

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الآلية والالكتروتقني  
Département d'Automatique et d'Électrotechnique

## Mémoire de Master

Filière Electrotechnique

Spécialité Machine électrique

Présenté par

**Djellal yacoub**

&

**Ben kuidir khadir**

## Thème

---

stabilité statique dans les réseaux  
électrique en utilisant  
un « SVC »

---

Proposé par :

**Dr.Belazzoug**

**Année Universitaire 2021-2022**



# *Remerciements*

Nos remerciements s'adressent tout d'abord à " Allah ", le tout puissant qui nous a tracé le chemin de notre vie et nous a accordé la volonté, la santé, le courage, la force et la patience nécessaire à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier notre encadrant, Mr. Belazzoug qui nous a fait l'honneur de diriger ce travail, sa compétence et ses conseils pertinents ont été pour nous un point de référence fort et de réconfort à chaque instant.

Nous tenons à remercier notre encadrant, Mr. Sebaa qui nous a fait l'honneur de diriger ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation au fil des ans.

Et les personnels universitaire Saad Dahelb, Nos remerciements vont également à l'entreprise pour nos avoir permis d'effectuer des stages, et Co- promoteur madame Dahmane pour le conseil que vous avons pu nous prodiguer au cours de ces trois mois

Très grande merci les étudiants de section électrotechniques. et tous ceux qui ont eu le mérite après « ALLAH » de nous avoir encouragés et soutenus pour réaliser ce Mémoire.



## *Dédicace*

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père . J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde.

A ma très chère mère ; Tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Et Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver t'accorder santé, longue vie et bonheur.

À mes chères sœurs, Je vous aime.

À mes amis : Moad, Amine, Sidali, Ghano

A mon copine : Zineb

À ceux qui m'ont toujours encouragé pour que je réussisse À mon binôme Khadir.

**YACQUB**



# *Dédicace*

*Je dédie cette thèse à mes chers parents, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect à eux ma considération pour leurs soutiens, leurs sacrifices et leurs aides.*

*A mes cher adorables frère et sœurs qui m'ont aidé durant toute cette période*

*A mes amis et camarades, Amine, Mouad, Amar, Lounis.*

*A mon binôme Yacoub qui a joué un grand rôle pour réaliser ce projet jusqu'à la fin*

*Une spéciale dédicace mon cher Papa qui compté et qui compte encore énormément pour moi, j'aurai tant aimé que tu sois présent pour ce succès, que dieu ai vos âmes dans sa sainte miséricorde.*

*Khadir*

# SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicaces	
Résumé et mots-clés	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction	

## Chapitre I : Généralité sur les réseaux de transport

I.1 Introduction	1
I.2 GENERALITE SUR LE RESEAU ELECTRIQUE	1
I.3 Définition de réseau d'énergie électrique	2
I.4 Les transformateurs	4
I.4.1 Définition	4
I.4.2 Modèle de transformateurs	5
I.4.3 Postes de transformation	6
I.4.4 Types des transformateurs	6
I.4.4.1 Transformateurs monophasés	6
I.4.4.2 Transformateurs triphasés	8
I.5 Les lignes électriques	9
I.5.1 Définition et composants	9
I.5.2 types de lignes	12
I.5.2.1 Lignes de distribution BT	12
I.5.2.2 Lignes de distribution MT	12
I.5.2.3 Lignes de transport HT	12
I.5.2.4 Les lignes de transport THT	12
I.6 Les câbles	12

I.6.1 Définition.....	12
I.6.2 Types d'isolation .....	12
I.7 Réseau de transport et d'interconnexion.....	13
I.8 Transport de la puissance active et réactive.....	14
I.9 Conclusion .....	17

## **Chapitre II : Stabilité du réseau électrique**

II.1 Introduction.....	19
II.2 GENERALITESUR L'ETUDE DE LA STABILITE DU RESEAU ELECTRIQUE .....	19
II.2.1 les types de stabilité .....	19
II.2.2 Classification de la stabilité des réseaux .....	20
II.2.3 stabilité de tension.....	21
II.2.3.1 Stabilité de tension aux grandes perturbations.....	22
II.2.3.2 Stabilité de tension aux petites perturbations .....	22
II.2.4 Stabilité de fréquence.....	22
II.2.5 Instabilité de la tension .....	22
II.3 Différents méthode d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique .....	23
II.4 CRITERES DE FONCTIONNEMENT .....	23
II.5 Conclusion .....	24

## **Chapitre III : Dispositifs FACTS : SVC**

III.1 Introduction .....	26
III.2 dispositifs FACTS.....	26
III.3 Types de FACTS .....	27
III.3.1 En serie .....	27
III.3.1.1Compensateurs séries à base de thyristors.....	27
III.3.2 En parallèle .....	29
III.3.3 Compensateurs hybrides série – parallèle.....	30
III.4 Rôles des dispositifs FACTS.....	32

III.5 Classification des dispositifs FACTS.....	33
III.6 Différents catégories des FACTS.....	33
III.7 Les différents types des systèmes FACTS .....	34
III.8 Etude du Compensateurs statiques (SVC).....	36
III.8.1 Historique du SVC .....	36
III.8.2 Définition.....	36
III.8.3 Principe de fonctionnement .....	37
III.8.3.1 Condensateur fixe (FC).....	38
III.8.3.2 Réactance commandée par thyristors (TCR).....	38
III.8.3.3 Condensateur commuté par thyristors (TSC).....	39
III.8.4 Les avantage de SVC.....	39
III.9 Comparaison des FACTS les plus utilisés .....	39
III.10 Conclusion.....	40

## **Chapitre IV : Simulation**

-Le réseau considéré .....	42
-Analyse des résultats des simulations .....	42
IV.1 SUR LOGICIEL DU MATLAB .....	43
<b>1<sup>er</sup> cas</b> : Les simulations ont été réalisées avec ou sans SVC au POSTE N°1 220/60kV .....	43
<b>2<sup>eme</sup> cas</b> : Les simulations ont été réalisées avec ou sans SVC au POSTE N° 2 220/60Kv.....	46
IV.2 SUR LOGICIEL DU MATLAB .....	50
IV.2.1 sans SVC au poste N° 2 220/60kV .....	50
IV.2.2 Les résultats obtenus avec SVC au poste N° 2 220/60kV.....	51
IV.2.3 Avec SVC(TCR .TSC) au poste N° 2 220/60kV .....	52
IV.2.4 sans SVC au poste N° 2 220/60kV .....	57
IV.3 conclusion .....	64

### **Conclusion générale**

## Liste des figures

<b>N°</b>	<b>Titre des figures</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	Réseaux publics	<b>02</b>
<b>02</b>	Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique	<b>04</b>
<b>03</b>	Modèle simplifié de transformateur	<b>05</b>
<b>04</b>	Transformateur monophasé	<b>06</b>
<b>05</b>	Transformateur élémentaire	<b>07</b>
<b>06</b>	Construction d'un transformateur monophasé	<b>07</b>
<b>07</b>	Formation de transformateur triphasé.	<b>08</b>
<b>08</b>	Modes de couplage de transformateur triphasé.	<b>09</b>
<b>09</b>	Conducteurs des lignes aériennes	<b>09</b>
<b>10</b>	Quelques types d'isolateurs	<b>11</b>
<b>11</b>	Types usuels des pylônes pour des lignes triphasées	<b>12</b>
<b>12</b>	Estimation du type d'isolation.	<b>14</b>
<b>13</b>	Circuit équivalent en $\pi$ d'une ligne électrique	<b>15</b>
<b>14</b>	Susceptance shunt d'une ligne électrique	<b>16</b>
<b>15</b>	Classification de la stabilité des réseaux de puissances	<b>21</b>
<b>16</b>	Les dispositifs de stabilité du réseau électrique.	<b>23</b>
<b>17</b>	Structure du TCSC	<b>27</b>
<b>18</b>	Structure du TSSC	<b>28</b>
<b>19</b>	Structure du TCSR.	<b>28</b>
<b>20</b>	Schéma de base du SSSC	<b>28</b>
<b>21</b>	Statique du SSSC	<b>29</b>
<b>22</b>	Schéma de base de l'UPFC	<b>31</b>

<b>23</b>	Schéma simplifié de Classification des dispositifs FAC	<b>34</b>
<b>24</b>	Classification des dispositifs de compensation FACTS	<b>35</b>
<b>25</b>	Représentation d'un SVC.	<b>37</b>
<b>26</b>	Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006	<b>37</b>
<b>27</b>	Schéma de principe d'un SVC.	<b>38</b>
<b>28</b>	TCR	<b>38</b>
<b>29</b>	TSC	<b>39</b>
<b>31</b>	Les profils ci-dessus représentent une faible perturbation des tensions suite au déclenchement d'un SVC, qui se stabilise rapidement à des valeurs admissibles.	<b>43</b>
<b>32</b>	Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant	<b>44</b>
<b>33</b>	Les profils ci-dessus représentent une perturbation des tensions qui se stabilise à des valeurs qui sont dans les limites de fonctionnement normal	<b>45</b>
<b>34</b>	Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant	<b>45</b>
<b>35</b>	Les profils ci-dessus représentent une perturbation des tensions qui se stabilise à des valeurs qui sont dans les limites de fonctionnement normal.	<b>46</b>
<b>36</b>	Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant.	<b>47</b>
<b>37</b>	Les profils ci-dessus représentent une perturbation des tensions qui se stabilise à des valeurs qui sont dans les limites de fonctionnement normal	<b>48</b>
<b>38</b>	Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant.	<b>48</b>
<b>39</b>	Modélisation en SICRE d'un SVC raccordé au réseau	<b>49</b>
<b>40</b>	sans SVC au poste N° 2 220/60kV	<b>50</b>

<b>41</b>	Les profils ci-dessus représentent une faible perturbation des tensions suite au déclenchement des 2 disjoncteurs et augmentation des charges, pour analyser la stabilité statique .	<b>50</b>
<b>42</b>	avec SVC au poste N° 2 220/60kV	<b>51</b>
<b>43</b>	Les profils ci-dessus représentent une faible perturbation des tensions suite au déclenchement des 2 disjoncteurs et augmentation des charges, qui se stabilise rapidement à des valeurs admissibles	<b>51</b>
<b>44</b>	avec SVC (TCR .TSC) au poste N° 2 220/60kV	<b>52</b>
<b>45</b>	Déclenchement d'une ligne 220kV sans svc	<b>53</b>
<b>46</b>	commande de SVC	<b>54</b>
<b>47</b>	système de PLL	<b>54</b>
<b>48</b>	la fréquence minimale attendue du signal d'entrée.	<b>55</b>
<b>49</b>	gain du régulateur PID	<b>56</b>
<b>50</b>	régulateur de voltage	<b>57</b>
<b>51</b>	l'unité de distribution	<b>58</b>
<b>52</b>	Le modèle SVC (modèle détaillé d'une topologie SVC particulière)	<b>58</b>
<b>53</b>	Le schéma unifilaire du SVC modélisé est illustré sur le schéma unifilaire du SVC	<b>59</b>
<b>54</b>	observer la réponse dynamique du SVC aux changements de tension du système	<b>60</b>
<b>55</b>	l'oscilloscope comment les TSC sont séquentiellement allumés et éteints	<b>61</b>
<b>56</b>	l'oscilloscope du TCR AB. La figure ci-dessous effectue un zoom sur trois cycles lorsque l'angle de tir $\alpha$ est de 120 degrés	<b>62</b>
<b>57</b>	Etude statique	<b>63</b>

## Liste des tableaux

<b>N°</b>	<b>Titre des tableaux</b>	<b>Page</b>
<b>01</b>	les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur	<b>40</b>
<b>02</b>	Les résultats de la simulation d'écoulement de puissance (en régime permanent)	<b>43</b>
<b>03</b>	Les simulations ont été réalisées pour l'état N-1 pour l'indisponibilité d'une ligne 220kV	<b>44</b>
<b>04</b>	En situation normale aucune contrainte aucune contrainte sur le fonctionnement du réseau électrique	<b>46</b>
<b>05</b>	Les simulations ont été réalisées pour l'état N-1 pour l'indisponibilité d'une ligne	<b>47</b>

## List des abbreviations

**FACTS:** Flexible Alternative Current Transmission System.

**CSPR :** compensateur statique de puissance réactive.

**BT :** basse tension.

**HT :** haut tension.

**MT:** moyenne tension.

**SVC:** Static var Compensator.

**STATCOM:** Static Synchronous Compensator.

**TCSC:** Thyristor Controlled Series Capacitor.

**UPFC:** Unified Power Flow Controller.

**TSSC:** Thyristor switcher series capacitor.

**TCR:** Reactance commandés par thyristor

**TCPAR:** Thyristor Controlled Phase Angle Regulator

**IPFC:** Interline Power Flow Controller

**TSC:** Thyristor Switched Reactor.

**SSSC:** Compensateur seriesynchrone.

**HTA :** Haute Tension niveau A.

**HTB :** Haute Tension niveau B.

**MT :** Moyenne Tension.

**KV :** kilo volte.

**FC :** Condensateur fixe.

**KVA :** kilo volte Ampère.

**MVA :** Méga volte Ampère.

**LTC :** Load Tap Changer

## Symbole et Paramètre

**P** : Les pertes d'énergie active

**Q** : Les pertes d'énergie réactive

**XL** : Réactance de la ligne (inductive).

**XC** : Réactance capacitive.

**B**: susceptant shunt  $\mu\text{mhos /Km}$ .

## *Résumé*

L'étude de la stabilité des réseaux électriques constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux électrique, comme nous avons pu le constater tout le long de ce mémoire. Le FACTS utilisé au cours de ce travail est un dispositif de type SVC (Static Var Compensator), a été dimensionné par les algorithmes d'optimisation afin d'améliorer la stabilité statique.

L'objectif de ce travail est d'examiner la stabilité statique dans les réseaux électriques en utilisant un SVC et de démontrer le rôle du SVC dans le réseau. Le logiciel utilisé pour Les calculs des écoulements de puissance est **SPIRA**.

**Mots Clés :** réseaux électriques, dispositif FACT, SPIRA, stabilité statique, SVC.

## *Abstract*

The study of the stability of electrical networks is an important subject for the planning and operation of electrical networks, as we have seen throughout this thesis. The FACTS used in this work is an SVC (Static Var Compensator) type device, which has been sized by optimization algorithms to improve static stability.

The objective of this work is to examine the static stability in electrical networks using an SVC and to demonstrate the role of the SVC in the network. The software used for the power flow calculations is **SPIRA**.

**Keywords:** electrical networks, FACT device, SPIRA, static stability, SVC.

## المخلص

تعتبر دراسة استقرار الشبكات الكهربائية موضوعاً مهماً لتخطيط وتشغيل الشبكات الكهربائية كما رأينا خلال هذه الأطروحة. 'FACTS' المستخدمة في هذا العمل هي جهاز من نوع 'SVC' (Static Var Compensator) والذي تم تغيير حجمه بواسطة خوارزميات التحسين لتحسين الاستقرار الثابت.

الهدف من هذا العمل هو فحص الاستقرار الثابت في الشبكات الكهربائية باستخدام SVC وإظهار دور SVC في الشبكة.

البرنامج المستخدم في حسابات تدفق الطاقة هي SPIRA.

الكلمات المفتاحية: الشبكات الكهربائية ، جهاز FACT ، SPIRA ، الاستقرار الساكن ، SVC

# Introduction Générale

# *Introduction générale*

---

## **Introduction générale :**

L'évolution des réseaux électriques fut marquée, durant les dernières années, par de nouvelles stratégies de conception, d'exploitation et de contrôle. En effet, la solution adoptée, par les plupart des pays, pour faire face au problème de croissance rapide de la demande d'énergie électrique se résume dans les points suivants : La mise en service de nouvelles centrales plus puissantes, Le maillage de plus en plus de réseau de transport et de distribution, L'échange d'énergie entre pays par l'interconnexions internationales et même intercontinentales. Cette complexité de structure, à la base des problèmes actuels rencontrés dans la conduite en ligne et essentiellement l'affaiblissement de la capacité des réseaux à garder la stabilité suite à un défaut, a favorise l'appel des moyens de contrôle.

Il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de disposer d'un moyen permettant de contrôler les transits de puissance dans les lignes afin que le réseau de transport existant puisse être exploité de la manière la plus efficace et la plus sûre possible.

La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité qui leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences.

La technologie FACTS est un moyen permettant de remplir cette fonction. Avec leur aptitude à modifier les paramètres des lignes, les FACTS peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active, que pour celui de la puissance réactive et de la tension.

L'objectif de ce travail était de concevoir une stratégie de contrôle pour les tensions ainsi que pour les flux de puissances réactives transitant dans les réseaux électriques.

Le FACTS utilisé au cours de ce travail est un dispositif de type shunt à savoir le SVC ( Static Var Compensator) ou bien le compensateur statique de puissance réactive CSPR.

Les SVCs sont des dispositifs de compensation parallèle connectés en des points précis du système de transmission.

Leur topologie est basée sur des convertisseurs de courant. Le SVC est une Susceptance continûment ajustable, capacitive à inductive. Sa sortie est ajustée pour échanger le courant inductif ou capacitif dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge, ceci pour maintenir ou contrôler les paramètres du système

## *Introduction générale*

---

électriques, d'une manière typique ; la tension, à l'intérieur de limites désirées. Il est utilisé pour les applications suivantes :

- Augmente la capacité de puissance transmise dans les réseaux de transmission.
- Améliore la stabilité en régime permanent et transitoire.
- Amortie les oscillations de puissance.
- Compensation de puissance réactive.
- Minimise les pertes de puissance transmise.
- Régulation de la tension.

Sur le premier chapitre nous-allons aborder Généralités sur les réseaux de transport. On retrouve dans ce chapitre les définitions de la (transformateur, la charge, les lignes) la définition d'un réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, on retrouve l'étude la stabilité du réseau électrique (étude statique, étude dynamique).

Dans le troisième chapitre, on retrouve aussi l'étude et classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits de façon plus détaillée.

**Chapitre I :**  
**Généralité sur le réseau de transporte**

### **I.1 Introduction**

Le réseau de transport relie toutes les centrales électriques dans un système de puissance et distribue la puissance aux différents consommateurs. Les éléments principaux du réseau sont les lignes aériennes à haute tension, les câbles souterrains, les transformateurs et les jeux de barres. Des éléments auxiliaires peuvent être trouvés : des condensateurs en série, des réactances shunts et des systèmes de compensation, des systèmes de protection [1].

En matière de production décentralisée, les réseaux de transport jouent un rôle lié au fait qu'ils constituent l'ossature du système électrique pour les échanges d'énergie et que l'intégration d'une proportion appréciable de ce type de production aura une influence sur le comportement global du système et sur son exploitation. Même si, pour une grande part, cette production décentralisée sera connectée au réseau de distribution. En effet, cette intégration va requérir une grande flexibilité des échanges entre production centralisée et production décentralisée [2].

### **I.2 GENERALITE SUR LE RESEAU ELECTRIQUE :**

Les réseaux électriques (transport et distribution) ont pour rôle d'acheminer l'énergie des sites de production vers les lieux de consommation, avec des étapes de baisse du niveau de tension dans des postes de transformation. Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter le centre de production telle que les centrales hydrauliques, thermiques...etc. Avec les centres de consommation (villes, usines...) [3].

#### **a) Réseaux d'utilisation :**

Ces sont les réseaux de basse tension (BT) qui alimentent les maisons, l'éclairage public, les moteurs et les appareils domestiques. Ce type de réseau électrique doit présenter une continuité de service permanente. Généralement la gamme de tension est de 220 volts à 380 volts.

#### **b) Réseaux de transport :**

Ils assurent l'alimentation de l'ensemble du territoire national grâce à des Transits de puissances importantes et de tensions qui sont de 60, 220, et 400 kV.

#### **c) Réseaux de répartition :**

Ce sont les réseaux HT/MT (30/10 kV), ils fournissent les puissances nécessaires aux réseaux de distribution reliés entre eux, ils facilitent le secours mutuel entre régions.

### d) Réseaux de distribution :

Ce sont les réseaux de moyenne tension (MT) qui fournissent aux réseaux d'utilisation les puissances nécessaires demandées. Ils doivent observer des distances limitées de voisinage, c'est pour cela que ces réseaux se réalisent en souterrain dans les villes. (En Algérie le niveau de tension de distribution de l'énergie est fixé à 10 kV).



Figure I.1: Réseaux publics

### I.3 Définition de réseau d'énergie électrique

Pour la majorité des réseaux et pour le réseau Algérien en particulier, la production de l'énergie électrique est assurée par plusieurs alternateurs synchrones situés dans différentes centrales de production. En régime permanent, ces machines tournent à vitesse constante définie comme la vitesse synchrone. Cette vitesse impose la fréquence de la tension sur le réseau.

Les réseaux d'électricité ont été conçus dans le but de veiller à :

- la fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique, les réseaux relient entre elles toutes les unités de production et visent à assurer une fonction de secours en cas de pannes et/ou de défaillances.

- L'optimisation de la disponibilité de l'énergie électrique aux consommateurs, ainsi les réseaux, permettent d'acheminer l'énergie produite par des sources délocalisées vers les points

## Chapitre I : Généralité sur le réseau de transport

de consommation[4] ; visent à assurer l'acheminement de l'énergie produite en masse à un endroit défini par des machines raccordées en grande partie aux niveaux de tension supérieurs vers des consommateurs en général disséminés sur un territoire donné et raccordés à des niveaux de tension inférieurs .

