

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud MAMMARI, Tizi-Ouzou**



**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique**  
**Département d'Automatique**

**Mémoire de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme

*Master professionnel en automatique*

*Option : Automatique et Informatique Industrielles*

**Thème**

*Utilisation d'un dispositif FACTS de  
type STATCOM pour améliorer le plan  
de tension d'une ligne électrique THT*

Proposé et dirigé par :

M<sup>r</sup> HAMACHE Amar

présenter par :

M<sup>lle</sup> : DAHMAM Nassima

M<sup>lle</sup> : KEMEL Sadia

Soutenu le : / /2012

*Promotion 2012*

# Introduction Générale

## Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques et calcule LOAD FLOW

Introduction .....	01
I-Définition d'un réseau électrique.....	02
I-1 Structures d'un réseau.....	02
a- Réseau radial ou en étoile .....	02
b- Réseau en boucle.....	02
c- Réseau maillé ou interconnecté.....	03
I-1-2 Types de réseaux électriques.....	03
a- Réseau de transport .....	03
b- Réseau de répartition.....	04
c- Réseau de distribution .....	04
I-1-3 niveaux de tension des réseaux électriques .....	04
I-2 Postes de transformation.....	06
I-2-1 Architecture et schémas de postes.....	06
I-2-2 jeux de barres .....	07
II- Problèmes survenus sur les réseaux de transport d'énergie électrique .....	07
II-1 les chutes de tension.....	07
III-Formulation du problème du Load Flow .....	07
III-1 Calcul du Load Flow (écoulement de charge).....	07
III-2 résolution par la méthode de Newton-Raphson.....	08
III-2-1 procédure de résolution.....	09
III-3 Application de la méthode de Newton pour le calcule de Load flow .....	09
III-3-1 Calcul des paramètres d'un réseau a quatre nœuds .....	10
a- Calcul des admittances .....	11
b- Calcul des transits actifs et pertes lignes <sup>12</sup>	
c- Calcul des puissances générées .....	13
d- Calcul des puissances réactives et les pertes dans les lignes.....	13
e- Calcul des puissances en fonction des inconnues.....	14
f- Calcul des dérivées des puissances des lignes.....	14
IV-Application sur réseau réel .....	18

Conclusion.....	19
-----------------	----

## **Chapitre II : moyens classiques de la compensation.**

Introduction .....	22
I – définition la puissance réactive .....	23
II- Chutes de tension et pertes par effet joule.....	23
II-1 Effet de la circulation par effet joule.....	23
II-1-1 Pertes joule.....	23
II-1-2 Chutes de tension .....	24
III- Principe de la compensation .....	25
IV- Moyens de la compensation réactive .....	27
IV-1 Les batteries de condensateurs.....	27
a. Batteries de condensateurs HT .....	27
b. Batteries de condensateurs MT .....	27
c. Avantage des batteries de condensateur.....	27
d. Inconvénients des batteries de condensateurs .....	27
IV-2 élévation de la tension de production .....	29
IV-3 Ajout d'une ligne on parallèle .....	30
IV-4 Les compensateurs synchrones.....	31
Conclusion.....	32

## **Chapitre III : solution moderne : le STATCOM**

Introduction .....	33
I-Généralité sur les dispositifs FACTS .....	34
I-1- Définition des FACTS.....	34
I-2- Types des FACTS .....	34
I-2-1- les compensateurs parallèles .....	34
I-2-2 les compensateurs séries.....	34
I-2-3 les compensateurs hybrides (série parallèle).....	35
I-3 Fonctionnement des FACTS .....	36
➤ Les grands réseaux de transport .....	36
➤ Les réseaux industriels .....	36
II-Modélisation STATCOM.....	36
II-1 Définition du STATCOM .....	36
II-2 Principe de fonctionnement du STATCOM .....	37
II-3 Modélisation du STATCOM.....	38
II-4- identification des références .....	44
II-5- découplage des composantes du courant du STATCOM .....	45

III-Régulation de la tension.....	48
III-1 Cas d'une compensation capacitive .....	51
III-2 Cas d'une compensation inductive .....	54
Conclusion.....	58
Conclusion générale .	

## Introduction générale

---

La découverte de l'énergie électrique a été l'un des plus grands exploits que l'homme ait jamais fait ; car l'électricité lui a apporté beaucoup de confort et de facilité dans sa vie quotidienne et professionnelle.

La croissance de la population et l'industrialisation sont deux facteurs déterminants pour la consommation de l'énergie électrique qui ne cesse de croître. Pour remédier à ce problème, il est nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, ligne de transport...etc. ce qui implique plus de dépenses et une dégradation du milieu naturelle.

L'industrie de l'énergie électrique est confrontée durant ces dernières années à des problèmes liés à la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique. Le transport se fait sur de longues distances en utilisant des lignes de grandes capacités. Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences dont, la difficulté de maintenir un profil de tension acceptable. C'est pour cela qu'il est nécessaire d'avoir des réseaux maillés fonctionnant près des limites thermiques afin de satisfaire les nouvelles exigences.

Les réseaux maillés sont soumis à des perturbations entre zones interconnectées et subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité, des chutes de tension et des pertes. Pour remédier à cela les FACTS (Flexible Alternative current transmission systèmes) semblent être une solution efficace par leurs temps de réponse très faibles (de l'ordre de quelques cycles réseaux).

Dans le présent travail, on s'intéressera au dispositif FACTS de type STATCOM (*STATic COMpensator*) pour améliorer le plan de tension d'une ligne électrique THT.

Le premier chapitre portera sur le problème de répartition des charges (LOAD FLOW) ainsi que les chutes de tension dans les réseaux de transport. Le deuxième chapitre sera consacré à l'exposition de quelques solutions classiques.

L'utilisation du STATCOM comme solution moderne ainsi que les simulations à l'aide de MATLAB\Simulink feront l'objet du troisième chapitre.

Le travail sera achevé par une étude comparative, une conclusion générale et quelques perspectives.

### **Introduction :**

A nos jours la vie humaine ne peut se passer de l'électricité, elle serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour cela, il a fallu inventer et construire des centrales électriques, capable de produire de l'électricité en grande quantité.

Les réseaux électriques sont apparus vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, pour assurer le transport et la distribution de l'énergie électrique, tout en respectant les trois normes principales à savoir la qualité de production, la sécurité de fonctionnement et l'économie.

La répartition des charges (Load Flow) est l'un des principaux problèmes qui se pose aux gestionnaires d'un système de production et transport d'énergie électrique. Dans tout ensemble de centrales électriques alimentant un ensemble de consommateur par l'intermédiaire d'un réseau de transport maillé, on doit déterminer la répartition des puissances fournies par ces centrales, à un instant donné, tout en respectant un ensemble de contrainte techniques et économiques.

La résolution du problème de répartition des charges, nous permet de déterminer les valeurs du Module et de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données .Ce qui nous permettra de calculer les puissances transitées et générées ainsi que les pertes engendrées.

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de fonctionnement, en régime permanent, d'un system de puissance en procédant comme suit :

- Formulation d'un model mathématique approprié et la spécification d'un certain nombre de variables et de contraintes relatives aux nœuds du système.
- La résolution numérique du système.

### I-Définition d'un réseau électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'appareillages permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs. Il est constitué de lignes électriques connectées aux postes électriques, qui permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs. (back et boost)

### I-1 Structures d'un réseau :

Les réseaux électriques peuvent être structurés de différentes manières selon les modes d'exploitations souhaités; on distingue :

#### a- Réseau radial ou en étoile :

Il représente le réseau sous sa forme la plus simple. Les lignes partent d'un point central, par exemple un poste local, et rayonnent depuis celui-ci. Si une perturbation se produit sur ce type de réseau, l'alimentation électrique de tous les clients rattachés à ce rayon défectueux est interrompue, jusqu'à ce que la panne soit réparée. Ce qui pourrait paralyser tout un quartier.

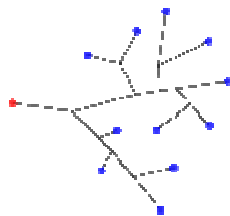


Figure I-1 : réseau radial ou en étoile.

#### b- Réseau en boucle :

L'assemblage en boucles des lignes permet de mettre hors circuit une partie de la ligne défectueuse grâce à ses points de séparation. L'alimentation électrique est interrompue uniquement dans cette partie jusqu'à la réparation de la panne ; le reste du réseau peut continuer à fonctionner.

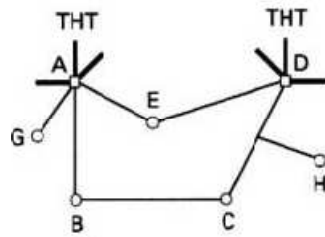


Figure I-2 : réseau en boucle.

### c- Réseau maillé ou interconnecté :

Lorsque des lignes en boucle sont regroupées pour relier des points très éloignés les uns des autres, elles forment un réseau maillé. Ce type de réseau offre une très grande fiabilité d'approvisionnement car chaque tronçon de ligne peut être alimenté via différentes voies. Même une défaillance sur plusieurs tronçons n'engendre pas une grave perturbation. Les réseaux maillés sont surtout construits et exploités là où la sécurité d'approvisionnement d'un grand nombre de clients peut être compromise par une perturbation, comme c'est particulièrement le cas pour les réseaux de transport et de distribution haute tension.

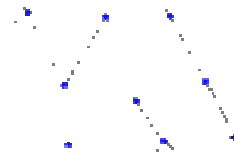


Figure I-3 : réseau maillé.

### I-1-2 Types de réseaux électriques :

Dans un système électrique il existe trois types de réseaux dont :

#### a- Réseau de transport :

Il est constitué des lignes et des postes de transformation issues des centrales, son rôle est de transporter l'énergie électrique des centrales de production vers les grands centres de consommation, ainsi que d'alimenter les grandes et les petites industries. Il sert aussi pour les interconnexions avec les pays voisins.

### **b- Réseau de répartition :**

Il s'agit des réseaux de niveau de tension inférieure à 220 KV (60KV pour les réseaux de SONALGAZ). Il comprend des lignes de transport et les postes de transformation intermédiaires entre le réseau de transport et celui de distribution, et il permet aussi de répartir la puissance avec les postes de distribution.

### **c- Réseau de distribution :**

Il est constitué des lignes et des postes de transformation qui servent à l'alimentation des clients domestiques, ainsi que la PME (moyenne et petite entreprise). Il comprend un réseau à moyenne tension et un réseau à basse tension.

### **I-1-3 Niveaux de tension des réseaux électriques :**

L'architecture d'un réseau de distribution électrique industriel est plus ou moins complexe selon le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise. Nous allons identifier les différents postes de livraison HTB et HTA, et la structure des réseaux HTA et BT.

La norme en vigueur en ALGERIE définit les niveaux de tension alternative comme suit :

- THT : pour une tension comprise entre 220 kV et 400 kV.
- HT : pour une tension de 60 KV.
- MT : pour une tension comprise entre 10 kV et 30 kV.
- BT : pour une tension inférieure 10kV.

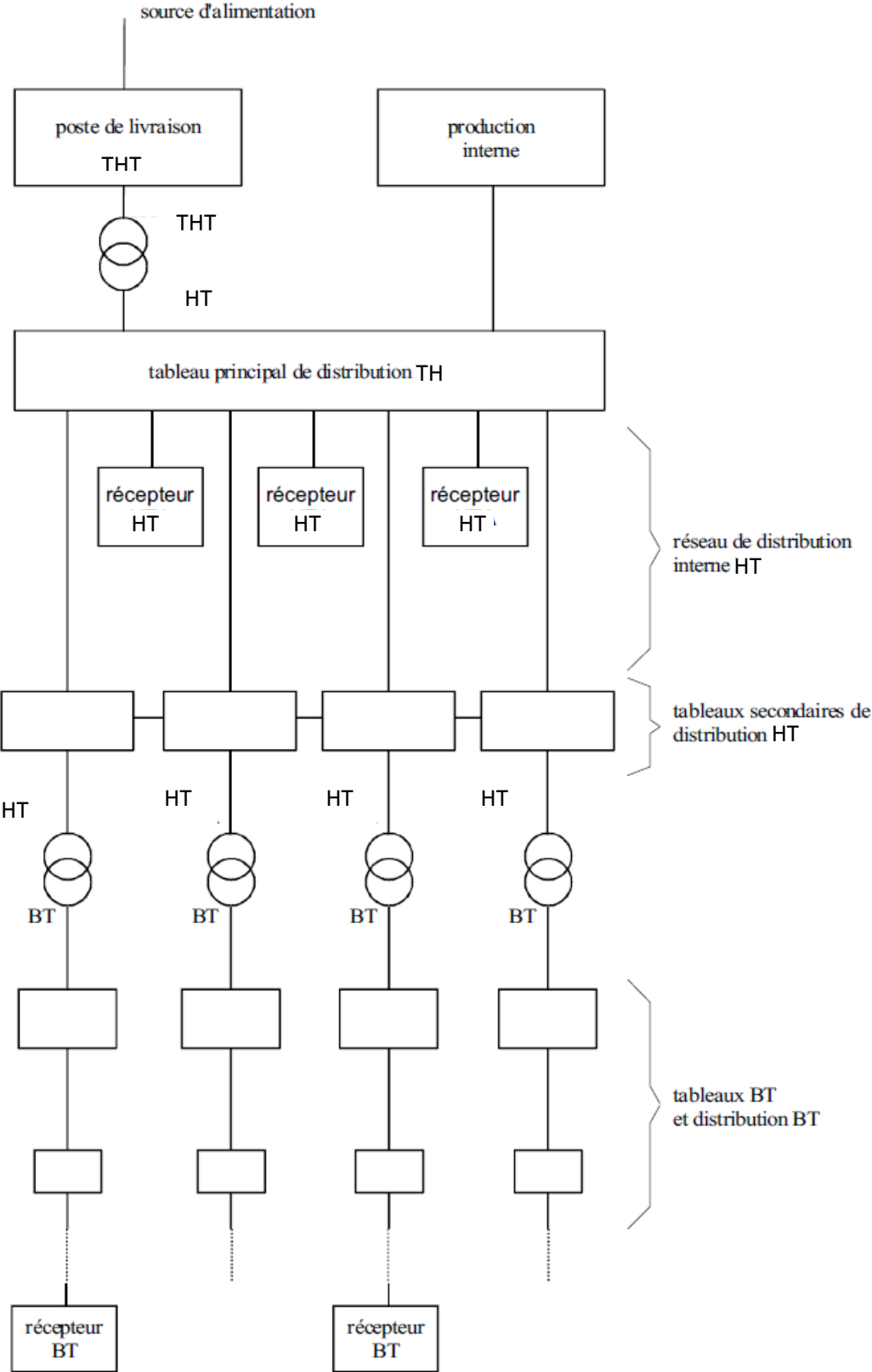


Figure I-4 : structure générale d'un réseau de distribution.

### I-2 Postes de transformation :

Ils servent à élever ou à baisser la tension à réguler au moyen de compensateurs synchrones, de réactances capacitatives ou inductives et de transformateurs à prises réglables. Pour la protection du réseau et du personnel il est prévu des fusibles, des disjoncteurs et de sectionneurs.

On distingue plusieurs types de postes selon les fonctions qu'ils assurent :

- ✓ Les postes d'alimentation régionaux;
- ✓ Les postes d'alimentation HT/MT ;
- ✓ Les postes d'interconnexions à 400kV et à 220kV assurant le regroupement des puissances appelées.
- ✓ Les postes de transformations comportant au moins deux jeux de barres à des tensions liées par 2 ou 3 transformateurs.

#### I-2-1 Architecture et schémas de postes :

Un poste moyenne tension MT a un principe de fonctionnement identique à un [poste haute tension THT](#) : des arrivées sont raccordées à un ou plusieurs jeux de barres qui distribuent l'énergie vers des départs. La tension est ensuite abaissée pour aller alimenter les installations en aval.

Le schéma en double jeu de barre est fréquemment utilisé dans les postes sources ou les postes d'aiguillage pour leur flexibilité en exploitation et en maintenance.

Les postes HT / BT sont en général à simple jeu de barres comme illustré ci-dessous.

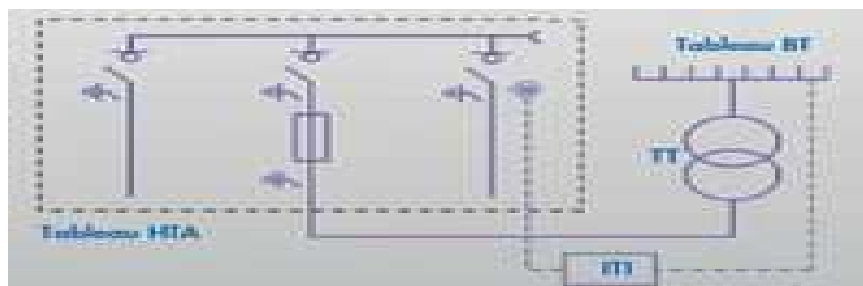


Figure I-5 : poste à simple jeu de barres.

### **I-2-2 jeux de barres :**

Les jeux de barres sont l'un des organes essentiels d'un poste, ce sont les points où se réalisent une concentration d'énergie et l'organisation des transits de puissances vers diverses lignes ou transformateurs raccordés.

Pour chaque niveau de tension le nombre de jeux de barres est généralement de deux.

### **II-Problèmes survenus sur les réseaux de transport d'énergie électrique :**

Parmi les différents problèmes qui surviennent dans les réseaux électriques on distingue :

#### **II-1 les chutes de tension :**

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

La chute de tension a des raisons géographiques (les sources de production de l'énergie électrique se trouvent très éloignées des zones de consommation). Le transport de l'énergie s'accompagne de chutes dues au transport de la puissance réactive.

Plus la demande de la puissance croît, plus la chute est importante, et le réseau devient incapable de satisfaire la demande.

### **III-Formulation du problème du Load Flow :**

Un réseau électrique est composé d'impédances et d'une série de charges à alimenter à partir des générateurs dont les capacités de production sont connues; la question qui se pose : comment calculer les différentes grandeurs électriques du réseau (puissances, tension, courants...etc) ?

#### **III-1 Calcul du Load Flow : (écoulement de charge) :**

L'objectif du calcul du Load Flow consiste à déterminer les valeurs des courants, des puissances actives et réactives (P et Q), des chutes de tension ( $\Delta V$ ) dans les lignes pour

chaque branche du réseau, ainsi que celles des tensions (V) aux nœuds d'un réseau électrique. Cette étude est exploitée pour la stabilité, le contrôle ainsi que pour le bon fonctionnement des systèmes de transmission d'énergie électrique.

Le calcul des puissances transitées exige la connaissance de deux grandeurs parmi les quatre grandeurs citées ci-dessous :

$P_{ij}$  : puissance active injecté au nœud i.

$Q_{ij}$  : puissance réactive injecté au nœud i.

$V_i$  : module de la tension au nœud i.

$\gamma_i$  : Phase de la tension au nœud i.

