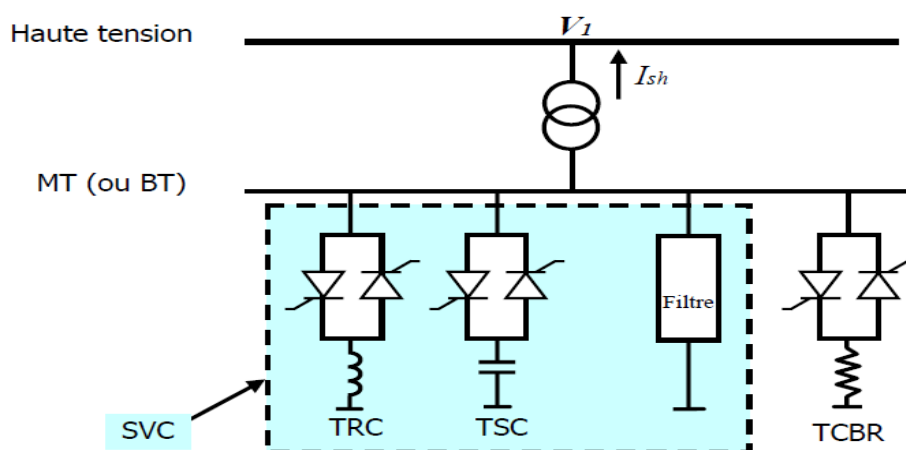


Figure .I. 6: Schéma du SVC et TCBR

A. 1 Compensateur parallèle à base de GTO thyristors

Le STATCOM (STATIC synchronous COMPensator) fut le premier FACTS utilisant le VSC (onduleur à source de tension) à être introduit dans les réseaux électriques [16]. Un STATCOM est un convertisseur statique à source de tension connecté en parallèle à un réseau alternatif en général par le biais d'un transformateur abaisseur. En réglant le déphasage du VSC égal à celui de la tension alternative au point de connexion, le flux de courant dans l'impédance de réseau est parfaitement réactif. Le STATCOM, a connu jusqu'à présent différentes appellations [14].

- **ASVC** (Advanced Static Var Compensator).
- **STATCON** (STATIC CONDenser).
- **SVG** (Static Var Generator).
- **SVC light**
- **SVC plus**

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 [11]. Le STATCOM à une fonction comparable à celle des SVC avec des performances dynamiques plus importantes.

La figure (I.7) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle [23].

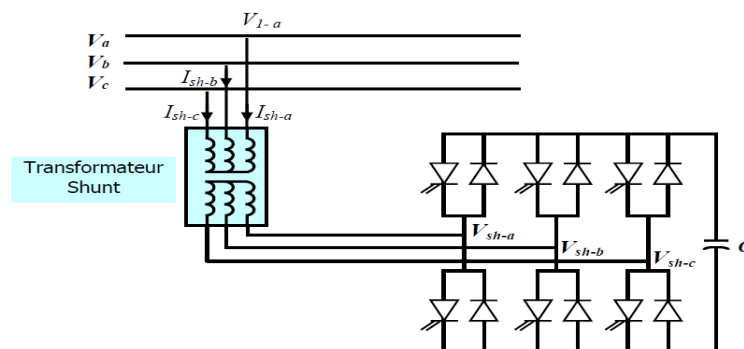


Figure .I.7: Schéma de base d'un STATCOM

I.5.3.2 Compensateurs séries

La puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison dont le comportement est essentiellement inductif. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction en série avec la ligne d'un banc de condensateurs d'impédance X_c . Artificiellement l'impédance de la ligne est donc réduite de X_l à $(X_l - X_c)$ et le transit de puissance est augmenté. De plus, comme le montre le diagramme de Fresnel représenté par la figure (I.9), le profil de tension est amélioré tout au long de la ligne ($V_s - V_R$ plus petit) et l'angle de transport est réduit d'où une amélioration de la stabilité dynamique du système de transport [24].