- Suite à la libéralisation du secteur électrique, le réseau vise également à remplir un rôle dans la facilitation du marché de l'électricité et à faire en sorte qu'un maximum de transactions Commerciales puisse s'exécuter [31].

Un réseau d'énergie électrique est aujourd'hui un ensemble de circuits complexes interconnectés comme le montre le schéma de principe de la (Fig. I.2).

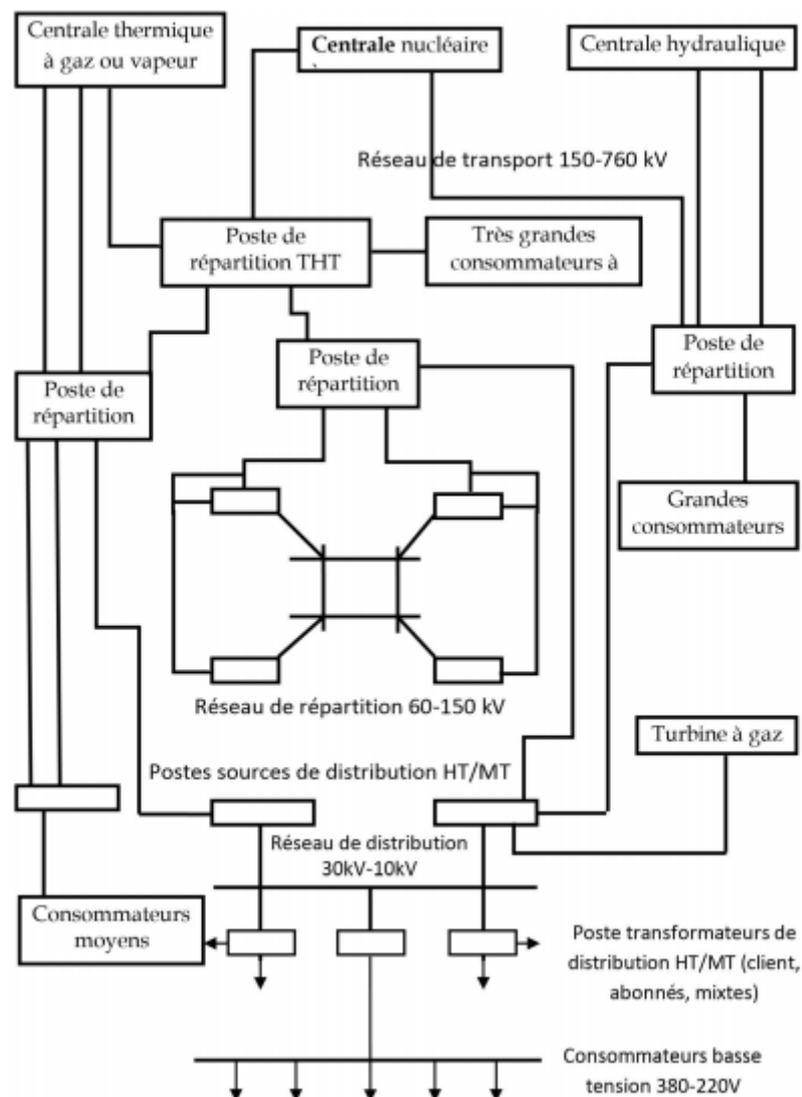


Figure I.2: Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique

### I.4 Les transformateurs

#### I.4.1 Définition :

Le transformateur est utilisé pour coupler des circuits de courant alternatif, les « bobines primaires » sont les bobines connectées à la source d'énergie et les autres bobines sont des « bobines secondaires ». Le transformateur élévateur de tension, ou survolteur, est un transformateur dans lequel la tension secondaire est supérieure à la tension primaire. Dans le cas contraire, il s'agit d'un transformateur abaisseur de tension, ou dévolteur.

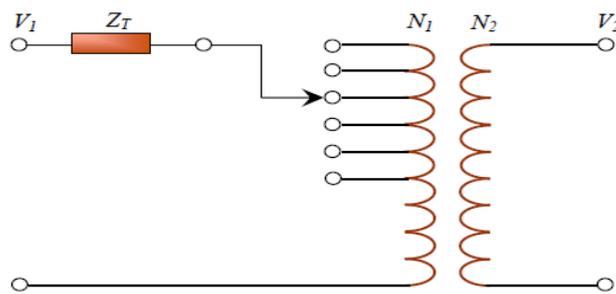
Les transformateurs électriques doivent être efficaces et doivent également dissiper aussi peu d'énergie calorifique que possible pendant la transformation. Les rendements dépassent couramment 99 % du fait de l'utilisation d'alliages d'acier spéciaux permettant de coupler les champs magnétiques induits entre les bobines primaires et secondaires.

La perte d'énergie électrique n'est que de 0,5 % dans un transformateur de taille importante. Cependant, un tel dispositif dégage une chaleur importante et requiert donc des systèmes de refroidissement spécifiques [6].

#### I.4.2 Modèle de transformateurs :

Le transformateur permet d'élever l'amplitude de la tension alternative disponible à la sortie de l'unité de production pour l'amener aux niveaux requis pour le transport. A l'autre extrémité de la chaîne, côté consommateurs, les transformateurs sont utilisés pour abaisser la tension et la ramener aux valeurs utilisées dans les réseaux de distribution -BT- [7].

Dans certains transformateurs, la modification de spires requiert de mettre l'appareil hors service et de changer manuellement les connexions. Plus généralement, cette modification peut être effectuée en charge c.-à-d. sans interrompre le courant qui parcourt l'enroulement dont on modifie le nombre de spires. Le dispositif correspondant, appelé *régleur en charge*, comporte un contacteur conçu pour éviter la formation d'arcs électriques (susceptibles d'endommager les contacts) et un moteur électrique pour entraîner ce contacteur. La figure (I .3) montre le schéma équivalent du transformateur (sans circuit magnétique) : il est doté de plusieurs prises (côté haute tension) permettant de modifier le nombre de spires du primaire. L'impédance  $Z_T$  correspond à l'impédance équivalente totale vue du primaire.



**Figure I.3.** : Modèle simplifié de transformateur.

Si  $N_1$  est le nombre de spires côté haute tension et  $N_2$  est le nombre de spires côté basse tension, le rapport de transformation  $M$  est défini par :

$$M = \frac{N_1}{N_2} \text{(I.1)}$$

La relation entre la tension du côté primaire  $V_1$  et la tension du côté secondaire  $V_2$  à vide est :

$$V = \frac{V_1}{V_2} \text{(I.2)}$$

### I.4.3 Postes de transformation : [8]

L'énergie électrique produite dans une centrale est utilisée sur place ou transportée sur parfois de longues distances avant d'être utilisée. Pour compenser les chutes de tensions dans les conducteurs, on élève la tension à 220 kV ou 400 kV suivant le besoin, ceci se fait grâce aux transformateurs élévateurs qui se trouvent au voisinage des alternateurs. Une fois l'énergie électrique transportée à l'endroit d'utilisation, il est nécessaire d'abaisser la tension pour des raisons de sécurité ou encore parce qu'on doit faire passer le courant dans des câbles souterrains qui ne supportent pas des grandes tensions. On utilise à cet effet des transformateurs abaisseurs.

### I.4.4 Types des transformateurs

On distingue deux types des transformateurs les plus utilisés qui sont :

#### I.4.4.1 Transformateurs monophasés

##### a) Réalisation :

Sont réalisés à deux variantes, avec enroulements simples ou doubles. Le parcours des lignes de flux magnétique est esquissé dans la figure (I.4) [9].

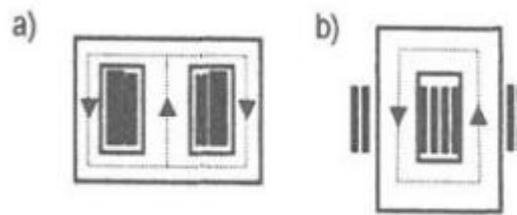


Figure (I.4) :

Transformateur

monophasé :

a) Enroulement simple

b) Enroulement double.

**b) Transformateur élémentaire : [10]**

Une bobine a noyau d'air est alimentée par une source de tension  $E_g$ , le courant magnétisant  $I_m$  produit un flux total  $\Phi$  qui dispersé autour de l'enroulement figure (I.5), si l'on approche de ce montage une deuxième bobine, une partie de ce flux est captée par les spires de cette dernière et une tension  $E_2$  est induite à ses bornes. L'ensemble de ces deux bobines constitue un transformateur, la bobine accrochée à la source est appelée primaire, tan disque l'autre est appelée secondaire.

Le flux  $\Phi$  créé par le primaire est subdivisé en deux parties : un flux mutuel  $\Phi_m$  qui accroche les spires de secondaire et un flux de fuite  $\Phi_f$  qui ne les accroche pas. Lorsque les bobines sont éloignées l'une de l'autre, le flux mutuel est faible par rapport au flux total ; on dit alors que le couplage est faible. Pour obtenir un meilleur couplage en rapprochant les deux enroulements.

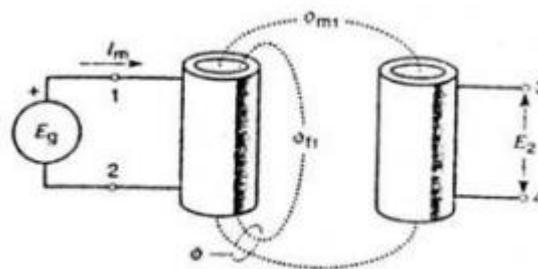


Figure (I.5) : Transformateur élémentaire

c) Construction : [10]

Habituellement, la construction des transformateurs utilisés en pratique est telle que leurs propriétés se rapprochent de celle de transformateur idéal. Ainsi, afin d'obtenir une bonne perméabilité, le noyau est fait en acier de bonne qualité. De plus, pour minimiser les pertes fer, le noyau laminé en utilisant de l'acier en silicium

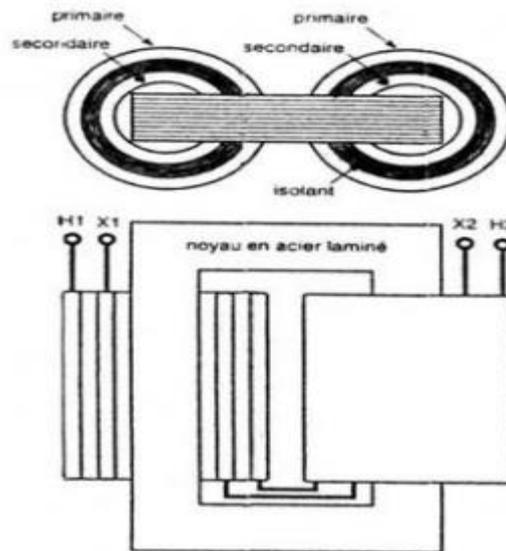


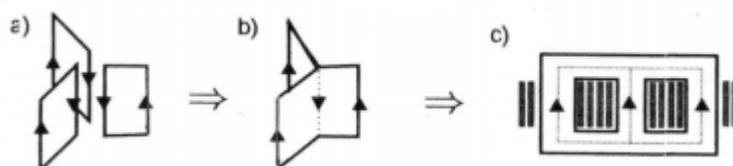
Figure (I.6) : Construction d'un transformateur monophasé.

### I.4.4.2 Transformateurs triphasés

#### a) Description : [9]

On peut obtenir un transformateur triphasé simplement par couplage triphasé de trois transformateurs monophasés, ce qui est onéreux à cause de gaspillage du matériel. La solution habituelle pour ce type est le transformateur à trois colonnes. La figure (I.7) illustre sa formation en partant de trois transformateurs monophasés figure (I.7.a), à la place de six colonnes on a besoin seulement de quatre colonnes figure (I.7.b).

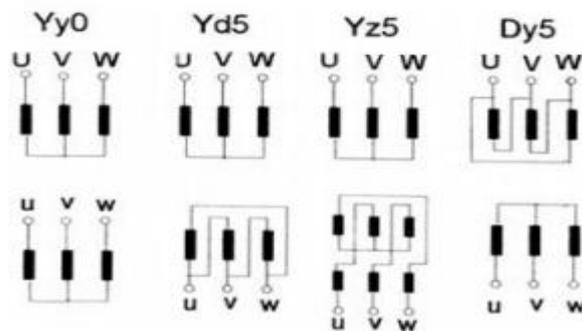
La somme des trois flux déphasés de  $120^\circ$  étant nulle en régime équilibré, on peut même renoncer à la colonne centrale dans la figure (I.7.b) en pointés avec épargne supplémentaire de matériels. Si en fin on ramène les trois colonnes restantes dans un plan figure (I.7.c), on obtient une solution très simple présentant une légère dissymétrie magnétique qui cependant ne perturbe pas les bons fonctionnements.



**Figure (I.7) :** Formation de transformateur triphasé.

### b) Modes de couplages des enroulements : [9]

Les enroulements des tensions primaires et secondaires des trois phases peuvent être connectés en étoile, en triangle ou en zigzag figure (I.8). On obtient ainsi une multitude de combinaison possible ou de modes de couplages. Les modes les plus importants pour la technique des réseaux d'énergie électrique sont montrés dans la figure, chaque mode (appelé aussi groupe horaire) est caractérisé par des symboles.



**Figure (I.8) :** Modes de couplage de transformateur triphasé.

### c) Classification des transformateurs : [2]

Les transformateurs se classifient selon leurs puissances fournissent, on distingue :

- Petits transformateurs :  $1 \text{ KVA} < S < 25 \text{ KVA}$ .
- Transformateurs de distribution :  $25 \text{ KVA} < S < 2000 \text{ KVA}$ .
- Transformateurs pour le transport d'énergie :  $S > 2000 \text{ KVA}$  jusqu'à  $1000 \text{ MVA}$ .

### I.5 Les lignes électriques

#### I.5.1 Définition et composants :

Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs et de supports. Le rôle fondamental d'une ligne est de transporter l'énergie électrique. Elle doit posséder les caractéristiques de base suivantes :

- La tension doit demeurer constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges entre zéro et la charge nominale.
- Les pertes doivent être faibles afin que la ligne possède un bon rendement.
- Les pertes joules ne doivent pas surchauffer les conducteurs

Le genre de ligne utilisé est imposé par les facteurs suivants :

- Puissance à transporter, distance de transport et le coût.
- Esthétique, encombrement et facilité d'installation.

#### a) Les conducteurs : [9,10]

Les conducteurs des lignes aériennes sont toujours nus, constitués de brins toronnés dans le but de réduire l'effet de peau encore sont isolés l'un de l'autre par une couche d'oxyde, on emploie presque exclusivement des fils en cuivre ou des fils en aluminium avec âme en acier qui assure une résistance mécanique plus élevée, ces derniers sont plus économiques. L'aluminium est beaucoup plus léger et moins cher, sa résistivité est 1,62 fois que celle de cuivre, soit  $36 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ . Le cuivre est rare dans les lignes nouvelles.

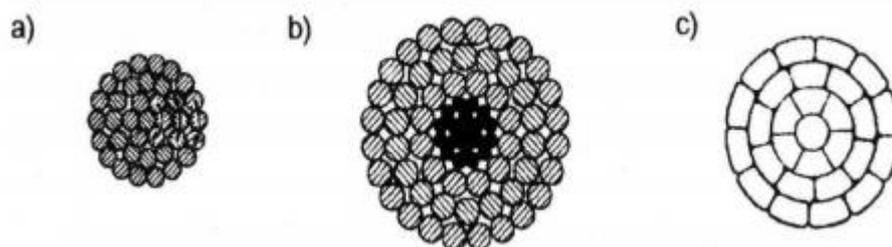


Figure (I.9) : Conducteurs des lignes aériennes.

a) Conducteur simple

b) Conducteur Al-acier

c) Conducteur compact.

#### b) Les isolateurs : [10]

Les chaînes d'isolateurs servent à supporter et à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et la terre, ils sont presque toujours fabriqués en verre ou en porcelaine ayant respectivement une rigidité diélectrique de 120 KV/mm et de 12 à 28 KV/mm.

- **Types d'isolateurs: [11]**

Il existe plusieurs types d'isolateurs parmi eux on trouve : les isolateurs rigides qui sont utilisés pour des tensions inférieures à 50 KV, les isolateurs suspendus fabriqués en conducteur à haute tension, les isolateurs supports qui sont utilisés particulièrement dans les postes de transformation comme support de matériels et d'appareils.

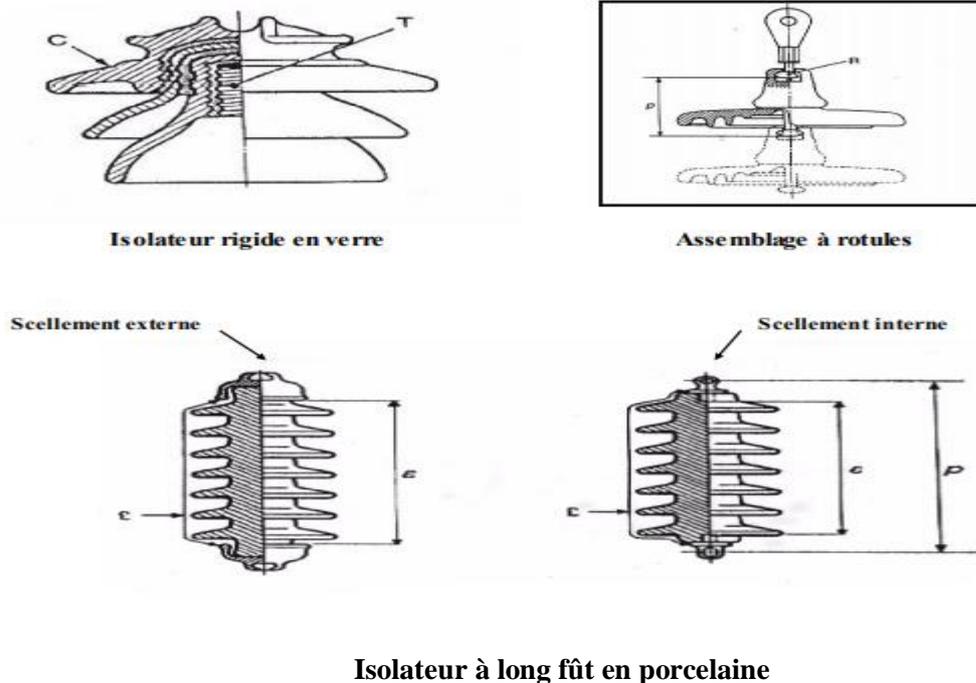


Figure (I.10) : Quelques types d'isolateurs.

**c) Les supports :**

Les supports ou les pylônes maintiennent les conducteurs à une hauteur convenable ou dessus du sol par intermédiaire des travers ou bras.

- **Types du support : [9]**

On distingue plusieurs types de pylônes et parmi eux on trouve : le pylône métallique en treillis qui est constitué par un assemblage de membrures formant un treillis et destiné à la

plupart des lignes de transport de l'électricité, il comporte un fût quadrangulaire et des consoles ou des traverses. Le pylône haubané à chaînette supporte des conducteurs à 735 KV, ce type de pylône nécessite moins d'acier galvanisé que le pylône haubané en V ; il est donc comparativement moins lourd et moins cher. Le pylône en béton est fréquent en HTA, mais on le rencontre aussi en HTB utilisé pour des tensions allant jusqu'en 380 kV, ce pylône est préfabriqué en usine. Le pylône en bois est essentiellement utilisé en HTA, quoiqu'on le trouve dans certains pays jusqu'en 161 kV. Des prototypes existent aussi pour des tensions supérieures.

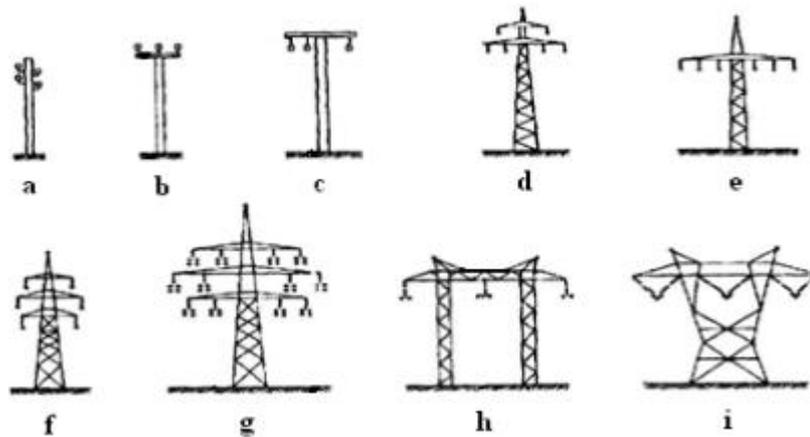


Figure I.11 .Types usuels des pylônes pour des lignes triphasées.

- a) Poteau de bois.
- b) Ligne avec isolateurs rigides (moyennes tensions).
- c) Poteau en béton (moyennes tensions).
- d), e), f) Pylônes en treillis pour lignes à deux ternes (hautes tensions).
- g) Ligne à plusieurs ternes (hautes tensions).
- h), i) Ligne simple à un terne (hautes tensions).

### I.5.2 types de lignes: [10]

- Ligne de distribution à basse tension (BT) .
- Ligne de distribution à moyenne tension (MT) .
- Ligne de transport à haute tension (HT) .