Les expressions des puissances actives et réactives sont données par les équations suivantes :

$$P_{ij} = \sum_{j=1}^n V_i V_j |Y_{ij}| \cos(\gamma - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I-1})$$

$$Q_{ij} = - \sum_{j=1}^n V_i V_j |Y_{ij}| \sin(\gamma - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I-2})$$

### III-2 résolution par la méthode de Newton-Raphson :

Les premières méthodes appliquées aux calculs d'écoulement de puissance sur la première génération des calculs numérique étaient les méthodes itératives de la matrice Y, mais celles-ci ne convergeaient pas sur quelques problèmes, et ces insuffisances ont mené au développement des méthodes de la matrice Z, qui ont eut une meilleure convergence, mais elle exige plus de stockage et fonctionnent en ralenti sur un grand nombre de système, un problème qu'on peut rencontrer aussi avec la méthode de Newton-Raphson, qui par contre possède un grand avantage qu'est la convergence quadratique(très rapide) après peu d'itérations.

D'où le choix de la méthode de Newton-Raphson pour déduire les différent paramètres de notre réseau.

### III-2-1 procédure de résolution :

Soit  $F(x) = 0$ , une équation non linéaire.

En faisant le développement en série de Taylor de  $F(x)$  autour de la solution initiale  $x^{(0)}$  on obtient :

$$F(x) = F(x^{(0)}) + (x - x^{(0)}) \frac{df(x)}{dx} + (x - x^{(0)})^2 \frac{1}{2!} \frac{df^2(x^{(0)})}{dx^2} + \dots \quad (I-3)$$

En négligeant les termes d'ordre supérieur, on aura :

$$f(x^{(0)}) + (x - x^{(0)})f'(x^{(0)}) = 0 \quad (I-4)$$

En développant en série de Taylor au voisinage de  $x^{(0)}$ , il résulte :

$$Y_1 = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \frac{df_1}{dx_1} + \Delta x_2^{(0)} \frac{df_1}{dx_2} + \Delta x_n^{(0)} \frac{df_1}{dx_n} + \text{termes d'ordre supérieurs} \quad (I-5)$$

De même pour  $y_2 \dots y_n$ .

Le système d'équation obtenu peut être écrit sous forme matricielle (matrice Jacobienne) :

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ y_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-6)$$

### III-3 Application de la méthode de Newton pour le calcul de Load flow :

Elle nous permet de résoudre un système d'équation non linéaire en exprimant les puissances actives et réactives en fonction des tensions nodales.

L'équation de la puissance complexe aux nœuds (k) est :

$$S = P + jQ = VI \quad (I-7)$$

### III-3-1 Calcul des paramètres d'un réseau a quatre nœuds :

Si le réseau admet n nœud P et V auront n composantes complexes et Y une matrice complète de dimension n\*n les éléments seront calculés à partir des caractéristiques des composantes du réseau.

Les inconnues de base sont  $V_2 \angle \delta_2$ ,  $V_3 \angle \delta_3$  et  $V_4 \angle \delta_4$ .

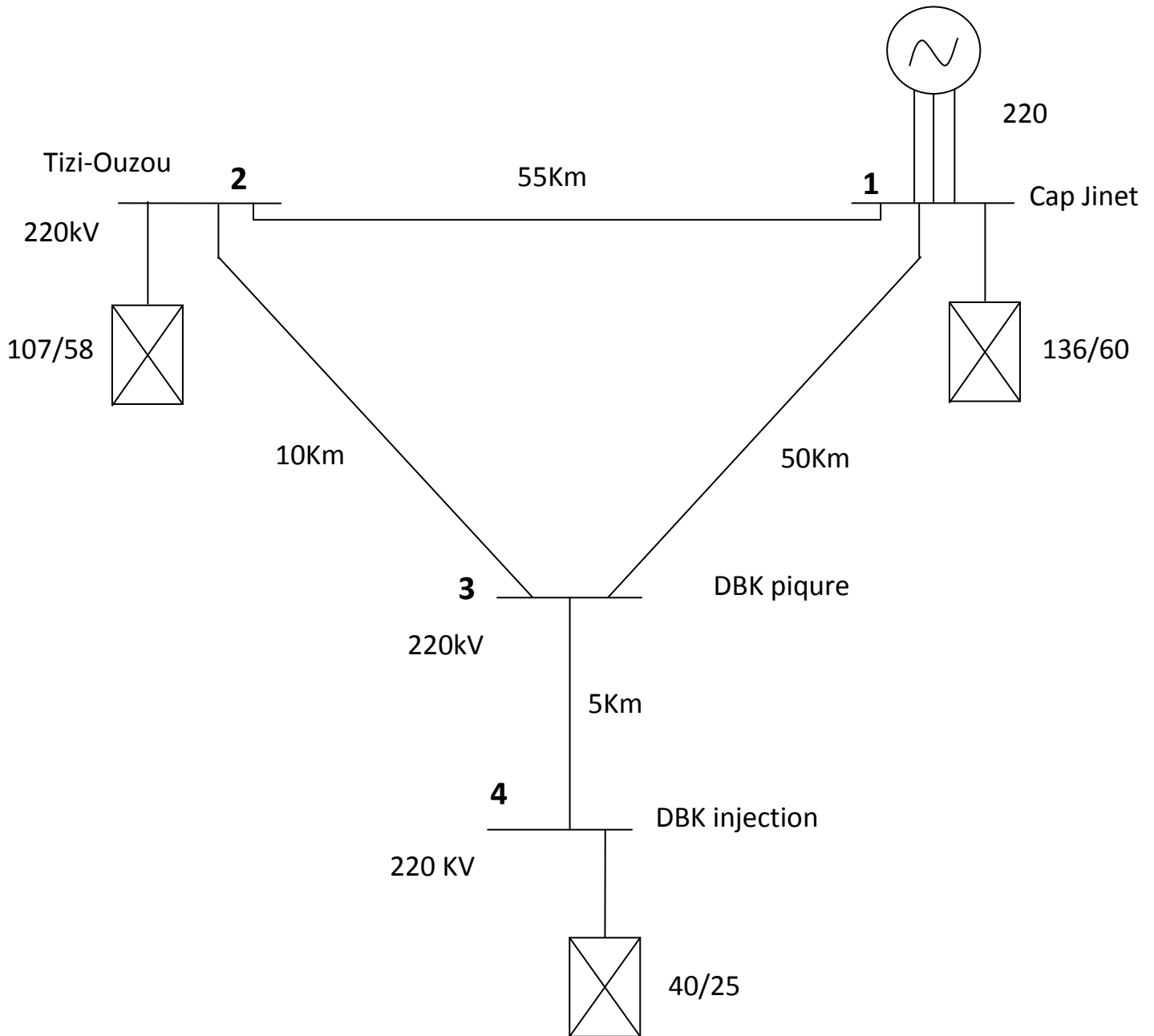


Figure I-6 : schémas synoptique d'un réseau réel à quatre nœuds.

**a- Calcul des admittances :**

Chaque ligne du réseau de transport électrique est caractérisée par une impédance qui s'écrit comme suit :

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij} \tag{I-8}$$

D'où on déduit les admittances :

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} \quad (\text{I-9})$$

La matrice des admittances s'écrit comme suite :

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & -y_{12} & -y_{13} & -y_{14} \\ -y_{21} & y_{22} & -y_{23} & -y_{24} \\ -y_{31} & -y_{32} & y_{33} & -y_{34} \\ -y_{41} & -y_{42} & -y_{43} & y_{44} \end{pmatrix} \quad (\text{I-10})$$

**b- Calcul des transits actifs et pertes lignes :**

$$P_{12} = [V_1^2 \cos(\gamma_{12}) + |Y_{12}|V_1V_2 \cos(\gamma_{12} + 0 - \delta_2)]|Y_{12}| \quad (\text{I-11})$$

$$P_{21} = [V_2^2 \cos(\gamma_{12}) + |Y_{12}|V_1V_2 \cos(\gamma_{12} + \delta_2 - 0)]|Y_{12}| \quad (\text{I-12})$$

$$perte_{12} = P_{12} + P_{21} \quad (\text{I-13})$$

$$P_{13} = [V_1^2 \cos(\gamma_{13}) + |Y_{13}|V_1V_3 \cos(\gamma_{13} + 0 - \delta_3)]|Y_{13}| \quad (\text{I-14})$$

$$P_{31} = [V_3^2 \cos(\gamma_{13}) + |Y_{13}|V_1V_3 \cos(\gamma_{13} + \delta_3 - 0)]|Y_{13}| \quad (\text{I-15})$$

$$perte_{13} = P_{13} + P_{31} \quad (\text{I-16})$$

$$P_{23} = [V_2^2 \cos(\gamma_{23}) + |Y_{23}|V_2V_3 \cos(\gamma_{23} + \delta_2 - \delta_3)]|Y_{23}| \quad (\text{I-17})$$

$$P_{32} = [V_3^2 \cos(\gamma_{23}) + |Y_{23}|V_2V_3 \cos(\gamma_{13} - \delta_2 + \delta_3)]|Y_{23}| \quad (\text{I-18})$$

$$perte_{23} = P_{23} + P_{32} \quad (\text{I-19})$$

$$P_{34} = [V_3^2 \cos(\gamma_{34}) + |Y_{34}|V_3V_4 \cos(\gamma_{34} + \delta_3 - \delta_4)] |Y_{34}| \quad (\text{I-20})$$

$$P_{43} = [V_4^2 \cos(\gamma_{34}) + |Y_{34}|V_3V_4 \cos(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4)] |Y_{34}| \quad (\text{I-21})$$

$$p_{erte_{34}} = P_{34} + P_{43} \quad (\text{I-22})$$

$$P_{14} = P_{41} = P_{24} = P_{42} = 0 \quad (\text{I-23})$$

$$pertes = Perte_{12} + Perte_{23} + p_{erte_{34}} \quad (\text{I-24})$$

**c- Calcul des puissances générées :**

$$P_{générée} = V_1^2 |Y_{11}| \cos(\gamma_{11}) + V_2V_1 |Y_{12}| \cos(\gamma_{12} + \delta_2) + V_1V_3 |Y_{13}| \cos(\gamma_{13} + \gamma_3) + p_{consommée} \quad (\text{I-25})$$

$$Q_{générée} = V_1^2 |Y_{11}| \sin(\gamma_{11}) + V_2V_1 |Y_{12}| \sin(\gamma_{12} + \delta_2) + V_1V_3 |Y_{13}| \sin(\gamma_{13} + \gamma_3) + Q_{consommée} \quad (\text{I-26})$$

$\delta_i$ : c'est l'angle des  $V_i$

$\theta_{ij}$ : c'est l'angle des  $Z_{ij}$

$\gamma_{ij}$ : c'est l'angle des  $Y_{ij}$

**d- Calcul des puissances réactives et les pertes dans les lignes :**

$$Q_{12} = [V_1^2 \sin(\gamma_{12}) + |Y_{12}|V_1V_2 \sin(\gamma_{12} + 0 - \delta_2)] |Y_{12}| \quad (\text{I-27})$$

$$Q_{21} = [V_2^2 \sin(\gamma_{12}) + |Y_{12}|V_1V_2 \sin(\gamma_{12} + \delta_2 - 0)] |Y_{12}| \quad (\text{I-28})$$

$$Q_{perte_{12}} = P_{12} + P_{21} \quad (\text{I-29})$$

$$Q_{13} = [V_1^2 \sin(\gamma_{13}) + |Y_{13}|V_1V_3 \sin(\gamma_{13} + 0 - \delta_3)]|Y_{13}| \quad (\text{I-30})$$

$$Q_{31} = [V_3^2 \sin(\gamma_{13}) + |Y_{13}|V_1V_3 \sin(\gamma_{13} + \delta_3 - 0)]|Y_{13}| \quad (\text{I-31})$$

$$Q_{perte_{13}} = P_{13} + P_{31} \quad (\text{I-32})$$

$$Q_{23} = [V_2^2 \sin(\gamma_{23}) + |Y_{23}|V_2V_3 \sin(\gamma_{23} + \delta_2 - \delta_3)]|Y_{23}| \quad (\text{I-33})$$

$$Q_{32} = [V_3^2 \sin(\gamma_{23}) + |Y_{23}|V_2V_3 \sin(\gamma_{13} - \delta_2 + \delta_3)]|Y_{23}| \quad (\text{I-34})$$

$$Q_{perte_{23}} = P_{23} + P_{32} \quad (\text{I-35})$$

$$Q_{34} = [V_3^2 \sin(\gamma_{34}) + |Y_{34}|V_3V_4 \sin(\gamma_{34} + \delta_3 - \delta_4)]|Y_{34}| \quad (\text{I-36})$$

$$Q_{43} = [V_4^2 \sin(\gamma_{34}) + |Y_{34}|V_3V_4 \sin(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4)]|Y_{34}| \quad (\text{I-37})$$

$$Q_{perte_{34}} = P_{34} + P_{43} \quad (\text{I-38})$$

$$Q_{14} = Q_{41} = Q_{24} = Q_{42} \quad (\text{I-39})$$

$$Q_{pertes} = Q_{Perte_{12}} + Q_{Perte_{23}} + Q_{perte_{34}} \quad (\text{I-40})$$

**e- Calcul des puissances en fonction des inconnues :**

$$P_2 = V_2V_1|Y_{12}| \cos(\gamma_{12} - \delta_2) + V_2^2 |Y_{22}| \cos(\gamma_{22}) + V_2V_3|Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-41})$$

$$P_3 = V_3 V_1 |Y_{13}| \cos(\gamma_{13} - \delta_3) + V_3 V_2 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) + V_3^2 |Y_{33}| \cos(\gamma_{33}) + V_3 V_4 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \quad (\text{I-42})$$

$$P_4 = V_4 V_1 |Y_{14}| \cos(\gamma_{14} - \delta_4) + V_4 V_2 |Y_{24}| \cos(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) + V_4 V_3 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_4 - \delta_3) + V_4^2 |Y_{44}| \cos(\gamma_{44}) \quad (\text{I-43})$$

$$Q_2 = V_2 V_1 |Y_{12}| \sin(\gamma_{12} - \delta_2) + V_2^2 |Y_{22}| \sin(\gamma_{22}) + V_2 V_3 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-44})$$

$$Q_3 = V_3 V_1 |Y_{13}| \sin(\gamma_{13} - \delta_3) + V_3 V_2 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) + V_3^2 |Y_{33}| \sin(\gamma_{33}) + V_3 V_4 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \quad (\text{I-45})$$

$$Q_4 = V_4 V_1 |Y_{14}| \sin(\gamma_{14} - \delta_4) + V_4 V_2 |Y_{24}| \sin(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) + V_4 V_3 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_4 - \delta_3) + V_4^2 |Y_{44}| \sin(\gamma_{44}) \quad (\text{I-46})$$

**f- Calcul des dérivées des puissances des lignes :**

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = V_2 V_1 |Y_{12}| \sin(\gamma_{12} - \delta_2) + V_2 V_3 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-47})$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -V_2 V_3 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-48})$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} = 0 \quad (\text{I-49})$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_2} = V_1 |Y_{12}| \cos(\gamma_{12} - \delta_2) + 2V_2 |Y_{22}| \cos(\gamma_{22}) + V_3 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-50})$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3} = V_2 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-51})$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_4} = 0 \quad (\text{I-52})$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -V_3 V_2 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) \quad (\text{I-53})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = & \\ & V_3 V_1 |Y_{13}| \sin(\gamma_{13} - \delta_3) + V_3 V_2 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) + V_3 V_4 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \\ & \delta_3 + \delta_4) \end{aligned} \quad (\text{I-54})$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} = -V_3 V_4 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \quad (\text{I-55})$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2} = V_3 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) \quad (\text{I-56})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_3}{\partial V_3} = & \\ & V_1 |Y_{13}| \cos(\gamma_{13} - \delta_3) + V_2 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) + 2V_3 |Y_{33}| \cos(\gamma_{33}) + \\ & V_4 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \end{aligned} \quad (\text{I-57})$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_4} = V_3 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \quad (\text{I-58})$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} = -V_4 V_2 |Y_{24}| \sin(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) \quad (\text{I-59})$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} = V_4 V_3 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_4 + \delta_3) \quad (\text{I-60})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} = & \\ & V_4 V_1 |Y_{14}| \sin(\gamma_{14} - \delta_4) + V_4 V_2 |Y_{24}| \sin(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) + V_4 V_3 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \\ & \delta_4 + \delta_3) \end{aligned} \quad (\text{I-61})$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial V_2} = V_4 |Y_{24}| \cos(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) \quad (\text{I-62})$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial V_3} = V_4 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_4 + \delta_3) \quad (\text{I-63})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_4}{\partial V_4} = & V_1 |Y_{14}| \cos(\gamma_{14} - \delta_4) + V_2 |Y_{24}| \cos(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) + V_3 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \\ & \delta_4 + \delta_3) + 2V_4 |Y_{44}| \cos(\gamma_{44}) \end{aligned} \quad (\text{I-64})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = V_2 V_1 |Y_{12}| \cos(\gamma_{12} - \delta_2) + V_2 V_3 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-65})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -V_2 V_3 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-66})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} = 0 \quad (\text{I-67})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_2} = -(V_1 |Y_{12}| \sin(\gamma_{12} - \delta_2) + 2V_2 |Y_{22}| \sin(\gamma_{22}) + V_3 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3)) \quad (\text{I-68})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_3} = -V_2 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_2 + \delta_3) \quad (\text{I-69})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_4} = 0 \quad (\text{I-70})$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} = -V_3 V_2 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) \quad (\text{I-71})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} = & \\ & V_3 V_1 |Y_{13}| \cos(\gamma_{13} - \delta_3) + V_3 V_2 |Y_{23}| \cos(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) + \\ & V_3 V_4 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \end{aligned} \quad (\text{I-72})$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} = -V_3 V_4 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \quad (\text{I-73})$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_2} = -V_3 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) \quad (\text{I-74})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = & \\ & -(V_1 |Y_{13}| \sin(\gamma_{13} - \delta_3) + V_2 |Y_{23}| \sin(\gamma_{23} - \delta_3 + \delta_2) + 2V_3 |Y_{33}| \sin(\gamma_{33}) + \\ & V_4 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4)) \end{aligned} \quad (\text{I-75})$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_4} = -V_3 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_3 + \delta_4) \quad (\text{I-76})$$

$$\frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} = -V_4 V_2 |Y_{24}| \cos(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) \quad (\text{I-77})$$

$$\frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} = -V_4 V_3 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \delta_4 + \delta_3) \quad (\text{I-78})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} = & \\ & V_4 V_1 |Y_{14}| \cos(\gamma_{14} - \delta_4) + V_4 V_2 |Y_{24}| \cos(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) + V_4 V_3 |Y_{34}| \cos(\gamma_{34} - \\ & \delta_4 + \delta_3) \end{aligned} \quad (\text{I-79})$$

$$\frac{\partial Q_4}{\partial V_2} = -V_4 |Y_{24}| \sin(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) \quad (\text{I-80})$$

$$\frac{\partial Q_4}{\partial V_3} = -V_4 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_4 + \delta_3) \quad (\text{I-81})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} = & \\ & -(V_1 |Y_{14}| \sin(\gamma_{14} - \delta_4) + V_2 |Y_{24}| \sin(\gamma_{24} - \delta_4 + \delta_2) + V_3 |Y_{34}| \sin(\gamma_{34} - \delta_4 + \\ & \delta_3) + 2V_4 |Y_{44}| \sin(\gamma_{44})) \end{aligned} \quad (\text{I-82})$$

Le système à résoudre est le suivant (méthode de NEWTON RAPHSON):

$$X_i = X_{i-1} + J^{-1}(X)F(X)$$

Avec :  $F(X) = X^* - g(X)$  ; (la précision (mismatch))

On commence par  $X_0$  (vecteur des valeurs initiales des tensions et leurs arguments)

$$X_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Alors la jacobienne s'écrit comme suite :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_4} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_4} \\ \frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial P_4}{\partial V_2} & \frac{\partial P_4}{\partial V_3} & \frac{\partial P_4}{\partial V_4} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_4} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_4} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial \delta_4} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_4}{\partial V_4} \end{pmatrix}^{-1}$$

### IV- Application sur un réseau réel :

Après avoir élaboré un scripte Matlab pour le calcul du Load Flow ci-dessous, les données lignes du réseau :

$$Z_{12} = 0.007 + j0.0328$$

$$Z_{23} = 0.0013 + j0.006$$

$$Z_{13} = 0.0064 + j0.0299$$

$$Z_{34} = 0.0006 + j0.0030$$

$$S_{baze} = 100 \text{ MVA}$$

$$U_{baze} = 220 \text{ KV}$$

$$Z_{baze} = 484 \Omega$$

$I = 0.6 \text{ kA}$  : Courant nominal supporté par une ligne.