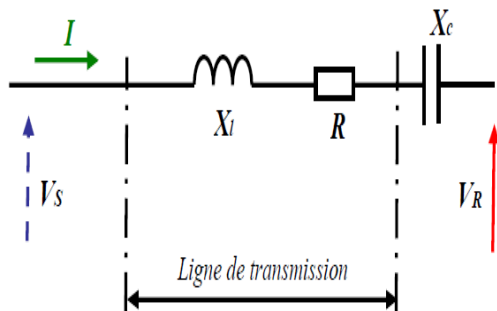


Figure I. 8: Ligne de transmission avec systèmes compensation série

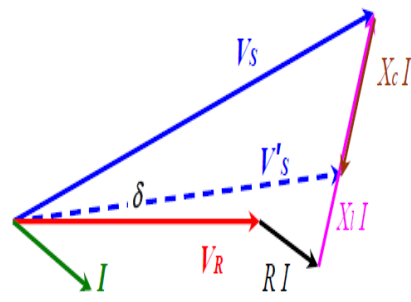


Figure I. 9 : Diagramme de fresnel

A2. Compensateurs séries à base de thyristors

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

➤ TCSC (Thyristor Controlled series Capacitor)

Un module de TCSC est composé d'un banc de condensateur en parallèle avec une inductance commandée par thyristors, l'impédance totale vue par la ligne est une combinaison parallèle de capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'allumage des thyristors figure (I.10). On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser [25].

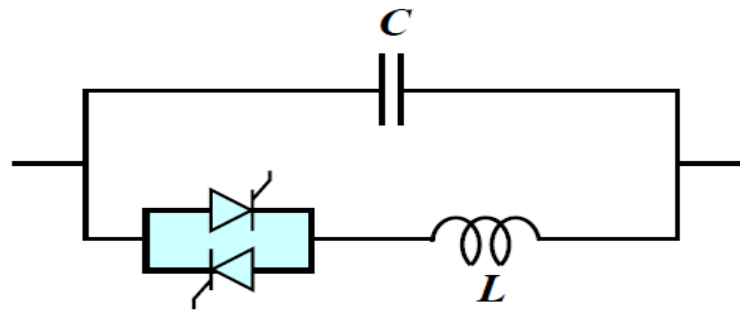


Figure .I. 10: Structure d'un TCSC

➤ *TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)*

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

➤ *TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)*

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable [9]. Lorsque l'angle d'amorçage de réactance contrôlée est égal à 120 degrés, le thyristor cesse de conduire, et la réactance non contrôlée X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison des deux réactances en parallèle [14].

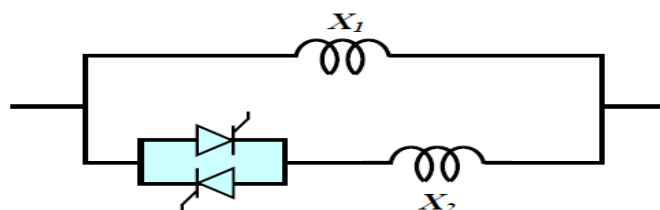


Figure.I. 11: Structure d'un TCSR

➤ *TSSR (Thyristor Switched Serie Reactor)*

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

B.2 Compensateurs séries à base de GTO thyristors

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

➤ **SSSC (Static Synchronous Series Compensator)**

C'est un convertisseur à source 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 [9]. La figure (I.12) montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport.

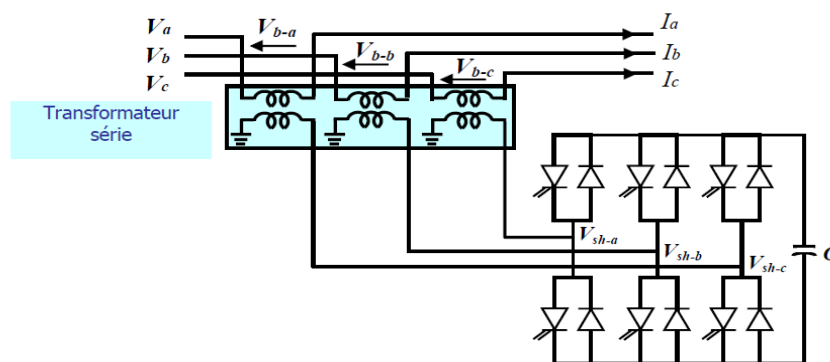


Figure .I. 12 : Schéma de base du SSSC

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. Si on ne désire que la compensation réactive, la source d'énergie peut être sous dimensionnée.

