

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY, 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

*Commande du transit de puissance à
travers une ligne THT à l'aide d'un
dispositif FACTS de type SSSC*

Présenté par :

Ahmed CHATBI
Boussad CHIHAOUI

Proposé et dirigé par : M^r Amar HAMACHE, MA UMMTO

Soutenu le : / 09 /2012

Promotion 2012

Résumé

L'objectif de ce travail est de contrôler le transit de puissance dans un réseau électrique en utilisant un dispositif SSSC qui est un FACTS de type série. Cette solution moderne a fait l'objet d'une étude de l'écoulement de puissance par simulation en régime permanent suivie de la modélisation dynamique du dispositif, et enfin des simulations ont été faites dans le but de tester le système de commande utilisant des correcteurs PI. Les résultats de simulation révèlent de bonnes performances dynamiques et un temps de réponse appréciable.

Mots clés : *Réseau électrique, Load Flow, FACTS, SSSC, PI.*

Abstract

The objective of this work is to control the power flow in an electric network using a SSSC device, which is a series FACTS device. This modern solution was the subject of the power flow survey by simulation in permanent regime followed by the dynamic modeling of the device and finally some simulations have been made in order to test the control system using some PI controllers. The results of simulation reveal a good dynamic performances and a substantial response time.

Key words : *Electric network, Load Flow, FACTS, SSSC, PI.*

SOMMAIRE

Introduction générale :	7
Chapitre I: Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique	
Introduction :.....	10
I) Structure générale des réseaux électriques :	10
II) Problématique de fonctionnement des réseaux électriques :	12
III) Position du problème de Load Flow (écoulement de charges) :.....	12
IV) Analyse de l'écoulement de puissance :	13
IV-1) Equations de l'écoulement de puissance :	13
IV-2) Matrice des admittances :	14
V) Calcul de l'écoulement de puissance :.....	15
Méthode de Newton-Raphson :	15
VI) Etude d'un réseau réel à 4 nœuds :.....	17
VI-1) Définition des paramètres du réseau :	17
VI-2) Matrice des admittances :	18
VI-3) Equations des puissances actives et réactives dans chaque nœud :.....	18
VI-4) Puissances actives et réactives transités :	19
VI-5) Les pertes :	21
VI-6) Les puissances actives et réactives générées :.....	21
VI-7) Puissance supporté par une ligne :	21
VI-8) Application de l'algorithme de Newton-Raphson :	22
VI-9) Résultats de la simulation :	26
VI-10) Etude du réseau avec l'arrivée de la zone industrielle:	27
Conclusion :	28
Chapitre II: Solutions classiques	
Introduction :.....	30

I) Insertion d'une ligne de transport :.....	30
I-1) Principe :.....	30
I-2) Application au réseau réel :	31
II) Maillage du réseau :	32
II-1) Cas du réseau réel à 4 nœuds :.....	33
III) Augmentation de la tension de source :.....	34
Conclusion :	35

Chapitre III: Une solution moderne: le SSSC

Introduction :.....	37
I) Définition des FACTS :	37
II) Rôle des FACTS :.....	38
III) Types de FACTS :	38
III-1) Compensateurs séries:.....	39
III-2) Compensateurs shunts (parallèles):	39
III-3) Compensateurs hybrides série-shunt:	39
IV) Compensateur série de type SSSC : (<i>Static Synchronous Series Compensator</i>).....	40
IV-1) Définition :	40
IV-2) Principe de fonctionnement :	41
IV-3) Modélisation du SSSC :.....	42
IV-4) Simulation du système en boucle ouverte :	45
IV-4-1) Paramètres du système :	45
IV-4-2) Résultats de simulation :.....	45
IV-5) Commande PI du flux de puissance :.....	46
IV-5-1) Découplage des courants :.....	46
IV-5-2) Définition des paramètres du régulateurs PI :	49
IV-5-3) Résultats de simulation :.....	49
Conclusion :	54

Conclusion générale:	56
Bibliographie	59

Annexe

Transformation de Park	61
------------------------------	----



**Introduction
générale**

Introduction générale

Introduction générale :

La consommation de l'énergie électrique est en hausse progressive et cette tendance augmente avec l'industrialisation et la croissance de la population. Devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et de meilleure qualité, les entreprises de production, transport et distribution de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement continu et régulier en électricité. Evidemment, cela est accompagné d'un développement continu du réseau qui devient de plus en plus complexe et difficile à contrôler. Ainsi à un réseau qui doit gérer de grandes quantités d'énergie électrique en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats, beaucoup de problèmes peuvent survenir entre autre la surcharge des lignes. Et de ce fait le potentiel des interconnexions du réseau ne seraient pas exploitée entièrement.

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base de valves de puissance commandables en ouverture et fermeture très avancés (GTO, IGBT). Ces dispositifs sont appelés FACTS (acronyme de *Flexible Alternative Current Transmission Systems*).

L'objet de ce travail est d'étudier le transit de puissance dans un réseau réel à 4 nœuds (réseau de la région de Tizi-Ouzou à l'horizon 2010), en y installant un dispositif FACTS de type SSSC. Ce travail s'articule autour de trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, il sera étudié le transit de puissance dans le réseau en prévoyant le raccordement d'une zone industrielle avec tous les problèmes qui pourraient être engendrés en particulier les surcharges de lignes.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la proposition de quelques solutions classiques pour pallier au problème de surcharge des lignes.
- Dans le troisième chapitre, le réseau sera doté d'un dispositif FACTS de type SSSC. Après que son principe de fonctionnement aura été expliqué, le SSSC sera modélisé en vue de sa commande. Le modèle établi dans l'espace de transfert servira à la synthèse de correcteurs classiques dans l'objectif de réguler le flux de puissance et remédier par conséquent au problème de surcharge des lignes.
- Enfin, le travail sera achevé par une conclusion générale.

Introduction générale

L'analyse de faisabilité et efficacité de l'utilisation de ce moyen moderne dans la gestion des flux de puissance dans un réseau électrique sera faite sur la base des résultats de simulation lesquelles sont obtenus en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.



Chapitre I

Problèmes relatifs à
l'écoulement de puissance
dans un réseau électrique

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

Introduction :

De nos jours, avec la complexité et le développement des systèmes utilisant l'énergie électrique, il est nécessaire d'améliorer les réseaux électriques en matière de performances et de sécurité.

Les réseaux électrique subissent parfois des surcharges de ligne, entre les zones interconnectés, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Pour cela, on doit procéder à l'étude des réseaux pour déterminer les transits de puissance dans chaque ligne et les chutes de tension, pour éviter des problèmes dans le cas où on envisage d'installer de nouvelles charges (ex : zones industrielles). Les calculs permettant d'obtenir ces informations sont connues sous le nom d'**écoulement des puissances** ou **Power Flow** (en littérature anglo-saxonne).

Dans ce chapitre, il sera exposé le problème de Power Flow, qui se base sur l'étude des transits de puissance dans les lignes et les chutes de tension qui en résultent. Pour cela, on propose d'étudier un réseau réel à 4 nœuds de la région de Tizi-Ouzou, avec les prévisions de charges de 2010.

I) Structure générale des réseaux électriques :

Les réseaux de transport et d'interconnexion à très haute tension (THT) assurent la liaison entre les centrales de production et les consommateurs (zones industrielles, clients domestiques,...etc.). Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée, l'énergie aux couts les plus faibles.

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié en quatre grandes parties :

a) La production :

Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ». [1]

b) Le transport :

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux. L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension. [1]

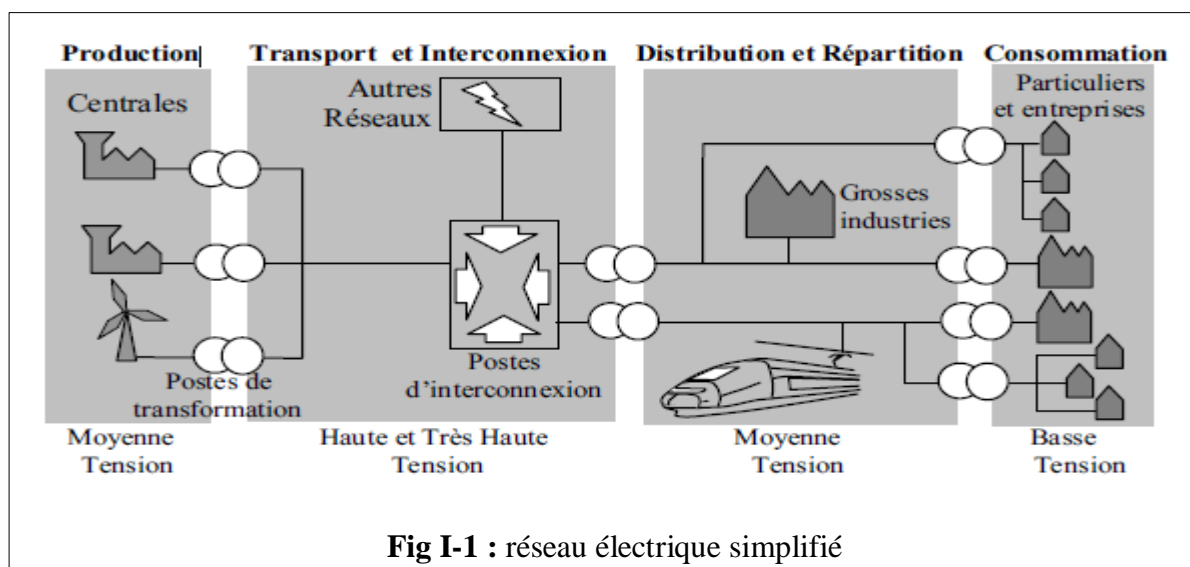
c) La distribution :

Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau. C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation. [1]

d) La consommation :

Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée (100 à 250 V). Certains clients industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension. [1]

La figure suivante illustre les grandes parties du réseau électrique :



Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

II) Problématique de fonctionnement des réseaux électriques :

L'écoulement de charges (*load flow, en anglais*) est l'un des principaux problèmes auxquels sont confrontés les gestionnaires d'un système de production - transport d'énergie électrique. Dans tout ensemble de centrales électriques alimentant un ensemble de consommateurs par l'intermédiaire d'un réseau de transport par essence maillé, on doit déterminer la répartition des puissances en régime permanent (> 300 sec) tout en respectant un ensemble de contraintes techniques et/ou économiques. [2]

La résolution du problème de Load Flow, nous permettra de déterminer les valeurs, en chaque nœud (jeu de barres THT), des phaseurs de tension (module et phase) du réseau pour un point de fonctionnement donné. Ce qui nous permettra par conséquent de calculer les puissances transitées, générées et dissipées dans les lignes.

III) Position du problème de Load Flow (écoulement de charges) :

L'analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique composé d'un nombre de générateurs, lignes de transmission et charges est très importante pour les études de planification et d'exploitation du réseau. Cela permet de connaître les conditions de production et de charge et les niveaux des tensions du réseau. [3]

Le problème de l'écoulement de puissance (power flow) consiste à déterminer les paramètres régissant le fonctionnement du réseau que sont :

- Les puissances active, et réactive relatives à chaque nœud.
- Les chutes de tension en chaque nœud.
- Les puissances actives et réactives transités dans chaque ligne.

Le calcul des puissances transitées exige la connaissance en chaque nœud (i), des grandeurs suivantes :

- P_i : puissance active au nœud i .
- Q_i : puissance réactive au nœud i .
- V_i : module de la tension au nœud i .

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

- θ_i : phase de la tension au nœud i .

En général deux grandeurs parmi celles qui sont cités ci-dessus sont connues, selon le type du nœud considéré, à savoir :

a) Nœud producteur (P-V):

Pour ce type de nœuds, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.

b) Nœud consommateur (P-Q) :

Pour ce type de nœuds, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.

c) Nœud bilan :

Il fournit des puissances actives et réactives supplémentaires pour tenir compte des pertes de puissance qui restent inconnues jusqu'à la fin du calcul. En ce nœud le module de la tension ainsi que la phase sont connus.

IV) Analyse de l'écoulement de puissance :

Pour la résolution d'un problème de répartition de charges, il est plus commode de travailler avec les admittances (Y) plutôt qu'avec les impédances (Z). Vu la facilité avec laquelle les termes de la matrice d'admittance peuvent être calculés, elle constitue le point de départ de la plupart des méthodes de calcul de la répartition des charges. Cette méthode nous amène à résoudre un système d'équations non linéaires.