Les limites de tension standard qu'il ne faut pas franchir  $\pm 10\%$  de la valeur nominale  
( $220 * 10$ ) = 22kV

$$V_{\max} = 220 + 22 = 242 \text{ kV}$$

$$V_{\min} = 220 - 22 = 198 \text{ kV}$$

Puissances actives et réactives consommées des nœuds :

$$P_{1c} = 136 \text{ MW} = 1.36 ; Q_{1c} = 60 \text{ MVAR} = 0.6$$

$$P_{2c} = 107 \text{ MW} = 1.07 ; Q_{2c} = 58 \text{ MVAR} = 0.58$$

$$P_{3c} = 0 \text{ MW} ; Q_{3c} = 0 \text{ MVAR}$$

$$P_{4c} = 140 \text{ MW} = 1.4 ; Q_{4c} = 75 \text{ MVAR} = 0.75$$

On a obtenues les résultats suivants :

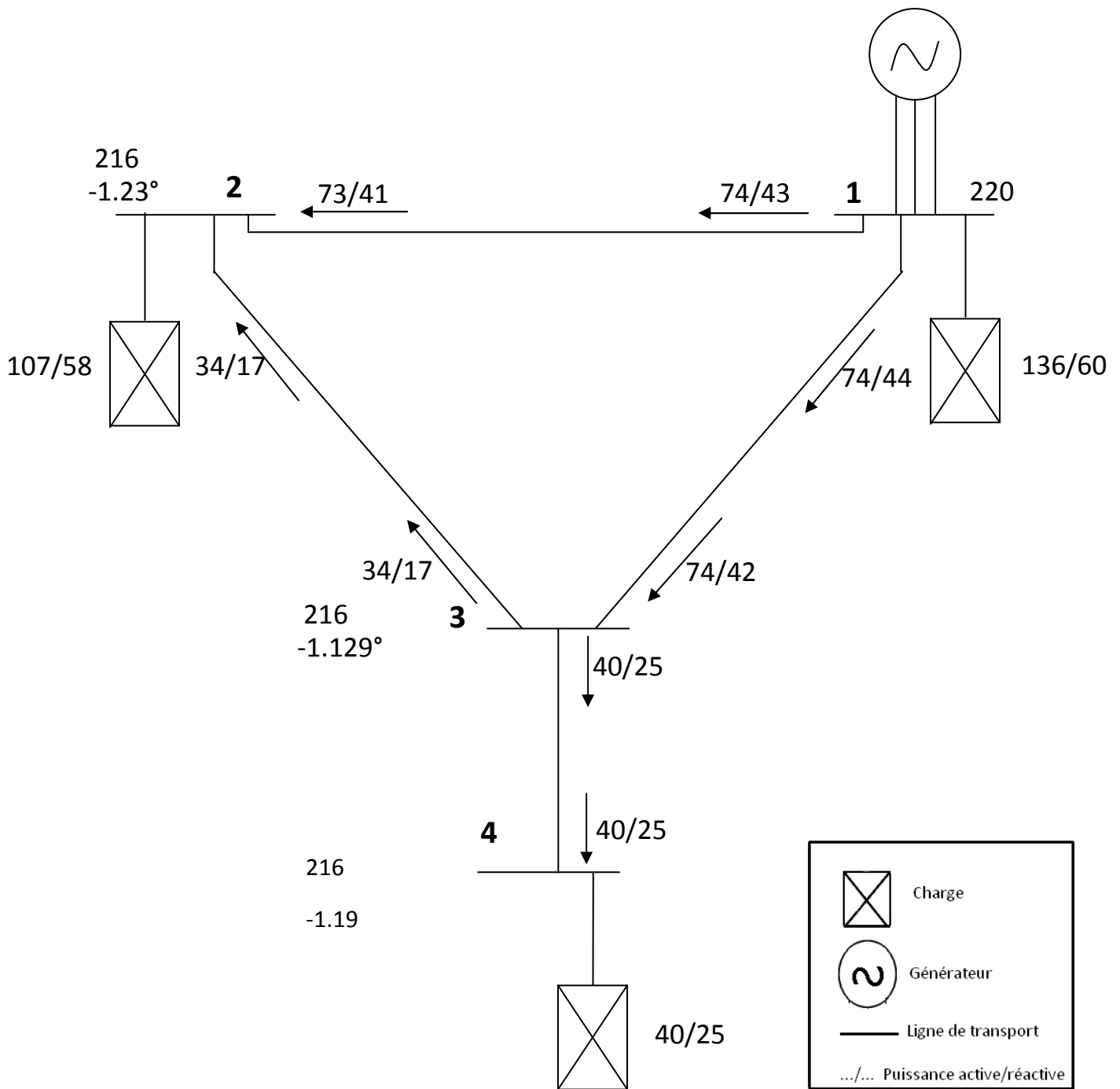


Figure I-7 : transit de puissance sans la charge.

Après simulation on remarque qu'il a eu des chutes de tension. Ces chutes peuvent être plus importante dans le cas ou en envisagerait l'ajout d'une zone industrielle de (100MW/50MVAR) dans les années à venir comme le montre les résultats suivants :

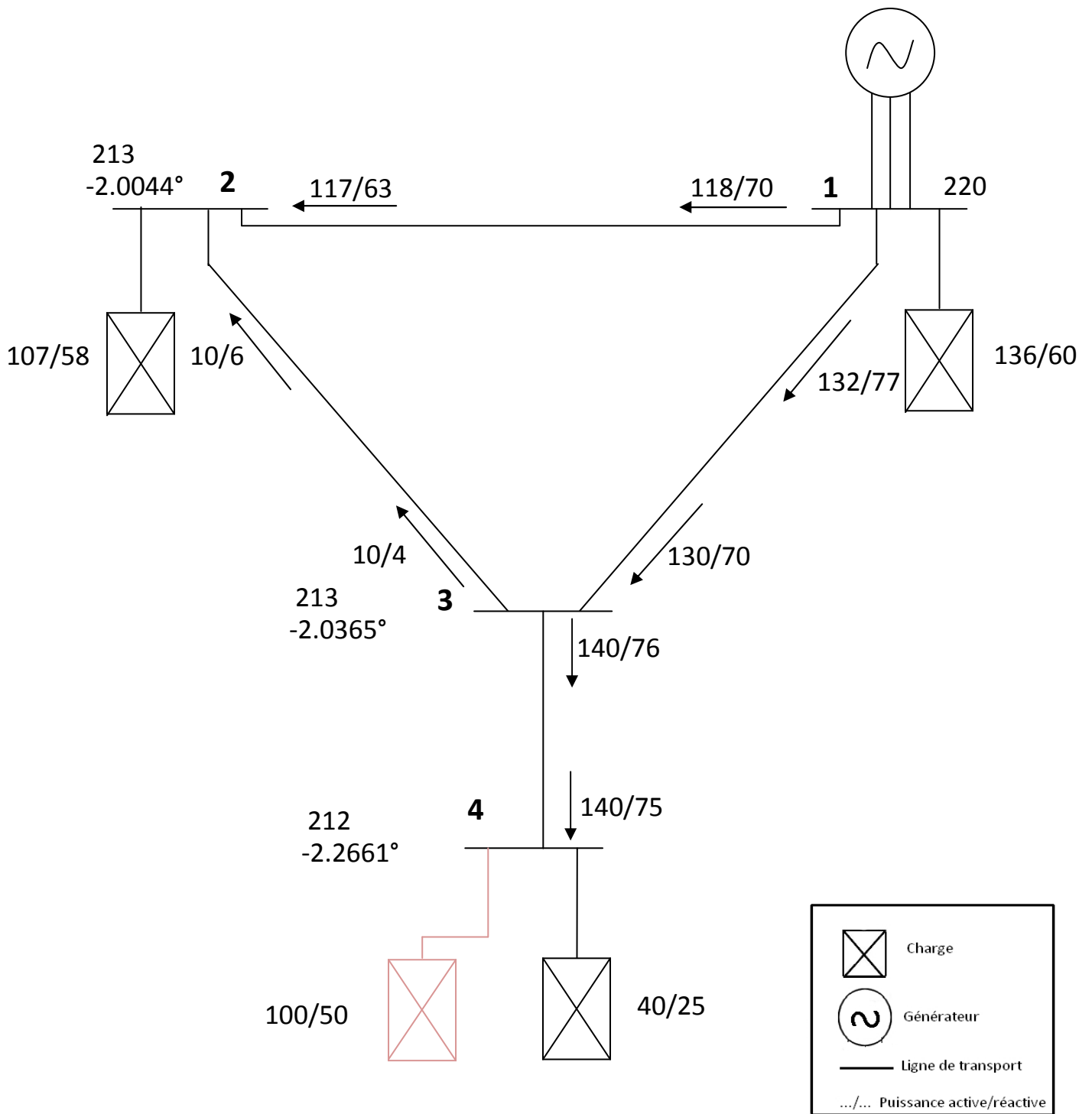


Figure I-8 : transit de puissance avec la charge.

### **Conclusion :**

Le chapitre a mis le point sur le problème des chutes de tension qui accompagne les transits de puissance dans un réseau de transport d'électricité d'une part et la façon de les localiser numériquement (algorithme de Newton Raphson).

**Introduction :**

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels-que d'importantes chutes de tension, pertes ligne considérables (par effet joule) par conséquent, une capacité moindre de transport de la puissance active.

Pour remédier à ce problème, plusieurs moyens sont utilisés (moyens classiques et modernes). Dans ce qui suit, on présentera les différents moyens classiques utilisés pour compenser la puissance réactive (c'est-à-dire la générer là où elle est consommée) et éliminer ainsi la chute de tension.

**I – définition la puissance réactive :**

En régime sinusoïdal, la puissance réactive (noté  $Q$ ) est la puissance échangée entre la source d'énergie et le récepteur d'une façon continue. C'est une puissance sans énergie accompagnant la puissance active et élevant par là les courants de ligne et les pertes. Néanmoins, elle est nécessaire au fonctionnement des appareils électriques tels que les transformateurs et les machines tournantes...etc.

**II- Chutes de tension et pertes par effet joule :****II-1 Effet de la circulation de la puissance réactive:**

Le transit de puissance réactive entre la source (générateur) et les récepteurs (charge) à travers les réseaux de transport de l'énergie électrique peut se manifester sous forme de pertes par effet joule et chutes de tension, alors il faut tenir compte de ce phénomène pour pouvoir améliorer le rendement (diminuer voire éliminer les chutes de tension).

**II-1-1 Pertes joule :**

L'étude du schéma de l'exemple ci-dessous permet de déterminer les pertes joule ( $p_j$ ) engendrée par le transit de puissance réactive  $Q$ .

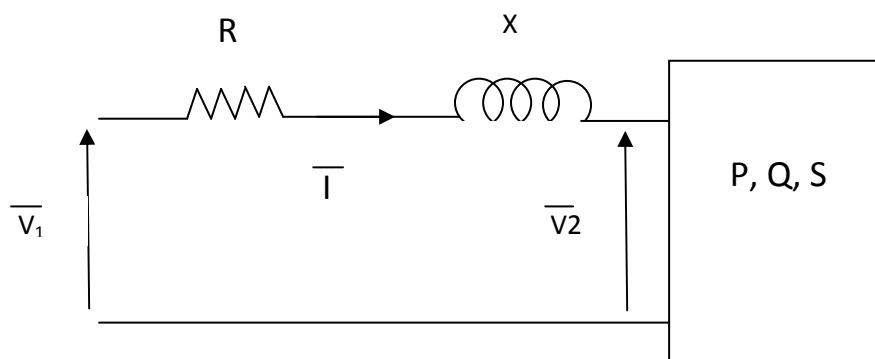


Figure II-1 : étude d'un circuit RL.

Le réseau est représenté par une résistance R en série avec une inductance X. l'ensemble fournit une puissance active P et échange une puissance réactive Q avec le récepteur.

La valeur efficace du courant I qui traverse le réseau :

$$I = \frac{S}{V_2} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V_2}$$

Avec :

$V_2$ : Valeur efficace de la tension aux bornes du récepteur.

S : Puissance apparente consommée par le récepteur.

L'expression des pertes par effet joule engendrées par le transport de puissance à travers la résistance est :

$$P_j = RI^2 = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{V_2^2}$$

$$P_j = \frac{RP^2}{V_2^2} + \frac{RP^2 \cdot tg^2\varphi}{V_2^2}$$

Une partie des pertes joule  $\frac{RP^2 \cdot tg^2\varphi}{V_2^2}$  est occasionnée par le transit de puissance Q.

Pour un réseau triphasé l'expression est:

$$P_j = 3 \cdot R \cdot I^2$$

La valeur efficace du courant est égal:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_2}$$

Alors :

$$P_j = 3 \cdot R \left( \frac{S}{\sqrt{3}U_2} \right)^2 = \frac{3 \cdot R \cdot (P^2 + Q^2)}{3U_2^2} = \frac{R \cdot P^2 \cdot (1 + tg^2\varphi)}{3U_2^2}$$

$$P_j = \frac{R \cdot P^2}{U_2^2} + \frac{R \cdot P^2 \cdot tg^2\varphi}{U_2^2}$$

Le terme  $\frac{R \cdot P^2 \cdot tg^2\varphi}{U_2^2}$  représente la partie des pertes joule causées par le transit de puissance réactive. D'où la nécessité de réduire au mieux le transport de cette puissance indispensable pour le fonctionnement des récepteurs (machines...etc).

**II-1-2 Chutes de tension :**

Soit la figure suivante représentant le schéma simplifié d'une ligne de transmission, d'impédance complexe  $Z=R+jX$ , destinée à alimenter la charge  $Z_c$ .

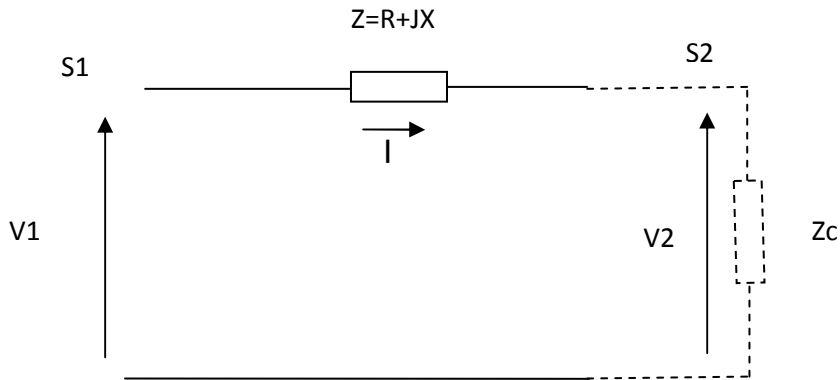


Figure II-2 : ligne d'un réseau électrique.

Les puissances apparentes :

$$S_1 = P_1 + jQ_1$$

$$S_2 = P_2 + jQ_2$$

La relation qui relie les tensions donnée par :

$$V_1 = V_2 + R \cdot I + jX \cdot I$$

Le diagramme vectoriel (de Fresnel) des tensions est représenté comme suit :

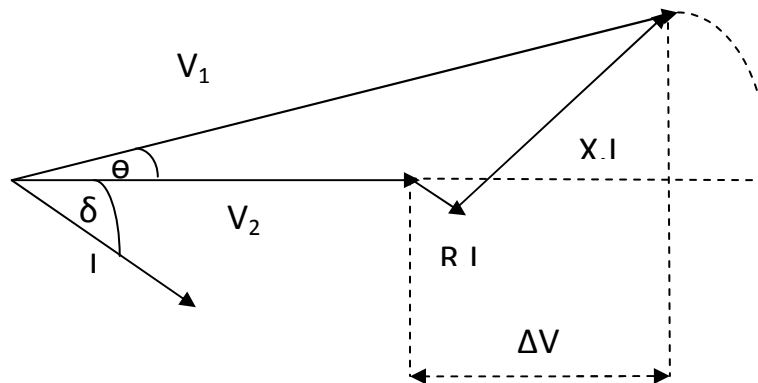


Figure II-3 : diagramme vectoriel.

( $\delta$ ) Désigne le déphasage du courant par rapport à la tension de la charge, on peut écrire pour un réseau monophasé :

$$\Delta V = R \cdot I \cos \delta + X \cdot I \sin \delta$$

$$\Delta V = R \cdot I \cdot \frac{V_2}{V_2} \cos \delta + X \cdot I \cdot \frac{V_2}{V_2} \sin \delta$$

$$\Delta V = \frac{R \cdot P_2 + X \cdot Q_2}{V_2}$$

Pour un réseau triphasé on notera U la tension composée correspondant à V, P et Q les transit triphasé :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R \cdot P + XQ}{U^2}$$

Pour les lignes THT et HT, nous pouvant négliger R ( $R \ll X$ ) l'écart de tension entre les deux point :

$$\Delta U = \frac{X \cdot Q}{U}$$

Cette relation montre que c'est le transit de puissance réactive Q qui est à l'origine des chutes de tension (Q augmente  $\rightarrow$   $\Delta U$  augmente). Ce qui a des répercussions néfaste sur le courant admissible traversant le réseau car il est limité par l'échauffement thermiques, et sur le transport de la puissance active.

### III- Principe de la compensation :

Le but de la compensation de l'énergie réactive est d'élevé le facteur de puissance pour réduire les pertes dans le réseau électrique.

La figure ci-dessous traduit la représentation vectorielle de la compensation.