- Ligne de transport à très haute tension (THT) .

### **I.5.2.1 Lignes de distribution BT :**

Ce sont des lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, les cuisinières, etc.

Les lignes sont habituellement des câbles ou des barres fonctionnant à des tensions inférieures à 400V.

### **I.5.2.2 Lignes de distribution MT**

Ce sont des lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie de l'électricité. Leur tension est comprise entre 1 kV et 50 kV.

### **I.5.2.3 Lignes de transport HT**

Ce sont les lignes relient les postes de transformation principaux aux centrales de production d'énergie. Les lignes fonctionnent généralement à des tensions inférieures à 400 kV.

Dans cette catégorie, on trouve aussi des lignes servant à échanger de l'énergie entre deux grands réseaux et à augmenter la stabilité de l'ensemble.

### **I.5.2.4 Les lignes de transport THT**

Ce sont des lignes qui relient les centrales éloignées aux centres de consommation ou d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs allant jusqu'à 1000km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 750 kV.

## **I.6 Les câbles**

### **I.6.1 Définition: [9]**

Les câbles sont des conducteurs entourés d'une gaine armée ou non qui protège ces derniers et les isolent contre les contraintes électriques, mécanique et chimiques.

### **I.6.2 Types d'isolation: [9]**

Selon les tensions appliquées sur les câbles, on distingue plusieurs types d'isolations telle que :

Isolation en papier : (papier imprégné d'huile minérale et de serine).

Isolation en matières synthétiques : les plus employés sont :

- Le polyéthylène (PE), le polyéthylène réticulé (PER) ainsi le polyvinyle(PVC) et la gomme synthétique (EPR)

- Le (PE) est caractérisé par des pertes nettement inférieures.

Isolation gazeuse : on utilise l'azote avec une pression interne d'environ 15 bars.

Isolation à l'huile.

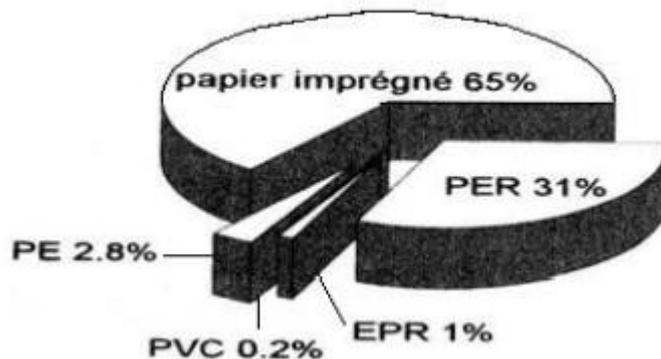


Figure I.12 : Estimation du type d'isolation.

### I.7 Réseau de transport et d'interconnexion : [12]

C'est le réseau utilisé dans les centrales ainsi que les lignes et les postes de transformation issus de celle-ci. Il est capable de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances.

Il assure :

- L'acheminement de l'électricité des centrales de production aux grandes zones de consommation

- L'interconnexion nationale qui gère les centres de production en orientant la production en fonction de l'évolution de la demande selon sa répartition géographique et temporelle

L'interconnexion internationale permettant de gérer des flux d'énergie entre les pays en fonction de la demande de puissance et des pics de consommation de chaque pays ;

L'interconnexion du réseau présente principalement trois avantages :

#### a) La stabilité :

Les réseaux interconnectés forment un ensemble qui est plus puissant que les réseaux individuels. Il s'ensuit que ces réseaux peuvent mieux supportés les perturbations qu'une

centrale seule, d'où une plus grande stabilité. Par exemple, si la charge augmente subitement sur l'un des réseaux interconnectés, un transfert d'énergie s'effectue immédiatement de sorte que la charge accrue puisse être supportée par plusieurs centrales ou lieu d'une seule.

### b) La continuité de service :

Si une des centrales interconnectées tombe en panne ou si on devait la débrancher pour des opérations d'entretien, les autres centrales prendraient immédiatement le relais pour assurer la continuité de service.

### c) Economie :

Lorsque les réseaux sont reliés, on peut répartir la charge entre différentes centrales afin de minimiser le coût de fonctionnement global : on peut arrêter une centrale et faire fonctionner les autres à leur rendement maximum. L'inconvénient principal de l'interconnexion devient de la nécessité d'une même fréquence pour toutes les centrales interconnectées et des relations très rigides qui relient les tensions de dispositifs. Ainsi, tout incident susceptible de perturber l'ensemble.

## I.8 Transport de la puissance active et réactive : [33]

Quand un régime permanent de circulation d'énergie est établi dans un réseau électrique, on peut écrire les équations reliant les puissances actives  $P_i$  et réactives  $Q_i$  injectées ou soutirées en chaque sommet  $i$  et les tensions en modules  $|V|$  et phases  $\theta$ . La détermination des tensions et courants sur une ligne électrique peut être effectuée en utilisant la notation complexe. En schématisant chaque liaison (du sommet  $i$  au sommet  $k$ ) par un  $\pi$  symétrique tel que ( $i=1, k=2$ )

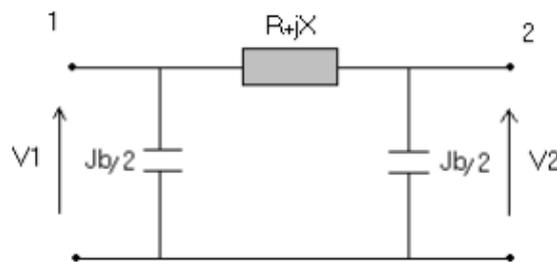


Figure I.13 : Circuit

équivalent en  $\pi$  d'une

ligne électrique

## Chapitre I : Généralité sur le réseau de transport

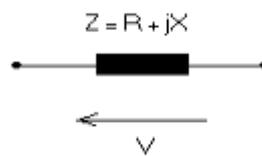
Les lignes sont normalement spécifiées par :

- **Une impédance série** :  $Z = R + jX \text{ } \Omega/\text{Km}$ .
- **Une admittance shunt** :  $Y = G + jB \text{ } \mu\text{mhos}/\text{Km}$ .

En pratique  $G$  est extrêmement petit ( $G=0$ ) et par conséquent  $jB = j\omega C$  ou  $B$  représente la susceptance shunt  $\mu\text{mhos}/\text{Km}$ .

Il y a de plus un bilan de conservation, aux pertes près, sur  $\sum P_i$  et  $\sum Q_i$  ce bilan peut être assuré par un sommet quelconque (ou l'on peut aussi fixer  $\theta = 0$ )

### a) Impédances séries :



**Figure I.14.** Impédance série d'une ligne électrique

Les pertes dans les impédances série sont donnés par:

$$S = V \cdot I^* \quad (\text{I.3})$$

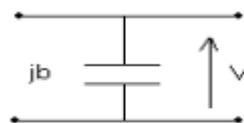
$$V = Z \cdot I \text{ c'est-à-dire que } S = Z \cdot I \cdot I^* = Z(I_r + jI_i)(I_r - jI_i) \quad (\text{I.4})$$

$$S = P + jQ = Z(I_r^2 + I_i^2) = Z|I|^2 \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Avec: } P = R|I|^2 \text{ et } Q = X|I|^2$$

Si  $R = 0$  alors  $P = 0$ , Si  $X = 0$  alors  $Q = 0$ .

### b) Susceptance shunt :



**Figure 1.15 :** Susceptance shunt d'une ligne électrique

En complexe la tension  $\bar{V}$  peut s'écrire :

$$V = V_r + jV_i \quad (\text{I.6})$$

$$I = jB V = jB (V_r + jV_i) = -B V_i + jB V_r \quad (\text{I.7})$$

$$I^* = -B V_i - j B V_r = -B (V_i + j V_r) \text{(I.8)}$$

La puissance  $S$  dans la Susceptance est donnée par  $S = VI^* = P + j Q$  c'est-à-dire que :

$$S = VI^* = (V_r + j V_i) (-B (V_i + j V_r)) = -B (V_r + j V_i) (V_i + j V_r) \text{(I.9)}$$

$$S = -jB (V_r^2 + V_i^2) = -jB|V|^2 \quad \text{(I.10)}$$

Comme  $S = P + jQ$ , donc  $P = 0$  et  $Q = -jB|V|^2$

En d'autres termes la puissance réactive  $Q$  est délivrée par la Susceptance de la ligne.

### **I.9 Conclusion :**

Dans ce chapitre Nous avons présenté un aperçu sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique qui, influents sur la qualité de la tension, on commençant par une étude générale sur les réseaux, l'acheminement de puissance à travers ces réseaux. On a vu brièvement les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport provoquée par le transit de puissance réactive. En fin on à présent le réglage de tension et les différent moyens classique de compensation d'énergie réactive.

# **Chapitre II:**

## **Stabilité du réseau électrique**

### **II.1 Introduction :**

La stabilité d'un réseau d'énergie électrique est définie comme étant l'aptitude de celui-ci à fonctionner au voisinage du synchronisme lorsqu'il est sollicité par une ou plusieurs Perturbations. La perturbation crée déséquilibre entre la production et la consommation dans le réseau électrique [13] .Ce déséquilibre induit la variation de l'énergie cinétique provoquant ainsi l'évolution des angles rotorique accompagnées par des oscillations dynamiques.

Les perturbations sont causées par des défauts qui surviennent sur le réseau électrique. Parmi ces défaut, nous pouvons citer : le court-circuit mono ou polyphasés, suivis généralement d'ouverture de lignes [14] ; les modifications de charges ; la rupture d'une interconnexion et le déclenchement accidentel d'une machine ou d'un transformateur les défauts peuvent être classés par leur rapidité et par leur amplitude. 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.

### **II.2 GENERALITESUR L'ETUDE DE LA STABILITE DU RESEAU ELECTRIQUE :**

La stabilité du réseau électrique est sa capacité de fournir la puissance demandée par les consommateurs tout en maintenant constantes et près des valeurs nominales de la fréquence et l'amplitude de la tension aux différentes barres du réseau quel que soit la perturbation.

On définit trois types de stabilité :

- 1- la stabilité statique ou stabilité en régime permanent.
- 2- la stabilité dynamique.
- 3- la stabilité transitoire.

#### **II.2.1 les types de stabilité :**

##### **a) Stabilité statique:**

La stabilité statique est la capacité du réseau à se maintenir stable suite aux fluctuations lentes de la puissance appelée par les consommateurs ou suite à une perte de(s) circuit(s) de production ou de transport d'énergie. Les principaux facteurs qui contribuent à limitation de la stabilité statique sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de

la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive. La limite de la stabilité statique est atteinte lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute ou hausse de tension progressive et incontrôlable aboutissant en un effondrement généralisé du réseau [15].

### **b) Stabilité transitoire :**

Le réseau est dit transitoirement stable lorsqu'il retrouve son mode de fonctionnement normal après une perturbation durable qui s'accompagne d'un régime variable oscillatoire amorti considéré comme acceptable à l'égard à des fourchettes prédéfinies en tension, en fréquence et en temps. Les causes de l'instabilité transitoire sont le court-circuit, les pertes de lignes, les bris d'équipements majeurs comme les transformateurs de puissance et les alternateurs [15].

### **c) Stabilité dynamique :**

C'est l'aptitude du réseau à éviter tout régime oscillatoire divergent et à revenir à un état stable acceptable. Ceci inclut l'intervention éventuelle des protections et automatismes des diverses fonctions contre les perturbations envisagées [16].

L'utilisation d'un modèle linéaire est acceptable et le système est stabilisé par des Dispositifs de commande supplémentaires (stabilisateurs).

## **II.2.2 Classification de la stabilité des réseaux :**

Traditionnellement, le problème de la stabilité consiste à maintenir le fonctionnement synchrone des générateurs du système. Ainsi, pour avoir une production satisfaisante de la puissance électrique, toutes les machines synchrones du système doivent fonctionner en synchronisme. Cet aspect de la stabilité est influencé par les dynamiques de l'angle de rotor de générateur et de la relation puissance-angle [7].

Le terme « perturbation » dans ce cas, concerne à la fois les grandes perturbations telles que les courts-circuits, la perte d'un groupe de production, la perte d'un ouvrage comme une ligne de transmission, et les petites perturbations telles que la fluctuation de charge, manœuvre d'équipement, etc. Selon la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude de perturbations, on peut classer les types de la stabilité comme suite :

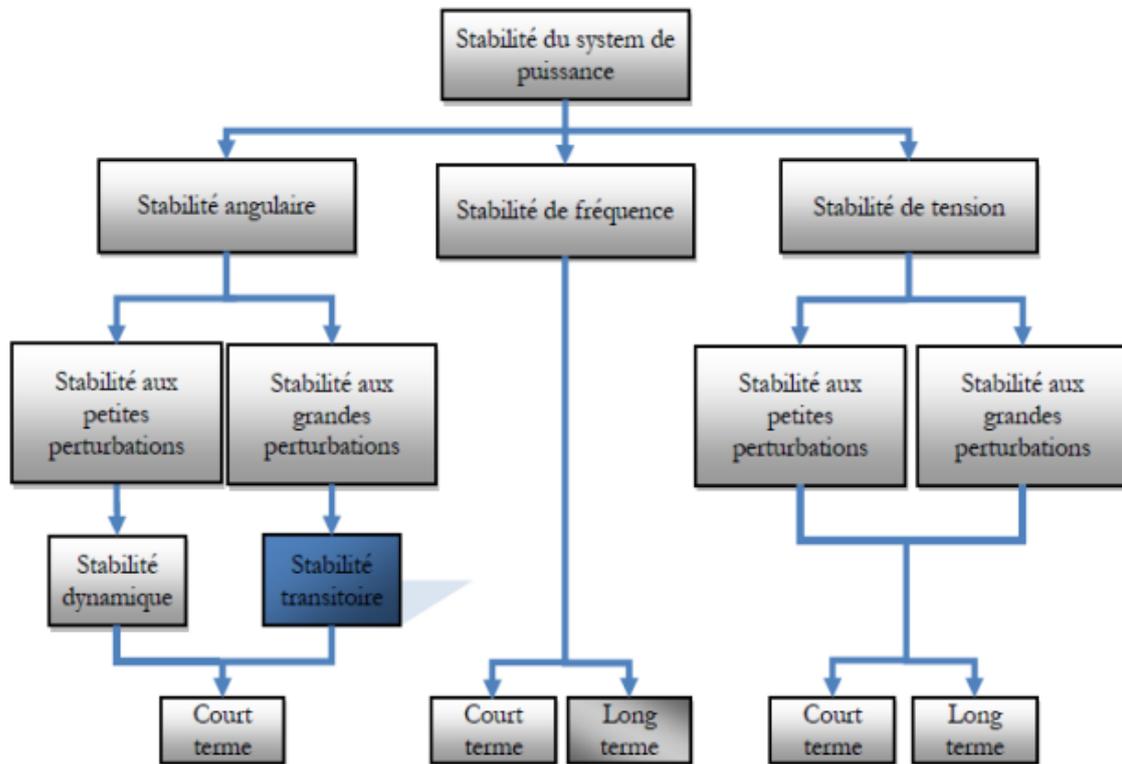


Figure II.1 Classification de la stabilité des réseaux de puissances.

### II.2.3 stabilité de tension :

La stabilité de tension est l'aptitude du réseau à maintenir les tensions en régime permanent sur tous les jeux de barre au point de fonctionnement normal et lors d'une perturbation de faible ou de grande amplitudes. Ce type de stabilité est déterminé par le bilan des puissances réactives aux nœuds du réseau électrique.

Généralement, l'instabilité de tension se produit lorsqu'une perturbation entraîne une augmentation de puissance réactive demandée au-delà de la puissance réactive possible.

Plusieurs changements dans le système de puissance peuvent contribuer à l'instabilité de tension, ce sont par exemple :

- une augmentation de charge.
- des générateurs, des condensateurs synchrones, ou des SVCs (Statique Var Compensateur systèmes) qui atteignent les limites de puissance réactive.

- une tentative d'un régulateur automatique en charge ayant échoué de restaurer la tension de charge à son niveau initial avant la perturbation.

- une panne de générateur, une perte d'une charge importante ou un déclenchement de ligne.

- une perte d'une source de puissance réactive (condensateurs, machines synchrones,...) [7].

La stabilité de tension est peut être divisée en deux catégories : [7]

### **II.2.3.1 Stabilité de tension aux grandes perturbations**

La stabilité de tension en grandes perturbations est la capacité du système à maintenir la tension stable à la suite de grandes perturbations ; telles que les défauts du système ou la perte d'un générateur. Cette capacité est déterminée par la topologie du système, les caractéristiques des charges, et les interactions entre les contrôles continus de tension, les contrôles discrets et les protections.

### **II.2.3.2 Stabilité de tension aux petites perturbations :**

La stabilité de tension en petites perturbations est la capacité du système à maintenir les tensions stables lorsqu'il est soumis à de petites perturbations ; telles que des changements progressifs des charges. Cette forme de stabilité est influencée par les caractéristiques des charges, des contrôles continus de tension et des contrôles discrets à un instant donné. Ce concept est utile pour déterminer, à tout instant, comment les tensions répondront aux petits changements du système.

### **II.2.4 Stabilité de fréquence :**

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée.

### **II.2.5 Instabilité de la tension :**

On définit la stabilité de la tension comme la capacité de maintenir une tension de barre constamment acceptable à chaque nœud du réseau, dans des conditions normales de fonctionnement, après avoir subi une perturbation. L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du

réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable, aboutissent en un effondrement généralisé de la tension.

### II.3 Différents méthode d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique : [17]

La compensation est une technique de la gestion d'énergie réactive afin d'améliorer la qualité énergétique dans les réseaux électriques à courant alternatif. Elle peut se réaliser de plusieurs manières, ayant pour buts :

La correction du facteur de puissance.

- Amélioration de la régulation de la tension.
- Equilibre des charges.
- L'aide au retour à la stabilité en cas de perturbation.

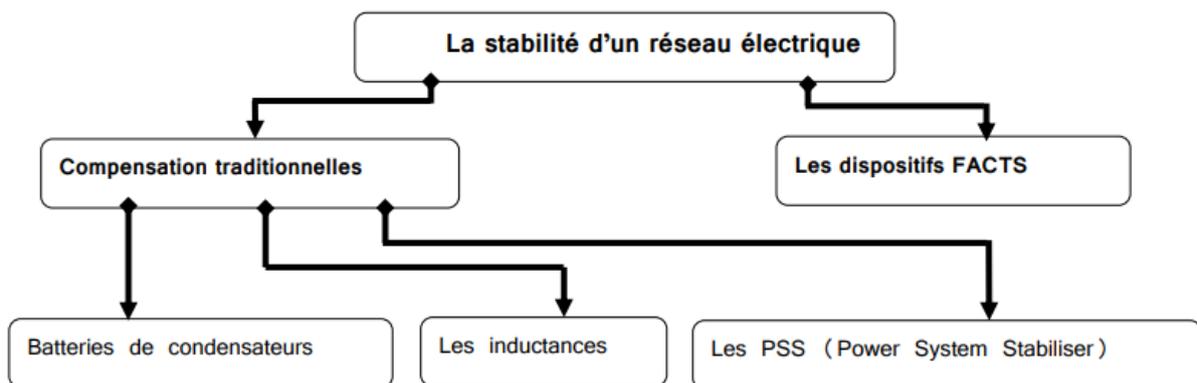


Figure II.2 : Les dispositifs de stabilité du réseau électrique.

Les moyens cités ci-dessus sont certes efficaces mais présentent tout de même certaines limitations telles que : temps de réaction élevé, et génération d'harmoniques.

### II.4 CRITERES DE FONCTIONNEMENT

Les conditions techniques considérées dans l'évaluation de l'analyse de sécurité du réseau sont les critères mentionnés dans le document « règles techniques de raccordement et règles de conduite du système électrique » qui concernent les points suivants :

Les niveaux de tension aux postes doivent être maintenus dans les limites admissibles

Les niveaux de transit des ouvrages de transport d'électricité ne doivent pas dépasser les capacités nominales

Les limites de fonctionnement des groupes doivent être respectées pour les puissances active et réactive, les tensions aux bornes des groupes ainsi que la fréquence doivent être dans les limites admissibles.

### **II.5. Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur la stabilité (statique, dynamique, transitoire) de réseau électrique .est une qualité de leur régulation par laquelle les situations modérément perturbées reviennent progressivement à un état d'équilibre. Considérées comme :

- La fréquence est son réglage est assuré en agissant sur des puissances actives à l'échelle globale.
- La tension est son réglage est assuré en agissant sur des puissances réactives à l'échelle locale.

Dans le cadre de ce travail, l'intérêt sera porté sur la stabilité statique.

**Chapitre III :**  
**Dispositifs FACTS : SVC**

### **III.1 Introduction**

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif, mais elle regroupe une collection de dispositifs à base d'électronique de puissance, implantés dans les réseaux électriques, afin de mieux contrôler le flux de puissance et d'augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc., ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie.

L'étude de la stabilité des réseaux électriques constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques. L'amortissement du système peut être obtenu par des moyens classiques de régulation de la tension et de la fréquence par des dispositifs FACTS, ces dispositifs sont de plus en plus utilisés dans les réseaux électriques.

Par la suite nous allons évoquer ces compensateurs en général. Un traitement particulier sera réservé au SVC.