La tension injectée à la fréquence du réseau peut être commandée en amplitude et en phase, quand il s'agit de la compensation purement réactive, seule l'amplitude de la tension est contrôlable, car le vecteur de tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne, dans ce cas la tension injectée en série peut faire avancer ou retarder le courant de la ligne de 90 degrés. Cela signifie que le SSSC peut être commandé en douceur par une valeur de courant quelconque en avance ou en retard de phase à l'intérieure de la plage de fonctionnement [6]. La caractéristique statique d'un SSSC (compensateur synchrone statique série) est donnée par la figure (I.13) :

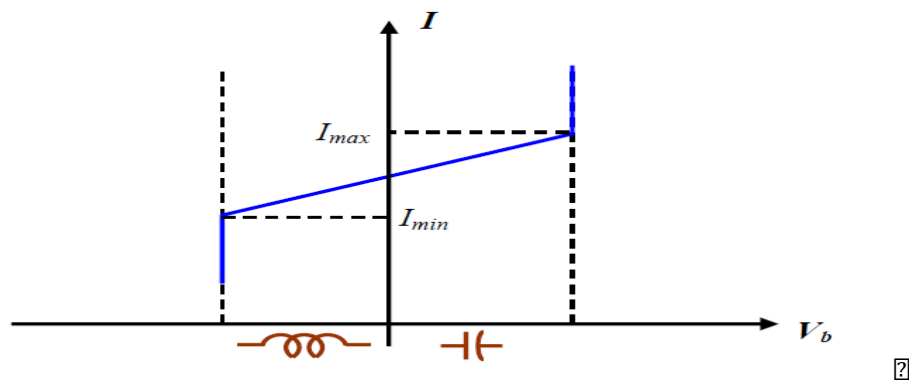


Figure .I. 13: Caractéristique statique du SSSC

Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment-là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension injectée n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de la ligne [14].

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 [26].

I.5.3.3 Compensateurs hybrides (série – parallèle)

A.3 Compensateurs hybrides à base de thyristors

➤ TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

Le TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régulateur 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 (n_1, n_2, n_3). Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire de thyristors. 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 [14].

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 [23].

L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont (n_1, n_2, n_3). Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre jusqu'à 27 valeurs différentes [14].

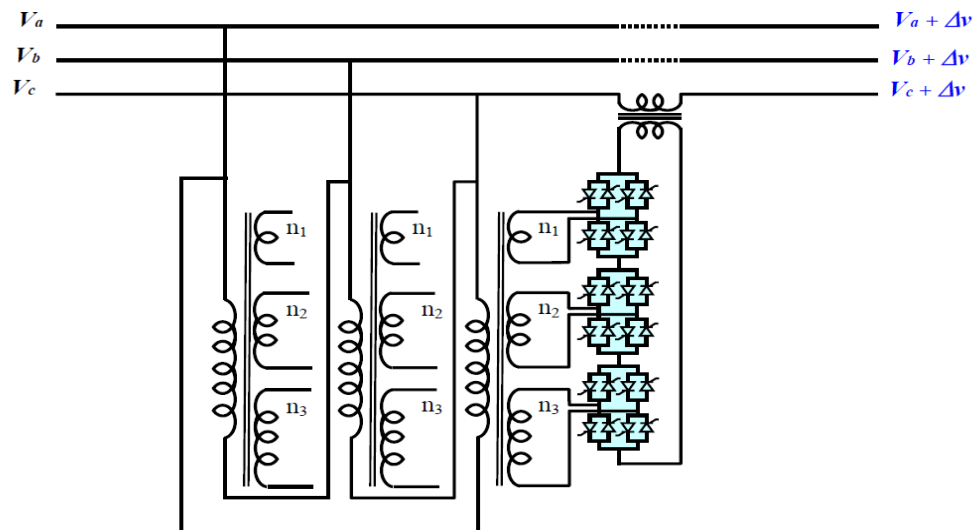


Figure .I. 14: Schéma de base d'un TCPAR

Un déphasage α est alors introduit et l'angle de transport total de la ligne électrique devient $(\delta \pm \alpha)$. Avec ce compensateur, le module de la tension en aval n'est pas égal à celui de la tension en amont [14].

La caractéristique statique d'un tel compensateur est représentée par la figure (I.14).

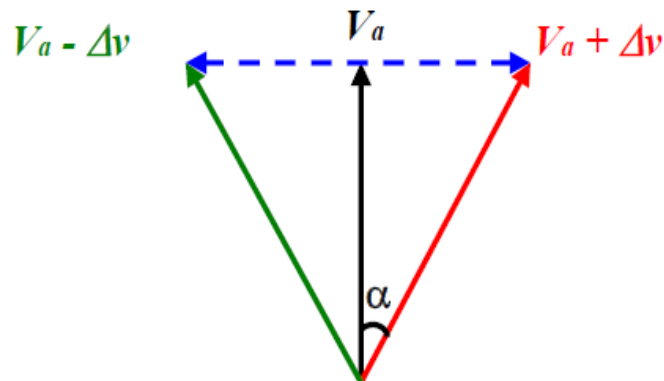


Figure.I.15: Diagramme vectoriel du TCPAR

A.3 Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors

➤ **IPFC** (Interline Power Flow Controller)

La fonction principale pour laquelle a été conçu le compensateur hybride connu sous le nom IPFC est la compensation d'un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station, il utilise des convertisseurs DC-AC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC [27].