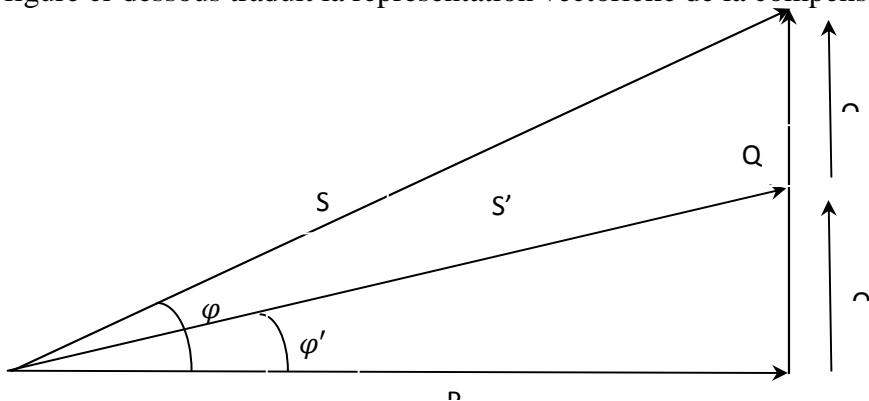


Figure II-4 : représentation vectorielle de la compensation.

Avant compensation :

Puissance active P (kW).

Puissance réactive Q (Kvar).

Puissance apparente S ( kVA).

Facteur de puissance  $\cos \varphi$

Après compensation avec une puissance de compensation de  $Q_c$  :

Puissance active P (kW).

Puissance réactive  $Q'$  (Kvar).

Facteur de puissance  $\cos \varphi'$

Puissance apparente  $S'$  ( kVA)

#### **IV- Moyens de la compensation réactive :**

La compensation peut se faire en basse tension ou en haute tension en utilisant :

##### **IV-1 Les batteries de condensateurs :**

La batterie de condensateurs est le moyen le plus économique et le plus simple de production de puissance réactive, ils ont pour rôle de fournir une partie de la puissance réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

###### **a. Batteries de condensateurs HT :**

Elles sont raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT, mais une partie d'entre elles participe également à la compensation des charges.

###### **b. Des batteries de condensateurs MT :**

Elles sont raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT, ces batteries servent à compenser l'appel global de la puissance réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.

**c. Avantage des batteries de condensateur:**

Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt.

- Absence d'usures mécaniques.
- Entretien réduit.
- Pertes faible.
- Elles occupent un faible volume.
- Elles sont faciles à installer.

**d. Inconvénients des batteries de condensateurs :**

- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges ce qui peut provoquer leur usure.
- Les condensateurs n'ont pas la rapidité de réponse nécessaire pour répondre aux phénomènes transitoires.
- La puissance fournie par le condensateur ne se fait qu'en pas discret.

**Exemple de simulation :**

En ajoutant un condensateur dans le nœud 4 on obtient les résultats suivants :

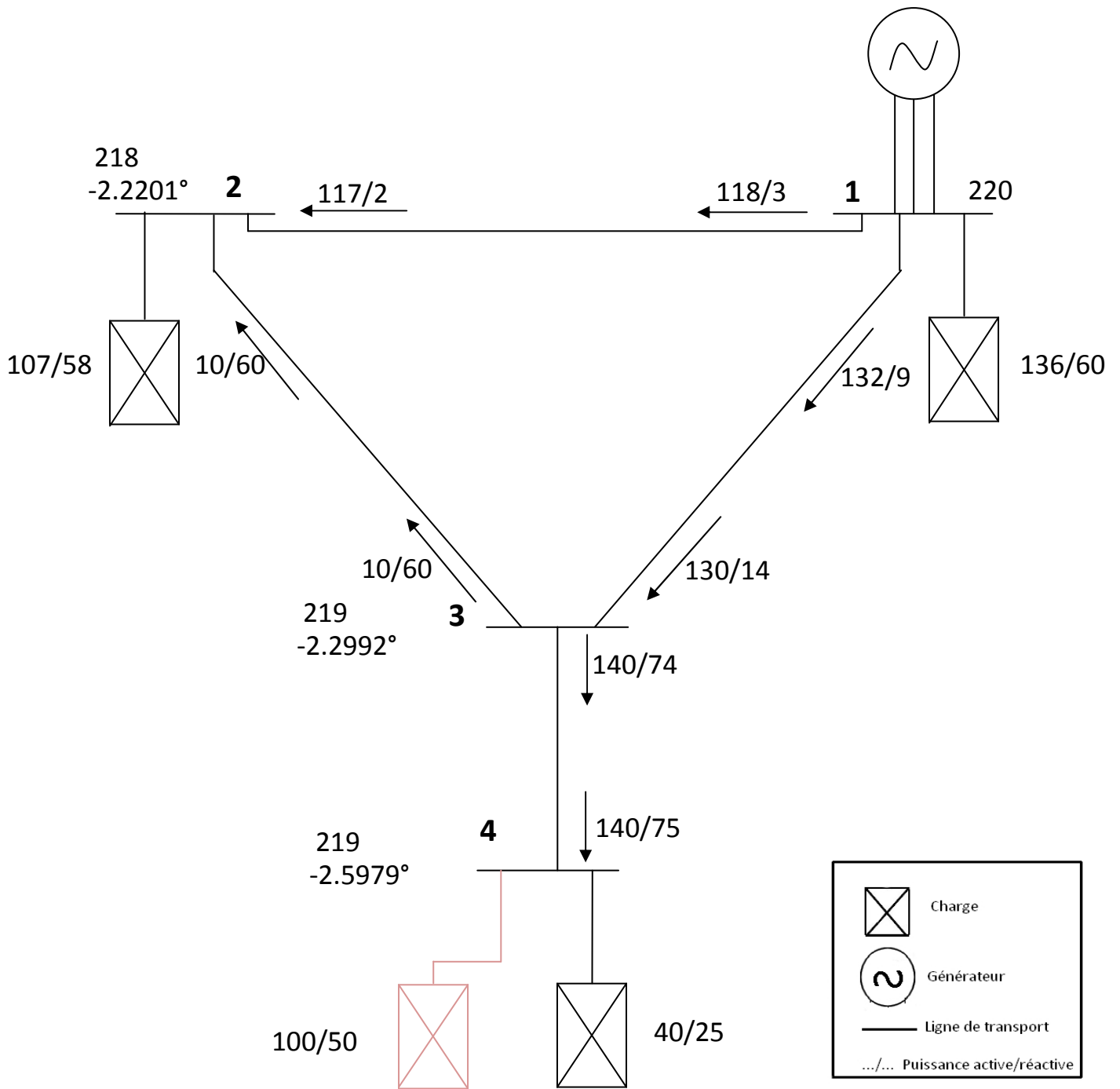


Figure II-5 Exemple de simulation après installation d'un condensateur.

**IV-2 élévation de la tension de production :**

Après avoir étudié les résultats de la simulation de la figure ci-dessous des chutes de tension on été constatées. Pour y remédier, la tension produite par le générateur a été augmentée de telle sorte à obtenir la tension désirée à la sortie (consommateurs).

**Exemple de simulation :**

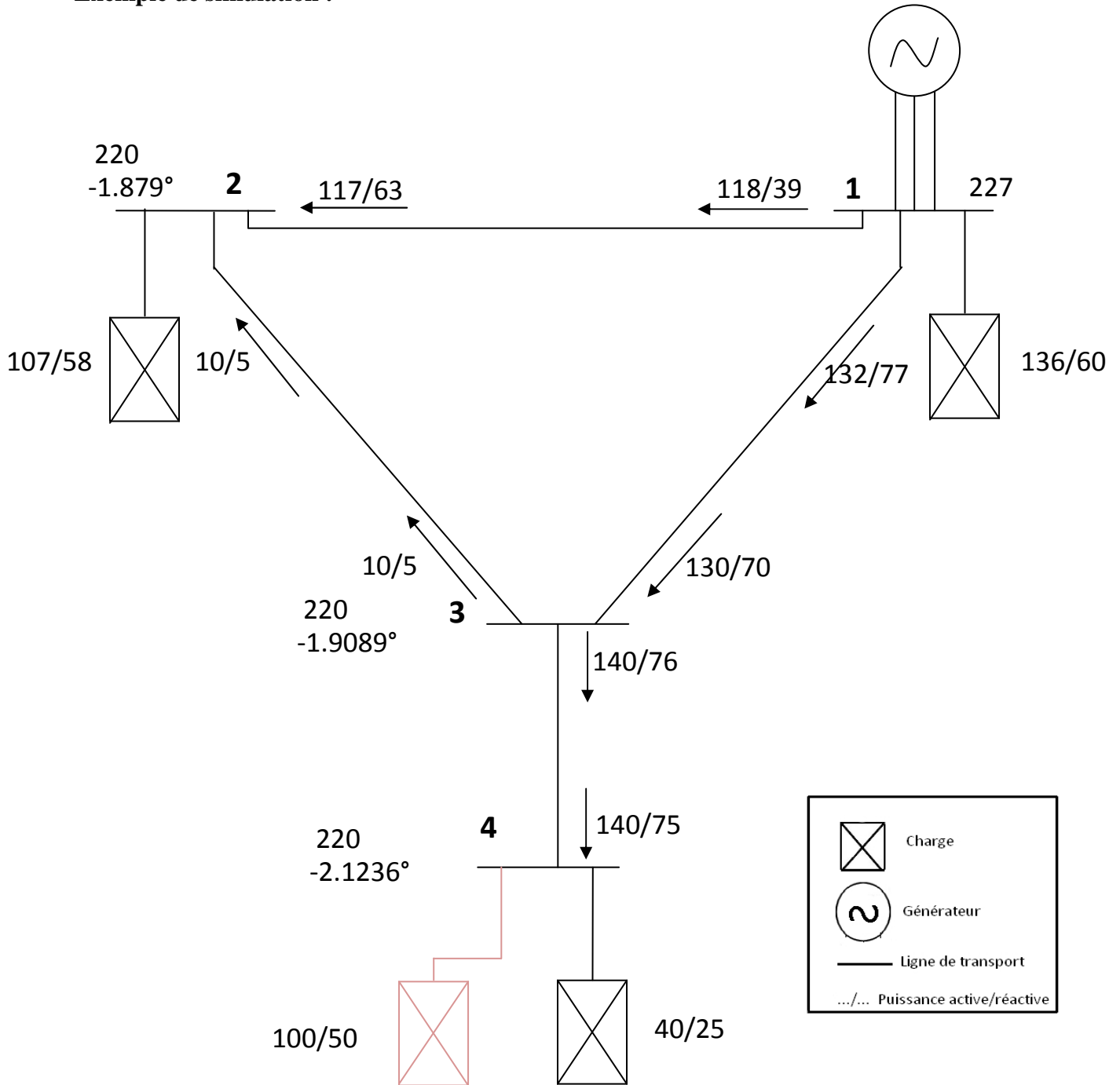


Figure II-6 Exemple de simulation par élévation de la tension de source.

**IV-3 Ajout d'une ligne en parallèle :**

Après avoir ajouté une ligne en parallèle, la charge est répartie entre les deux lignes ce qui engendre la diminution des pertes ainsi que les chutes de tension.

**Exemple de simulation :**

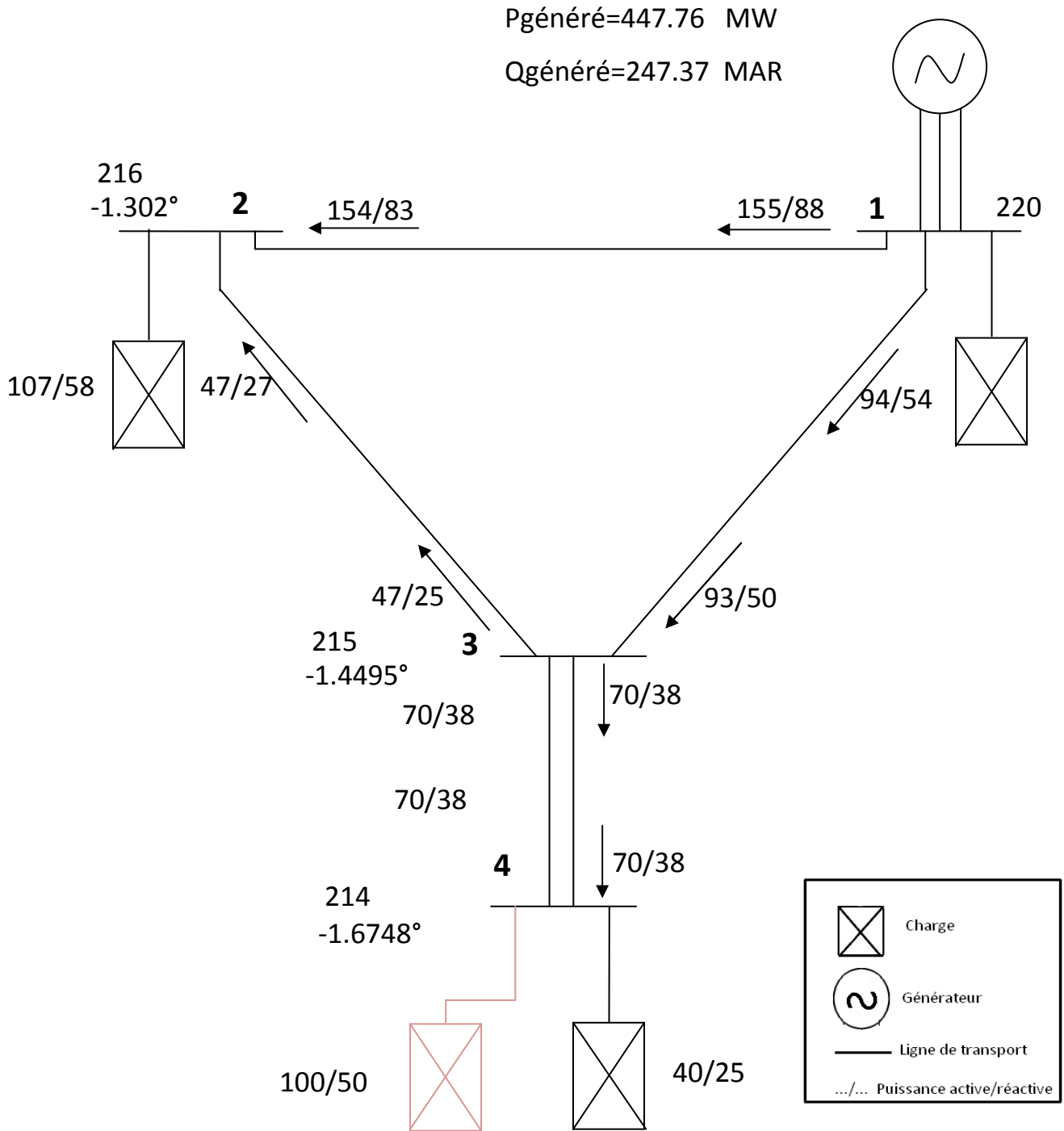


Figure II-7 Exemple de simulation après insertion d'une ligne en parallèle.

**IV-4 Les compensateurs synchrones :**

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent fournir ou absorber de la puissance réactive selon qu'elles soient sous ou surexcitées.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les moyens classiques utilisés pour la compensation de la puissance réactive. Ces moyens demeurent efficaces mais la lenteur de leur repense et leurs coûts élevés en font des moyens classiques (leur installation fait l'objet d'études de planification réseau à long terme). Dans les situations temporaires, il est préférable d'utiliser les moyens modernes qui feront l'objet du troisième chapitre.

**Introduction :**

Les dispositifs FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*) peuvent être introduits pour faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

Le concept de FACTS introduit en 1986 par EPRI (*Electric Power Research Institute*), regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique ainsi que le contrôle des puissances à travers ces derniers. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides (*Fast Valving*); ce qui donne aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes classiques qui ont des temps de réponse relativement lents.

Plusieurs types de FACTS ont été développés. Parmi lesquels on trouve, les plus connus qui sont le SVC (*Static Var Compensator*), le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), le STATCOM (*Static Compensator*) et l'UPFC (*Unified Power Flow Controller*). Chacun de ces dispositifs possède ses propres caractéristiques et peut être utilisé pour répondre à des besoins bien précis. [1]

## **I- Généralité sur les dispositifs FACTS :**

### **I-1- Définition des FACTS :**

D'après l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), la définition du terme FACTS est : « Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés afin d'améliorer la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau ».

La technologie des FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance raccordés au réseau électrique afin de mieux contrôler le flux de puissance à travers celui-ci et augmenter la capacité de transit des lignes. Les FACTS permettent aussi d'améliorer les marges de stabilité et assurer une flexibilité suffisante au transport d'énergie électrique.

### **I-2- Types des FACTS :**

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories.

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

#### **I-2-1- les compensateurs parallèle :**

Ils sont connectés en parallèle avec le réseau, ils injectent un courant dans le nœud du réseau auquel ils sont connectés. Ils sont principalement utilisés pour la compensation de la puissance réactive, par conséquent ils contrôlent la tension au nœud de raccordement. [2]

#### **I-2-2 les compensateurs séries :**

Ces dispositifs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance ou une tension variable, ils injectent une tension en série avec la ligne de transmission. Ils sont utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance de la ligne, ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance ainsi que la stabilité du système électrique en entier.[2]

**I-2-3 les compensateurs hybrides (série-parallèle) :**

C'est une combinaison des dispositifs séries et parallèles commandés d'une manière coordonnée afin de réaliser un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multivariable du flux de puissances active et réactive, la tension et l'angle de transport des liaisons. [2]

Le tableau de la figure III-1 montre les principales catégories classiques et modernes de dispositifs de contrôle des réseaux.