IV-1) Equations de l'écoulement de puissance :

Pour un réseau a n nœuds, les équations des puissances actives et réactives injectés dans chaque nœud sont données comme suit :

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

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

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

Les équations des puissances actives et réactives transitées dans chaque ligne sont données comme suit :

$$P_{ij} = |Y_{ij}| [V_i^2 \cos(\theta_{ij}) - V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)] \quad (\text{I-3})$$

$$Q_{ij} = |Y_{ij}| [V_i^2 \sin(\theta_{ij}) - V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)] \quad (\text{I-4})$$

Avec :

V_i, V_j : Tension aux nœuds i et j.

δ_i, δ_j : Phases des tensions V_i et V_j .

Y_{ij} : Module de l'admittance de la ligne ij. ($Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}}$)

Z_{ij} : Impédance de la ligne ij.

θ_{ij} : Argument de Y_{ij} .

IV-2) Matrice des admittances :

L'admittance de la ligne ij est donnée comme suit :

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} = Y_{ji} \quad (\text{I-5})$$

Avec : $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$

Les valeurs des composantes de la matrice d'admittance sont établies de la manière suivante :

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

- L'admittance propre « Y_{ii} », associée au nœud « i » est donnée comme suit :

$$Y_{ii} = -(-Y_{i1} - Y_{i2} - \dots - Y_{i(i-1)}) \quad (\text{I-6})$$

- L'admittance de transfert « Y_{ij} » associée aux nœuds « i » et « j », est égale à l'admittance de la branche qui joint ces deux nœuds, changée de signe.

A partir de là on définit la matrice des admittances suivante :

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & \dots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \quad (\text{I-7})$$

V) Calcul de l'écoulement de puissance :

Les méthodes itératives de la matrice Y étaient les toutes premières à être appliquées au calcul de l'écoulement de puissance sur la première génération des calculateurs numériques. Celles-ci ont exigé un stockage mémoire minimum, cependant, elles ne convergent pas sur quelques problèmes. Cette insuffisance a mené au développement des méthodes de la matrice Z , qui ont eu une meilleure convergence, mais ont exigé plus de stockage et fonctionnent au ralenti sur grand nombre de systèmes, un problème que partage aussi la méthode de Newton-Raphson qui possède, par contre, un avantage très intéressant celui de la convergence rapide (après peu d'itérations). [4]

Dans le cadre du présent travail, la méthode de Newton-Raphson sera adoptée pour la résolution du problème du Load Flow.

Méthode de Newton-Raphson :

La méthode de Newton-Raphson est la méthode la plus utilisée dans l'étude de l'écoulement de puissance grâce à sa convergence rapide. Cette approche utilise des itérations pour résoudre des systèmes d'équations non-linéaires ayant la forme suivante :

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad ; \text{ Ou sous forme vectorielle : } F(X) = 0 \quad (\text{I-8})$$

Où F représente l'ensemble des n équations non-linéaires, et X est le vecteur des n variables d'état inconnu. [5]

$$X = \begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \\ \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \end{pmatrix} \quad (\text{I-9})$$

$$F(X) = X_{cible} \Rightarrow X_{cible} - F(X) = 0 \quad (\text{I-10})$$

$$G(X) = 0 \quad (\text{I-11})$$

Avec : $G(X) = X_{cible} - F(X)$

En appliquant la méthode de Newton à l'équation précédente on trouve :

$$X_{i+1} = X_i - \left[\frac{\partial G}{\partial X^T} \Big|_{X=X_i} \right]^{-1} G(X_i) \quad (\text{I-12})$$

$$X_{i+1} = X_i - \left[-\frac{\partial F}{\partial X^T} \Big|_{X=X_i} \right]^{-1} (X_{cible} - F(X_i)) \quad (\text{I-13})$$

$$X_{i+1} = X_i + \left[\frac{\partial F}{\partial X^T} \Big|_{X=X_i} \right]^{-1} (X_{cible} - F(X_i)) \quad (\text{I-14})$$

Si on pose :

$$\frac{\partial F}{\partial X^T} = J(X) ; \text{ matrice Jacobéenne associée à } F.$$

Alors :

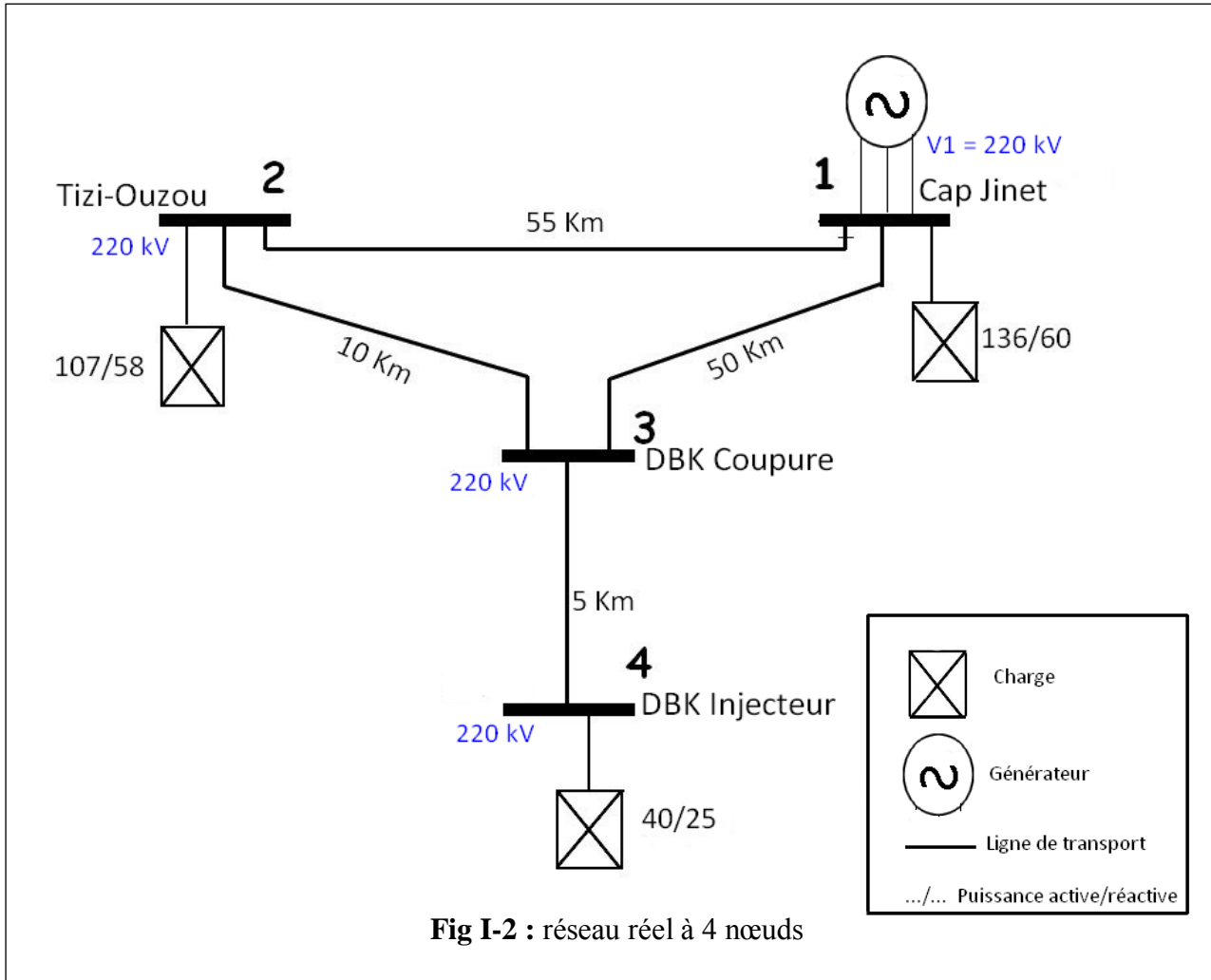
$$X_{i+1} = X_i + J^{-1}(X)(X_{cible} - F(X_i)) \quad (\text{I-15})$$

Dans le cas des systèmes électriques, il est préférable d'initialiser les phases à 0° et les modules à 1 pu.

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

VI) Etude d'un réseau réel à 4 nœuds :

Considérons le réseau suivant :



Les calculs seront effectués en unité réduite (pu), avec :

$$S_{base} = 100 \text{ MVA} ; U_{base} = 220 \text{ kV} ; Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = 484$$

VI-1) Définition des paramètres du réseau :

- Impédances des lignes :

$$Z = R + jX ;$$

$$\text{Avec : } X = 0.2890 \Omega/\text{km} ; R = 0.0620 \Omega/\text{km}$$

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

$$Z_{12} = Z_{21} = 0.0070 + j0.0328$$

$$Z_{13} = Z_{31} = 0.0064 + j0.0299$$

$$Z_{23} = Z_{32} = 0.0013 + j0.0060$$

$$Z_{34} = Z_{43} = 0.0006 + j0.0030$$

- **Puissances actives et réactives consommées aux différents nœuds :**

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

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

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

$$P_{4c} = 40 \text{ MW} = 1.4 ; Q_{4c} = 25 \text{ MVAR} = 0.75$$

- **Tension et phase au nœud 1 (nœud générateur) :**

$$V_1 = 220 \text{ kV}$$

$$\delta_1 = 0^\circ$$

VI-2) Matrice des admittances :

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & -Y_{13} & -Y_{14} \\ -Y_{21} & Y_{22} & -Y_{23} & -Y_{24} \\ -Y_{31} & -Y_{32} & Y_{33} & -Y_{34} \\ -Y_{41} & -Y_{42} & -Y_{43} & Y_{44} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 13.0682 - j61.1393 & -6.2231 + j29.1597 & -6.8451 + j31.9796 & 0 & 0 \\ -6.2231 + j29.1597 & 40.715 - j188.35 & -34.4919 + j156.1934 & 0 & 0 \\ -6.8451 + j31.9796 & -34.4919 + j156.1934 & 105.44 - j511.69 & -64.103 + j320.51 & 0 \\ 0 & 0 & -64.103 + j320.51 & 64.103 - j320.51 & 0 \end{pmatrix}$$

VI-3) Equations des puissances actives et réactives dans chaque nœud :

- **Nœud 2 :**

$$P_2 = V_2 V_1 |Y_{12}| \cos(\theta_{12} - \delta_2) + V_2^2 |Y_{22}| \cos(\theta_{22}) + V_2 V_3 |Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

$$Q_2 = -(V_2 V_1 |Y_{12}| \sin(\theta_{12} - \delta_2) + V_2^2 |Y_{22}| \sin(\theta_{22}) + V_2 V_3 |Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3))$$

- **Nœud 3 :**

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

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

- **Nœud 4 :**

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

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

VI-4) Puissances actives et réactives transités :

- **Ligne 1-2 (2-1) :**

$$P_{12} = \frac{V_1^2 \cos(\theta_{12}) - V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + 0 - \delta_2)}{|Z_{12}|}$$

$$P_{21} = \frac{V_2^2 \cos(\theta_{12}) - V_1 V_2 \cos(\theta_{12} - 0 + \delta_2)}{|Z_{12}|}$$

$$perte_{12} = P_{12} + P_{21}$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2 \sin(\theta_{12}) - V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + 0 - \delta_2)}{|Z_{12}|}$$

$$Q_{21} = \frac{V_2^2 \sin(\theta_{12}) - V_1 V_2 \sin(\theta_{12} - 0 + \delta_2)}{|Z_{12}|}$$