Le compensateur statique de l'énergie réactive est apparu dans les années 1970, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes. Plusieurs conceptions différentes ont été proposées. Toutefois, la plupart des SVC sont construits à partir des mêmes éléments de base permettant de fournir ou d'absorber de la puissance réactive.

Grâce au développement de l'électronique de puissance, la compensation d'énergie réactive par des moyens statiques est devenue possible par des compensateurs statiques de puissance réactive (SVC). Ces dispositifs constitués d'éléments électrique (batteries de condensateur, bobine.....etc.) et d'électronique pour commutation (thyristors) permettant des variations rapides et continue de puissance réactive pour éliminer les fluctuations de la puissance réactive absorbée par certains appareils provoquent des fluctuations de tension qui peuvent être gênantes pour tous les usagers.

### **III.2 Dispositifs FACTS**

Un FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la tension, augmenter les capacités de transit, ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité. Il agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le

réseau. Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible [18] .

Les condensateurs shunts fournissent la puissance réactive, et augmentent localement la tension du réseau (utilisé en période de forte consommation ou dans les zones éloignées des centres de production). Les réactances shunts consomment la puissance réactive, et diminuent la tension du réseau (utilisé en période de faible consommation). Les condensateurs séries permettent de diminuer l'impédance des liaisons électriques et d'augmenter la puissance transmissible par ces liaisons (une liaison électrique haute-tension est en effet essentiellement inductive) [19]. Les réactances série augmentent l'impédance d'une liaison électrique, afin de mieux répartir les courants sur les différentes liaisons.

### III.3 Types de FACTS

Les contrôleurs FACTS peuvent être classés comme suit:

#### III.3.1 En série

##### III.3.1.1 Compensateurs séries à base de thyristors

Les plus connus sont :

##### a) Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC):

Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur Figure (III.1).

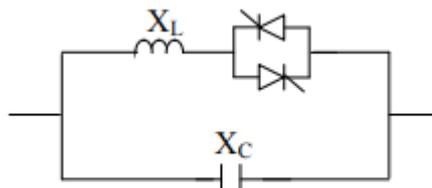
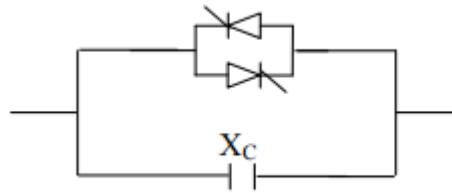


Figure III.1: Structure du TCSC

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance.

**b) Thyristor Switched Série Capacitor (TSSC):**

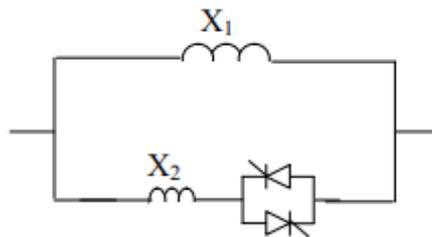
La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$ .



**Figure III.2:** Structure du TSSC

**d) Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR):**

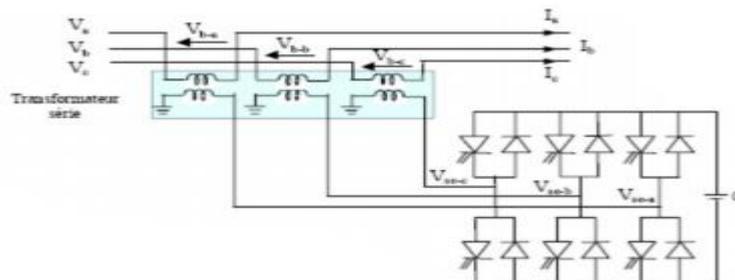
TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage de la réactance commandé par thyristor est de  $180$  degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable  $X_1$  agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de  $180$  degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de  $90$  degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances [20].



**Figure III.3:** Structure du TCSR.

**e) Static Synchronous Series Compensator (SSSC):**

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Fig. III.4).



**Figure .III.4 :** Schéma de base du SSSC

Un convertisseur à source de tension peut être utilisé dans un système de transport d'énergie. Un tel système porte la désignation compensateur série synchrone statique SSSC (Static Synchronous Series Compensator) [21].

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau. La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure(III.5).

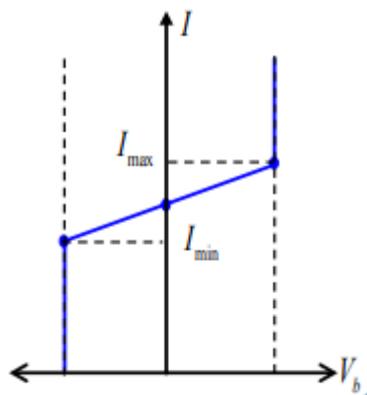


Figure.III.5. Statique du SSSC

#### III.3.2 En parallèle

##### a) TSC (Thyristor switched capacitor) :[22]

Les condensateurs sont préchargés à la valeur de crête de la tension du réseau et, en passage naturel par zéro du courant de condensateur (au moment où la tension aux bornes du condensateur est égale à la tension de réseau), le thyristor est amorcé. Si les deux tensions ne sont pas égales, il y aura une impulsion de courant (changement discontinu du courant -  $Cdv/dt$ ) ; ce qui n'est pas désirable. Pour atténuer les impulsions potentielles du courant, une inductance est toujours mise en série avec un condensateur. En même temps l'inductance est syntonisée pour éviter la possibilité de la résonance.

Après être débranché du réseau, le condensateur reste chargé. L'énergie stockée dans le condensateur reste. Pour le brancher de nouveau, il faut attendre que la tension du réseau

devienne égale à celle du condensateur. Donc, il n'y a pas de délai dans l'amorçage du thyristor et, le condensateur peut être soit branché, soit débranché du réseau. La rapidité de la réponse d'un TSC est un cycle. Ce qui est beaucoup plus rapide que la réponse d'une batterie des condensateurs qui est branchée au réseau via un disjoncteur. La réactance de TSC ne peut être variée qu'en pas discrets. Plus il y a de condensateurs branchés, plus le courant capacitif fourni au réseau est élevé. La valeur de réactance dépend du nombre de condensateurs branchés à la ligne.

#### **b) Statique synchrones compensateur (STATCOM) :**

Le compensateur statique synchrone, possède plusieurs avantages. Premièrement, il réagit plus vite, pouvant répondre en moins d'un cycle à des variations de la tension. Deuxièmement, lorsque la tension est basse, il peut produire plus de puissance réactive. Or, c'est précisément à ce moment que l'on a besoin d'une puissance réactive considérable pour empêcher que la tension chute davantage. En utilisant les convertisseurs statiques, et une version triphasée du type MLI « Modulation de Largeur d'Impulsion » ce convertisseur à grande puissance à base de GTO et d'une grande flexibilité, peuvent générer des tensions alternatives de forme quelconque. la fréquence, la phase, l'amplitude et la forme d'onde sont contrôlables.

#### **c) Le SVC Compensateurs statiques :**

Ces compensateurs statiques basés sur des dispositifs utilisant l'électronique de puissance (association de condensateurs et de bobines d'inductance commandées par thyristors). Les compensateurs statiques sont des dispositifs rapides d'injection de puissance réactive en un nœud d'un réseau, en vue d'y maintenir la tension à la référence voulue.

#### **d) TCR (Thyristor Controlled Reactor):**

Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. La valeur de l'impédance va continuellement changée par l'amorçage des thyristors. Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé et la tension à ses bornes est positive. Il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule. Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance réactive dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive.

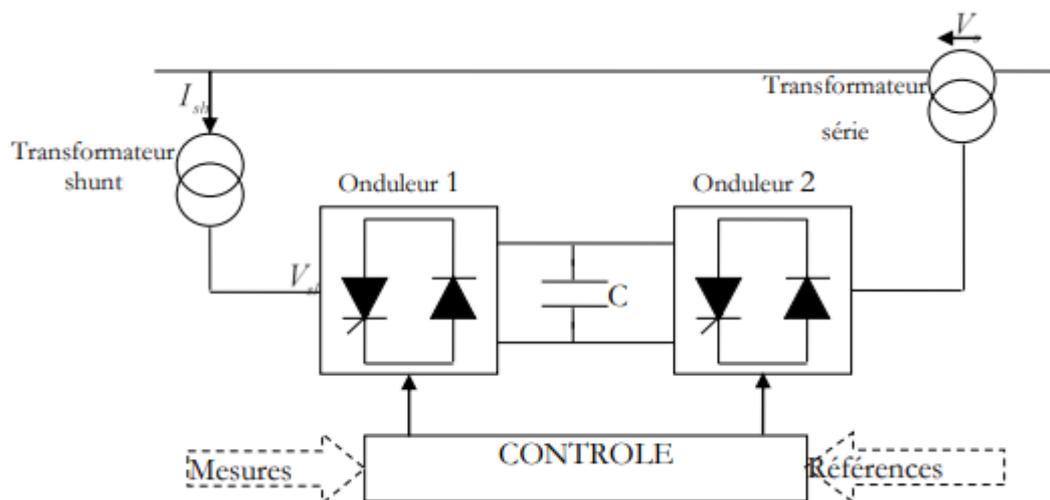
Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive et le TCR contrôle cette source de puissance.

### **III.3.3 Compensateurs hybrides série – parallèle**

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunt et série), il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées. On peut citer :

- **UPFC (Unified Power Flow Controller):**

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC est constitué de deux transformateurs, l'un est connecté en série et l'autre en shunt avec la ligne de transmission. Chaque transformateur est connecté à un onduleur à base des thyristors GTO. Ces derniers sont couplés à travers une liaison continue DC. Autrement dit, l'UPFC est la combinaison d'un STATCOM et un SSSC couplés à travers une liaison DC commune, pour permettre l'écoulement bidirectionnelle de la puissance active en effet, l'énergie active peut circuler librement dans les deux directions entre les extrémités AC des deux convertisseurs et chaque convertisseur peut générer ou absorber l'énergie réactive indépendamment. [23 ; 24]. La figure (III.6) montre le schéma de base de l'UPFC :



**Figure III.6.** : Schéma de base de l'UPFC

Dans la figure III.6, l'onduleur-2- injecte la tension  $V_s$ , qui est contrôlable en amplitude et en phase, donc il peut réaliser la fonction de compensation série de la puissance active et réactive. D'autre part, l'onduleur-1- est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur-2-. Il sert aussi à compenser l'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau.

En effet, l'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de ligne.

L'UPFC est capable de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS. Il peut être utilisé, en particulier, pour:[25]

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.

#### **III.4 Rôles des dispositifs FACTS : [26]**

Le développement des dispositifs *FACTS* est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor *GTO*. Les *FACTS* représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives: bobine d'inductance et condensateur enclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. Dans les dispositifs *FACTS*, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs.

De ce fait, les *FACTS* possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les *FACTS* permettent de remplir des fonctions tant en régimes stationnaires qu'en régimes transitoires. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régimes permanents, 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 supprimer, les dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter des flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

Les dispositifs *FACTS* peuvent aussi être utilisés pour la symétrisation de lignes de transport afin d'accroître leur capacité.

D'amortir les oscillations de puissance.

#### **III.5 Classification des dispositifs FACTS : [27]**

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés.

La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher des composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive. Ils servent également au remplacement du changeur de prises en charge mécanique dans les transformateurs de réglage.

La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former des convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

#### **III.6 Différents catégories des FACTS**

Différents catégories des FACTS Les dispositifs FACTS se divisent en trois importantes catégories des dispositifs shunt, série, et dispositifs combinés (shunts et séries avec le système) selon leur façon de se connecter au réseau comme représenté sur la Figure (III.9)

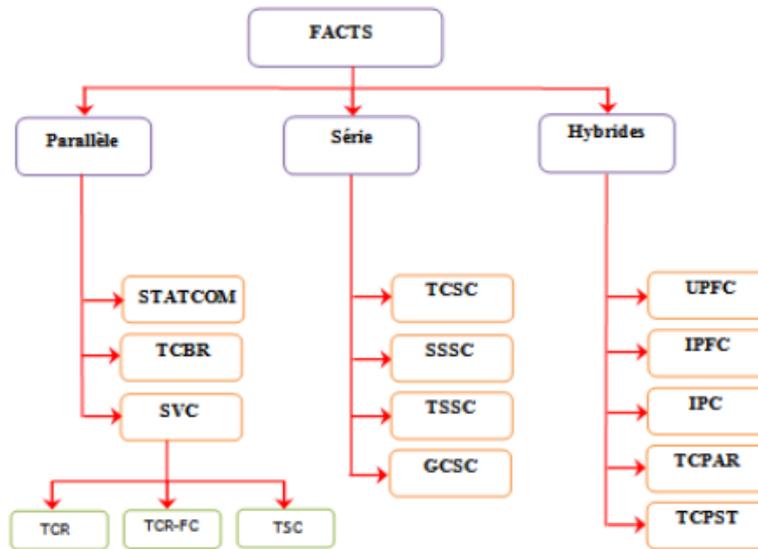


Figure III .7. : Schéma simplifié de Classification des dispositifs FAC

Ces catégories peuvent aussi être décomposées en deux générations selon la technologie utilisée. La première génération est à base de thyristors et la deuxième génération à base de GTO thyristors [28].

### III.7 Les différents types des systèmes FACTS

La technologie FACTS n'est pas limitée par un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble de paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie. La figure III.10 représente la classification des dispositifs de compensation FACTS [29].

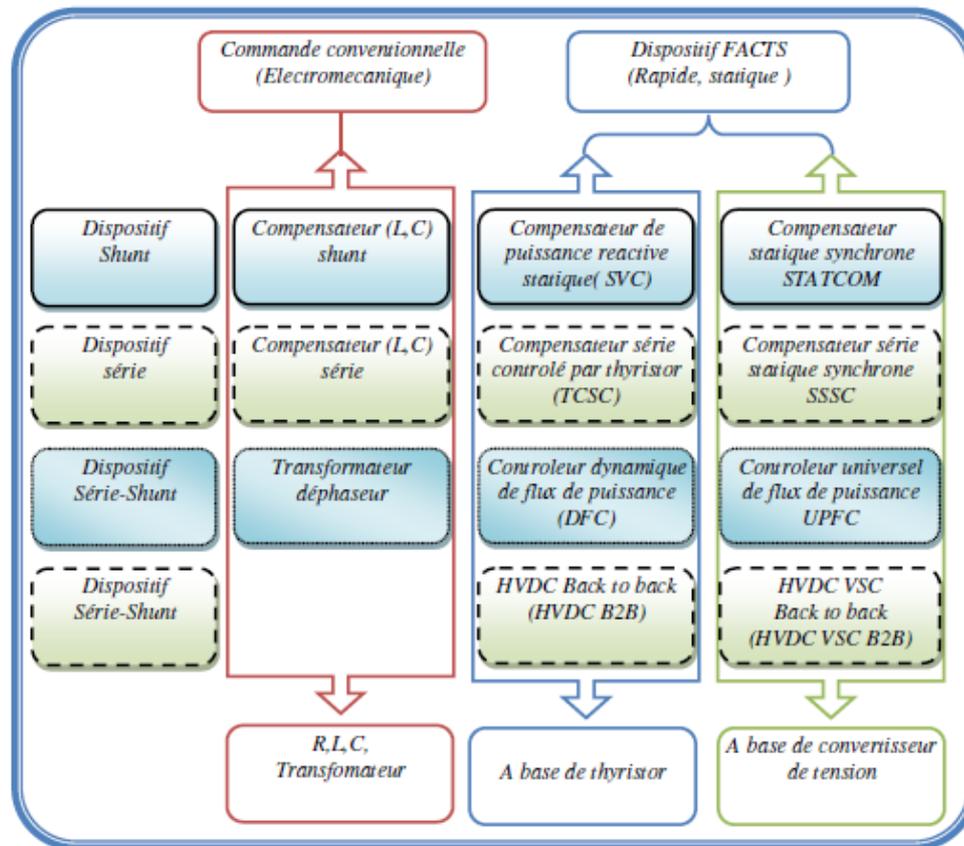


Figure. III.8 : Classification des dispositifs de compensation FACTS

➤ **Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS : [30]**

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

### **III.8 Etude du Compensateurs statiques (SVC)**

#### **III.8.1 Historique du SVC : [31,22]**

Depuis 1970 plus de 300 SVC est installé autour du monde, plus de 90 installé au Amérique du Nord. La figure (III.6) montre évolution d'installation du SVC dans le monde jusqu'à l'année 2006.

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est le premier dispositif FACTS qui apparaît dans les années 1970, le premier SVC est installé dans l'ouest de Nebraska, au l'Amérique du Nord, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles.

Les SVC sont des FACTS de première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage.

#### **III.8.2 Définition**

Le compensateur statique de puissance réactive (SVC ou CSPR) est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur de limites désirées. Le SVC injecte de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge [32].

Le Compensateur Statique de Puissance Réactive est un dispositif de compensation parallèle a base des composantes d'électronique de puissance.

Cette analyse du SVC ne comporte pas l'étude des transitoires ni celui de la stabilité du circuit. Il se limite à l'étude du SVC et ces composants en régime permanent.

Les dispositifs FACTS comme il a été mentionné dans l'introduction font en général appel à des éléments de l'électronique de puissance. Ces éléments sont utilisés depuis quelques années seulement. Le principal problème concernant l'utilisation de ceux-ci dans un dispositif FACTS est le contrôle. Le thyristor est dans la plupart des cas l'élément qui permet de contrôler ces dispositifs. L'opération d'un thyristor présente des caractéristiques spéciales. Par exemple, il est à la source des effets non linéaires et de la présence d'harmoniques dans les circuits qui comportent une branche TCR.

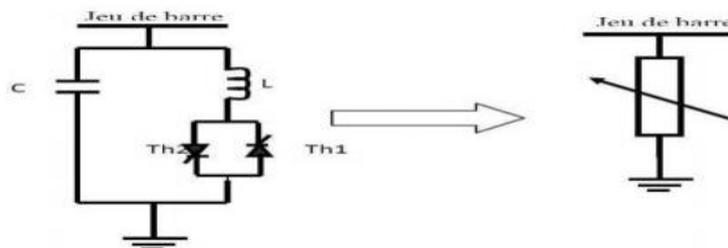


Figure III.9: Représentation d'un SVC.

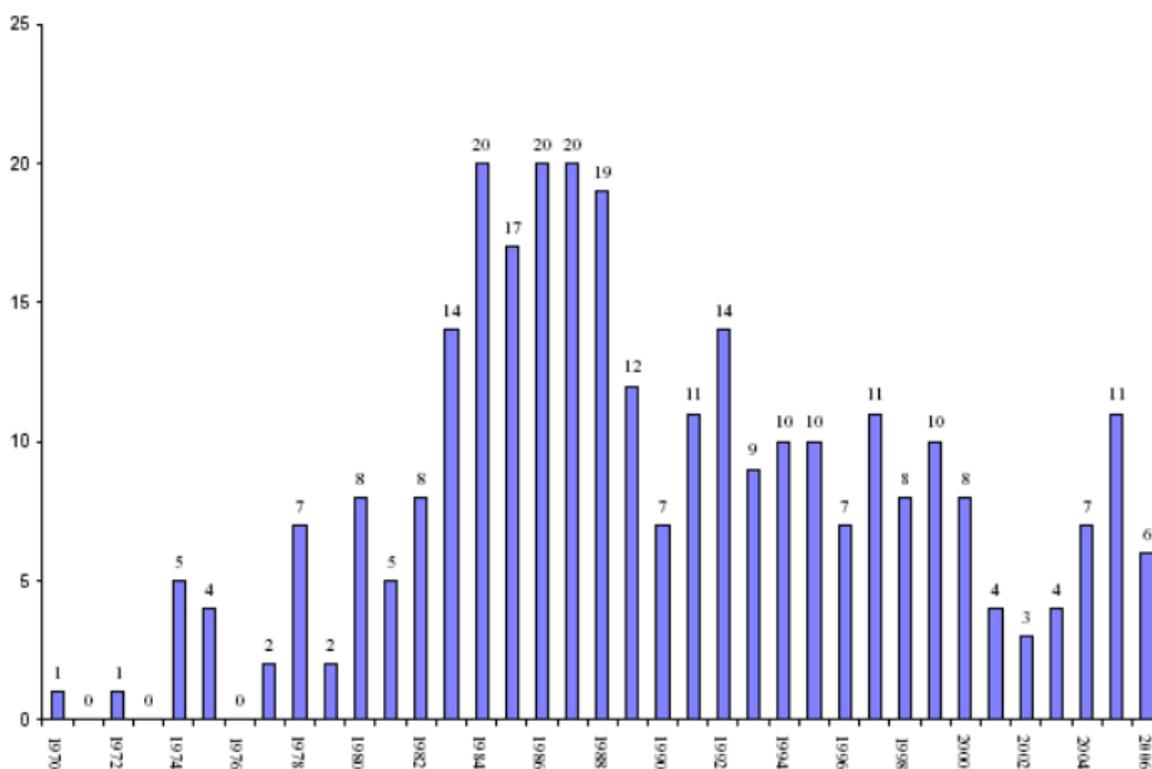


Figure III.10: Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006

### III.8.3 Principe de fonctionnement

Le compensateur statique SVC est composé de plusieurs éléments tel que le condensateur fixe (FC), qui est commandé par des éléments mécaniques; d'une réactance commandée par thyristors (TCR), et de condensateurs commutés par thyristors (TSC), et parfois de réactance commutée par thyristors (TSR), et des filtres d'harmoniques.