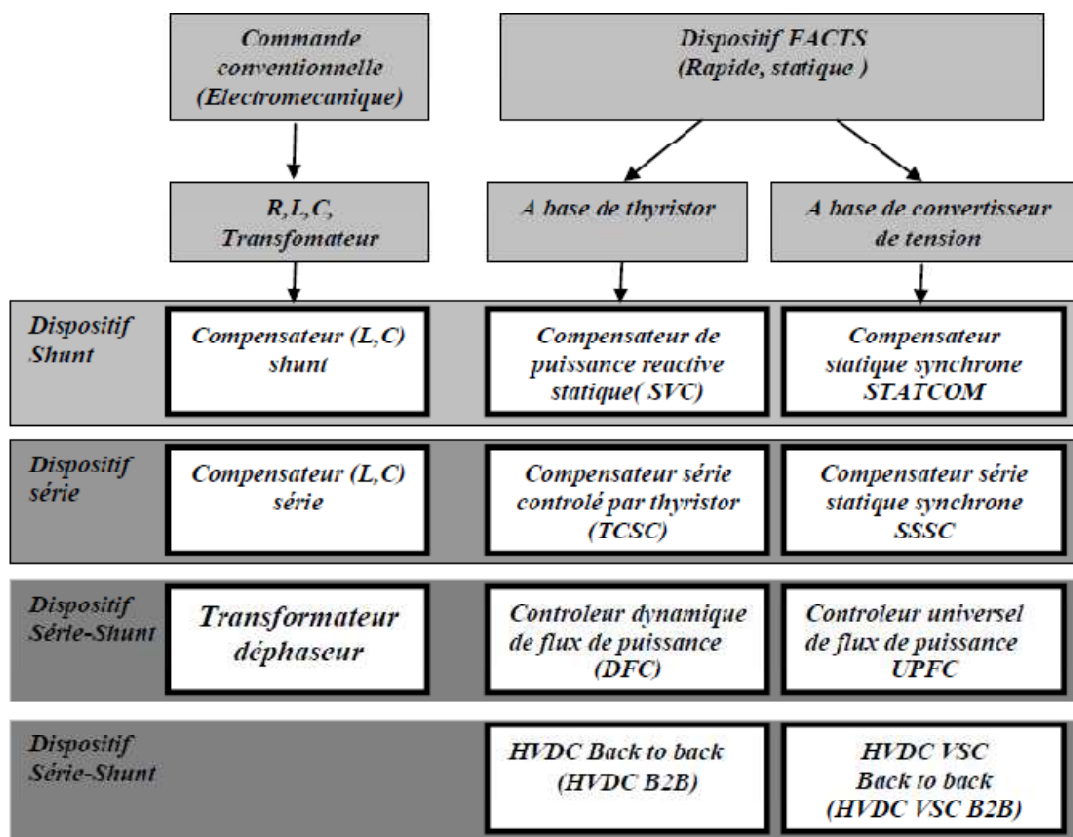


Figure III-1 : principaux dispositifs FACTS.

Dans les années 90 ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs de puissance. Son rôle est d'échanger de la puissance réactive avec le réseau.

### **I-3 Fonctionnement des FACTS :**

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant d'une façon dynamique, la puissance réactive. Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son nœud de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible. [3]

Les FACTS sont aussi utilisés pour le filtrage des harmoniques du courant et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la capacité d'un FACTS va de quelques MVA à quelques centaines de MVA. Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux à savoir :

➤ **Les grands réseaux de transport**

Pour améliorer le contrôle, augmenter les capacités de transport de puissance et contribuer à la récupération du réseau suivant un défaut (court circuit).

➤ **Les réseaux industriels**

Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point du réseau en présence de fluctuation de charge. La gamme de puissance est généralement inférieure à celle d'un réseau de transport. [3]

## **II- Modélisation du STATCOM :**

### **II-1- Définition du STATCOM :**

Le STATCOM est un convertisseur de tension à base de GTO (*Gate Turn off Thyristor*) ou IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) alimenté par des batteries d'accumulateurs, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage. Ce dispositif est semblable à un compensateur synchrone. [2]

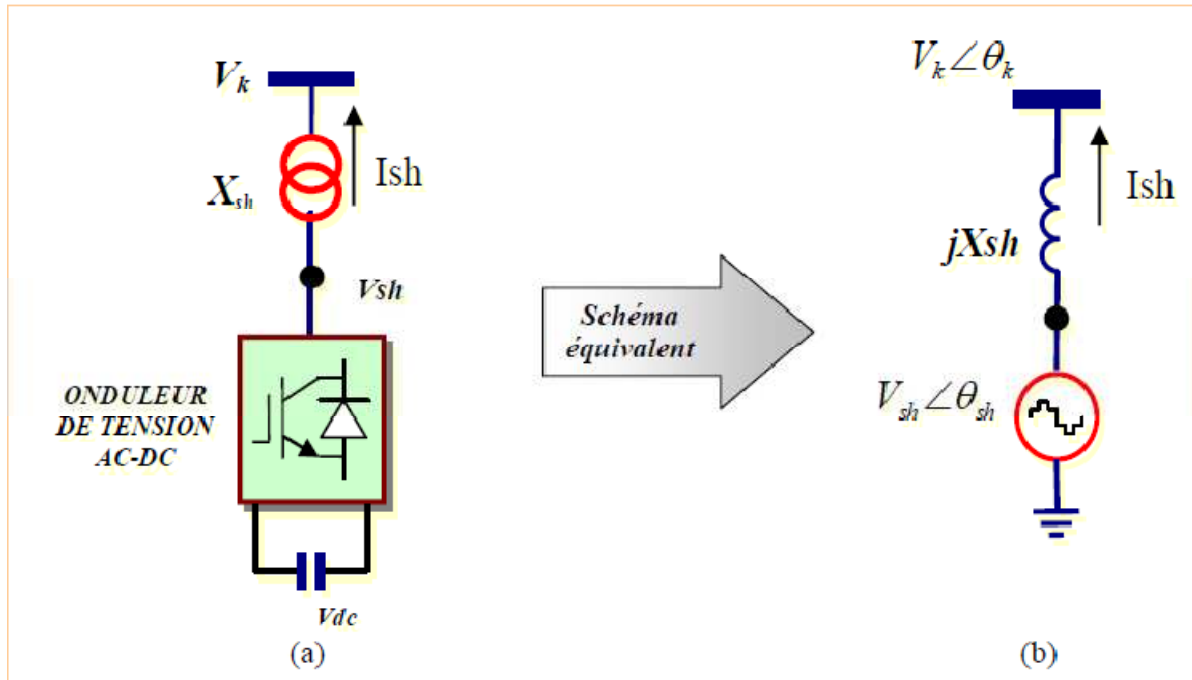


Figure III-2 : (a) structure d'un STATCOM ; (b) schéma équivalent.

Le STATCOM est capable de délivrer la puissance même si la tension du jeu de connexion est très faible, il y a eu lieu de signaler que le courant du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

## II-2- Principe de fonctionnement du STATCOM :

Le rôle du STATCOM est de compenser la puissance réactive, ce qui conduit à la régulation de la tension au jeu de barres auquel il est connecté. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de la puissance réactive à échanger avec le réseau [2][8][9].

Il n'y a pas d'échange de puissance active avec le réseau mais seulement la puissance réactive comme le montre la Figure III-3, (facteur de puissance quasi nul)

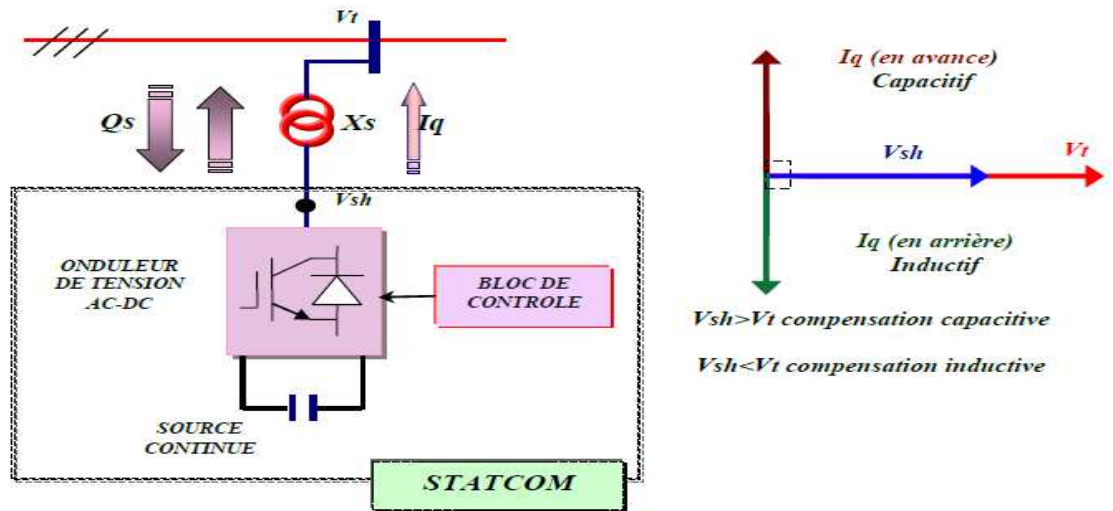


Figure III-3 : le STATCOM.

II-3- Modélisation du STATCOM :

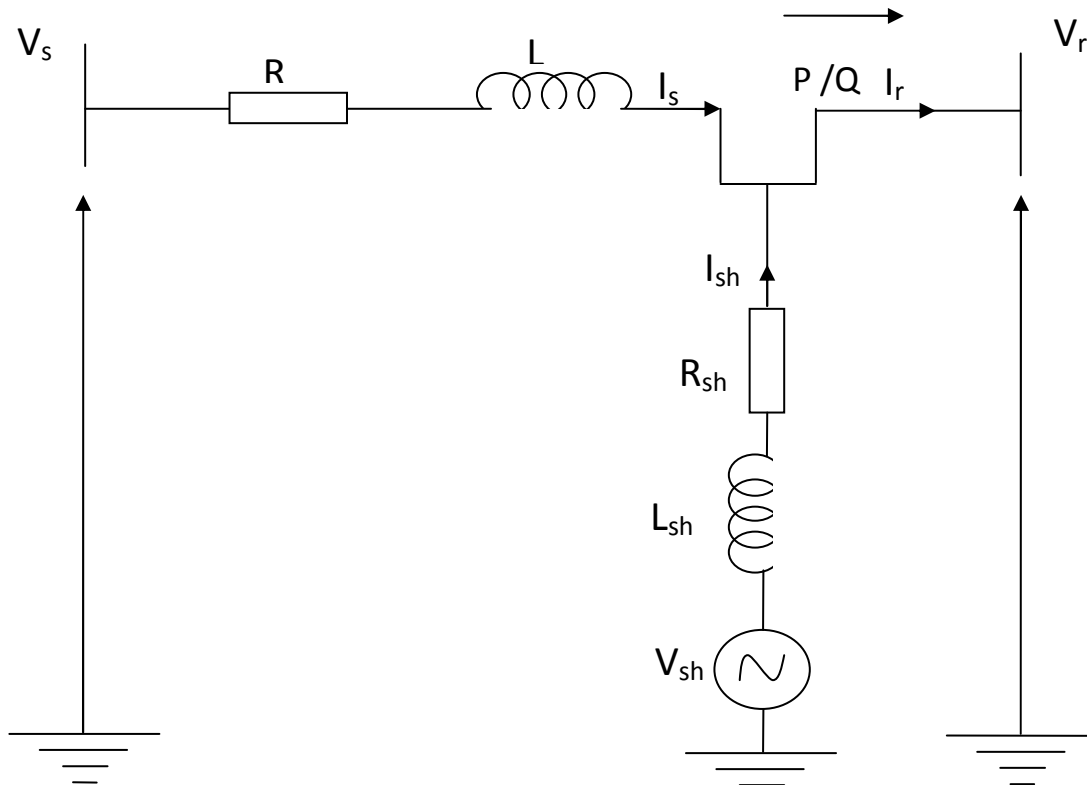


Figure III-4 : schéma équivalent du STATCOM.

Le STATCOM peut être représenté par le schéma équivalent de la figure III-4 ci-dessus en tenant compte seulement du jeu de barre où il est connecté.

Pour le modèle simplifié du STATCOM, on suppose que le circuit DC soit parfait. Le schéma équivalent du STATCOM est donc une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'intermédiaire d'une impédance de fuite du transformateur de couplage.

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud de raccordement) et la tension du STATCOM.

En appliquant la loi d'Ohm au schéma de la figure III4 :

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r = R\bar{I}_s + L \frac{d\bar{I}_s}{dt} \quad (\text{III-1})$$

$$\bar{V}_{sh} - \bar{V}_r = L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} + R_{sh}\bar{I}_{sh} \quad (\text{III-2})$$

$$\bar{I}_r = \bar{I}_s + \bar{I}_{sh} \quad (\text{III-3})$$

Où toutes les grandeurs sont triphasées :

$$\bar{V}_r = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix}; \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix}; \bar{I}_s = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } \bar{I}_r = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Le passage dans le repère synchrone tournant (d, p) aboutit aux équations dynamiques suivantes [8][9]:

$$\bar{V}_{sd} - \bar{V}_{rd} = R\bar{I}_{sd} + L \frac{d\bar{I}_{sd}}{dt} \quad (\text{III-4})$$

$$\bar{V}_{sq} - \bar{V}_{rq} = R\bar{I}_{sq} + L \frac{d\bar{I}_{sq}}{dt} \quad (\text{III-5})$$

$$V_{shd} - V_{rd} = R_{sh}I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shd} \quad (\text{III-6})$$

$$V_{shq} - V_{rq} = R_{sh}I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shq} \quad (\text{III-7})$$

Sous forme matricielle, le modèle du STATCOM dans l'espace d'état est tel que :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{shd} \\ V_{shq} \end{bmatrix} \quad (\text{III-8})$$

Où  $\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$  représente le vecteur de commande du système.

Cette dernière équation peut s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dI_{shd}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \cdot I_{shd} - \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{rd} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{shd} + \omega I_{shq} \\ \frac{dI_{shq}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \cdot I_{shq} - \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{rq} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{shq} - \omega I_{shd} \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

Par application de la transformée de LAPLACE, il résulte :

$$\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right) I_{shd}(S) = -\frac{1}{L_{sh}} V_{rd}(S) + \frac{1}{L_{sh}} V_{shd}(S) + \omega I_{shq}(S) \quad (\text{III-10})$$

$$\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right) I_{shq}(S) = -\frac{1}{L_{sh}} V_{rq}(S) + \frac{1}{L_{sh}} V_{shq}(S) - \omega I_{shd}(S) \quad (\text{III-11})$$

D'où le schéma bloc en boucle ouverte représenté à la figure (III-5) :

2

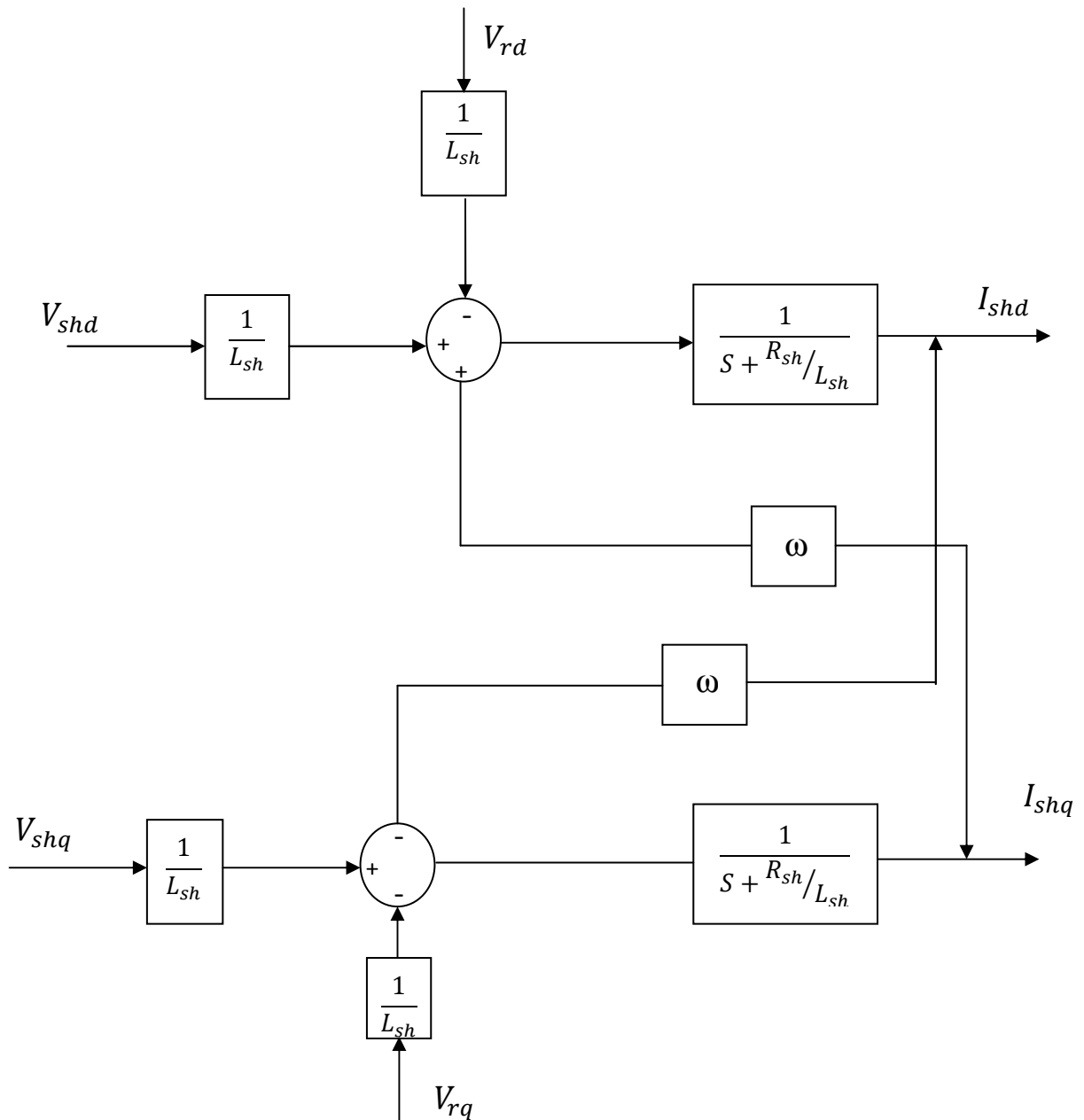


Figure III-5: Schéma fonctionnel du STATCOM en boucle ouverte.