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

$$Q_{perte_{12}} = Q_{12} + Q_{21}$$

- **Ligne 1-3 (3-1) :**

$$P_{13} = \frac{V_1^2 \cos(\theta_{13}) - V_1 V_3 \cos(\theta_{13} + 0 - \delta_3)}{|Z_{13}|}$$

$$P_{31} = \frac{V_3^2 \cos(\theta_{13}) - V_1 V_3 \cos(\theta_{13} - 0 + \delta_3)}{|Z_{13}|}$$

$$p_{erte_{13}} = P_{13} + P_{31}$$

$$Q_{13} = \frac{V_1^2 \sin(\theta_{13}) - V_1 V_3 \sin(\theta_{13} + 0 - \delta_3)}{|Z_{13}|}$$

$$Q_{31} = \frac{V_3^2 \sin(\theta_{13}) - V_1 V_3 \sin(\theta_{13} - 0 + \delta_3)}{|Z_{13}|}$$

$$Q_{perte_{13}} = Q_{13} + Q_{31}$$

- **Ligne 2-3 (3-2) :**

$$P_{23} = \frac{V_2^2 \cos(\theta_{23}) - V_2 V_3 \cos(\theta_{23} + 0 - \delta_3)}{|Z_{23}|}$$

$$P_{32} = \frac{V_3^2 \cos(\theta_{23}) - V_2 V_3 \cos(\theta_{23} - 0 + \delta_3)}{|Z_{23}|}$$

$$p_{erte_{23}} = P_{23} + P_{32}$$

$$Q_{23} = \frac{V_2^2 \sin(\theta_{23}) - V_2 V_3 \sin(\theta_{23} + 0 - \delta_3)}{|Z_{23}|}$$

$$Q_{32} = \frac{V_3^2 \sin(\theta_{23}) - V_2 V_3 \sin(\theta_{23} - 0 + \delta_3)}{|Z_{23}|}$$

$$Q_{perte_{23}} = Q_{23} + Q_{32}$$

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

- **Ligne 3-4 (4-3) :**

$$P_{34} = \frac{V_3^2 \cos(\theta_{34}) - V_3 V_4 \cos(\theta_{34} + 0 - \delta_4)}{|Z_{34}|}$$

$$P_{43} = \frac{V_4^2 \cos(\theta_{34}) - V_3 V_4 \cos(\theta_{34} - 0 + \delta_4)}{|Z_{34}|}$$

$$p_{erte_{34}} = P_{34} + P_{43}$$

$$Q_{34} = \frac{V_3^2 \sin(\theta_{34}) - V_3 V_4 \sin(\theta_{34} + 0 - \delta_4)}{|Z_{34}|}$$

$$Q_{43} = \frac{V_4^2 \sin(\theta_{34}) - V_3 V_4 \sin(\theta_{34} - 0 + \delta_4)}{|Z_{34}|}$$

$$Q_{perte_{34}} = Q_{34} + Q_{43}$$

Puisque il n'y a pas de liaison entre les nœuds 1-4 et 2-4 alors :

$$P_{14} = P_{41} = P_{24} = P_{42} = 0$$

$$Q_{14} = Q_{41} = Q_{24} = Q_{42} = 0$$

VI-5) Les pertes :

$$Pertes = Perte_{12} + Perte_{13} + Perte_{23} + Perte_{34}$$

$$Q_{per}tes = Q_{perte_{12}} + Q_{perte_{13}} + Q_{perte_{23}} + Q_{perte_{34}}$$

VI-6) Les puissances actives et réactives générées :

$$P_{géné}rée = V_1^2 |Y_{11}| \cos(\theta_{11}) + V_2 V_1 |Y_{12}| \cos(\theta_{12} + \delta_2) + V_1 V_3 |Y_{13}| \cos(\theta_{13} + \delta_3) + P_{1c}$$

$$Q_{géné}rée = -(V_1^2 |Y_{11}| \sin(\theta_{11}) + V_2 V_1 |Y_{12}| \sin(\theta_{12} + \delta_2) + V_1 V_3 |Y_{13}| \sin(\theta_{13} + \delta_3)) + Q_{1c}$$

VI-7) Puissance supporté par une ligne :

$$S = UI\alpha = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

P, Q : puissances actives et réactives

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

S : puissance apparente

$U = 220 \text{ kV}$: Tension nominale

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

α : facteur de surcharge (on prend $\alpha = 1.5$)

$S = 220 * 0.6 * 1.5 = 198 \text{ MVA}$; C'est la puissance nominale supportée par une ligne.

VI-8) Application de l'algorithme de Newton-Raphson :

La suite itérative est la suivante :

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

Elle est amorcée à partir de X_0 (vecteur des valeurs initiales des tensions et leurs arguments) :

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

On peut écrire :

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

Calcul des éléments de la Jacobienne :

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = V_2 V_1 |Y_{12}| \sin(\theta_{12} - \delta_2) + V_2 V_3 |Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -V_2 V_3 |Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

$$\frac{\partial P_2}{\partial \delta_4} = 0$$

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

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3} = V_2 |Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_4} = 0$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -V_3 V_2 |Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2)$$

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

$$\frac{\partial P_3}{\partial \delta_4} = -V_3 V_4 |Y_{34}| \sin(\theta_{34} - \delta_3 + \delta_4)$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_2} = V_3 |Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2)$$

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

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_4} = V_3 |Y_{34}| \cos(\theta_{34} - \delta_3 + \delta_4)$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial \delta_2} = -V_4 V_2 |Y_{24}| \sin(\theta_{24} - \delta_4 + \delta_2)$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial \delta_3} = V_4 V_3 |Y_{34}| \sin(\theta_{34} - \delta_4 + \delta_3)$$

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

$$\frac{\partial P_4}{\partial \delta_4} = V_4 V_1 |Y_{14}| \sin(\theta_{14} - \delta_4) + V_4 V_2 |Y_{24}| \sin(\theta_{24} - \delta_4 + \delta_2) \\ + V_4 V_3 |Y_{34}| \sin(\theta_{34} - \delta_4 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial V_2} = V_4 |Y_{24}| \cos(\theta_{24} - \delta_4 + \delta_2)$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial V_3} = V_4 |Y_{34}| \cos(\theta_{34} - \delta_4 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial P_4}{\partial V_4} = V_1 |Y_{14}| \cos(\theta_{14} - \delta_4) + V_2 |Y_{24}| \cos(\theta_{24} - \delta_4 + \delta_2) \\ + V_3 |Y_{34}| \cos(\theta_{34} - \delta_4 + \delta_3) + 2V_4 |Y_{44}| \cos(\theta_{44})$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = V_2 V_1 |Y_{12}| \cos(\theta_{12} - \delta_2) + V_2 V_3 |Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -V_2 V_3 |Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_4} = 0$$

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

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_3} = -V_2 |Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$\frac{\partial Q_2}{\partial V_4} = 0$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} = -V_3 V_2 |Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2)$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} = V_3 V_1 |Y_{13}| \cos(\theta_{13} - \delta_3) + V_3 V_2 |Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2) \\ + V_3 V_4 |Y_{34}| \cos(\theta_{34} - \delta_3 + \delta_4)$$

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \delta_4} = -V_3 V_4 |Y_{34}| \cos(\theta_{34} - \delta_3 + \delta_4)$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_2} = -V_3 |Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_3 + \delta_2)$$

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

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_4} = -V_3 |Y_{34}| \sin(\theta_{34} - \delta_3 + \delta_4)$$

$$\frac{\partial Q_4}{\partial \delta_2} = -V_4 V_2 |Y_{24}| \cos(\theta_{24} - \delta_4 + \delta_2)$$

$$\frac{\partial Q_4}{\partial \delta_3} = -V_4 V_3 |Y_{34}| \cos(\theta_{34} - \delta_4 + \delta_3)$$

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

$$\frac{\partial Q_4}{\partial V_2} = -V_4 |Y_{24}| \sin(\theta_{24} - \delta_4 + \delta_2)$$

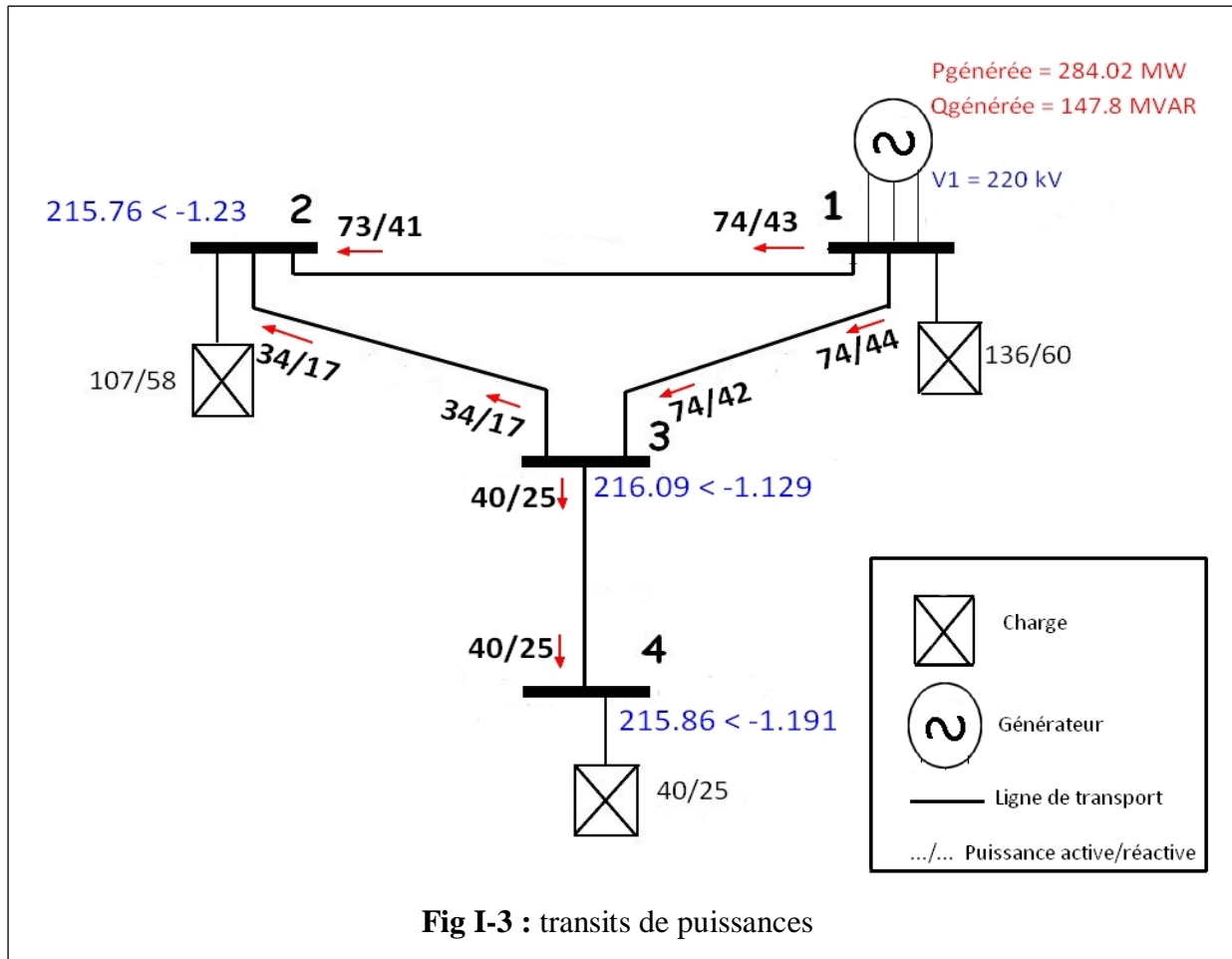
$$\frac{\partial Q_4}{\partial V_3} = -V_4 |Y_{34}| \sin(\theta_{34} - \delta_4 + \delta_3)$$

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

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

VI-9) Résultats de la simulation :

Les résultats sont obtenus en utilisant un script Matlab, et ils sont illustrés par la figure suivante :



Interprétation des résultats :

A partir de l'étude qui a été faite sur le réseau réel, il est tiré les remarques suivantes :

- Les pertes en puissance dans les lignes ne sont pas importantes.
- Les chutes de tension dans les nœuds ne sont pas importantes.
- Les transits de puissance dans les lignes n'ont pas atteint leurs valeurs limites de surcharge.

Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

VI-10) Etude du réseau avec l'arrivée de la zone industrielle:

En tenant compte de l'évolution et de l'augmentation de la consommation en surface (arrivée d'une zone industrielle dans le réseau étudié précédemment).