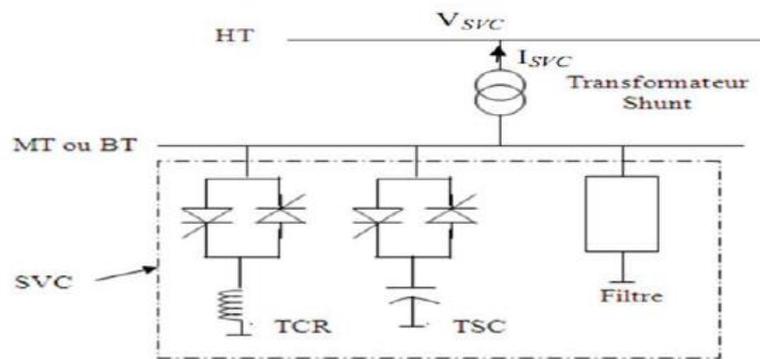


Figure III.11 : Schéma de principe d'un SVC.

### III.8.3.1 Condensateur fixe (FC)

Le condensateur fixe fournit au jeu de barre une puissance réactive fixe, il est connecté au réseau mécaniquement et comporte un contrôle pour l'ouverture du disjoncteur qu'il relie au jeu de barre.

### III.8.3.2 Réactance commandée par thyristors (TCR)

Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle (Fig. III.14), la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.

Ce principe est plus avantageux que le (TSC) ou la compensation est du type discontinu car la régulation de la puissance réactive se fait par échelons. Il existe donc toujours une différence entre la puissance réactive fournie ( $Q_c$ ) et celle consommée ( $Q_v$ ), Cette différence  $Q_v - Q_c = Q_r$  constitue une charge pour le réseau.

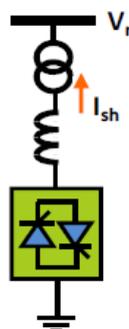


Figure III.12: TCR

### III.8.3.3 Condensateur commuté par thyristors (TSC)

Le circuit TSC est composé d'une capacité placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle (Fig.III.15). La batterie de condensateur est fractionnée en gradins appropriés qui sont individuellement commutés par des thyristors bidirectionnels. Pour ce type de compensation des règles importantes doivent être respectées. Les compensateurs doivent être préchargés à la valeur crête du réseau et enclenchés lorsque cette tension devient égale à celle du pré charge.



Figure III.13: TSC

### III.8.4 Les avantages de SVC :

Le SVC présente plusieurs avantages :

1. Réduire les pertes de transmission.
2. Augmenter la capacité de transmission.
3. Augmenter la limite de stabilité.
4. Améliorer la commande et la stabilité de tension.
5. Atténuer les oscillations de puissance.

### III.9 Comparaison des FACTS les plus utilisés :

Le tableau suivant montre les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur. (tableau 5).

- +: Performance moyenne.
- ++: Bonne performance.

- +++: Excellente performance.

FACTS Performance	SV	SVC	STATCOM	TCSC	SSSC	UPFC
Transit de puissance active	+	+	+	+++	+++	+++
Contrôle de la puissance réactive	+++	+++	+++	/	/	+++
Contrôle de la tension	+++	+++	+++	+	+	+++
Contrôle de l'angle de transport	/	/	/	+++	+++	+++
Contrôle dynamique de la tension	/	++	+++	/	/	+++
Stabilité	/	++	+++	++	+++	+++
Oscillation de puissance	/	++	+++	+++	+++	+++

### **II.10 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), ainsi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, IPFC. Cette classification est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique. Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux.

- Nous avons choisi d'étudier le SVC (Static Var Compensator) comme dispositifs FACTS pour contrôler et améliorer la tension et la puissance réactive dans un réseau de transport d'énergie électrique.

# **Chapitre IV :**

## **Simulation**

### ❖ **Le réseau considéré :**

Le réseau considéré dans l'étude statique est toutes les lignes, transformateurs et générateurs connectés aux nœuds HT et THT (60kV, 220 kV et 400 kV).

### ❖ **Analyse des résultats des simulations :**

Il est considéré dans cette étude trois SVC insérés dans le réseau électrique pour fournir ou absorber de la puissance réactive ; deux (02 SVC) raccordés au poste N°1 et un (01 SVC) au poste N°2.

Le type de compensateur statique dont il question dans cette partie est utilisé pour régler la tension et la puissance réactive transit dans un réseau de transport.

Le dispositif SVC est connecté au réseau à travers d'un transformateur de couplage 220kV/8kV, Le SVC est de 40Mvar capacitif, et de 10 Mvar inductif à 50 Hz.]

Afin de montré l'efficacité de SVC pour le contrôle de la tension ; deux simulations sont considérés : sans SVC et avec SVC dans le réseau en situation normale et perturbée.

### IV.1 SUR LOGICIEL DU SPIRA :

**1<sup>er</sup> cas :** Les simulations ont été réalisées avec ou sans SVC au POSTE N°1 220/60kV :

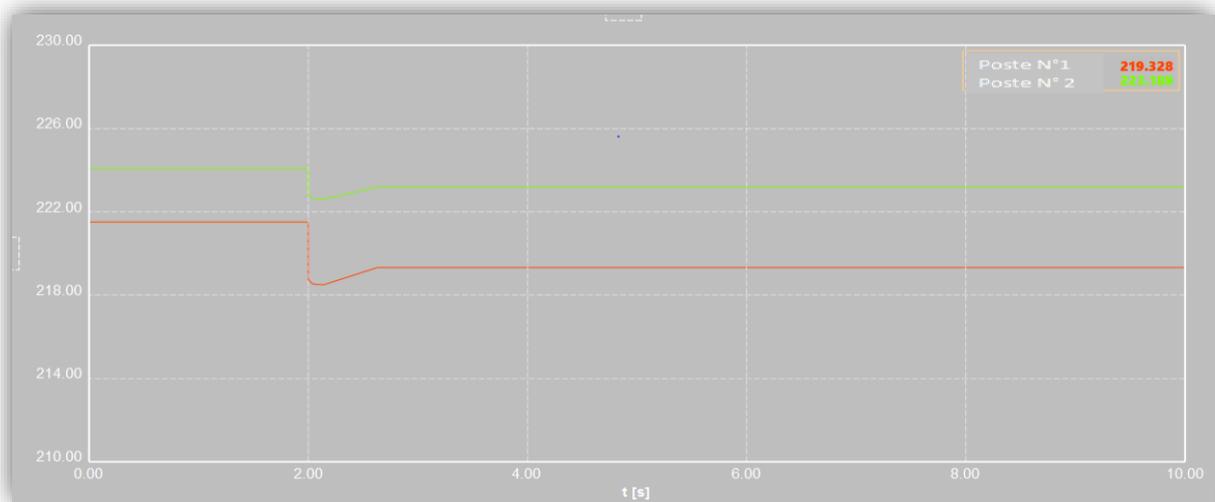
✓ **En situation normale :**

Les résultats de la simulation d'écoulement de puissance (en régime permanent) obtenue sont mentionnés dans le tableau suivant : (Tableau 02)

OUVRAGES	Avec SVC au POSTE N° 1 220/60Kv	Sans SVC au POSTE N° 1 220/60Kv
POSTE N° 1 220/60Kv	222	219
POSTE N° 2 220/60kV	224	223

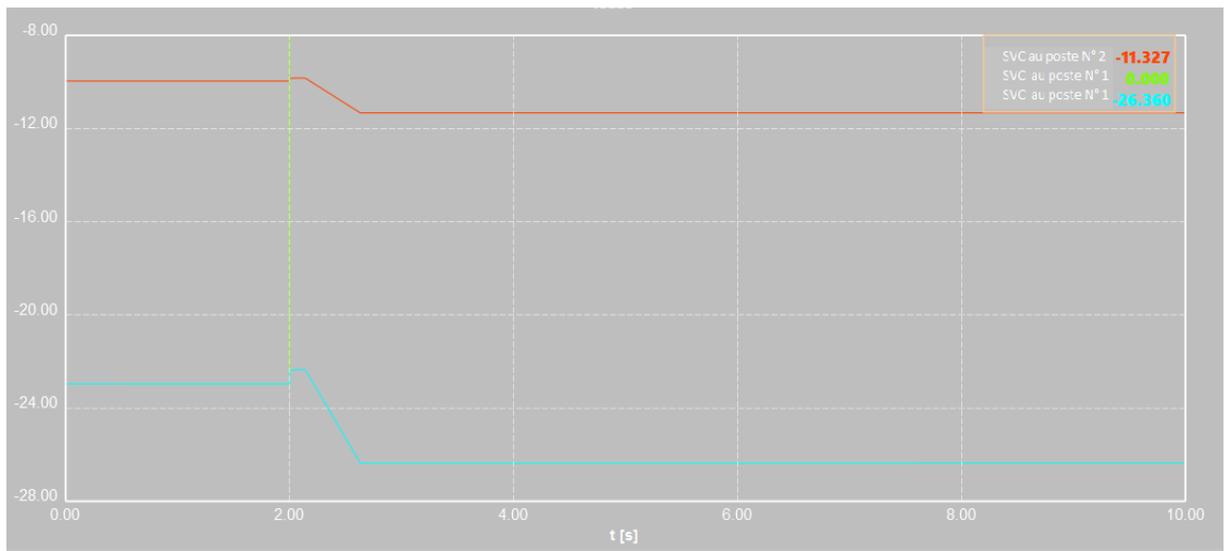
De l'analyse des résultats des simulations il ressort que sans le SVC une baisse de tension au poste N° 1 (219kV).

- **Les tensions (kV)**



**Figure IV.1 :** Les profils ci-dessus représentent une faible perturbation des tensions suite au déclenchement d'un SVC, qui se stabilise rapidement à des valeurs admissibles.

- **La puissance réactive (MVAR) des SVC**



**Figure IV.2 :** Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant.

✓ **En situation perturbée :**

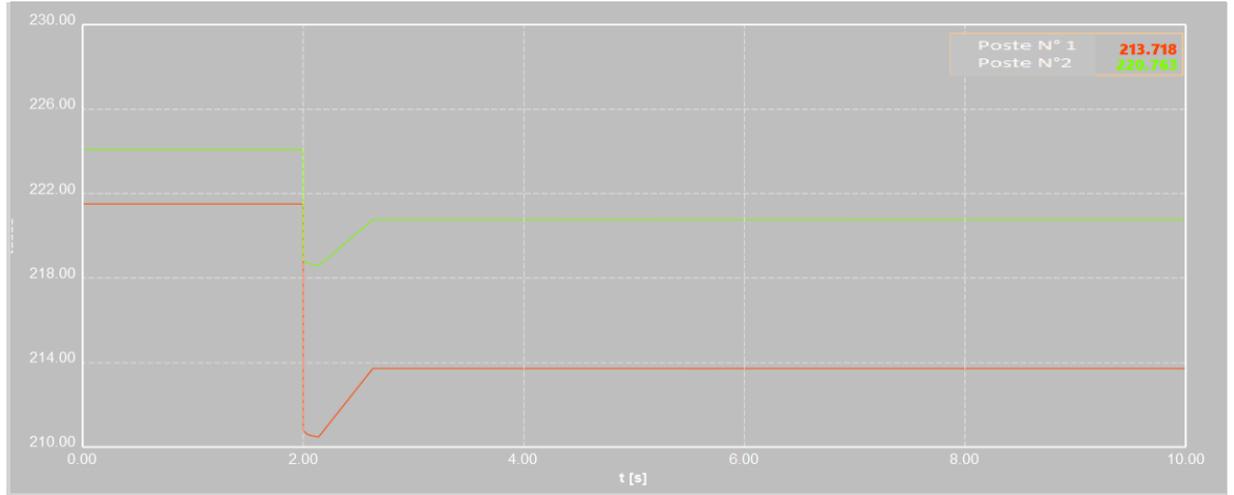
Les simulations ont été réalisées pour l'état N-1 pour l'indisponibilité d'une ligne 220kV

( **Tableau 03** )

<b>OUVRAGES</b>	<b>Avec SVC au POSTE N° 1 220/60kV</b>	<b>Sans SVC au POSTE N° 1 220/60Kv</b>
POSTE N° 1 220/60kV	216	211
POSTE N° 2 220/60kV	221	219

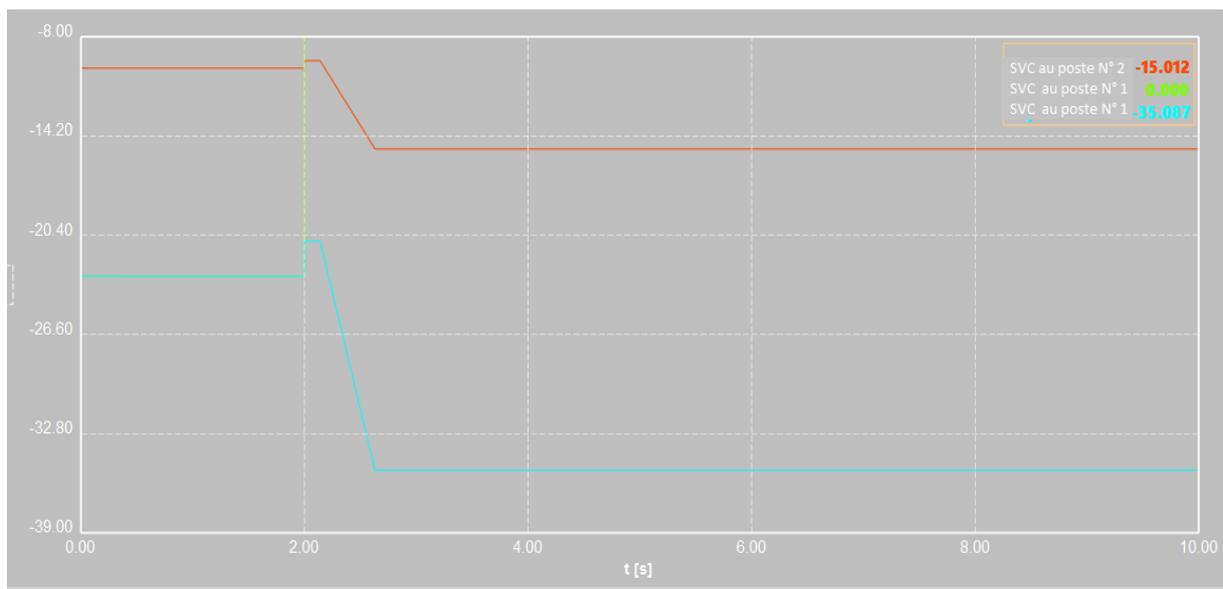
De l'analyse des résultats des simulations il ressort une chute de tension de tension au poste N° 1 (211kV).

- **Les tensions (kV)**



**Figure IV.3** : Les profils ci-dessus représentent une perturbation des tensions qui se stabilise à des valeurs qui sont dans les limites de fonctionnement normal.

- **La puissance réactive (MVAR) des SVC**



**Figure IV.4** : Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant.

### 2eme cas : Les simulations ont été réalisées avec ou sans SVC au POSTE N° 2

#### 220/60kV :

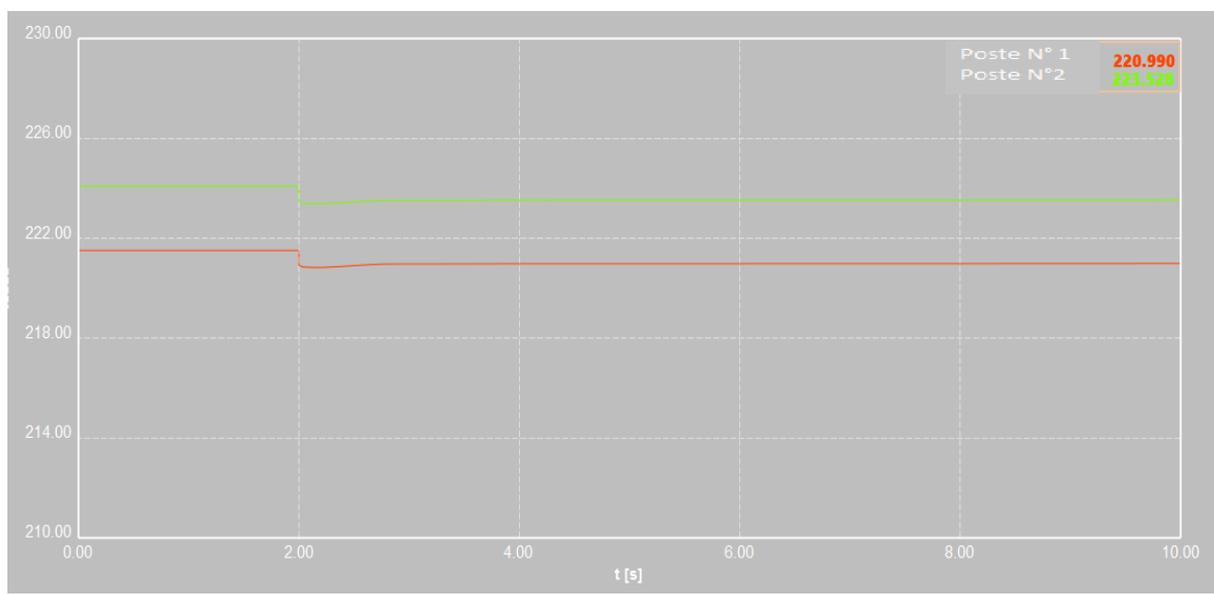
✓ En situation normale :

En situation normale aucune contrainte aucune contrainte sur le fonctionnement du réseau électrique (cf. tableau ci-dessous) ; les niveau de tension sont dans les limites admissible.

(Tableau 04)

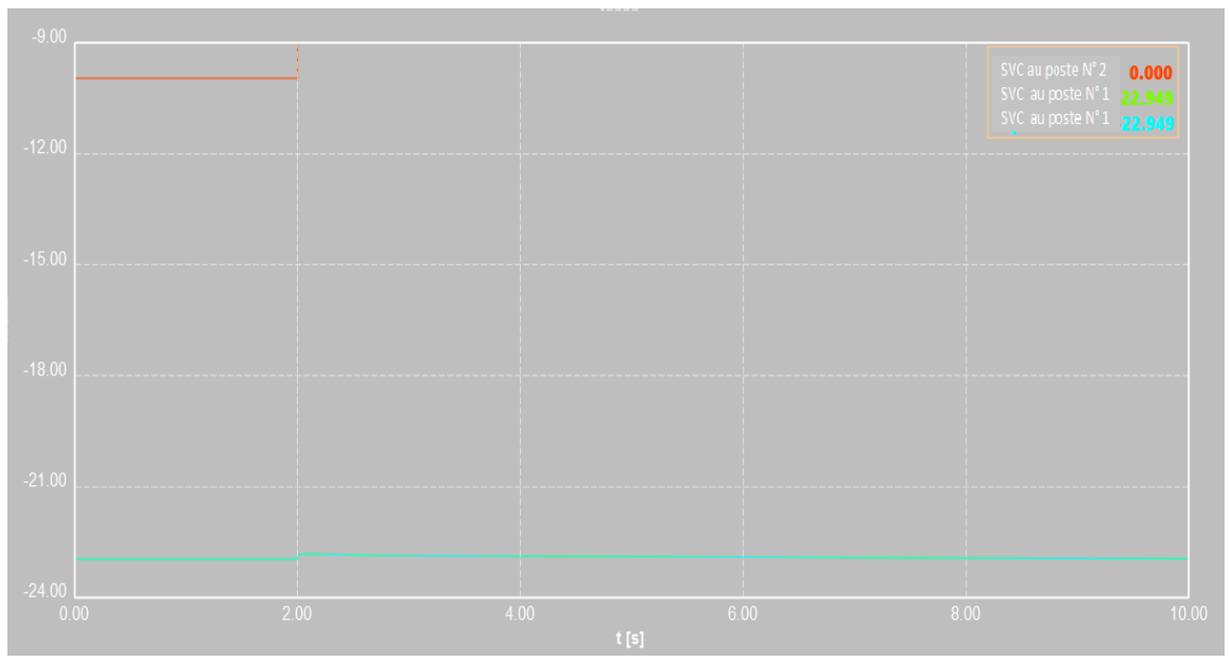
OUVRAGES	Avec SVC au POSTE N° 2 220/60kV	Sans SVC au POSTE N° 2 220/60kV
POSTE N° 2 220/60kV	224	223
POSTE N° 1 220/60kV	222	219

- Les tensions (kV)



**Figure IV.5 :** Les profils ci-dessus représentent une perturbation des tensions qui se stabilise à des valeurs qui sont dans les limites de fonctionnement normal