**Simulation du système en boucle ouverte :**

Les simulations ont été faites à l'aide de Matlab/simulink pour les valeurs suivantes des paramètres :  $L_{sh} = 0.1$  H,  $R_{sh} = 3$   $\Omega$ ,  $V_{shd} = 30$  kV,  $V_{shq} = 15$  kV,  $V_{rd} = 220$  kV,  $V_{rq} = 0$  kV

Résultat de simulation :

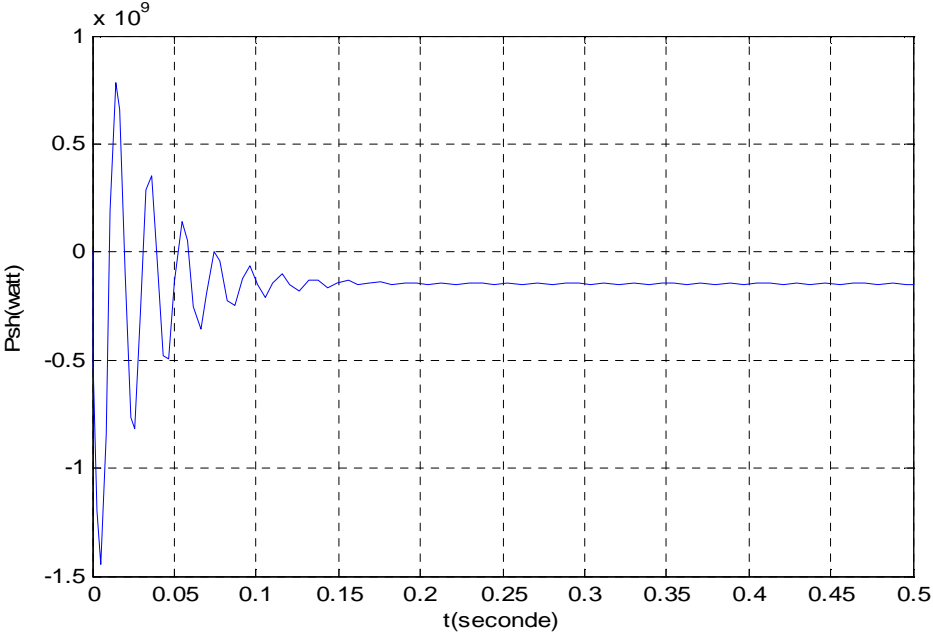


Figure III-6 : puissance active du STATCOM en régime libre

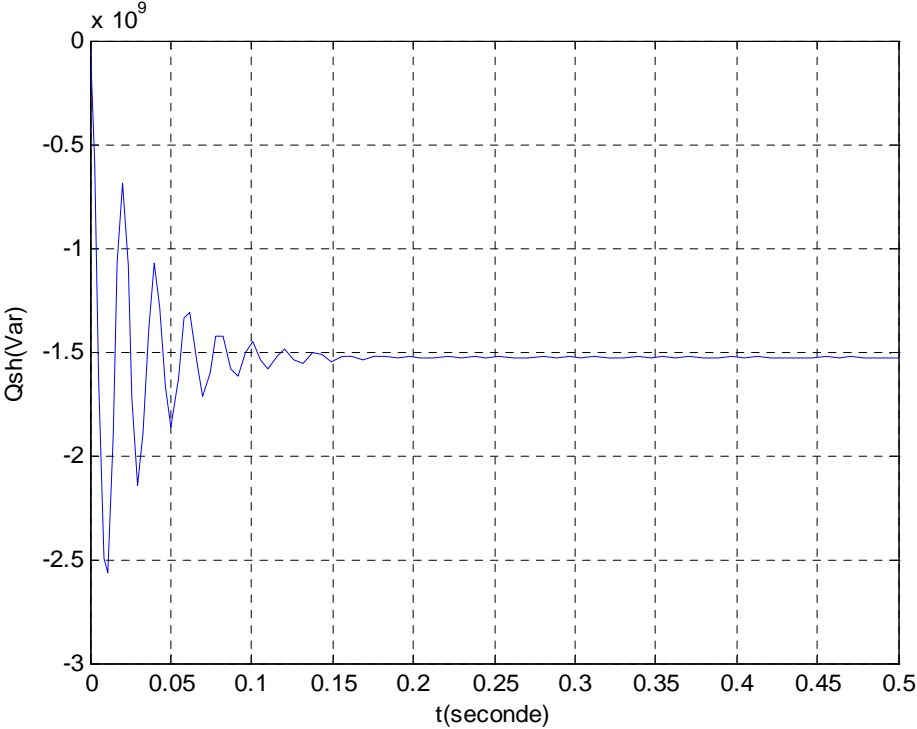


Figure III-7 : puissance réactive du STATCOM en régime libre

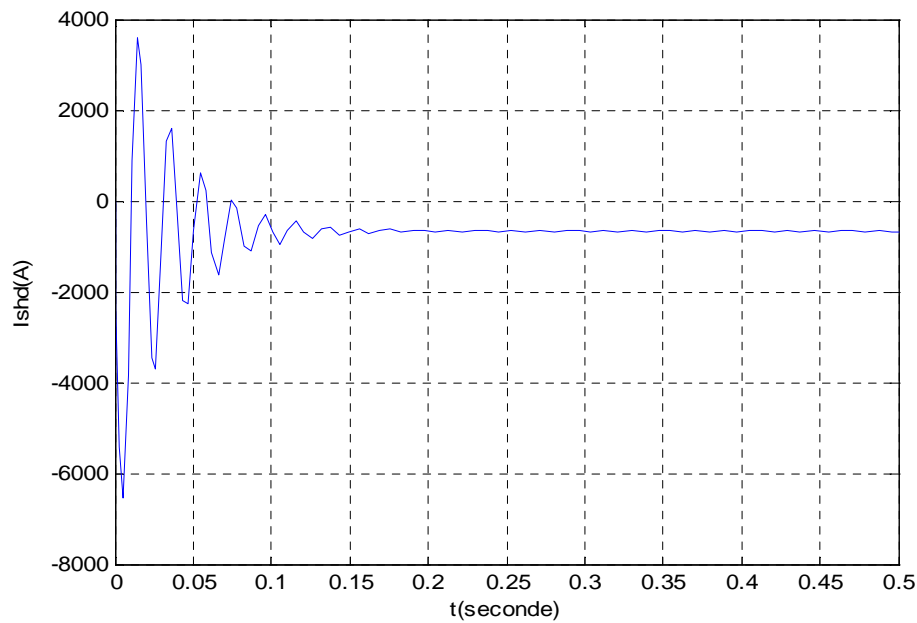


Figure III-8 : évolution de la composante directe du courant en régime libre

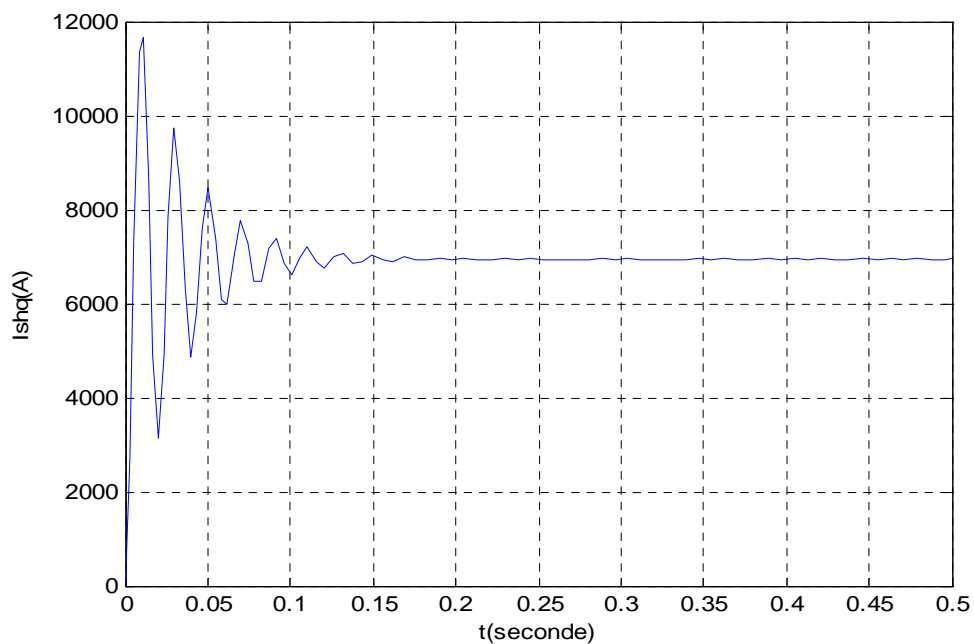


Figure III-9 : évolution de la composante en quadrature du courant en régime libre.

D'après les résultats de simulation, on constate que le système en boucle ouverte est stable (réponses indicielles oscillatoires amorties) avec un temps de réponse d'environ 5 cycles réseau (100 ms).

**II-4- identification des références :**

Le STATCOM est utilisé principalement pour la compensation de la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquent la régulation de la tension en ce dernier ; il injecte ou absorbe un courant  $I_{shréf}$  qui est l'image de la puissance compensée. Donc  $I_{shdréf}$  et  $I_{shqréf}$  sont les grandeurs de références que l'on doit déterminer à partir des puissances à injecter.

Les puissances de référence à injecter par le STATCOM sont la puissance réactive  $Q_{shréf}$  et la puissance active  $P_{shréf} \approx 0$  représentant les pertes joules dans le circuit continu, ici le STATCOM fonctionne à facteur de puissance nul ( $\cos\varphi=0$ ).

Sachant que dans le repère synchrone, les puissances s'expriment par [8][9]:

$$P_{shréf} = V_{rd}I_{shdréf} + V_{rq}I_{shqréf} \quad (\text{III-12})$$

$$Q_{shréf} = V_{rq}I_{shdréf} - V_{rd}I_{shqréf} \quad (\text{III-13})$$

Les expressions des courants sont :

$$I_{shdréf} = \frac{P_{shréf} + Q_{shréf}V_{rq}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \quad (\text{III-14})$$

$$I_{shqréf} = \frac{P_{shréf}V_{rq} - Q_{shréf}V_{rd}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \quad (\text{III-15})$$

D'après le schéma bloc du système de la figure (III-5), il y a un couplage entre les deux composantes du courant  $I_{sh}$ . Pour pouvoir commander plus aisément les courants, il serait nécessaire de procéder à un découplage des deux composantes du courant, le découplage s'effectue par la séparation du système en deux boucles fermées du moment que toutes les variables d'état sont mesurables.

**II-5- découplage des composantes du courant du STATCOM :**

Considérons le modèle simplifié représenté par le système d'équations (III-9) précédent :

$$\begin{cases} \frac{dI_{shd}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \cdot I_{shd} - \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{rd} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{shd} + \omega I_{shq} \\ \frac{dI_{shq}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \cdot I_{shq} - \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{rq} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot V_{shq} - \omega I_{shd} \end{cases}$$

En effectuant le changement de variable suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} (V_{rd} + V_{shd} + L_{sh} \omega I_{shd}) = U_{shd} \quad (\text{III-16})$$

Et à partir de la première équation du système (III-4) :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \cdot I_{shd} + U_{shd} \quad (\text{III-17})$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation ci-dessus il résulte :

$$\left( S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd}(S) = U_{shd}(S) \quad (\text{III-18})$$

D'où le transfert entre  $U_{shd}$  et  $I_{shd}$

$$\frac{I_{shd}(S)}{U_{shd}(S)} = \frac{1}{\left( S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right)} \quad (\text{III-19})$$

La commande est donnée par :

$$V_{shd} = L_{sh}U_{shd} - V_{rd} - L_{sh}\omega I_{shd}$$

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert entre  $U_{shq}$  et  $I_{shq}$ :

$$\frac{I_{shq}(S)}{U_{shq}(S)} = \frac{1}{\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right)} \quad (\text{III-20})$$

Avec :

$$U_{shq} = \frac{1}{L_{sh}} (V_{rq} + V_{shq} - L_{sh}\omega I_{shq}) \quad (\text{III-21})$$

Le schéma bloc en boucle fermée est le suivant :

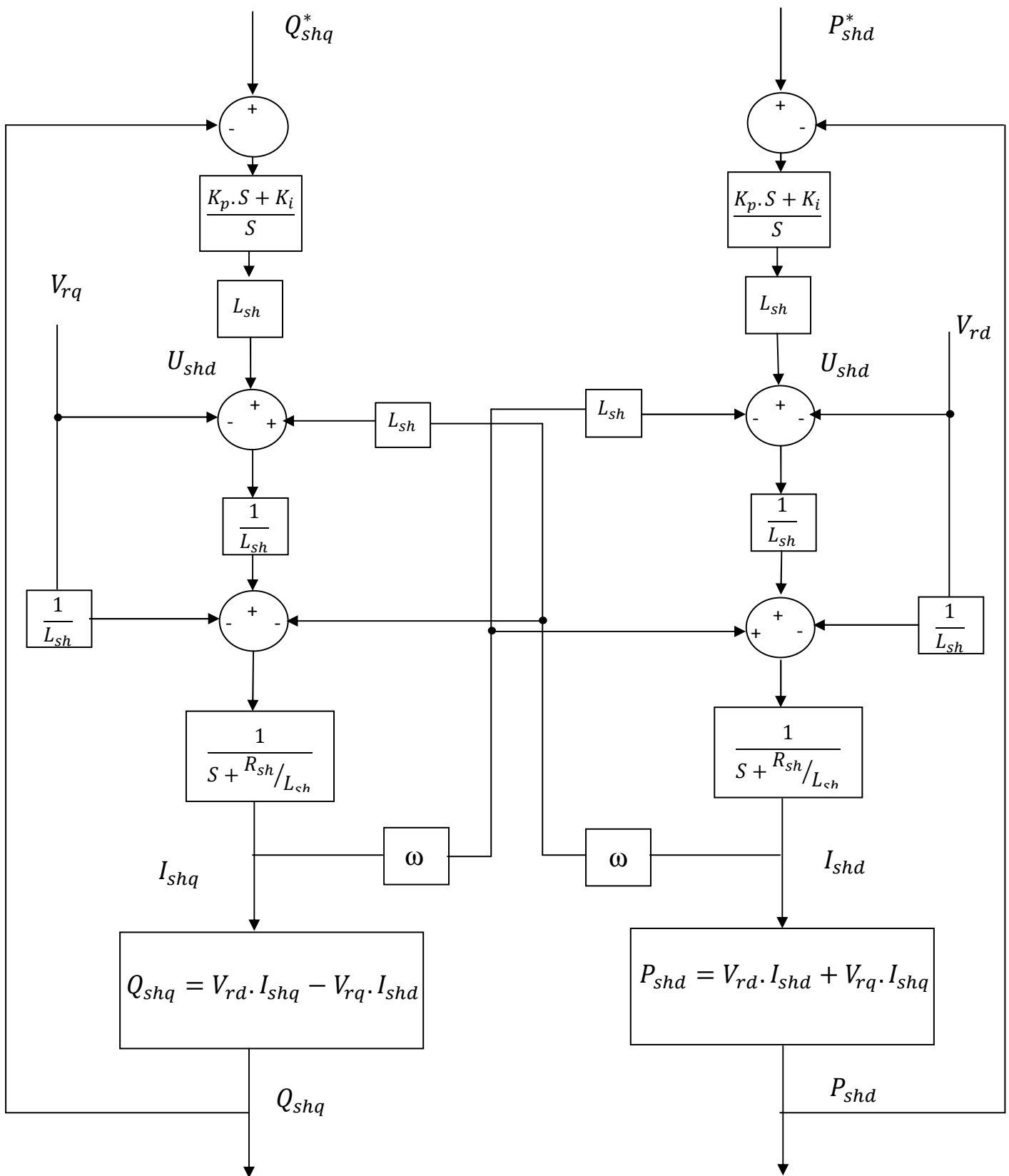


Figure III-10 : schéma fonctionnel du STATCOM en boucle fermée (régulation du courant).

**III-Régulation de la tension :**

Le maintien de la tension est un problème local lié à l'énergie réactive, la philosophie adoptée pour le réglage du plan de tension dans le réseau de transport est de maintenir le plan de tension le plus proche possible voire supérieure à la valeur nominale qui est de 220 kV et ce pour palier au problème des chutes de tension [6].

Soit le schéma de la ligne étudiée:

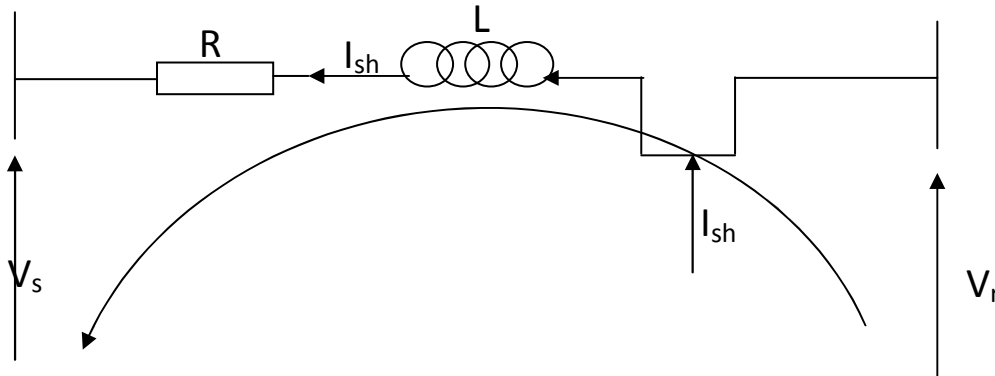


Figure III-11 : schéma d'une ligne d'un réseau.

En appliquant la loi des mailles à la figure ci-dessus :

$$V_r - L \frac{d I_{sh}}{dt} - R I_{sh} - V_s = 0 \quad (\text{III-22})$$

d'où :

$$V_s = -L \frac{d I_{sh}}{dt} - R I_{sh} + V_r \quad (\text{III-23})$$

En appliquant la transformation de Park à l'équation ci-dessus, il vient :

$$V_{sd} = -L \frac{d I_{shd}}{dt} - L\omega I_{shq} - R I_{shd} + V_{rd} \quad (\text{III-24})$$

$$V_{sq} = -L \frac{d I_{shq}}{dt} + L\omega I_{shd} - R I_{shq} + V_{rq} \quad (\text{III-25})$$

Ces deux dernières équations se traduisent par le schéma bloc suivant :

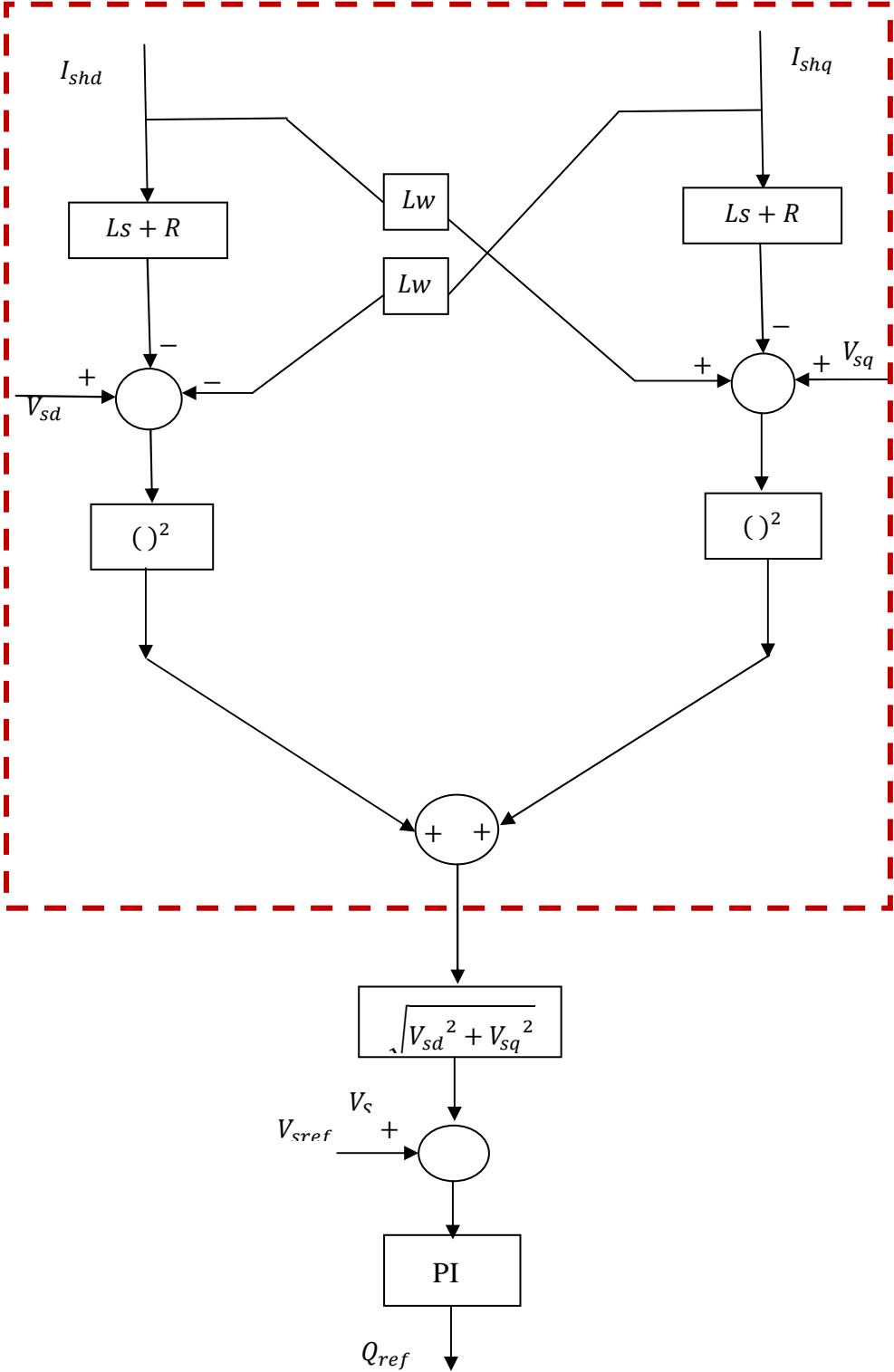


Figure III-12 schéma bloc du régulateur de tension.