Il est utilisé également afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau. La première proposition de L'IPFC est faite en 1998 par Gyugyi, Sen et Schuder [14] [28]. La figure (I.16) représente le schéma de base d'un IPFC.

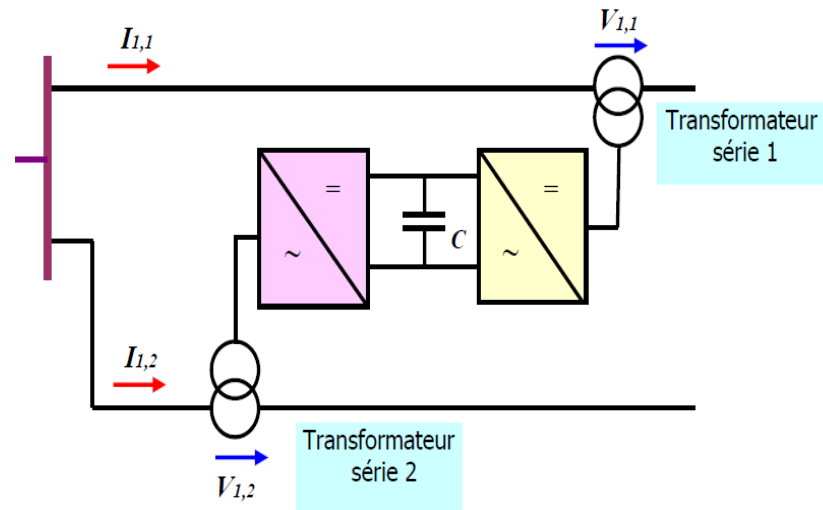


Figure .I. 16: Schéma de base d'un IPFC

➤ *UPFC (Unified Power Flow Controller)*

Ce dispositif est l'union de deux compensateurs l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle, le concept de ce dispositif a été présenté en 1990 par L. Gyugyi [14].

Il possède à la fois la fonctionnalité de trois compensateurs (série, parallèle et déphaseur). Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne. Son schéma de base est donné par la figure (I.17).

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 [29].

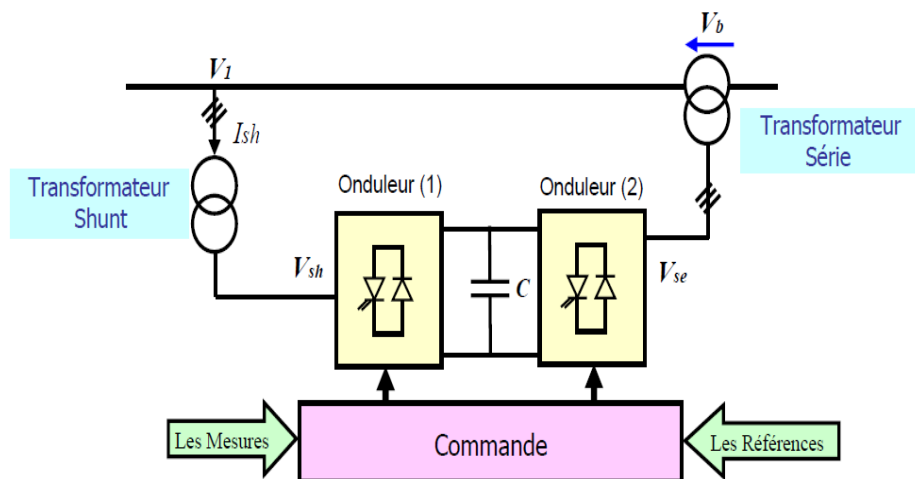


Figure .I. 17: schéma de base d'un UPFC

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 (I.16) l'onduleur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur (2). Il réalise aussi la fonction de compensation réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. 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. De plus, il peut basculer de l'un à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions[14].

I.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur la compensation de l'énergie réactive. On a vu brièvement les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport et la chute de tension provoquée par le transit de puissance réactive. Et on a présenté les différents moyens classiques de compensation d'énergie réactive. Enfin nous avons présenté les systèmes FACTS en général. Nous avons choisi d'étudier le STATCOM basé sur les onduleurs triphasés NPC à cinq niveaux.