• **La puissance réactive (MVAR) des SVC**



**Figure IV.6:** Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant.

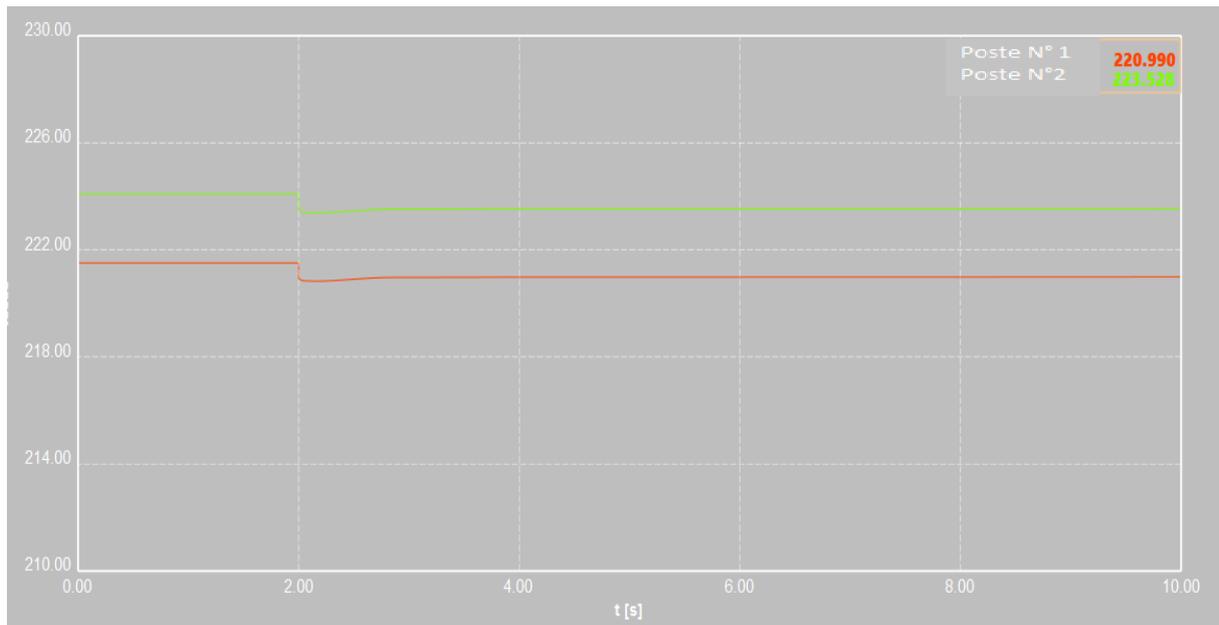
✓ **En situation perturbée :**

Les simulations ont été réalisées pour l'état N-1 pour l'indisponibilité d'une ligne (**tableau 5**)

<b>OUVRAGES</b>	<b>Avec SVC à POSTE N° 2 220/60kV</b>	<b>Sans SVC à POSTE N° 2 220/60kV</b>
POSTE N° 2 220/60kV	221	220
POSTE N° 1 220/60kV	219	218

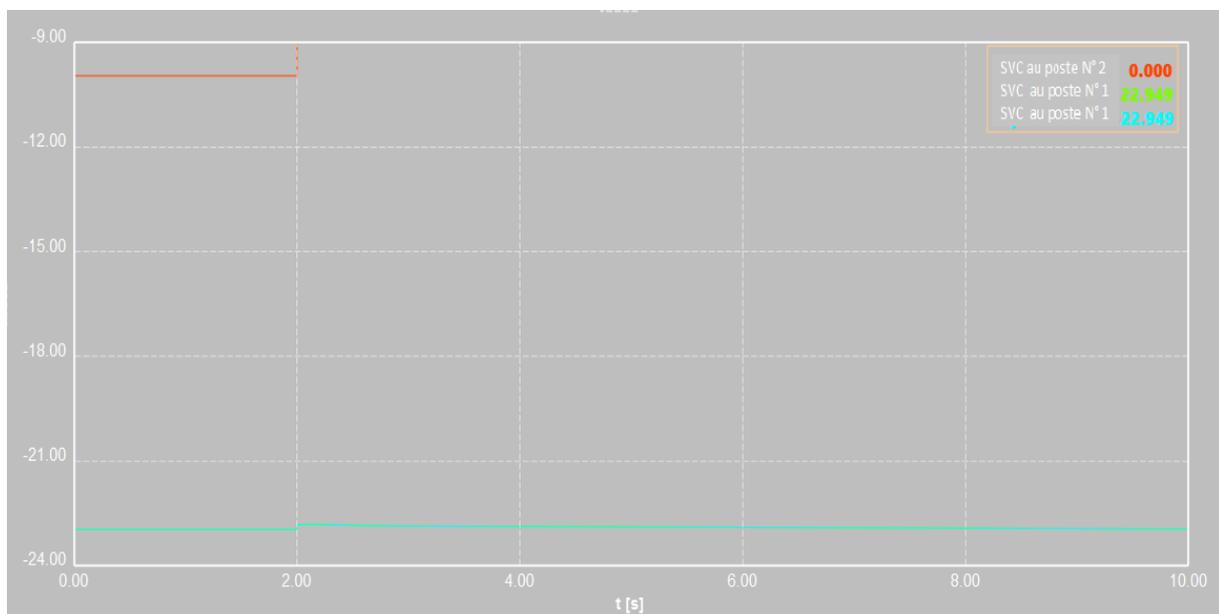
De l'analyse des résultats des simulations il ressort une baisse du plan de tension. Au vu de ces résultats obtenu il apparait que le SVC joue un rôle important ; ce dernier améliore le plan de tension.

- **Les tensions (kV)**



**Figure IV.7 :** Les profils ci-dessus représentent une perturbation des tensions qui se stabilise à des valeurs qui sont dans les limites de fonctionnement normal.

- **La puissance réactive (MVAR) des SVC**



**Figure IV.8 :** Les profils ci-dessus représentent la puissance réactive débitée par les deux SVC restant.

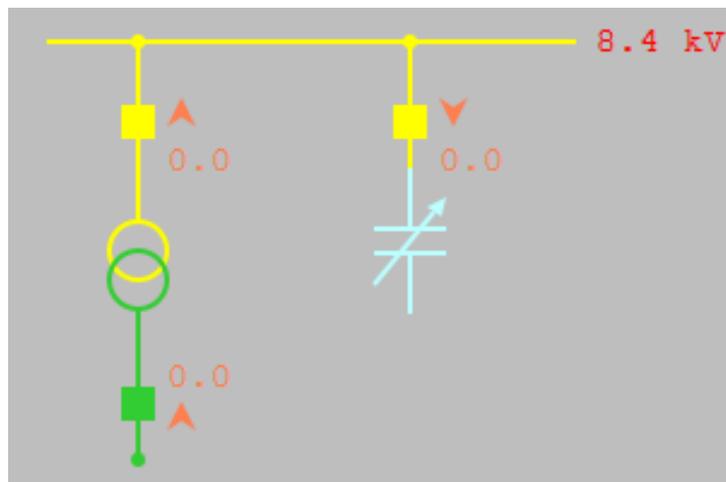
- Les simulations ont été réalisées en utilisant le modèle SICRE de l'outil de simulation SPIRA :

Le rôle du Simulateur Dynamique :

- Analyse des évènements être construction des incidents.
- Evaluation sécurité dynamique en ligne.
- Evaluation des stratégies de contrôle et du Plan de Défense.
- Evaluation de protection et dès leur réglages.
- Planification et test des Plans de Reconstitution

➤ **Modélisation des SVC :**

La figure ci-dessous représente la modélisation en SICRE d'un SVC raccordé au réseau :



**Figure IV.9 :** Modélisation en SICRE d'un SVC raccordé au réseau

## IV.2 SUR LOGICIEL DU MATLAB :

### IV.2.1 : sans SVC au poste N° 2 220/60kV :

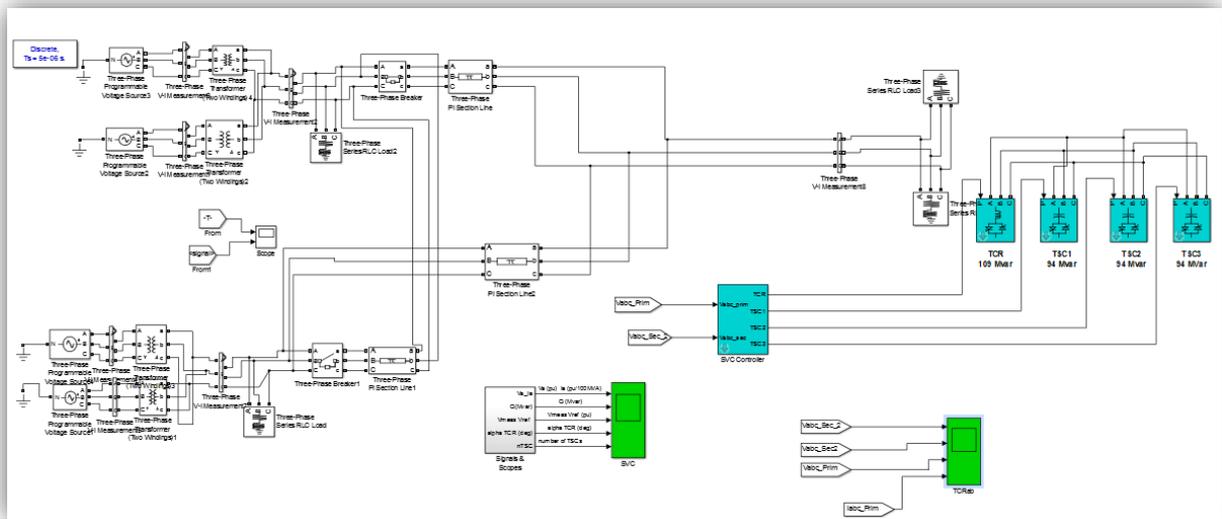


Figure IV.10 : Sans SVC au poste N° 2 220/60kV

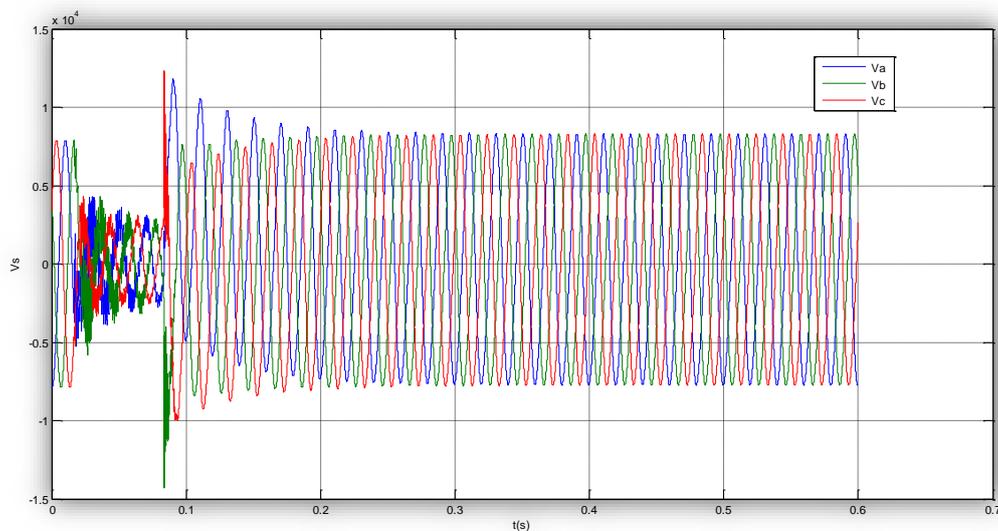


Figure IV.11: Les profils ci-dessus représentent une faible perturbation des tensions suite au déclenchement des 2 disjoncteurs et augmentation des charges, pour analyser la stabilité statique.

la perturbation est constaté dans labbes de temps du 0s à 0.08s suite à un déclenchement **des 2 disjoncteurs et augmentation des charges**, puis on remarque après T 0.08s une stabilisation des tensions à des valeurs hautes à cause de SVC avec filtre.

## IV.2.2 Les résultats obtenus avec SVC au poste N° 2 220/60kV:

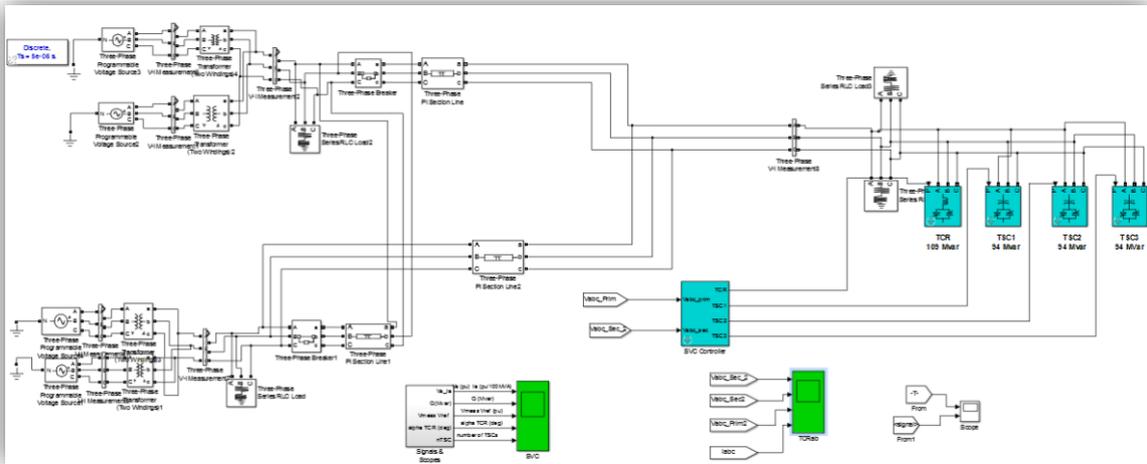


Figure IV.12 : avec SVC au poste N° 2 220/60kV

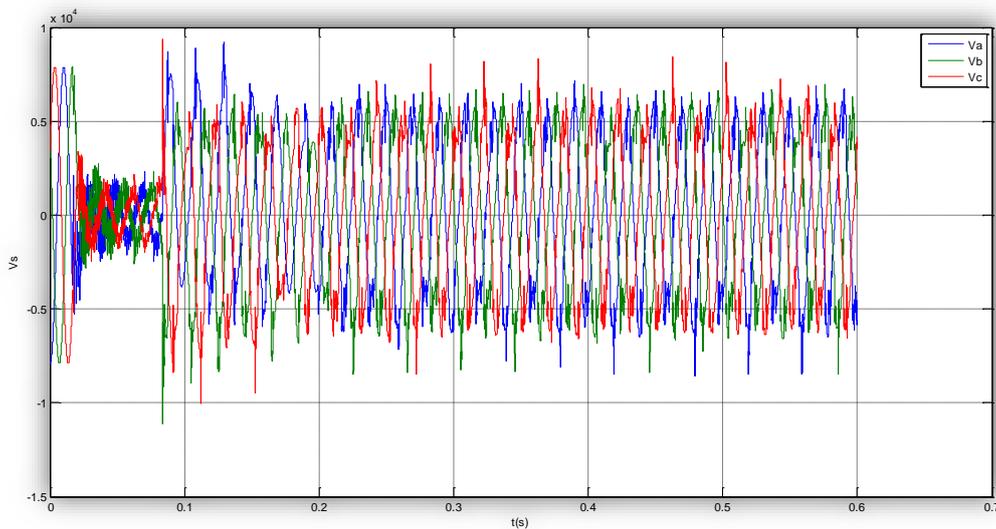


Figure IV. 13 : Les profils ci-dessus représentent une faible perturbation des tensions suite au déclenchement des 2 disjoncteurs et augmentation des charges, qui se stabilise rapidement à des valeurs admissibles

la perturbation est constaté dans labbes de temps du 0s à 0.08s suite à un déclenchement **des 2 disjoncteurs et augmentation des charges**, puis on remarque après T 0.08s une stabilisation des tensions à des valeurs hautes à cause de SVC sans filtre.

## IV.2.3 Avec SVC(TCR .TSC) au poste N° 2 220/60kV :

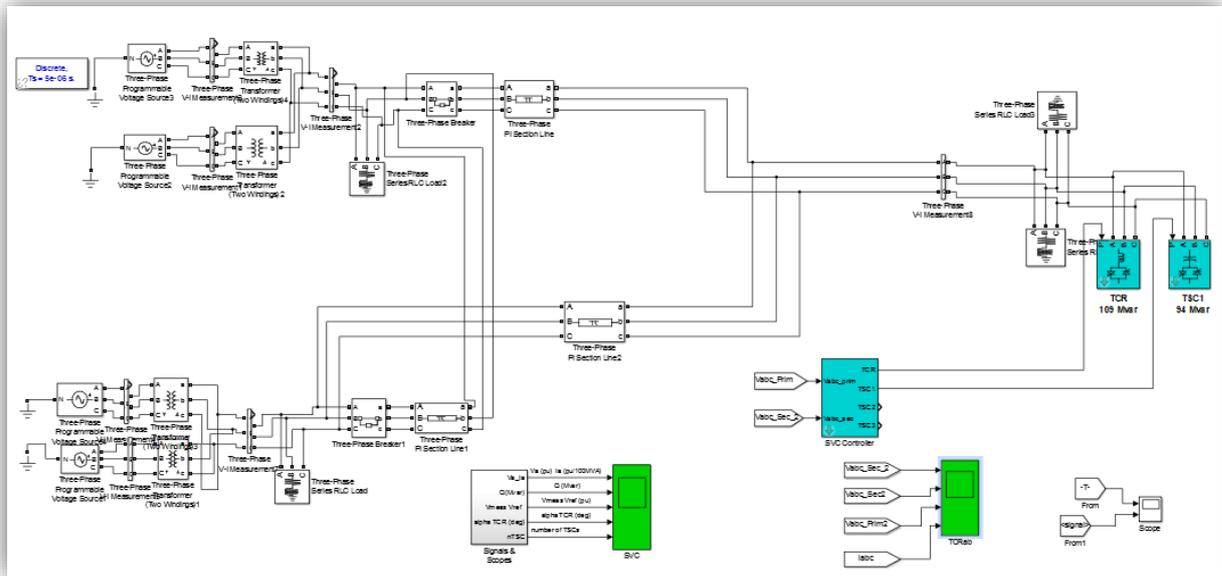


Figure IV.14 : avec SVC (TCR .TSC) au poste N° 2 220/60kV

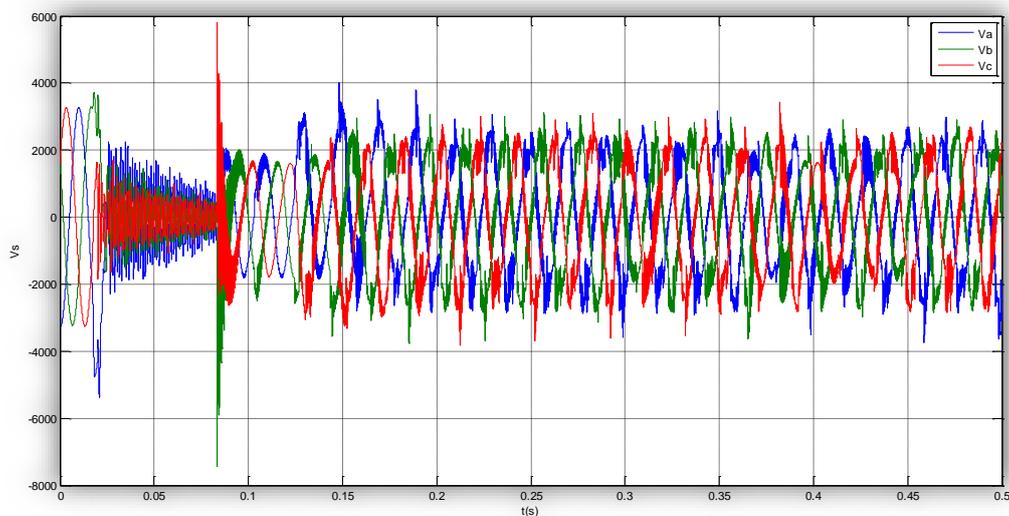


Figure IV.15 : avec SVC (TCR .TSC) au poste N° 2 220/60kV

la perturbation est constaté dans labbes de temps du 0s à 0.08s suite à un déclenchement **des 2 disjoncteurs et augmentation des charges**, puis on remarque après T 0.08s une stabilisation des tensions à des valeurs hautes à cause de SVC (TCR .TSC) sans filtre.