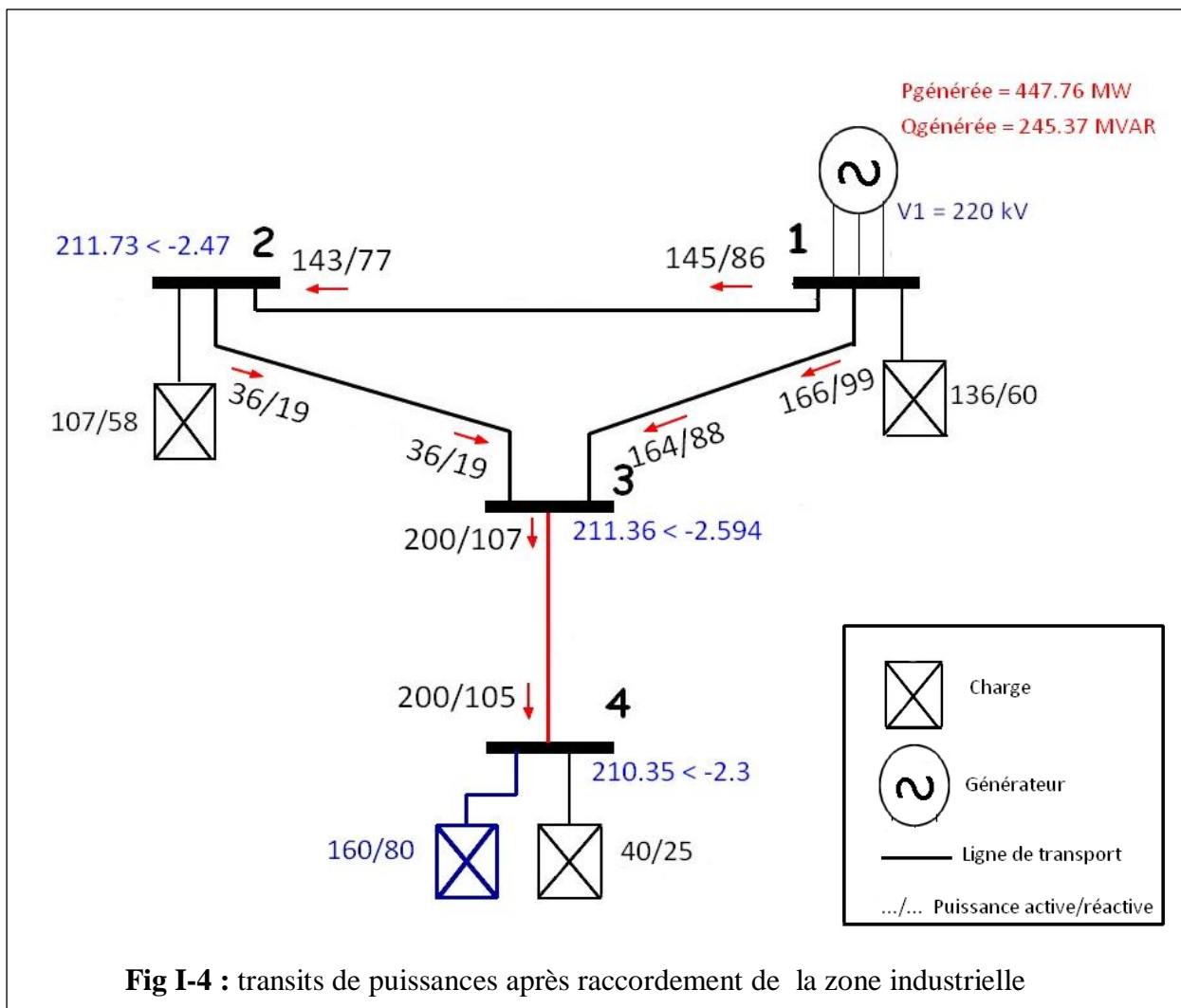
Dont la puissance mise à disposition (PMD) est :

$$P_{zone} = 160 \text{ MW}$$

$$Q_{zone} = 80 \text{ MVAR}$$

Avec un facteur de puissance de 0.90

Les résultats de l'étude sont donnés dans la figure suivante :



Chapitre I : Problèmes relatifs à l'écoulement de puissance dans un réseau électrique

Interprétation des résultats :

Avec l'arrivée de zone industrielle au nœud 4, et après l'analyse des résultats, on constate :

- Les pertes en puissance dans les lignes ne sont pas importantes par rapport à la puissance transitée.
- Les niveaux de tension ont chuté par rapport au premier cas.
- Les transits de puissance dans les lignes 1-2, 1-3 et 2-3 n'ont pas atteint la valeur nominale, donc les lignes ne sont pas surchargées.
- Dans la ligne 3-4, le transit de puissance a dépassé la valeur nominale donc la ligne est surchargée.

Conclusion :

Au cours du présent chapitre, il a été décrit le réseau électrique de puissance de la région de Tizi-Ouzou (à l'horizon 2010) auquel a été appliquée la méthode de Newton-Raphson pour la résolution du problème du load flow. Les résultats de simulation montrent que l'écoulement de puissance dans les lignes engendre beaucoup de problèmes de fonctionnement parmi lesquels, on peut citer la surcharge des lignes. Pour y remédier, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité (GRTE dans le cas de l'Algérie) est souvent contraint à revoir la configuration du réseau.



Chapitre II

Solutions classiques

Chapitre II : solutions classiques

Introduction :

Au cours du précédent chapitre, il a été exposé le problème du Load Flow dont la solution est nécessaire afin de déterminer les caractéristiques du réseau ainsi que son point de fonctionnement. Dans le réseau étudié précédemment, il a été constaté qu'avec l'avènement de la zone industrielle, un problème de surcharge de lignes est apparu, ce qui accélère la vétusté voire le déclenchement des lignes.

La surcharge des lignes est le problème le plus rencontré dans les réseaux électrique ; pour y remédier il existe plusieurs moyens. Dans le présent chapitre, on essaiera d'exposer quelques méthodes classiques pour parer au problème de surcharge de lignes, tel que : l'insertion de lignes en parallèle, le maillage ...etc.

I) Insertion d'une ligne de transport :

I-1) Principe :

Cette solution consiste à rajouter une autre ligne en parallèle avec celle qui est en surcharge. En fait, cela peut se voir comme une répartition du transit de puissance entre la ligne existante et celle rajoutée.

Le principe de cette méthode est expliqué dans la figure suivante :

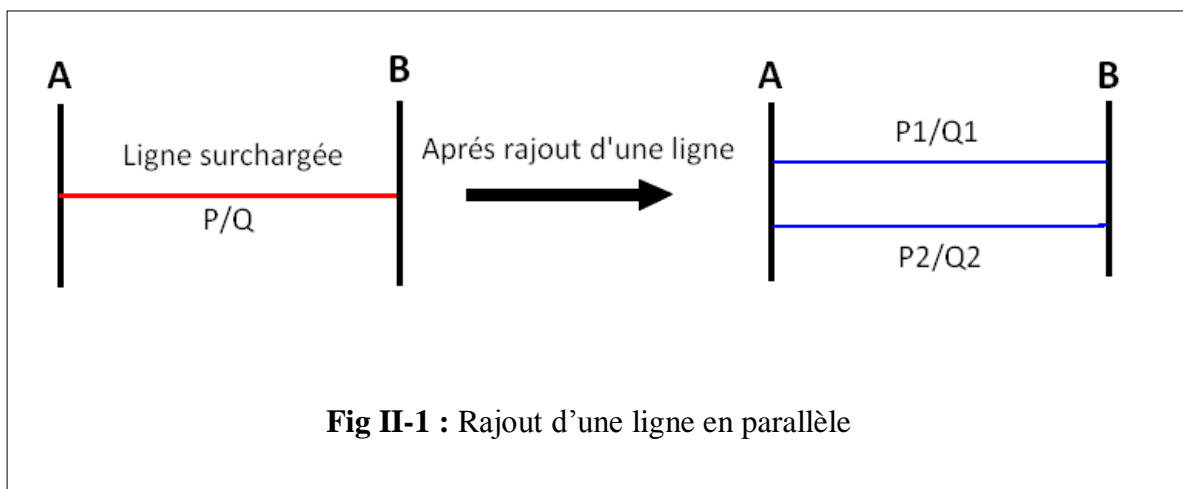


Fig II-1 : Rajout d'une ligne en parallèle

Chapitre II : solutions classiques

La puissance transitée entre les nœuds A et B est répartie entre les deux lignes proportionnellement à leurs admittances :

$$P = P_1 + P_2$$

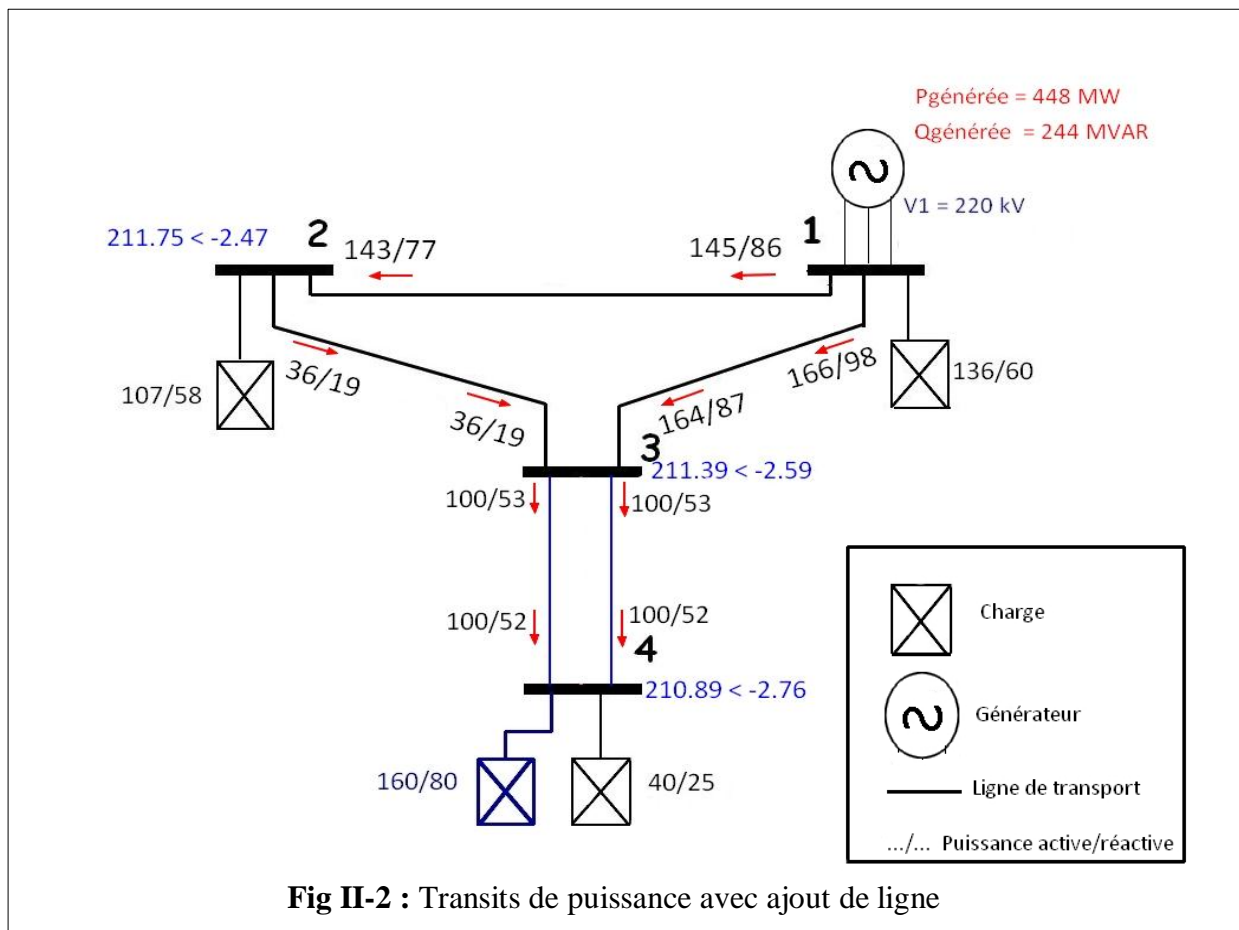
$$Q = Q_1 + Q_2$$

I-2) Application au réseau réel :

Dans le réseau précédent (en tenant compte de rajout de la zone industrielle), il a été constaté une surcharge de la ligne 3-4.

Pour y remédier, on propose d'ajouter une ligne en parallèle.

Les résultats de la simulation sont illustrés par la figure suivante :



Chapitre II : solutions classiques

Interprétation des résultats :

A partir des résultats obtenus, il a été constaté ce qui suit :

- Disparition de la surcharge entre les nœuds 3 et 4.
- Aucune modification sur les paramètres du réseau (transits de puissance, phaseurs de tension et puissance générée).

II) Maillage du réseau :

Un réseau électrique maillé est un réseau où les nœuds sont interconnectés entre eux. Il est conçu de façon à parer à toute défaillance d'un élément du réseau de transport ou d'une unité de production, en acheminant l'électricité par une autre partie du réseau ou en sollicitant d'autres unités de production, pour assurer une alimentation électrique fiable.