Alors le schéma bloc en boucle fermé devient :

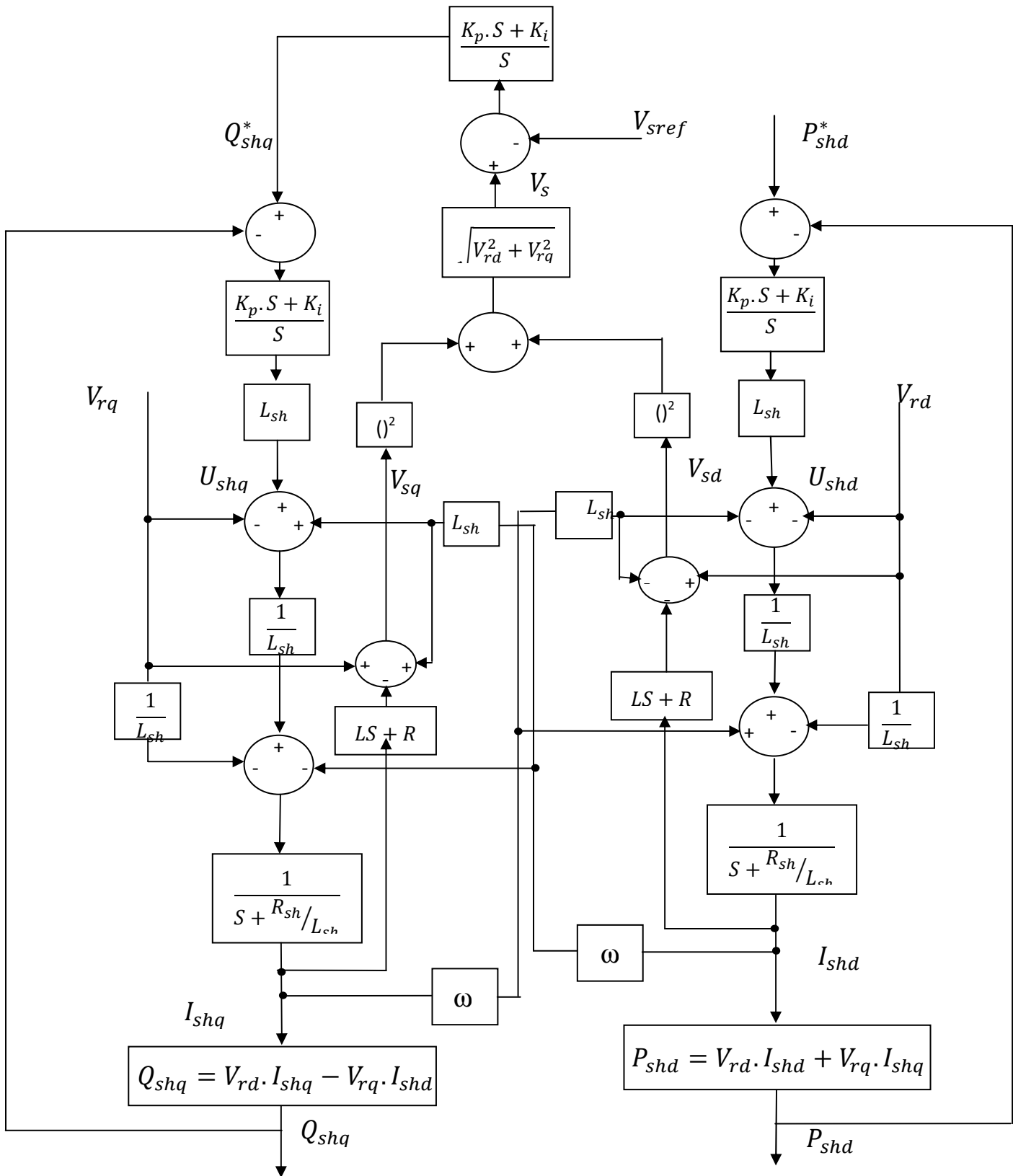


Figure III-13 : Schéma de la commande en tension du STATCOM.

**Résultats de simulation :****Les paramètres des régulateurs :**

✓ Pour les régulateurs des courants :

$$K_p = 100, K_i = 20$$

✓ Pour le régulateur de tension :

$$K_p = 20, K_i = 50000$$

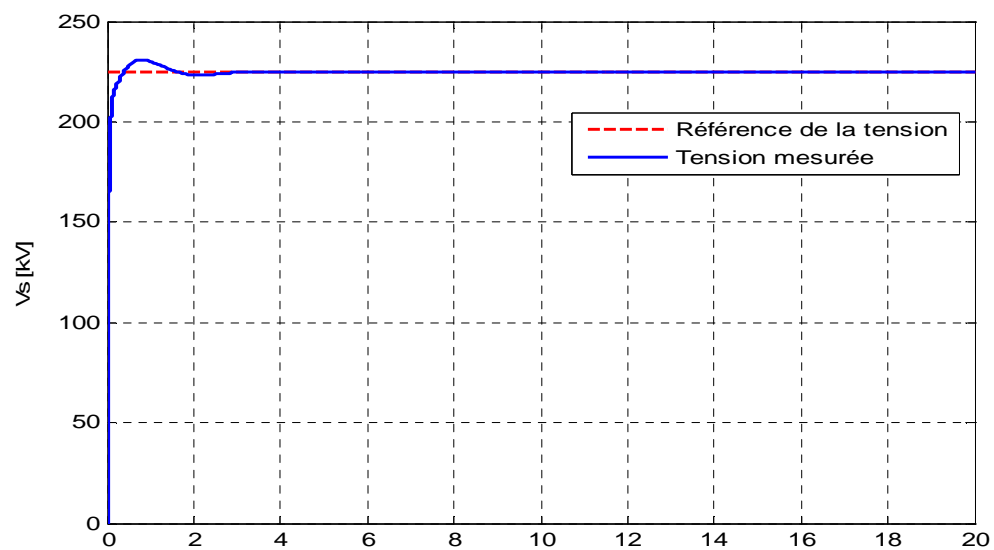
**III-1 Cas d'une compensation capacitive ( $V_{sref} = 225 \text{ kV}$ ) :**

Figure III-14 : Evolution de la tension et sa référence.

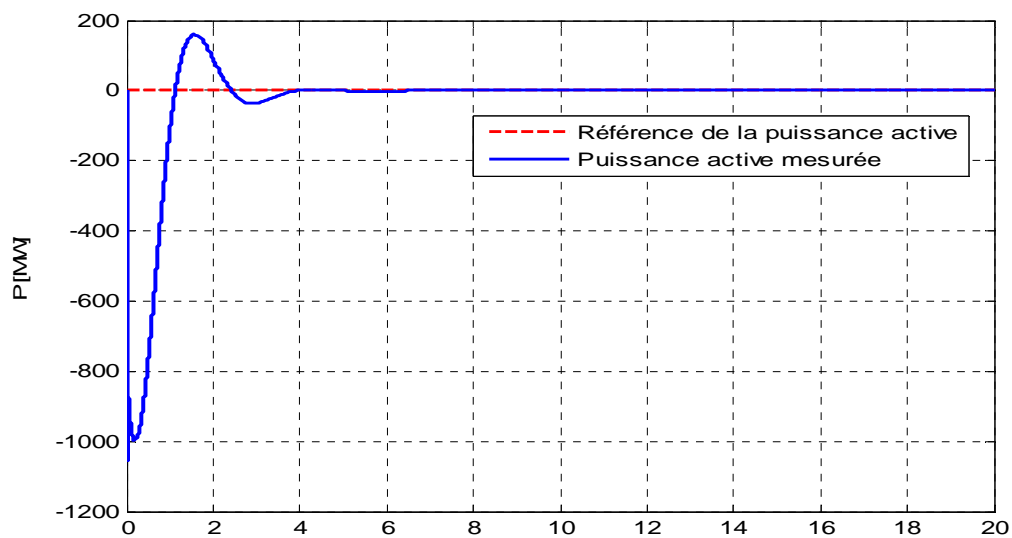


Figure III-15 : Evolution de la puissance active et sa référence.

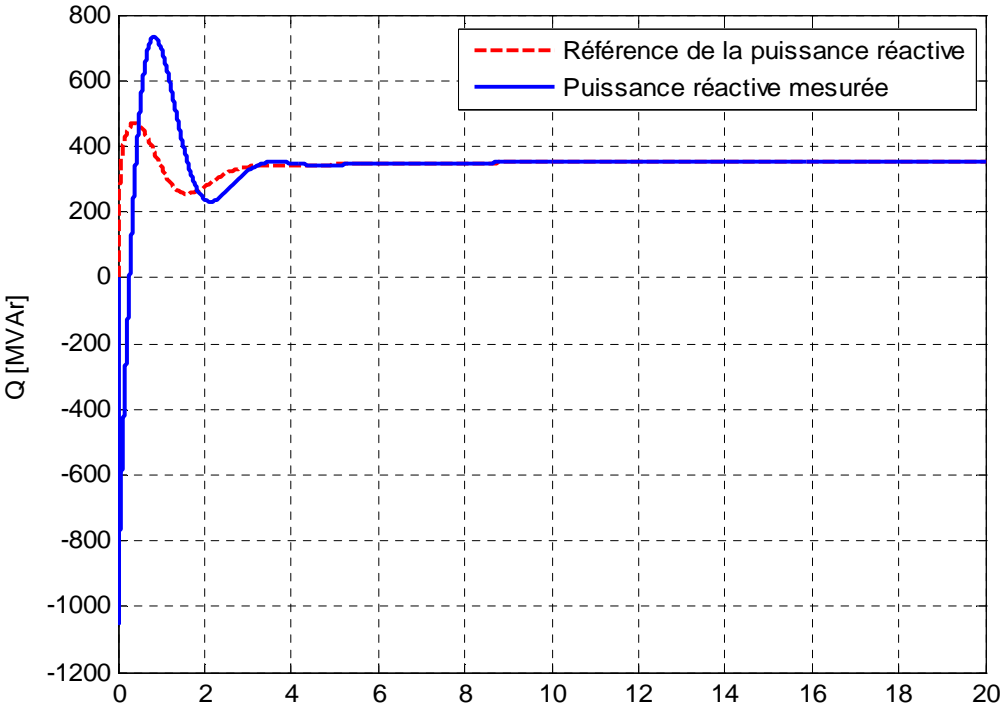


Figure. III-16 : Evolution de la puissance réactive et sa référence.

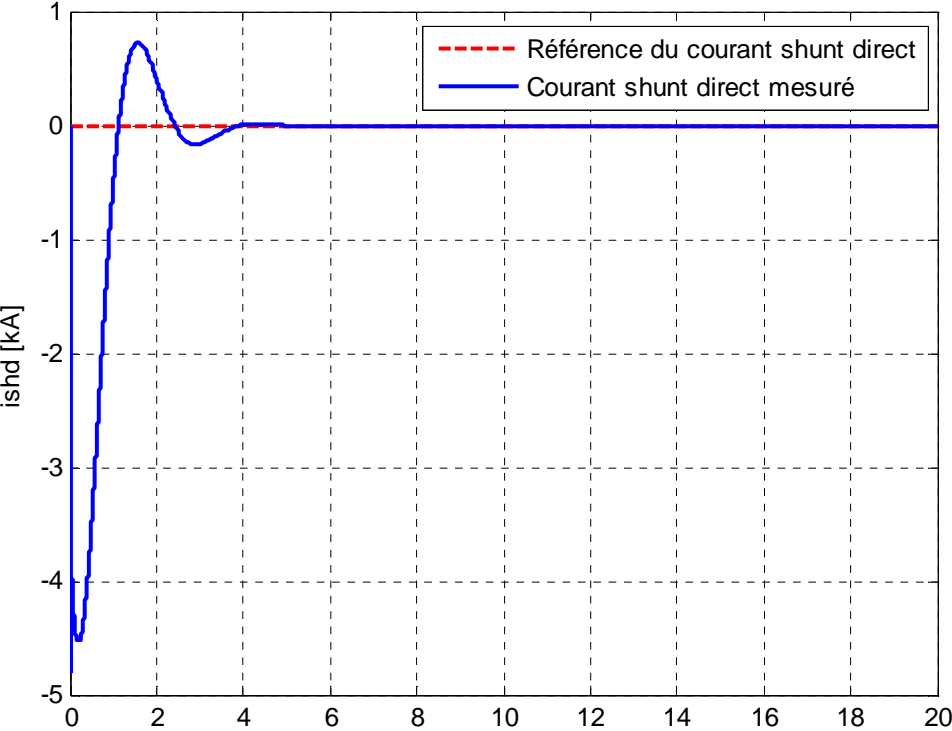


Figure. III-17 : Evolution du courant shunt direct et sa référence.

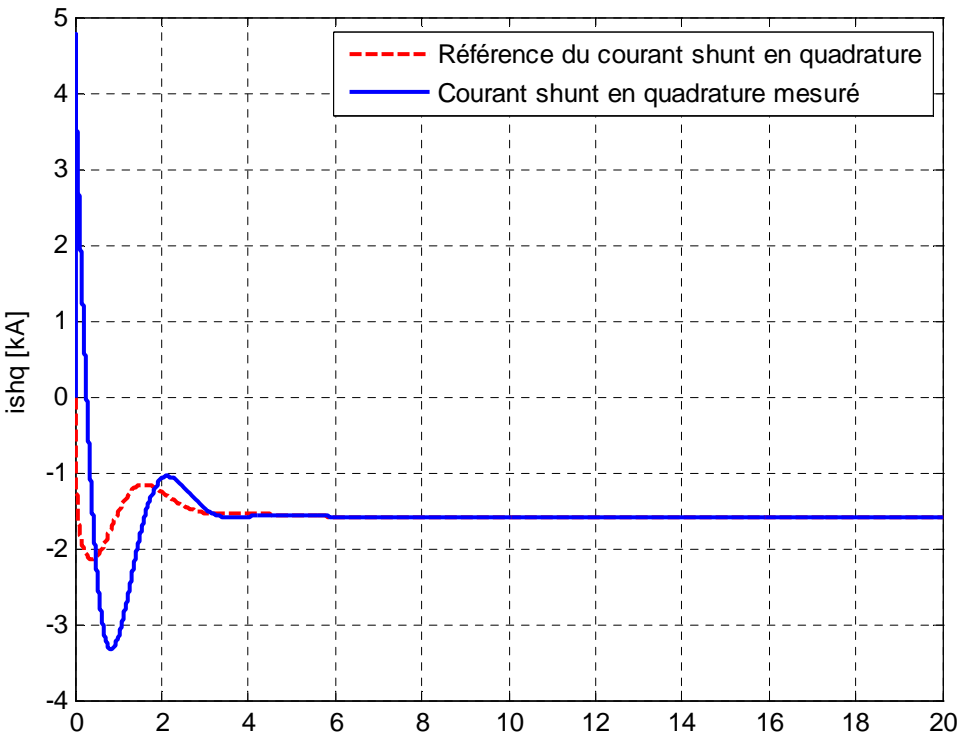


Figure. III- 18 : Evolution du courant shunt en quadrature et sa référence.

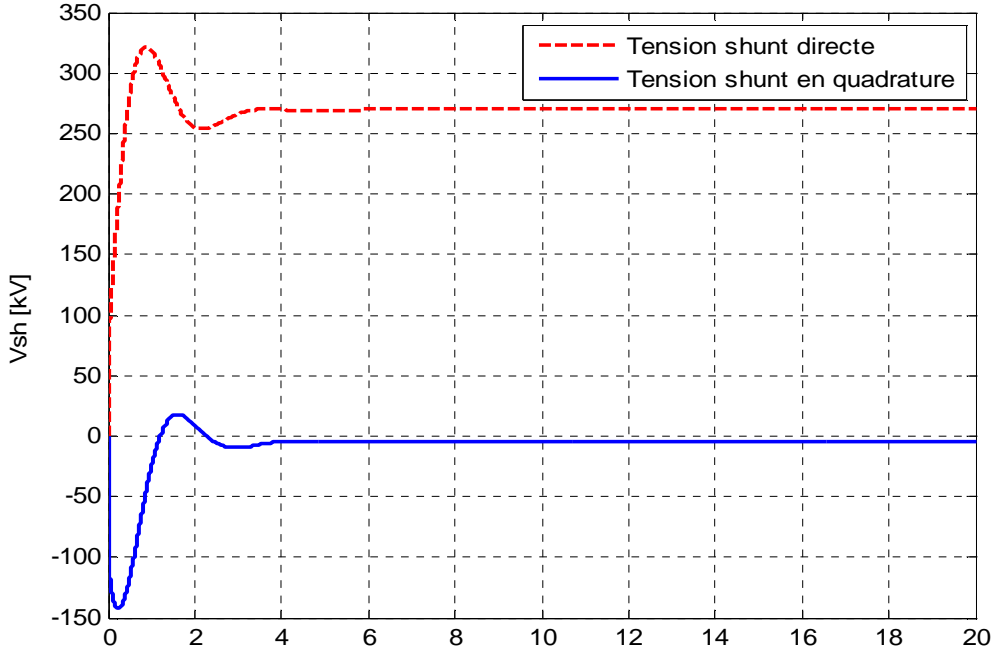


Figure. III-19 : Evolution des tensions de commande.