### Déclenchement d'une ligne 220Kv

## IV.2.4: sans SVC au poste N° 2 220/60kV :

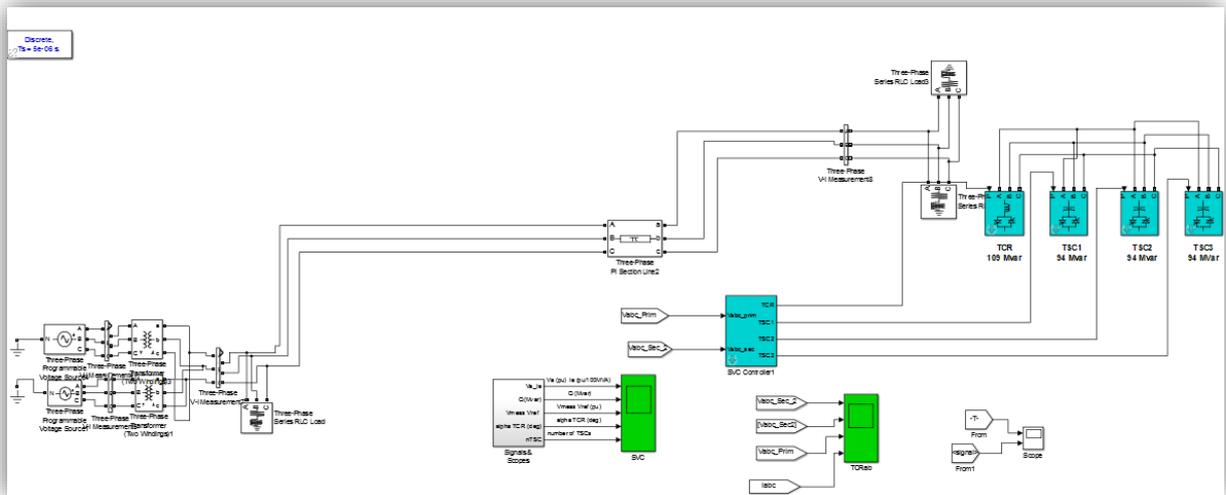


Figure IV.16 : Déclenchement d'une ligne 220kV sans svc

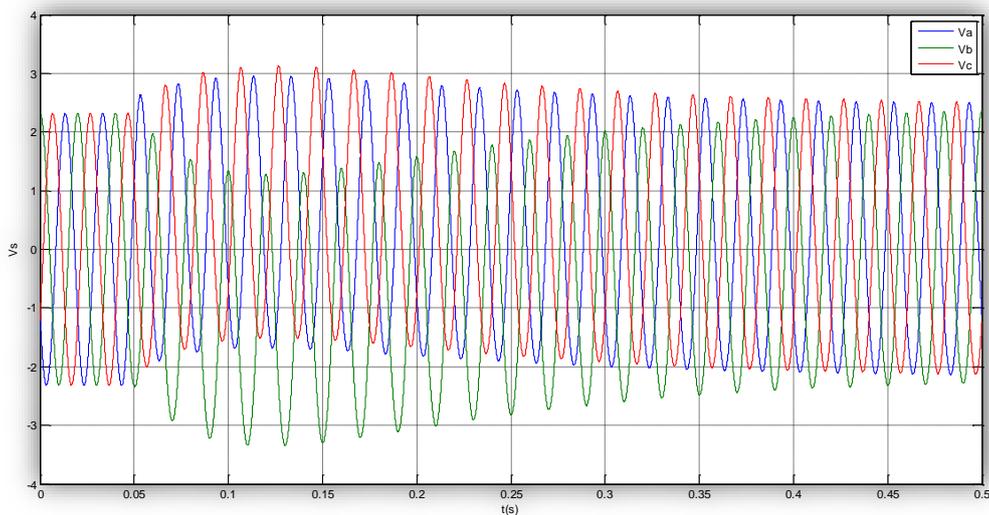


Figure IV.17 : Déclenchement d'une ligne 220kV sans svc

La perturbation est constaté dans labbes de temps du 0.06s à 0.3s suite à un déclenchement **de ligne 220kv et augmentation des charges**, puis on remarque à T 0.06s une augmentation des tentions apres la mise en place d'un SVC qui compense les pertes et à T 0.3s on constate une stabilisation des tensions à des valeurs admissibles à cause de SVC avec filtre.

- commande de SVC

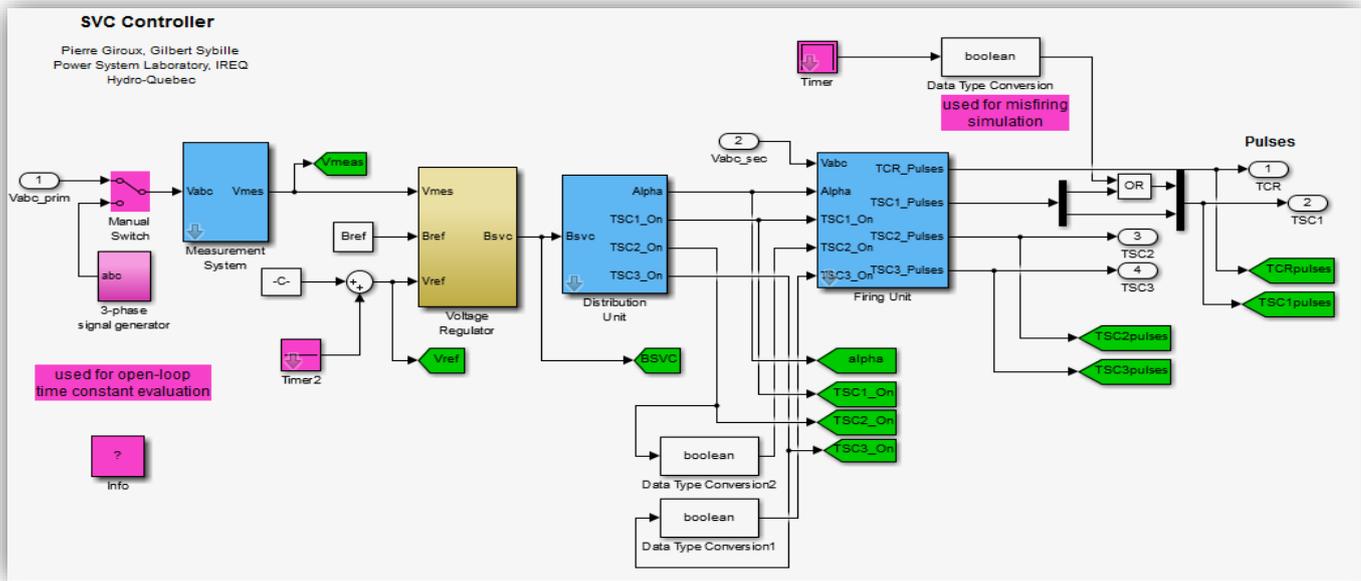


Figure IV.18 : commande de SVC

Le bloc Power (PLL-Driven, Positive-Sequence) calcule la puissance active directe P (en watts) et la puissance réactive Q (en vars) d'un ensemble périodique de tensions et courants triphasés. Pour effectuer ce calcul, le bloc calcule d'abord la séquence positive des tensions et courants d'entrée avec une fenêtre glissante sur un cycle de la fréquence fondamentale donnée par l'entrée 1. Le référentiel nécessaire au calcul est donné par l'entrée 2. Ces formules sont ensuite évaluées :

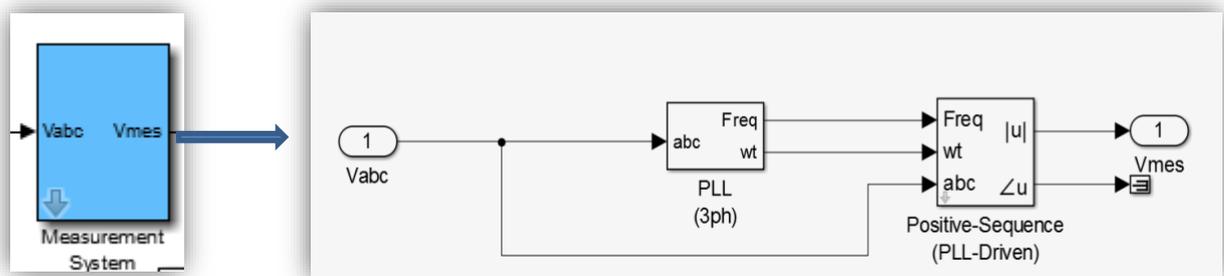


Figure IV.19: système de PLL

$$P = 3 \times |V1| \times \sqrt{2} \times |I1| \times \sqrt{2} \times \cos(\varphi)$$

$$Q = 3 \times |V1| \times \sqrt{2} \times |I1| \times \sqrt{2} \times \sin(\varphi)$$

$$\varphi = \angle V1 - \angle I1$$

V1 est la composante directe de l'entrée Vabc. I1 est la composante directe de l'entrée Iabc.

Avec ces formules, un courant circulant dans un circuit RL produit un P positif et un Q positif. Comme ce bloc utilise une fenêtre de moyenne mobile, un cycle de simulation doit se terminer avant que les sorties donnent la valeur correcte. Pour le premier cycle de simulation, la sortie est maintenue constante en utilisant les valeurs spécifiées par les paramètres Tension d'entrée initiale et Courant d'entrée initiale.

- **Fréquence initiale (Hz)**

Spécifiez la fréquence du premier cycle de simulation. La valeur par défaut est 50.

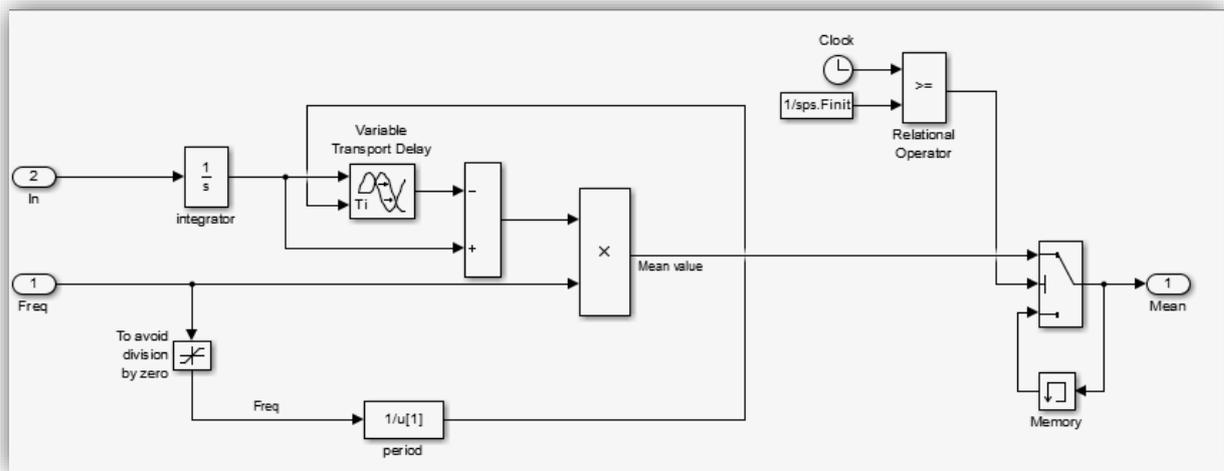


Figure IV.20 : la fréquence minimale attendue du signal d'entrée.

- **Fréquence minimale (Hz)**

Spécifiez la fréquence minimale attendue du signal d'entrée. Ce paramètre définit la taille de la mémoire tampon du bloc Moyenne (fréquence variable) utilisé à l'intérieur du bloc pour calculer la valeur moyenne. La valeur par défaut est 45.

Entrées initiales [Phase (degrés), Fréquence (Hz)]

Spécifiez la phase initiale et la fréquence du signal d'entrée. La valeur par défaut est [0, 50].

- **Gains du régulateur [Kp, Ki, Kd]**

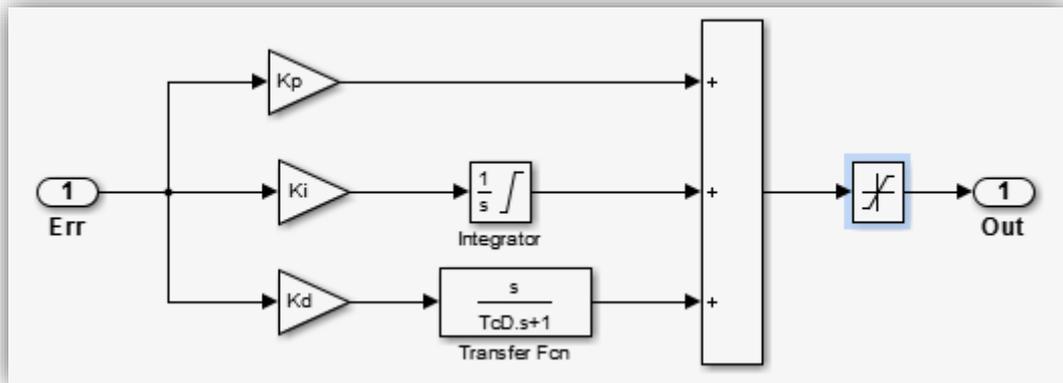


Figure IV.21: gain du régulateur PID

Spécifiez les gains proportionnels, intégraux et dérivés du contrôleur PID interne. Utilisez les gains pour régler le temps de réponse PLL, le dépassement et les performances d'erreur en régime permanent. La valeur par défaut est [180, 3200, 1].

- **Constante de temps pour l'action dérivée (s)**

Spécifiez la constante de temps pour le filtre de premier ordre du bloc dérivé PID. La valeur par défaut est 1e-4.

- **Taux maximal de changement de fréquence (Hz/s)**

Spécifiez la pente positive et négative maximale de la fréquence du signal. La valeur par défaut est 12.

- **Fréquence de coupure du filtre pour la mesure de fréquence (Hz)**

Spécifiez la fréquence de coupure du filtre passe-bas de second ordre. La valeur par défaut est 25.

- **Temps d'échantillonnage**

Spécifiez la durée d'échantillonnage du bloc, en secondes. Défini sur 0 pour implémenter un bloc continu. La valeur par défaut est 0.

Activer le contrôle automatique du gain

Lorsque cette case est cochée, le bloc PLL optimise ses performances en mettant à l'échelle le signal du régulateur PID en fonction de l'amplitude du signal d'entrée. Sélectionnez cette option lorsque le signal d'entrée n'est pas normalisé. La valeur par défaut est sélectionnée.

- **Entrées et sorties**

Dans Le signal d'entrée normalisé, en pu.

- **Fréq**

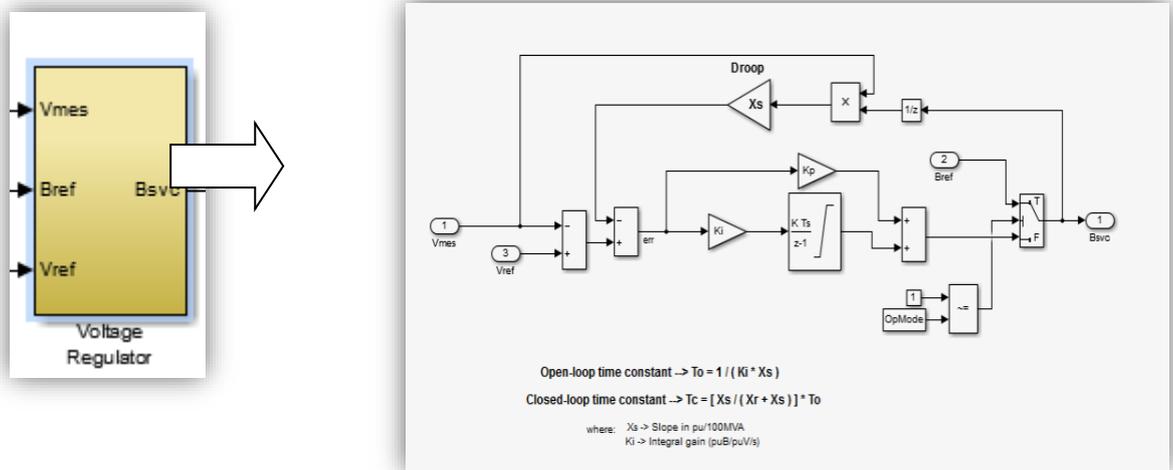
La fréquence mesurée, en hertz.

Poids

- **Wt**

(Rad) variant entre 0 et  $2 \cdot \pi$ , synchronisé sur le passage par zéro (montée)

du fondamental du signal d'entrée.



**Figure IV.22 :** régulateur de

voltage

Dans cette partie, la figure explique les étapes de la régulation de tension, en suivant les deux boucles de l'ouverture et de fermeture "T0 et Tc" qui dépend les constant "Ki , Xs , et Xr", dans cette partie on doit utiliser la méthode de contrôle PID pour calculer et comparer les tensions de l'entrée et de sortie et la tension qu'on devrait rajouter pour donner une forte possibilité que le système sera équilibrer a la fin

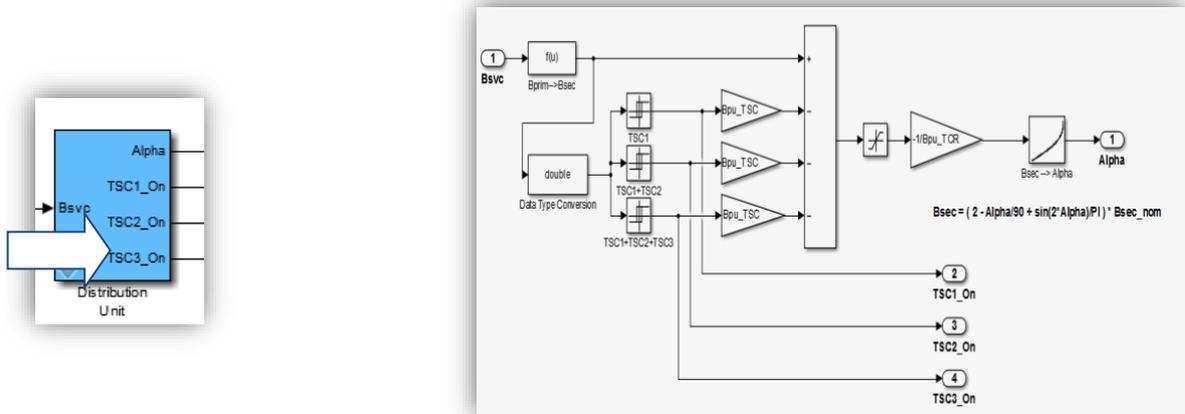


Figure IV.23: l'unité de distribution

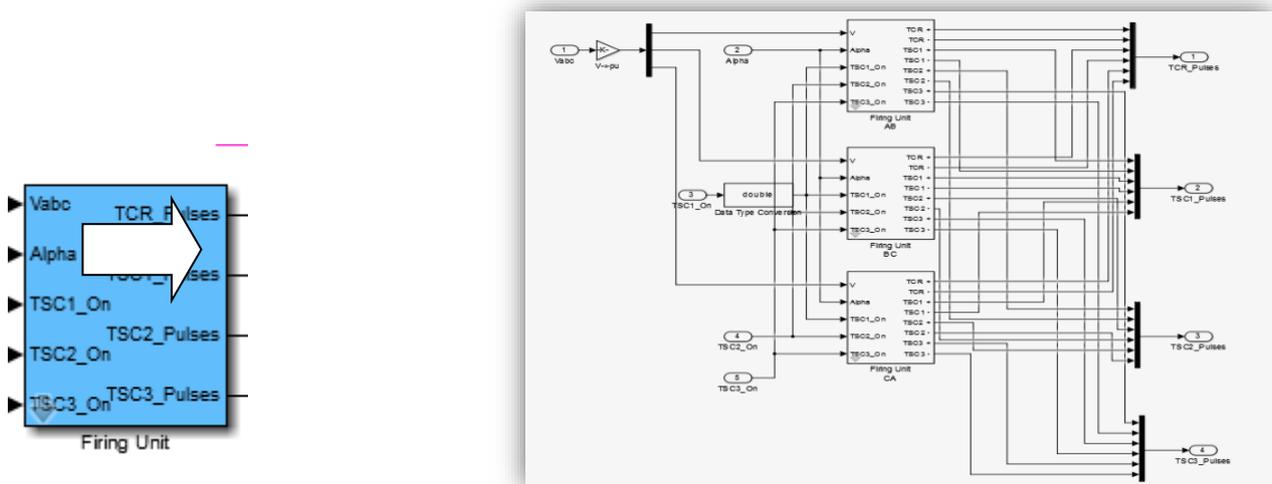
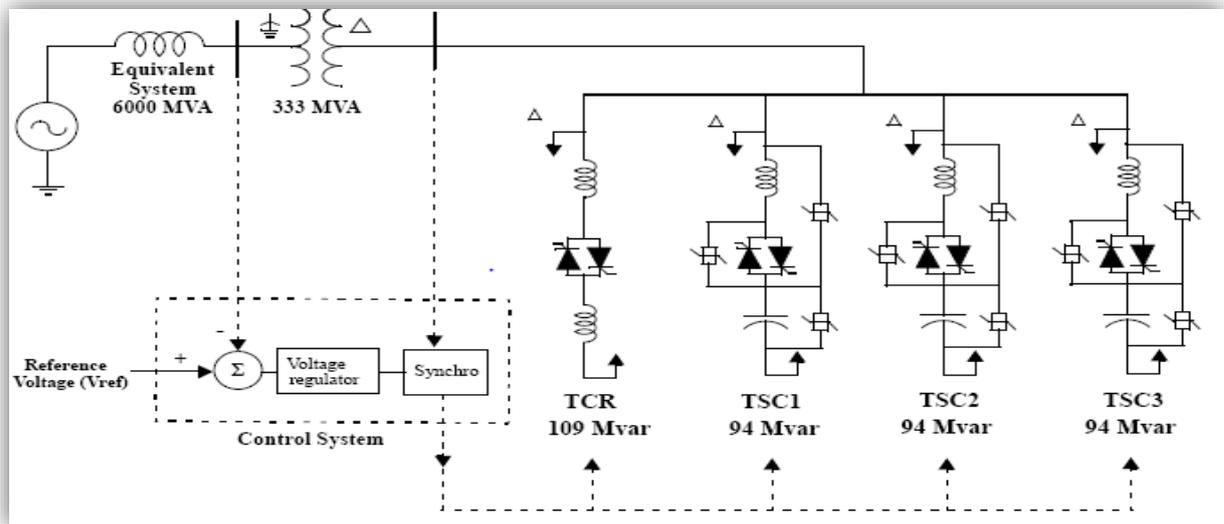


Figure IV.24 : Le modèle SVC (modèle détaillé d'une topologie SVC particulière)

- **Svccontroller**

Le modèle SVC décrit dans cet exemple est plutôt un modèle détaillé d'une topologie SVC particulière (utilisant un réacteur contrôlé par thyristor (TCR) et des condensateurs commutés par thyristor (TSC)) avec une représentation complète de l'électronique de puissance. Ce type de modèle nécessite une simulation discrète à pas de temps fixe (50  $\mu$ s dans ce cas) et il est utilisé typiquement pour étudier les performances du SVC sur une plage de temps beaucoup plus petite (quelques secondes). Les applications typiques incluent l'optimisation du système

de contrôle, l'impact des harmoniques, des transitoires et des contraintes sur les composants de puissance lors des défauts.