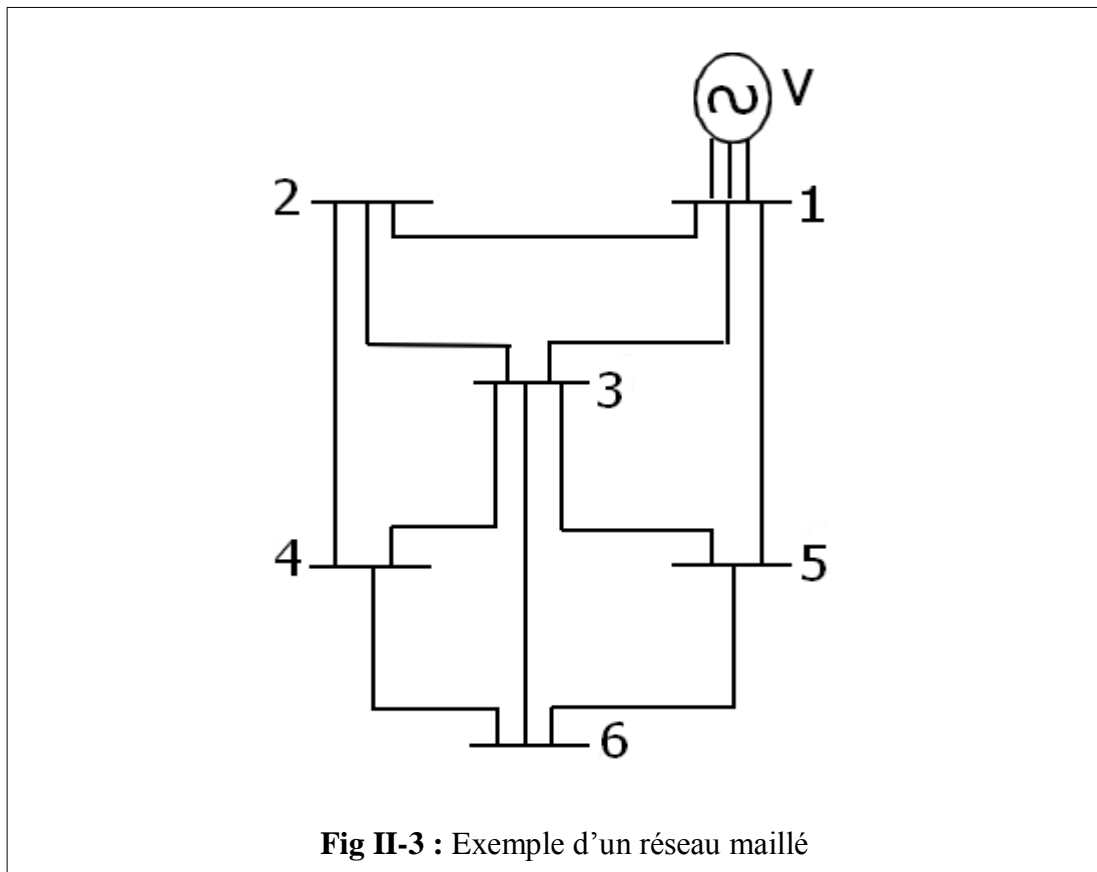


Fig II-3 : Exemple d'un réseau maillé

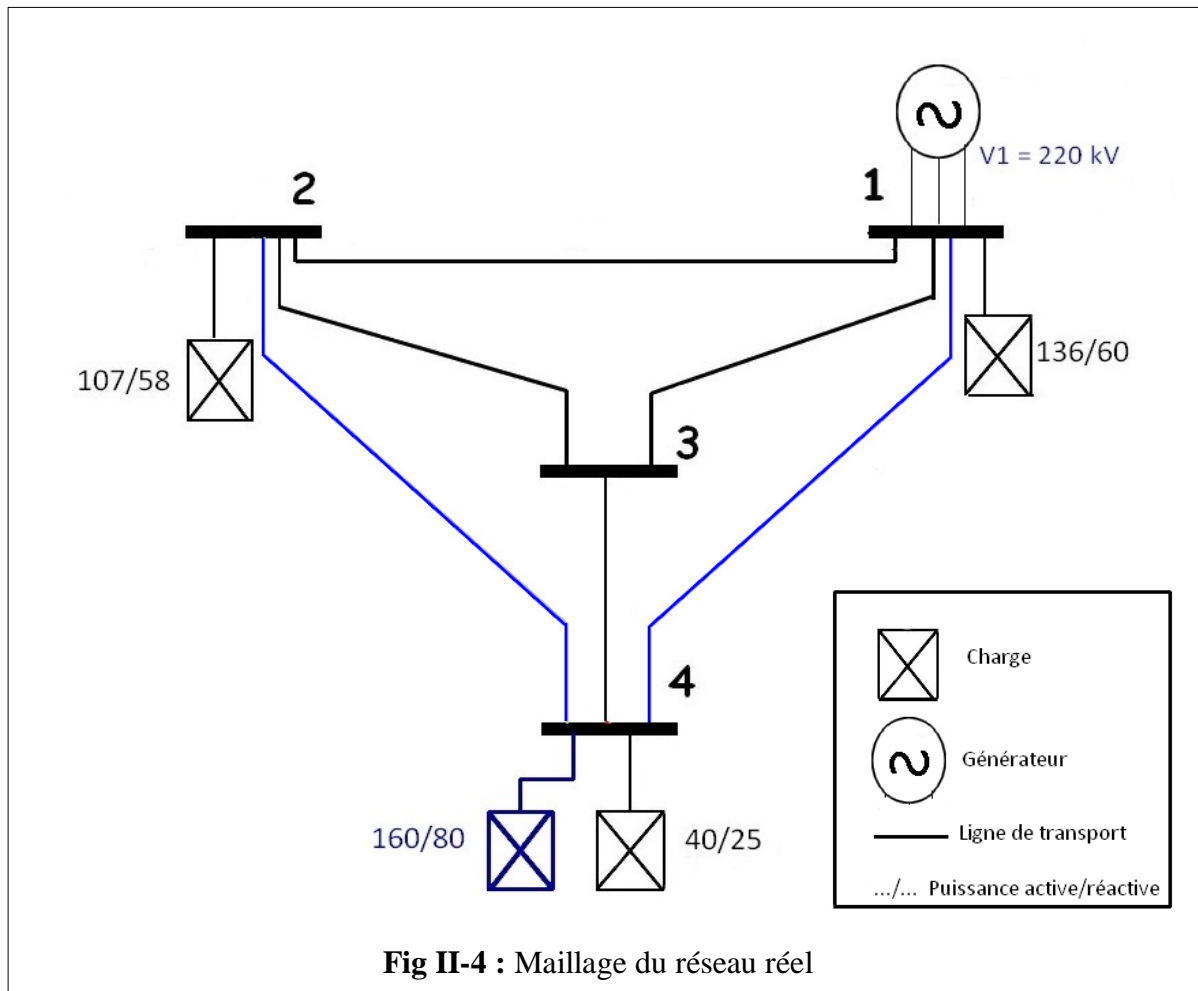
Chapitre II : solutions classiques

Dans le cas du réseau de la figure II-3, si par exemple la ligne 3-6 ne permettait pas de transporter de l'énergie (défaillance), le nœud 6 pourrait toujours être alimenté à travers les lignes 5-6 et 4-6, d'où l'intérêt évident du maillage.

II-1) Cas du réseau réel à 4 nœuds :

Dans le cas étudié précédemment (ajout d'une zone industrielle), il a été constaté que la ligne 3-4 était surchargée, ce qui engendre une défaillance et des coupures au niveau du nœud 4. Pour y remédier, on se propose de mailler le réseau en reliant le nœud 4 aux nœuds 2 et 1 en construisant de nouvelles lignes. Dans ce cas, la puissance consommée au niveau du nœud 4 sera transitée sur les lignes 1-4, 2-4 et 3-4, donc la surcharge sera éliminée.

Ainsi le nouveau réseau sera comme le montre la figure suivante :



Chapitre II : solutions classiques

III) Augmentation de la tension de source :

Précédemment, la tension de source était de 220kV. On simule le système pour une tension de source de 230kV, les résultats sont illustrés dans la figure suivante :

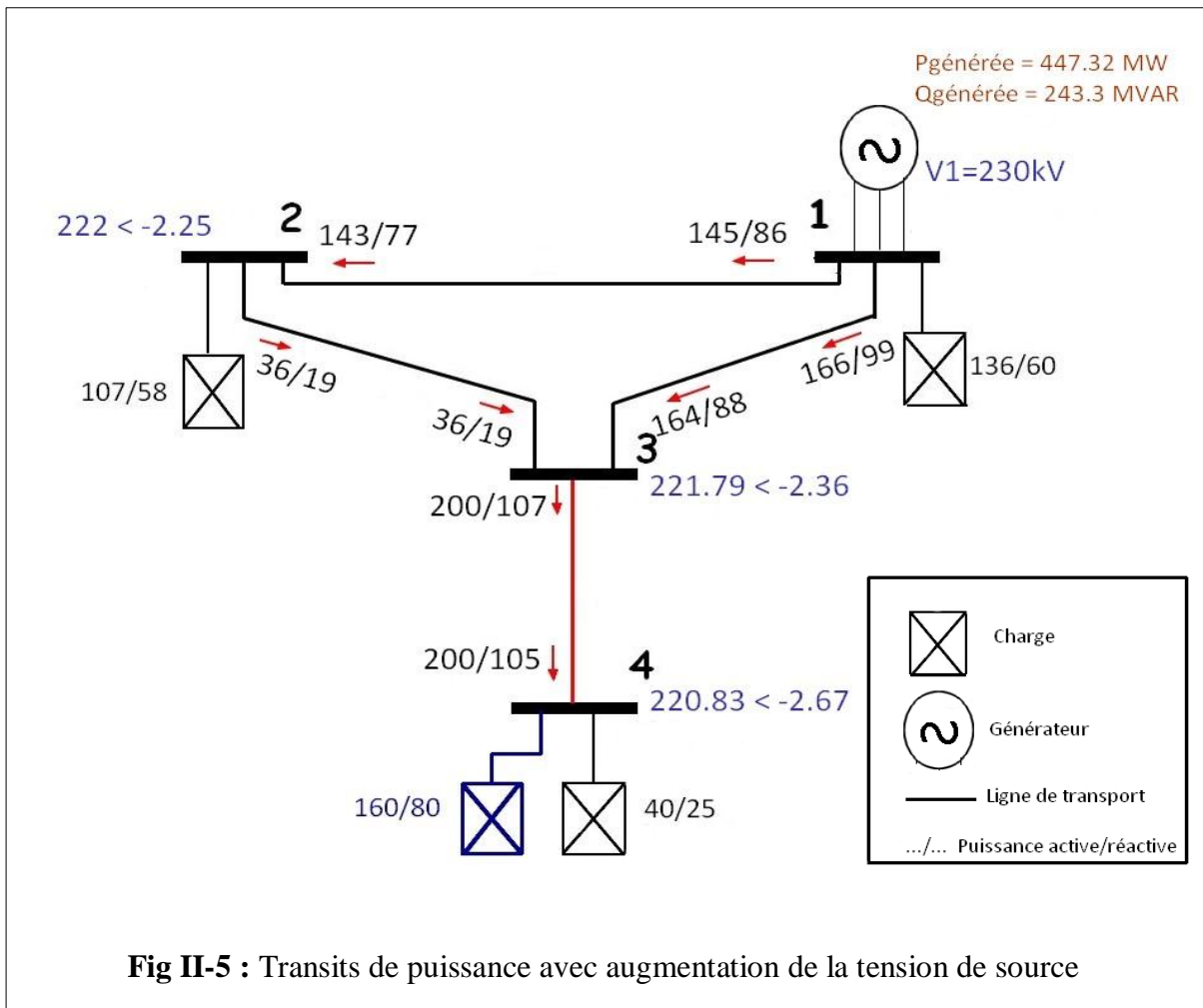


Fig II-5 : Transits de puissance avec augmentation de la tension de source

A partir des résultats obtenus, on constate que :

- Les transits de puissance n'ont pas changé.
- Les chutes de tension ont diminué.

Donc, cette méthode ne règle pas le problème de la surcharge des lignes mais elle diminue les chutes de tensions.

Chapitre II : solutions classiques

Conclusion :

Au cours de ce présent chapitre, il a été exposé certaines solutions classiques pour parer au problème de la surcharge des lignes d'un réseau électrique. A partir de l'étude de ces solutions, on a constaté que l'augmentation de la tension de source ne règle pas le problème de surcharge, aussi la construction de nouvelles lignes est à un cout très élevé et peut engendrer un encombrement du réseau. Pour cela, il faut penser à utiliser d'autres solutions qui sont plus fiables et moins encombrantes, ce qui sera présenté dans le chapitre suivant.



Chapitre III

Une solution moderne : le
SSSC

Introduction :

Au cours du chapitre précédent quelques solutions classiques qui permettaient de faire face au problème de surcharge des lignes ont été présentées. Ainsi, les lignes qui avaient des capacités de transit thermiquement limitée doivent être maintenant renforcées par d'autres lignes afin de diminuer l'impédance du réseau qui voit croître sa capacité de transport. Cependant le renforcement du réseau en lignes est contraint par l'environnement, l'encombrement des couloirs de servitude et le coût qui ne cesse de croître.