III-2 Cas d'une compensation inductive ( $V_{sref} = 215 \text{ kV}$ ) :

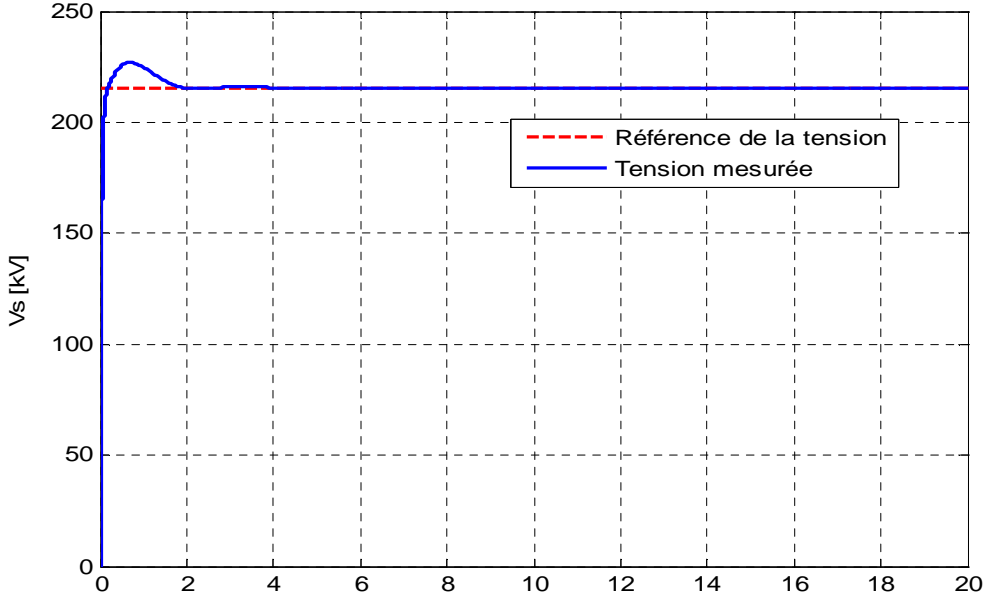


Figure III-20 : Evolution de la tension et sa référence.

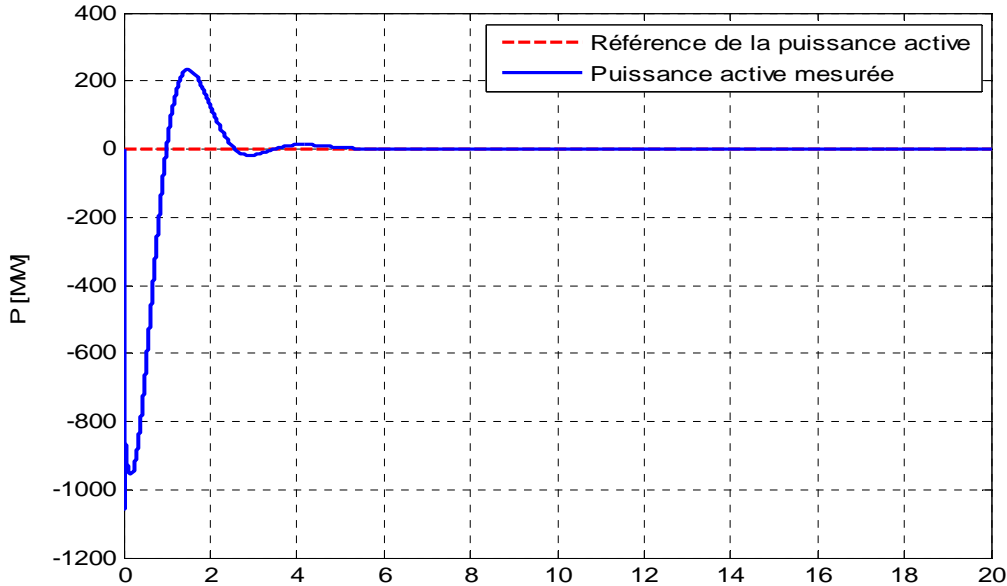


Figure III-21 : Evolution de la puissance active et sa référence.

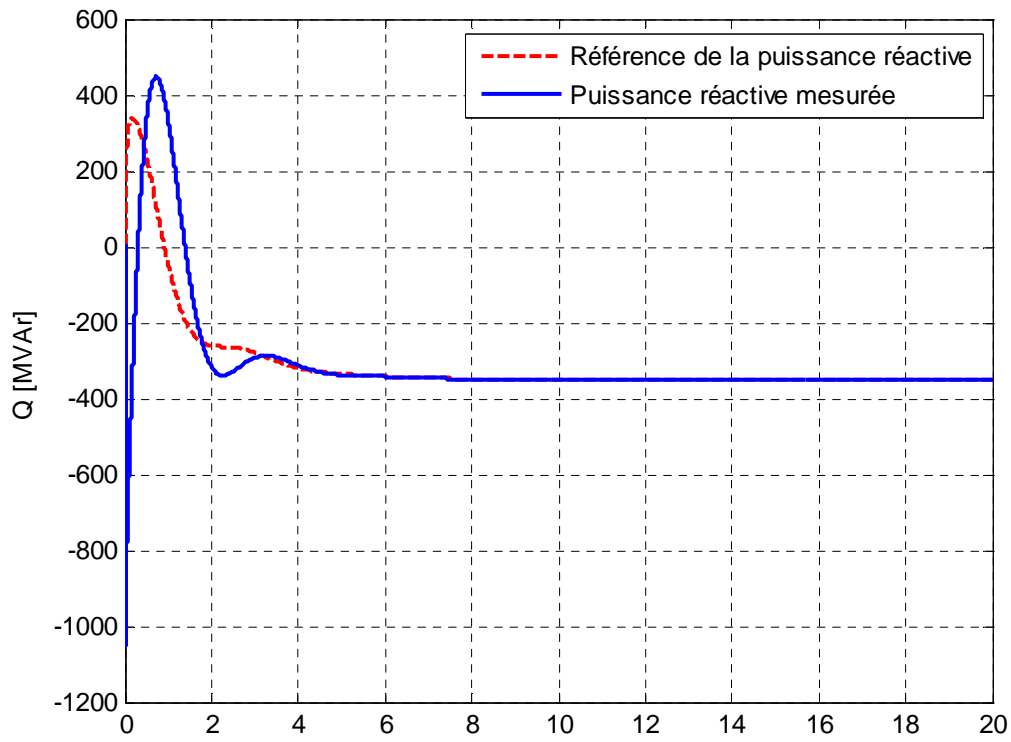


Figure III-22 : Evolution de la puissance réactive et sa référence.

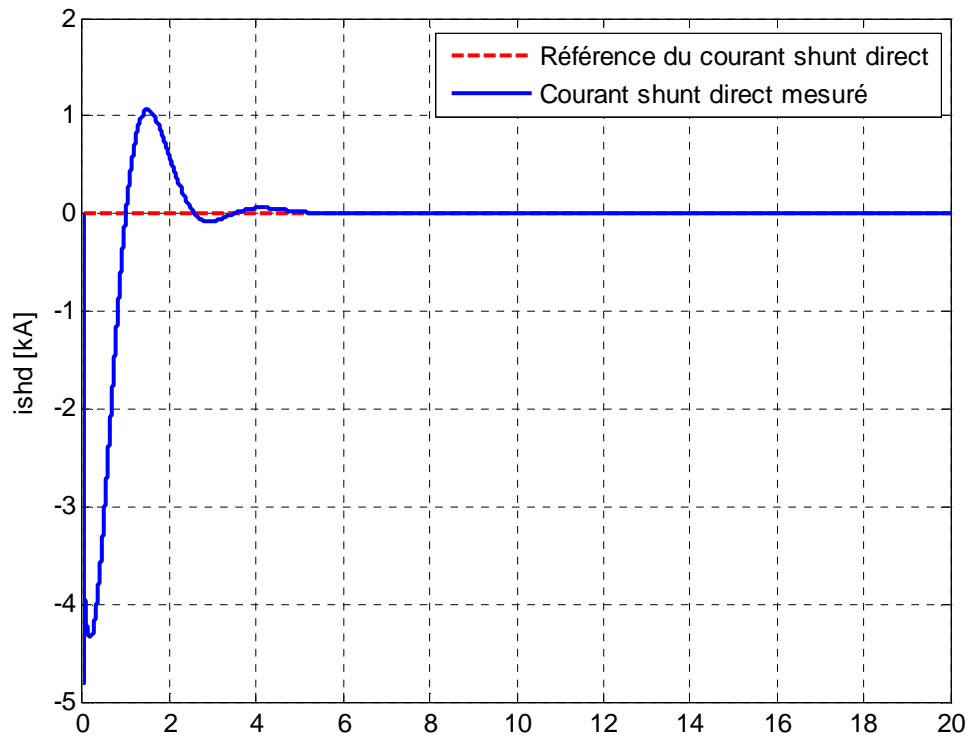


Figure III-23 : Evolution du courant shunt direct et sa référence.

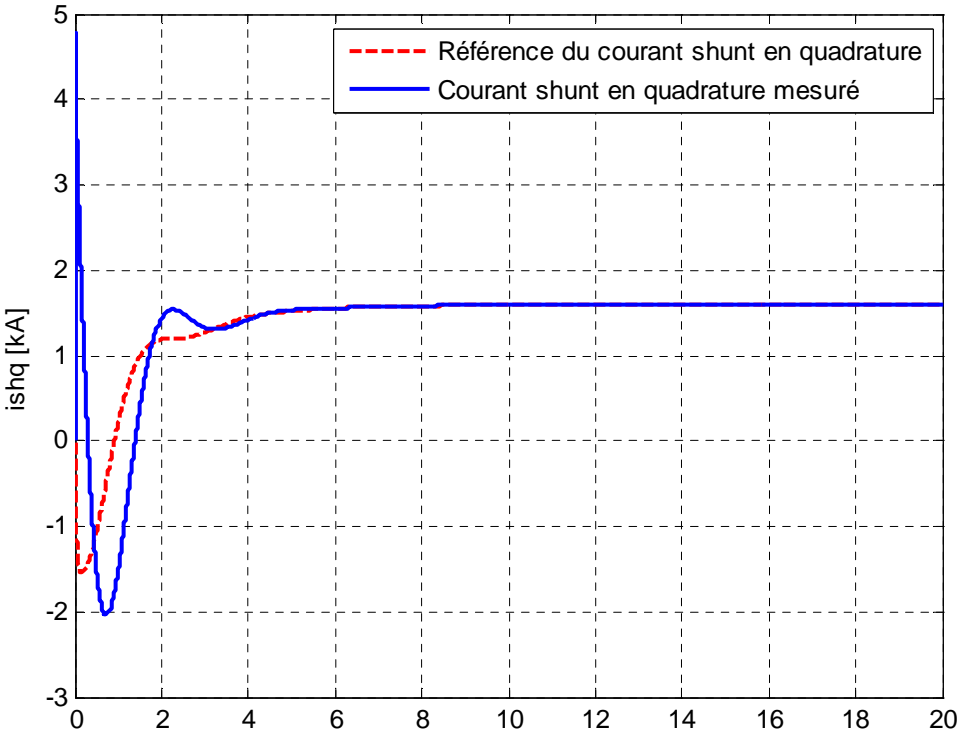


Figure III-24 : Evolution du courant shunt en quadrature et sa référence.

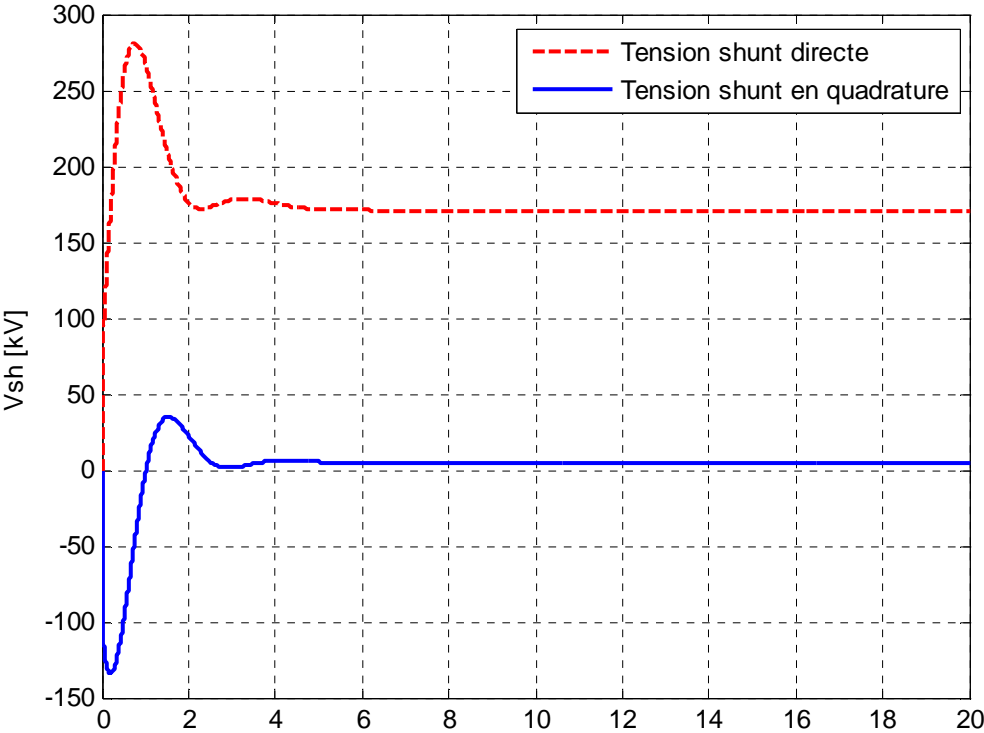


Figure III-25 : Evolution des tensions de commande.

D'après les résultats de simulation dans les deux scénarii (compensation capacitive et compensation inductive), on constate que l'objectif de commande est atteint (la tension alternative est régulée à sa consigne) avec un amortissement et un temps de réponse acceptable. En dépit du fort régime transitoire où les actionneurs de puissance sont très sollicités, il y a lieu de noter que les grandeurs électriques restent admissibles.

Il est à signaler que le second scénario concerne uniquement les réseaux isolés (cas du sud algérien) où la faiblesse et la dispersion des charges induisent des écoulements de puissance n'atteignant pas le minimum transmissible. Ces derniers rendent la ligne très capacitive avec par conséquent un niveau de tension relativement élevé. Dans ce cas de figure, les planificateurs envisagent des compensations inductives pour affaiblir le caractère capacitif du réseau.

### **Conclusion :**

Au cours de ce chapitre, il a été exposé une modélisation détaillée du dispositif FACTS de type STATCOM en exploitant tour à tour les équations de Kirchhoff en courant alternatif triphasé et la transformation de Park. Ceci a conduit à un modèle en courant linéaire carré à deux entrées et deux sorties. Par conséquent la synthèse de commande a été très simple. En effet, un correcteur de type PI a permis de réguler le courant à sa consigne avec les performances souhaitées dans le cahier des charges. Une boucle de commande externe a été ajoutée afin de réguler la tension alternative et maintenir le niveau de tension par la commande en puissance réactive qui en est une grandeur électrique très liée.

Il y a lieu de noter l'efficacité et la viabilité de du schéma de commande en tension en termes d'amortissement et temps de réponse malgré la complexité relative du schéma global, incorporant le modèle du STATCOM et celui des commandes des courants et de la tension.

## Conclusion Générale

---

### Conclusion générale:

L'industrie de l'énergie électrique actuelle a subi des changements profonds, suite aux bouleversements économique et technique connus dans plusieurs pays du monde. Ce nouvel environnement du marché de l'électricité a mis en évidence une clientèle plus importante et plus exigeante en termes de performances des réseaux entre autres : la flexibilité, la continuité de service, la fiabilité et la qualité de l'énergie offerte sur le marché.

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept pour les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif ; ces dispositifs flexibles sont appelés FACTS. Ils assurent le contrôle du flux de puissance, par conséquent, ils augmentent les capacités de transport des lignes qui sont souvent limitées par l'échauffement et/ou l'usure. Leur principe de fonctionnement se base essentiellement sur l'injection d'une tension ou courant alternatifs dans le réseau et ce en utilisant des convertisseurs de puissance constitués d'interrupteurs de puissance modernes tels que l'IGBT, le GTO...etc.

Dans ce mémoire, il a été présenté et expliqué le problème des chutes de tension provoquées par l'écoulement de charge (Load Flow) dans un réseau de transport d'électricité et les solutions préconisées afin d'y remédier. Après avoir passé en revue quelques solutions classiques de base, notre choix s'est focalisé sur le compensateur parallèle (shunt) STATCOM. Ce dernier étant capable de contrôler la puissance réactive injectée ou absorbée au nœud de connexion shunt auquel il est raccordé ce qui élimine ainsi les éventuelles chutes de tension. Pour atteindre cet objectif, il a fallu commencer par une étude de l'écoulement de puissance en régime permanent en deux scénarii (scénario moyen représenté par le réseau de la région de Tizi Ouzou projeté en 2010 et scénario fort avec la mise en service de la zone industrielle). La surcharge de l'une des lignes alimentant la charge de la zone industrielle provoque des chutes énormes de tension ce qui suggère la construction d'une nouvelle ligne en parallèle ou l'installation de batteries de condensateurs afin de compenser la puissance réactive accompagnant le fort transit actif. Ces solutions coûteuses et lentes peuvent être substituées par une autre solution moderne à base de l'électronique de puissance du type STATCOM, lequel dispositif permet de soulager le réseau en contrôlant la puissance

## Conclusion Générale

---

réactive, image de la tension, par l'intermédiaire d'un dispositif de commande classique utilisant des corrections classiques de type PI.

Après avoir élaboré un schéma de simulation sous Matlab/Simulink du système électrique incorporant le STATCOM, les résultats de simulation montrent que cette dernière solution révèle de bonnes performances dynamiques et un temps de réponse appréciable.

Comme perspective à ce travail, il serait intéressant d'étendre l'étude aux cas des clients industriels à demande irrégulière de puissance ainsi que la comparaison avec le dispositif SVC, ancêtre des FACTS.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rabah Benabid « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des réseaux électriques » université de Jijel ,2007.
- [2] Abdelaàli ALIBI « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS:(Flexible AC Transmission Systems) » université de BATNA, 2009.
- [3] Alain Innocent Leka « Amélioration du transit de puissance par les FACTS et simulation sur Matlab/Simulink d'un réseau électrique », 2008.
- [4] Christophe Prévé « Les réseaux électriques industriels » éditions Lavoisier 2005.
- [5] Jean-paul Barret , Piere Bornard, Bruno Meyer «Simulation des réseaux électriques » éditions Eyrolles, 1997.
- [6] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques » éditions Lavoisier, 2003.
- [7] : Haimour Rachida « contrôle des puissances par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique » ENSET-ORAN, 2009.
- [8] Amar HAMACHE et Hachemi CHEKIREB, Commande linéarisante décentralisée d'une ligne THT équipée d'un UPFC, Journal of Technology, ENP Alger, Algérie.
- [9] A. HAMACHE et H. CHEKIREB, Commande par mode glissant d'une interconnexion très haute tension (THT) munie d'un dispositif FACTS du type UPFC, International Conference on Electrical Engineering, Electronics and Automatics'10 Bejaia, Algeria, 2-3 November 2010.