**Figure IV.25 :** Le schéma unifilaire du SVC modélisé est illustré sur le schéma unifilaire du SVC

Le schéma unifilaire du SVC modélisé est illustré sur le schéma unifilaire du SVC. Il représente un SVC de 300 Mvar connecté sur un réseau de transport de 735 kV.

- **Composants d'alimentation SVC**

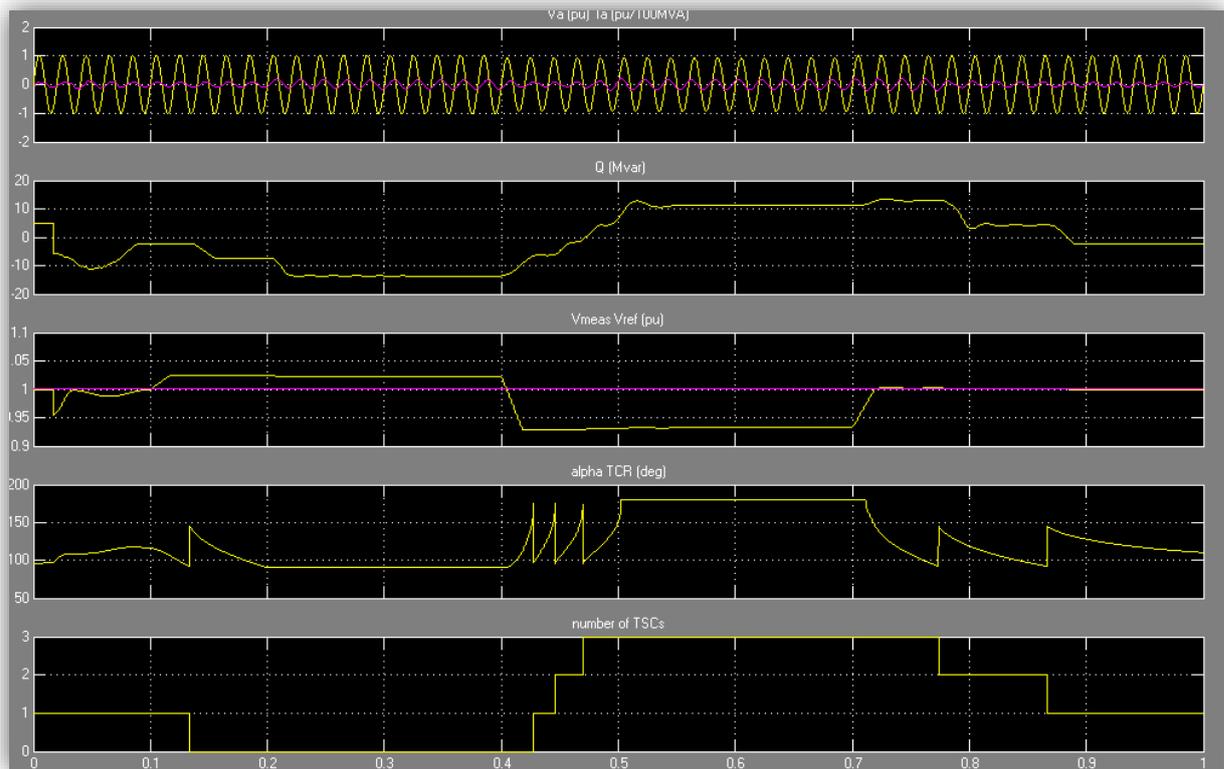
Le SVC se compose d'un transformateur de couplage 735 kV/16 kV, 333 MVA, d'un banc TCR de 109 Mvar et de trois bancs TSC de 94 Mvar (TSC1 TSC2 TSC3) connectés au secondaire du transformateur.

L'activation et la désactivation des TSC permettent une variation discrète de la puissance réactive secondaire de zéro à 282 Mvar capacitif (à 16 kV) par pas de 94 Mvar, tandis que le contrôle de phase du TCR permet une variation continue de zéro à 109 Mvar inductif. En tenant compte de la réactance de fuite du transformateur (0,15 pu), la susceptance équivalente SVC vue du côté primaire peut varier en continu de -1,04 pu/100 MVA (entièrement inductif) à +3,23 pu/100 Mvar (entièrement capacitif).

Le contrôleur SVC surveille la tension primaire et envoie les impulsions appropriées aux 24 thyristors (6 thyristors par banc triphasé) pour obtenir la susceptance requise par le régulateur de tension.

Chaque banc triphasé est connecté en triangle de sorte que, lors d'un fonctionnement équilibré normal, les harmoniques homopolaires triples ( $3e$ ,  $9e$ , ...) restent piégés à l'intérieur du triangle, réduisant ainsi l'injection d'harmoniques dans le système d'alimentation

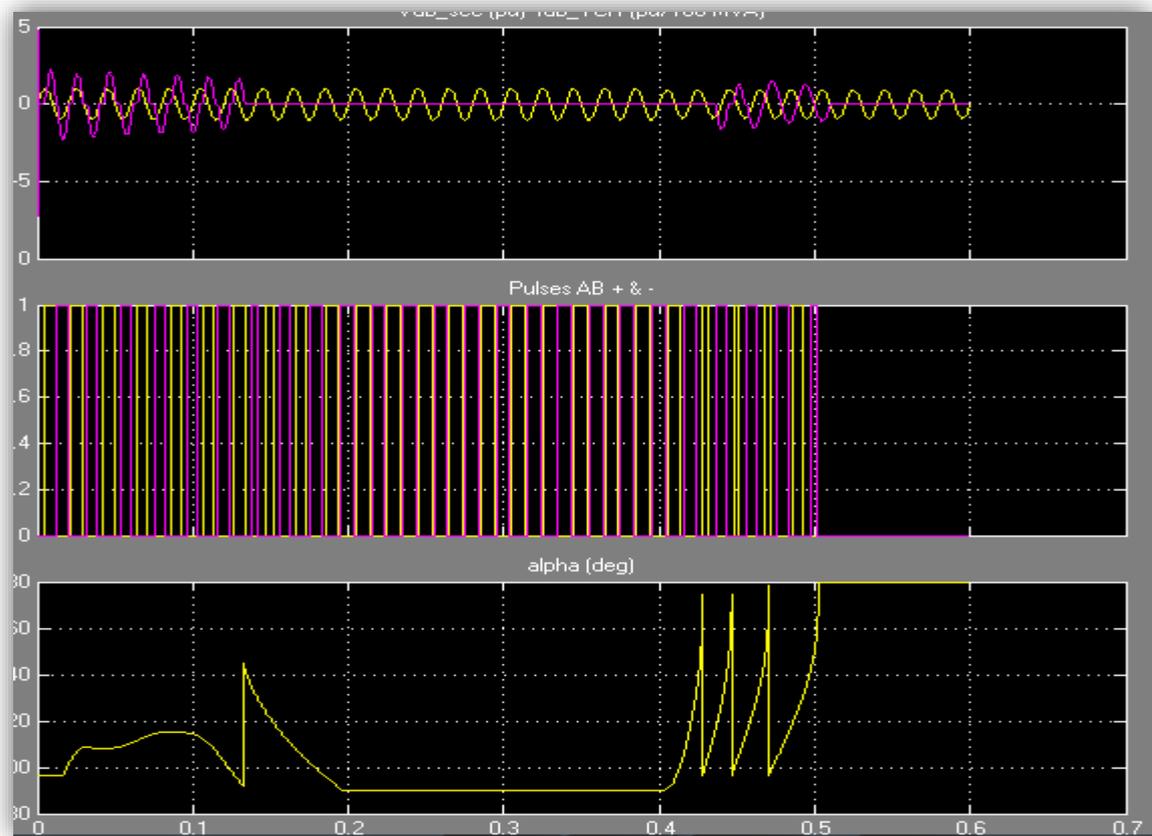
Le système électrique est représenté par un équivalent inductif (niveau de court-circuit de 6000 MVA) et une charge de 200 MW. La tension interne du système équivalent peut être modifiée au moyen d'un bloc de source de tension programmable triphasée pour observer la réponse dynamique du SVC aux changements de tension du système



**Figure IV.26** : observer la réponse dynamique du SVC aux changements de tension du système

Initialement, la tension de la source est fixée à 1,004 pu, ce qui donne une tension de 1,0 pu aux bornes du SVC lorsque le SVC est hors service. Comme la tension de référence  $V_{ref}$  est fixée à 1,0 pu, le SVC est initialement flottant (courant nul). Ce point de fonctionnement est obtenu avec TSC1 en service et TCR presque à pleine conduction ( $\alpha = 120$  degrés). A  $t = 0,1$  s, la tension est brusquement augmentée à 1,025 pu. Le SVC réagit en absorbant de la puissance réactive ( $Q = -4$  Mvar) pour, augmentant ainsi la tension à 0,974 pu. A ce stade, les trois TSC sont en service et le ramener la tension à 1,01 pu. Le temps de stabilisation à 95 % est d'environ 135 ms. À ce stade, tous les TSC sont hors service et le TCR est presque à pleine conduction ( $\alpha =$

94 degrés). A  $t = 0,4$  s la tension de la source est brutalement abaissée à 1,3 pu. Le SVC réagit en générant ( $Q = -15$ Mvar) de puissance réactive. Le TCR absorbe environ 40 % de sa puissance réactive nominale ( $\alpha = 120$  degrés).

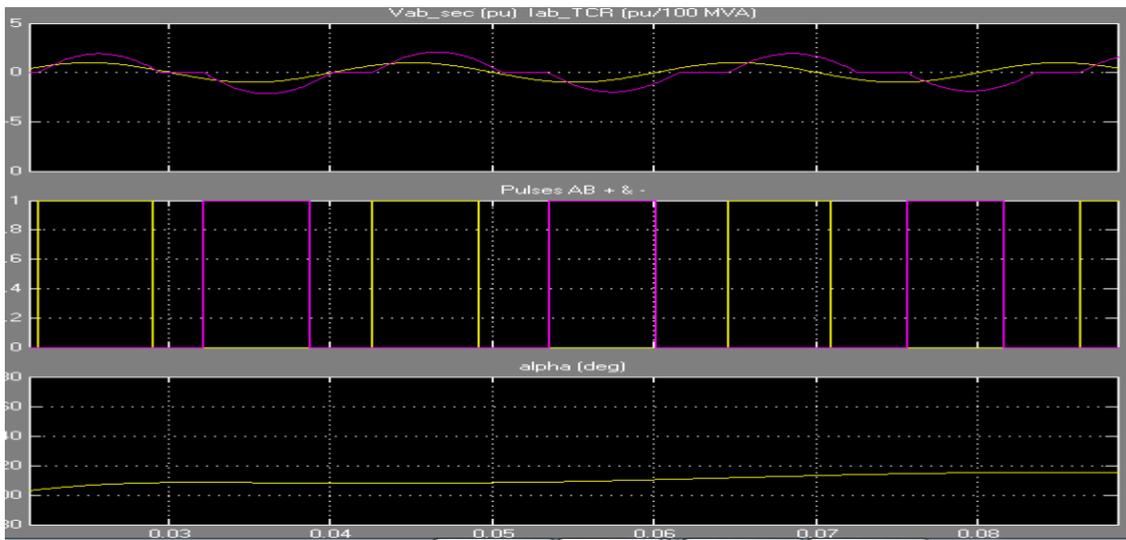


**Figure IV.26 :** l'oscilloscope comment les TSC sont séquentiellement allumés et éteints

Observez sur la dernière trace de l'oscilloscope comment les TSC sont séquentiellement allumés et éteints. Chaque fois qu'un TSC est allumé, l'angle  $\alpha$  du TCR passe de 180 degrés (pas de conduction) à 90 degrés (conduction complète). Enfin, à  $t = 0,7$  s, la tension est augmentée à 1,0 pu et la puissance réactive SVC est réduite à zéro.

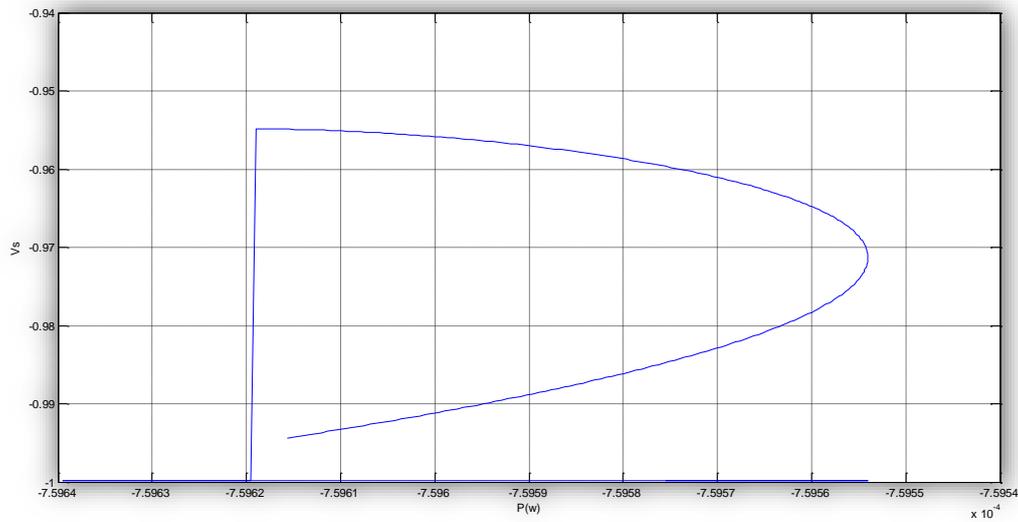
Vous pouvez ouvrir le sous-système Signal & Scopes pour observer des formes d'onde supplémentaires. La tension et le courant du TCR dans la branche AB ainsi que les impulsions des thyristors sont affichés sur l'oscilloscope du TCR AB. La figure ci-dessous effectue un zoom sur trois cycles lorsque l'angle de tir  $\alpha$  est de 120 degrés.

- Tension et courant en régime permanent dans TCR AB



**Figure IV.27 :** l'oscilloscope du TCR AB. La figure ci-dessous effectue un zoom sur trois cycles lorsque l'angle de tir  $\alpha$  est de 120 degrés

### - Etude statique :



**Figure IV .28 :** Etude statique

- La limite de la stabilité statique est atteinte lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification des conditions du réseau entraîne une chute ou hausse de tension progressive et incontrôlable aboutissant en un effondrement généralisé du réseau

### **IV.3 CONCLUSION**

Les résultats obtenues par les simulations, nous montrent que la tension contrôlée par le régulateur du compensateur statique SVC varie dans des limites tout à fait acceptables avant de revenir à une valeur proche de la valeur de référence

On peut conclure que les résultats obtenus ont montrées d'une façon claire que l'apport de SVC en tant que compensateur d'énergie réactive est bénéfique. Les résultats montrent l'efficacité du SVC sur la variation de la tension du générateur lorsque SVC est connecté proche de la perturbation, les oscillations observées dans le cas de la régulation classique sont pratiquement éliminées est rapidement établie.

# **Conclusion générale**

### **Conclusion**

- Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution originale au problème de contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique.
- L'objectif à un but d'étudier un dispositif de réglage sur lequel on agit pour contrôler aussi rapidement la variation de la tension, ainsi le transit de puissance réactive d'un réseau électrique
- L'étude du compensateur statique SVC, présentée dans ce travail, est constituée de trois parties, à savoir:
  - Description des éléments qui constituent le dispositif SVC.
  - définition du compensateur statique et son principe de fonctionnement.

Pour mieux caractériser les phénomènes liés aux réseaux transport et de distribution d'énergie électrique, il est nécessaire d'étudier ce réseau en prenant en considération les différentes pollutions que regorgent ses réalités

References

Bibliographiques

## *References Bibliographiques*

---

- [1] Machowski J., Bialek J.W. and Bumby J.R., Power system dynamics and stability, West Sussex, London, John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [2] : HENRI NEY « Equipements de puissance ». Paris, 1988.
- [3] Site Internet : [https://fr.scribd.com/document/160286876/4597291- Généralités-Sur Les-Réseaux-Electriques](https://fr.scribd.com/document/160286876/4597291-G%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9s-Sur-Les-R%C3%A9seaux-Electriques), Génie électrique, « Réseaux électriques », Généralités sur les réseaux électriques, chapitre 1, extrait.pdf.
- [4] J.B.Gupta, “ A cours in power systems“, Docteur de l’Université Henri Poincaré, Nancy-I en Génie Electrique- juillet 2005.
- [5] D. perrier – H. chorel “ Production – transport – distribution publique de L’électricité en France”, livre Edit 1994.
- [6] Michel PAYS « Câbles de transport d’énergie ». Techniques de l’Ingénieur, traité Génie électrique Doc. D 4 522 ATION PAR UNE METHODE METAHEURISTIQUE.
- [7] H. Elkhatib, Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux Électriques : optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique, Université de Paul CezanneD'aix, Thèse de Doctorat, 2008.
- [8] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « La planification Des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [9] VALENTIN CRASTAN « Les réseaux d’énergie électrique ». Tome 1.
- [10] THEODORE WILDI « Électrotechnique ». 3ème édition.
- [11] HANDELLA. « Cours de 4ème année de haute tension, électrotechnique ».
- [12] Terkia NABECHE « Restructuration du réseau électrique MT de la région de Fréha pour alimentation du pôle d’excellence de Tamda » Mémoire soutenu publiquement le 28 septembre 2014.
- Electrical Systems » Chap.3 "Transmission system compensation" edition 2002.
- [13] P.A. Lof et al. “Voltage Stability Indices for Stressed Power System.” IEEE Trans.PS, Vol.8No.1,pp.326-335, February1993.
- [14] N. Kandil, “ Algorithmes pour accélérer la simulation en stabilité transitoire “, Thèse d’état doctorat, université de MONTREAL, 1999.
- [15] BOUTABA Samia « Amélioration de la stabilité d’un réseau électrique par l’utilisation d’un ASVC » MEMOIRE EN VUE DE L’OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER .sept.2009
- [16] B. De Metz-Noblat et J. Jean, « Cahier technique n° 185 : Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels ». Groupe Schneider, janv-1997.

- [17] M'HAMMEDI Hamid « Amélioration de la stabilité du réseau électrique par l'utilisation des systèmes FACTS » master : Année Universitaire 2016 – 2017.
- [18] R. Ben Abid ; "Optimisation Multi-Objectif de la synthèse des FACTS par les particules en Essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques" thèse de magister, Université de Jijel, 04/09/2007.
- [19] S. Daiboun, "Renforcement de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS" Mémoire de Magistère, Département d'électrotechnique Université de Skikda 2005.
- [20] BOUDJELLA HOUARI « Contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) » Magister 23 Janvier 2008.
- [21] Terkia NABECHE « Restructuration du réseau électrique MT de la région de Fréha pour alimentation du pôle d'excellence de Tamda » Mémoire soutenu publiquement le 28 septembre 2014.
- [22] KAIDI NOUR EDDINE « Compensateur statique d'énergie réactive (SVC) » master 2019/2020.
- [23] G. GLANZMANN, "FACTS Flexible AC Transmission Systems," EEH - Power Systems Laboratory ETH Zurich 14. January 2005.
- [24] R. HAIMOUR, "Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique," Mémoire de magister, université de ENSET-ORAN ,2009.
- [25] S. DUPUIS, FPMS, " L'électronique de puissance dans les réseaux de transport, FACTS," Journée d'étude du groupe de contact FNRS-GREPES Electronique de puissance, 22 mars 2006.
- [26] H. Glavitsch and M. Rahmani . "Increased Transmission Capacity by Forced Symetrization". IEEE PES Summer Meeting, Berlin, 1997.
- [27] A. Pochon. "Placement Optimal de Dispositifs FACTS dans un Réseau Électrique au Moyen de la Méthode Tabou". Projet de semestre, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de Réseaux Électrique, 1999.
- [28] GACEM Abdelmalek « Commande Robuste d'un Dispositif FACTS par les Méthodes Métaheuristiques pour la Stabilité de Tension d'un Réseau Electrique » Doctorat en sciences 2019.
- [29] Abdelaàli ALIBI, "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)" Magister de l'Université de Batna 2009.
- [30] Allen J. Wood & Bruce F. Wollenberg: «Power Generation and Operation And Control» John Wiley & Sons.

## *References Bibliographiques*

---

[31]BOUDJELLA HOUARI « Contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) »Magister23 Janvier 2008.

[32]H. Tupia. Ernesto « Modélisation et analyse de stabilité du circuit compensateur statique variable » diplôme de maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Canada 2002.

[33] Oussama MAMMERI « DIFFERENTES METHODES DE CALCUL DE LA PUISSANCE REACTIVE DANS UNE NŒUD A CHARGE NON LINEAIRE EN PRESENCE D'UN SYSTEME DE COMPENSATION DE L'ENERGIE »Mémoire de Magister ,2011/2012.