Face à ce problème et devant les contraintes environnementale, écologique et économique de reconstructions de nouvelles lignes, et dans le but de substituer au moyens classiques, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques et d'augmenter leurs capacités de transport.

Aujourd'hui la technologie des "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant et en contrôlant leurs capacités de transport, et assurer par conséquent suffisamment de flexibilité et stabilité au réseau dans le transport de l'énergie électrique.

I) Définition des FACTS :

FACTS est l'abréviation de «*Flexible AC Transmission Systems*».

Ce sont des systèmes de transmission en courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transport des lignes. [6]

La technologie des FACTS 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 des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. Ils permettent ainsi d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité au transport d'énergie.

II) Rôle des FACTS :

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 en ouverture/fermeture tel le thyristor GTO et le transistor IGBT. Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'induction et condensateur déclenchés 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 d'une vitesse de commande et ne rencontrent pas de problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite. [7]

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des phaseurs de tension. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux cas suivants : [7]

- Contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimer, les surcharges dans les lignes.
- Amélioration du plan de tension global du réseau.

III) Types de FACTS :

Les systèmes de transport à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance permettant d'améliorer l'exploitation des réseaux électriques. La technologie de ces systèmes (interrupteurs statiques) leur assure une vitesse très élevée relativement aux systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces systèmes n'est pas réduit au contrôle de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi de l'augmentation de la capacité effective de transport jusqu'aux limites thermiques des liaisons tout en maintenant voire améliorant la stabilité des réseaux électriques. [8]

En général, les FACTS sont divisés en trois grandes catégories :

Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

III-1) Compensateurs séries:

Ils sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général, ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission. [9]

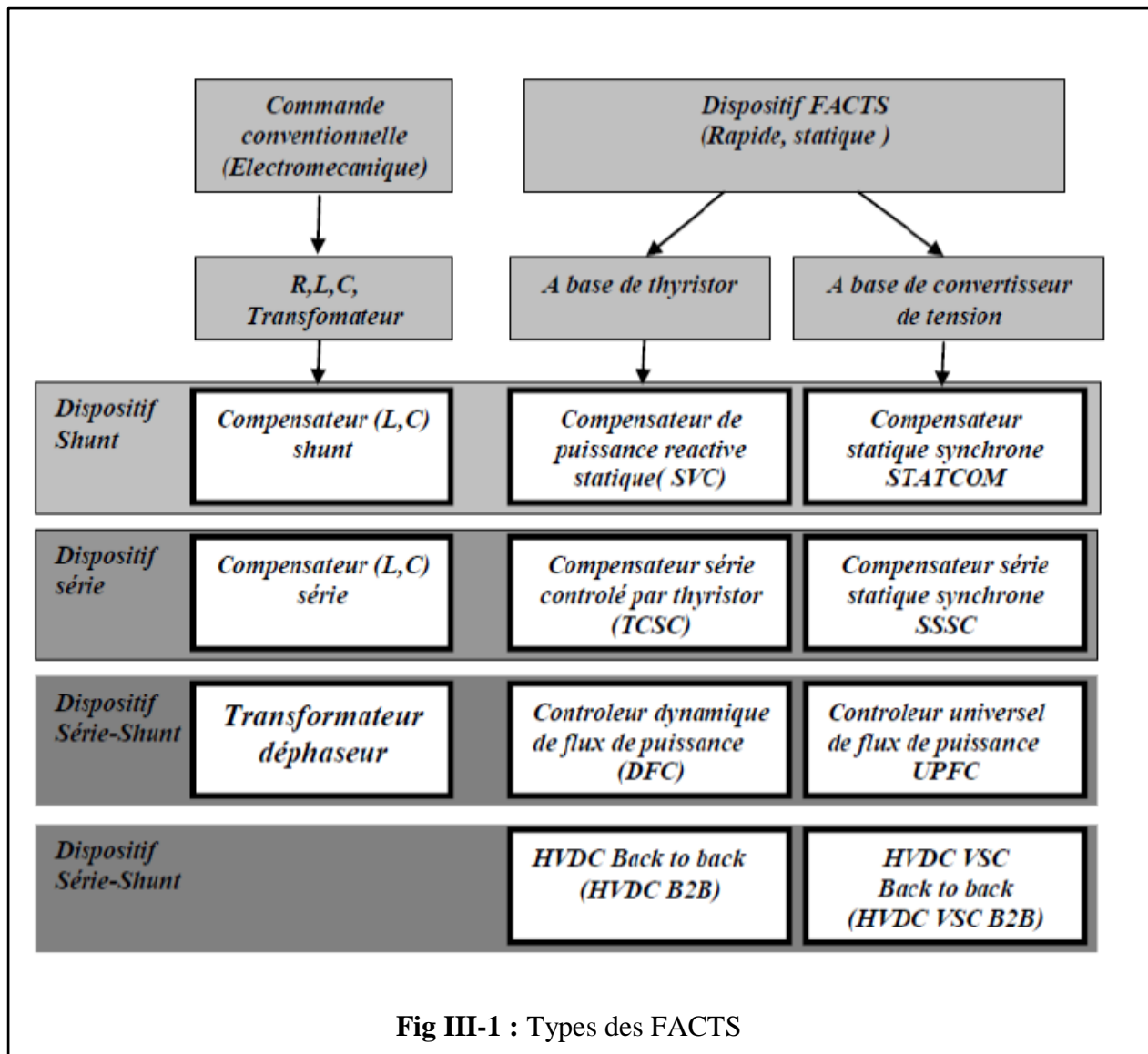
III-2) Compensateurs shunts (parallèles):

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau via le point de connexion pour principalement la compensation de la puissance réactive et par voie de conséquence le contrôle de la tension. [9]

III-3) Compensateurs hybrides série-shunt:

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. [9]

Les différents types de FACTS sont exposés à la figure suivante :



IV) Compensateur série de type SSSC : (*Static Synchronous Series Compensator*)

IV-1) Définition :

Selon IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

Le SSSC est un générateur synchrone statique qui fonctionne sans source d'énergie extérieur en tant que compensateur série dont la tension de sortie est en quadrature et indépendamment contrôlée avec le courant de ligne dans le but d'augmenter ou diminuer la

Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

chute de tension réactive à travers la ligne et par conséquent contrôler l'énergie électrique transportée. [9]

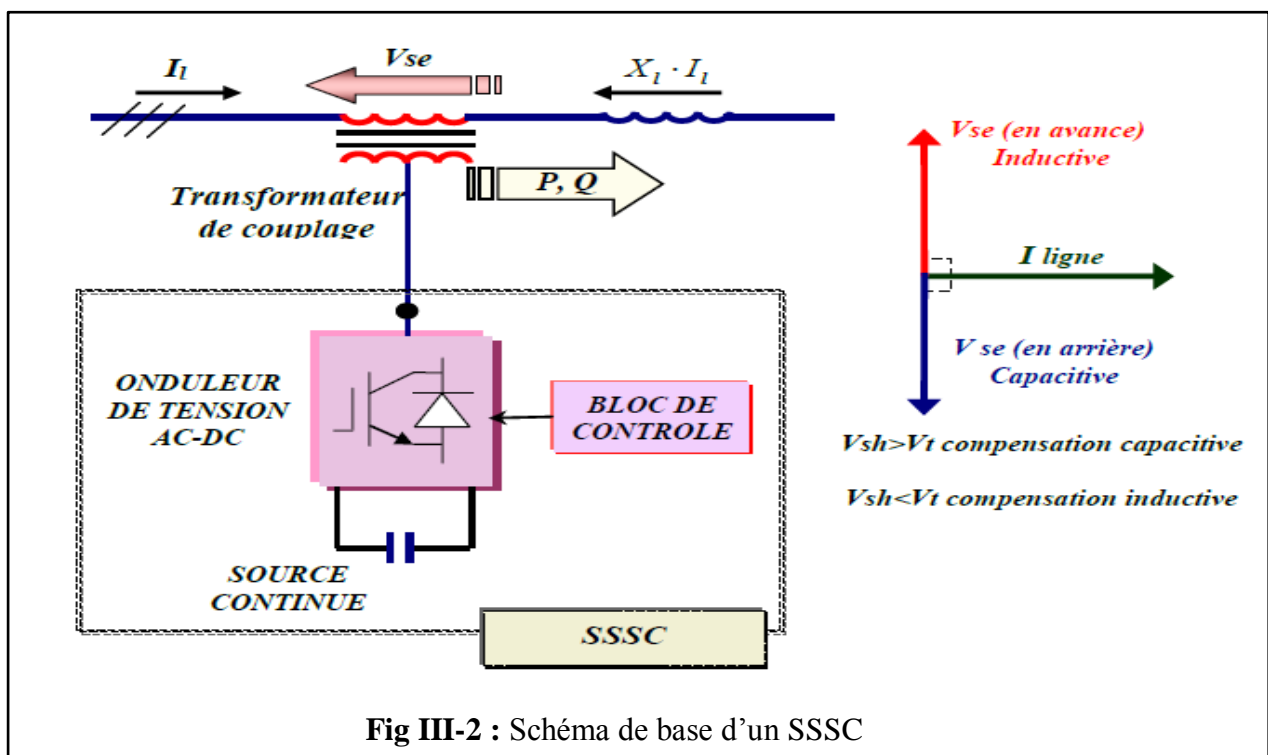
Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. [2]

IV-2) Principe de fonctionnement :

Le SSSC délivre une tension triphasée V_{se} , à la fréquence du réseau, contrôlable en amplitude et en phase afin d'augmenter ou diminuer la tension à travers la ligne représentée par son impédance inductive selon le mode de compensation capacitif ou inductif respectivement, mais comme l'impédance de la ligne ne varie pas réellement, c'est le courant dans la ligne qui sera affecté par cette variation et par conséquent les puissances correspondantes. [5]

Idéalement la tension V_{se} est à $(\pm 90^\circ)$ du courant de la ligne, ce qui fait qu'aucun échange de la puissance active est entre le réseau et le SSSC. Pratiquement il y a toujours une petite composante de cette tension V_{sed} en phase avec le courant I_l qui génère une petite quantité de la puissance active pour couvrir les pertes dans le convertisseur. [9]

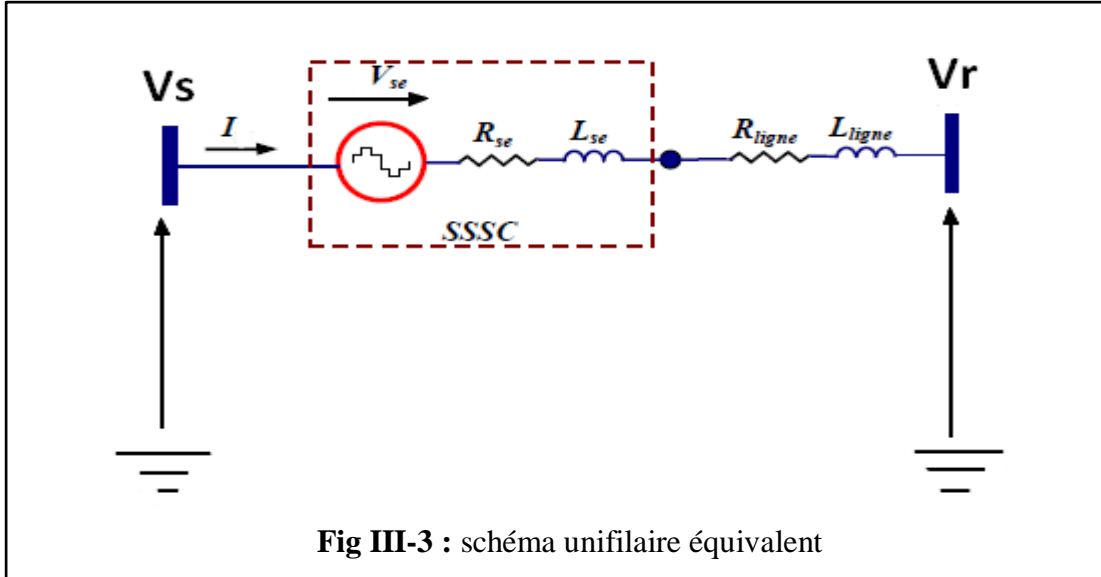
Le principe de fonctionnement du SSSC est représenté à la figure suivante :



Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

IV-3) Modélisation du SSSC :

Dans le réseau électrique, le SSSC est connecté en série avec la ligne de transport. Son schéma équivalent consiste donc en une source de tension en série avec l'impédance du transformateur de couplage, comme le montre la figure suivante :



Le courant de la ligne dépend en premier de la différence de potentiel des deux extrémités de la ligne, et en second, de la tension série injectée.

En appliquant la loi de Kirchhoff au système de la figure III-3 :

$$V_s + V_{se} - V_r - L \frac{dI}{dt} - RI = 0 \quad (\text{III-1})$$

Avec : $L = L_{se} + L_{ligne}$; $R = R_{se} + R_{ligne}$

$$L \frac{dI}{dt} + RI = V_s - V_r + V_{se} \quad (\text{III-2})$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{R}{L}I + \frac{V_s - V_r}{L} + \frac{V_{se}}{L} \quad (\text{III-3})$$

En projetant dans le repère de Park [Annexe]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{-R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_{sed} \\ V_{seq} \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_{sd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{rq} \end{pmatrix} \quad (\text{III-4})$$

Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

Ou encore :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_d = -\frac{R}{L} I_d + \frac{1}{L} V_{sed} + \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{rd}) + \omega I_q \\ \frac{d}{dt} I_q = -\frac{R}{L} I_q + \frac{1}{L} V_{seq} + \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{rq}) - \omega I_d \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

En appliquant la transformée de Laplace il résulte :

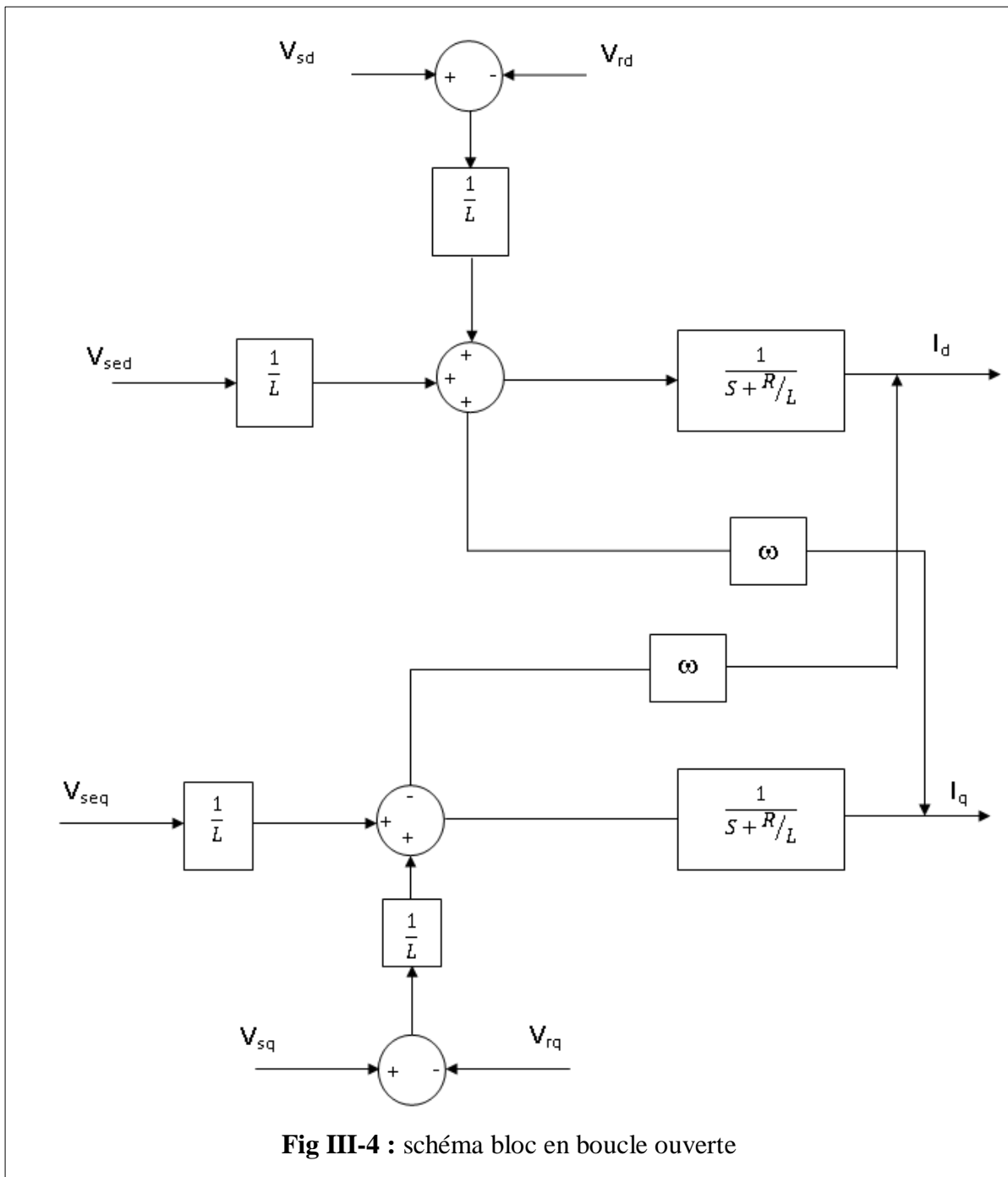
$$\begin{cases} S I_d(S) = -\frac{R}{L} I_d(S) + \frac{1}{L} V_{sed}(S) + \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{rd}) + \omega I_q \\ S I_q(S) = -\frac{R}{L} I_q(S) + \frac{1}{L} V_{seq}(S) + \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{rq}) - \omega I_d \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

Cette dernière équation peut s'écrire :

$$\begin{cases} \left(S + \frac{R}{L} \right) \underbrace{I_d(S)}_{Y_1} = \frac{1}{L} \underbrace{V_{sed}(S)}_{U_1} + \frac{1}{L} \underbrace{(V_{sd} - V_{rd})}_{\text{perturbation}} + \omega \underbrace{I_q(S)}_{Y_2} \\ \left(S + \frac{R}{L} \right) \underbrace{I_q(S)}_{Y_2} = \frac{1}{L} \underbrace{V_{seq}(S)}_{U_2} + \frac{1}{L} \underbrace{(V_{sq} - V_{rq})}_{\text{perturbation}} - \omega \underbrace{I_d(S)}_{Y_1} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

A partir des équations ci-dessus, le schéma bloc en boucle ouverte est représenté comme suit :



Le flux des puissances, est donné par les formules suivantes :

$$P = V_{rd}I_d + V_{rq}I_q \quad (\text{III-8})$$

$$Q = V_{rq}I_d - V_{rd}I_q \quad (\text{III-9})$$

Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

IV-4) Simulation du système en boucle ouverte :

Les simulations ont été élaborées à l'aide de Matlab/Simulink.

IV-4-1) Paramètres du système :

La ligne 3-4 qui était surchargée a pour impédance :

$$Z_{34} = R + jX = R + jL\omega = 0.31 + 1.445j$$

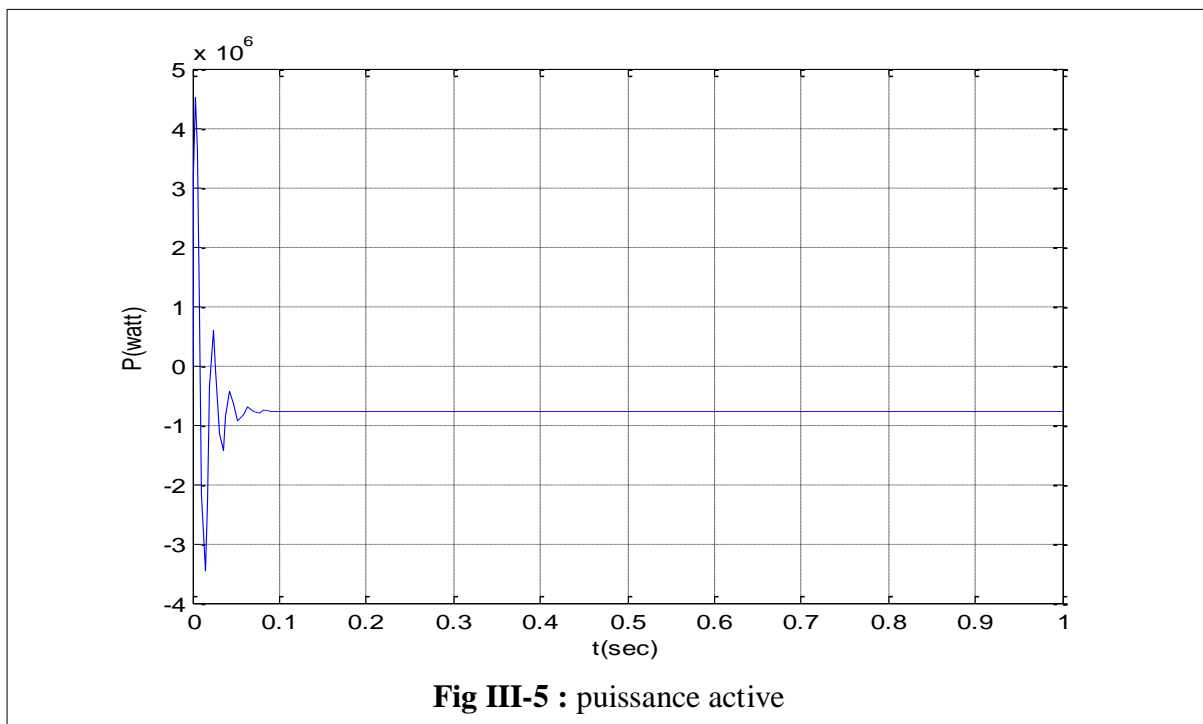
Donc :

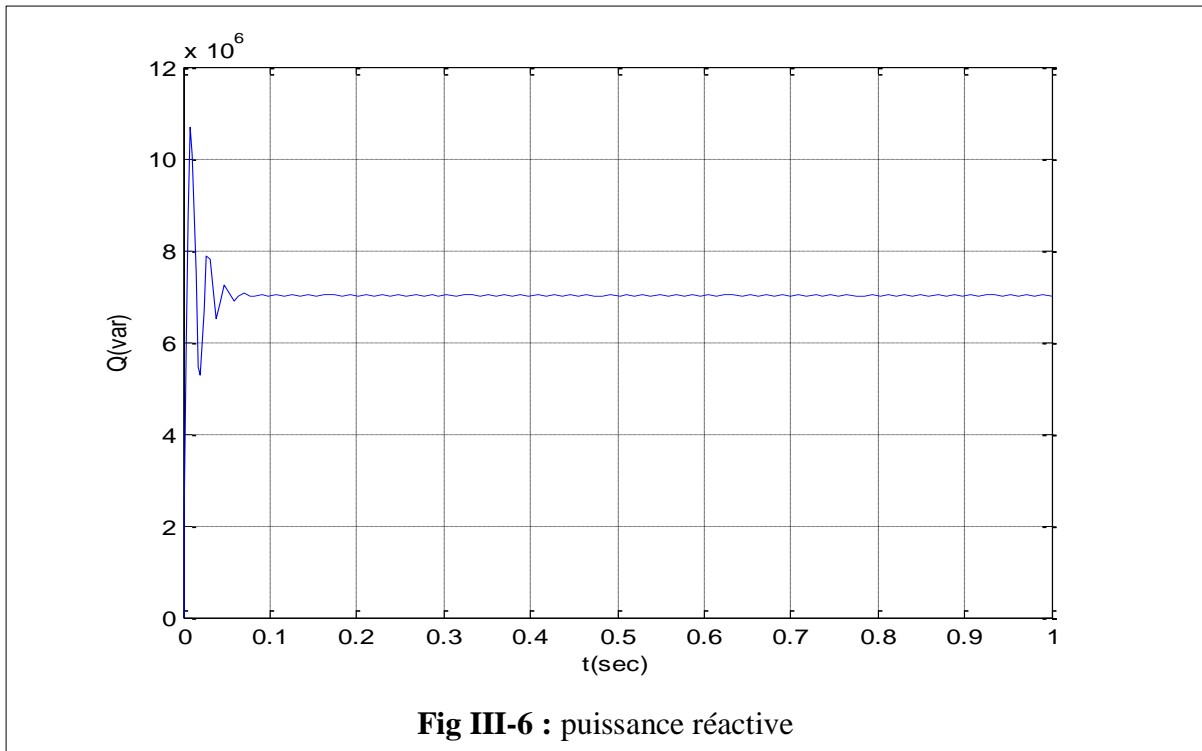
$$R = 0.31 \Omega$$

$$L = \frac{X}{\omega}, \text{ avec : } \omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/sec}$$

$$\text{D'où : } L = \frac{1.445}{314} = 0.0046 \text{ H}$$

IV-4-2) Résultats de simulation :





IV-5) Commande PI du flux de puissance :

Pour pouvoir piloter le SSSC dans la réalisation de l'objectif de commande qu'est la régulation des puissance active et réactive à leurs consignes prédéfinies par l'exploitant du réseau (Opérateur Système dans le cas de notre pays), il faudrait procéder comme suit :

IV-5-1) Découplage des courants :

A partir de l'équation (III-5) :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_d = -\frac{R}{L} I_d + \frac{1}{L} (V_{sed} + V_{sd} - V_{rd} + L\omega I_q) \\ \frac{d}{dt} I_q = -\frac{R}{L} I_q + \frac{1}{L} (V_{seq} + V_{sq} - V_{rq} - L\omega I_d) \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

En posant :

$$\begin{cases} U_{sed} = \frac{1}{L} (V_{sed} + V_{sd} - V_{rd} + L\omega I_q) \\ U_{seq} = \frac{1}{L} (V_{seq} + V_{sq} - V_{rq} - L\omega I_d) \end{cases}, \text{ (Commande virtuelle)}$$

Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

Le nouveau système (découplé) est tel que :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_d = -\frac{R}{L} I_d + U_{sed} \\ \frac{d}{dt} I_q = -\frac{R}{L} I_q + U_{seq} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

En appliquant la transformé de Laplace, il résulte :

$$\begin{cases} SI_d = -\frac{R}{L} I_d + U_{sed} \\ SI_q = -\frac{R}{L} I_q + U_{seq} \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

Ou encore :

$$\begin{cases} \frac{I_d}{U_{sed}} = \frac{1}{S + \frac{R}{L}} \\ \frac{I_q}{U_{seq}} = \frac{1}{S + \frac{R}{L}} \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

U_{sed} Et U_{seq} étant déjà calculé, d'où les expressions des signaux de commande réels :

$$\begin{cases} V_{sed} = LU_{sed} - L\omega I_q - V_{sd} + V_{rd} \\ V_{seq} = LU_{seq} + L\omega I_d - V_{sq} + V_{rq} \end{cases} \quad (\text{III-14})$$

Ainsi, le schéma bloc est représenté comme suit :

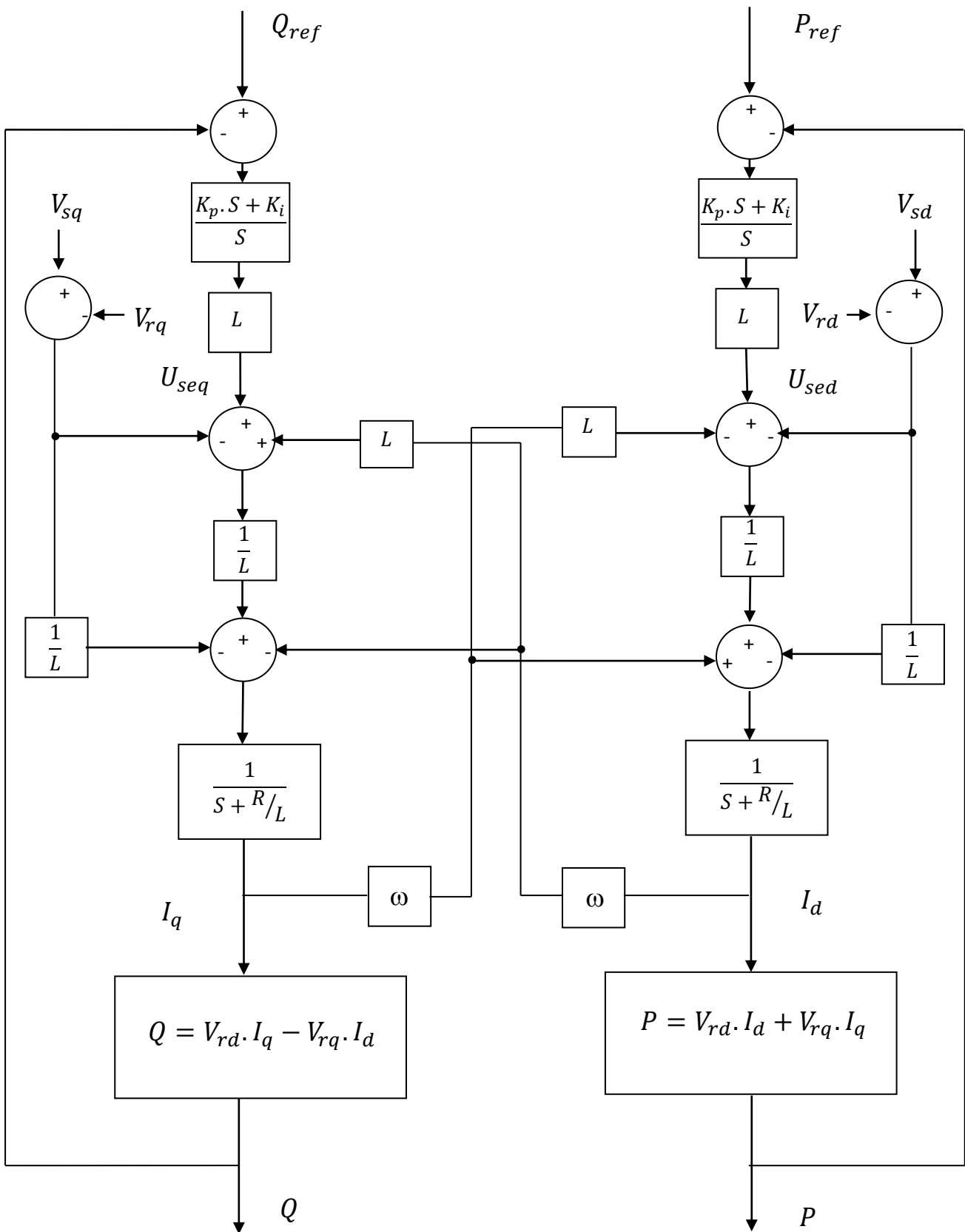


Fig III-7 : système de commande du SSSC

Chapitre III : Une solution moderne: le SSSC

IV-5-2) Définition des paramètres du régulateurs PI :

L'équation générale d'un PI est :

$$C(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right)$$

Les paramètres du régulateur sont choisis de telle façon à avoir un système qui suive la consigne (P_{ref}, Q_{ref}) et se stabilise rapidement (temps de réponse minimum).

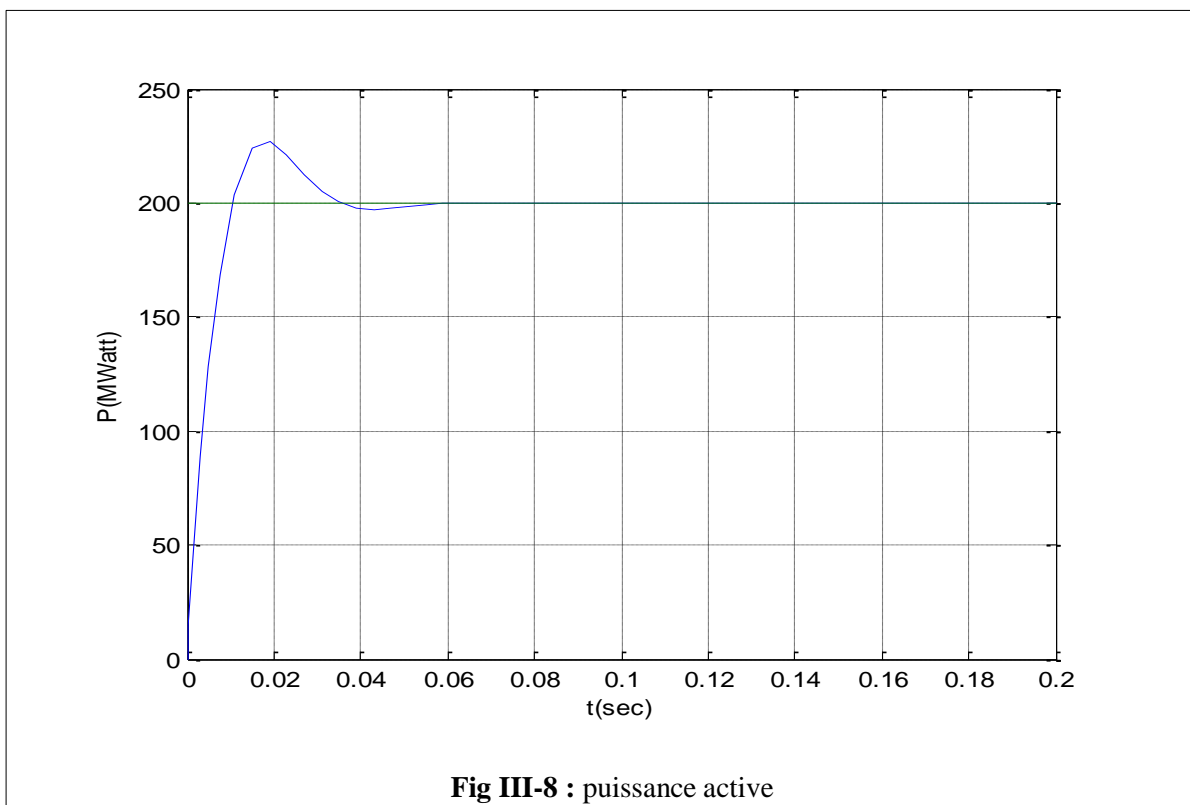
Les paramètres qui ont donné satisfaction sont tel que :

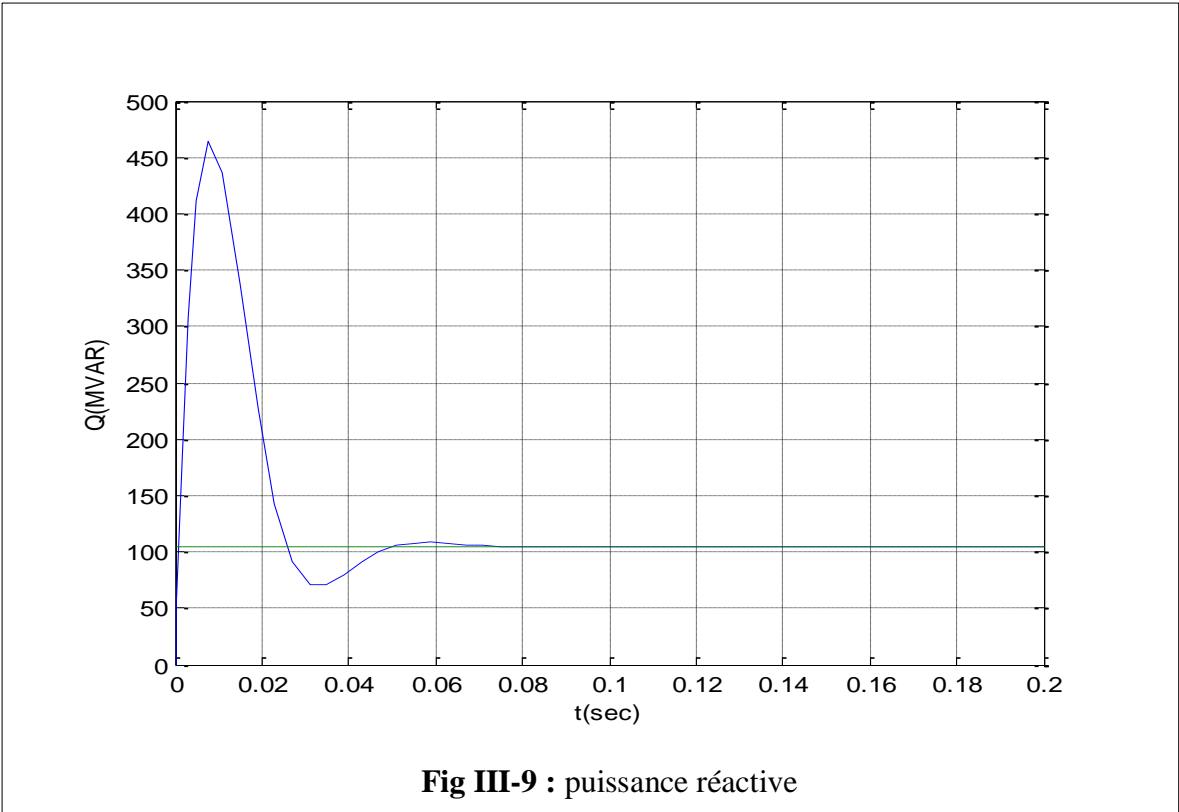
$$K_p = 2$$

$$K_i = 100$$

IV-5-3) Résultats de simulation :

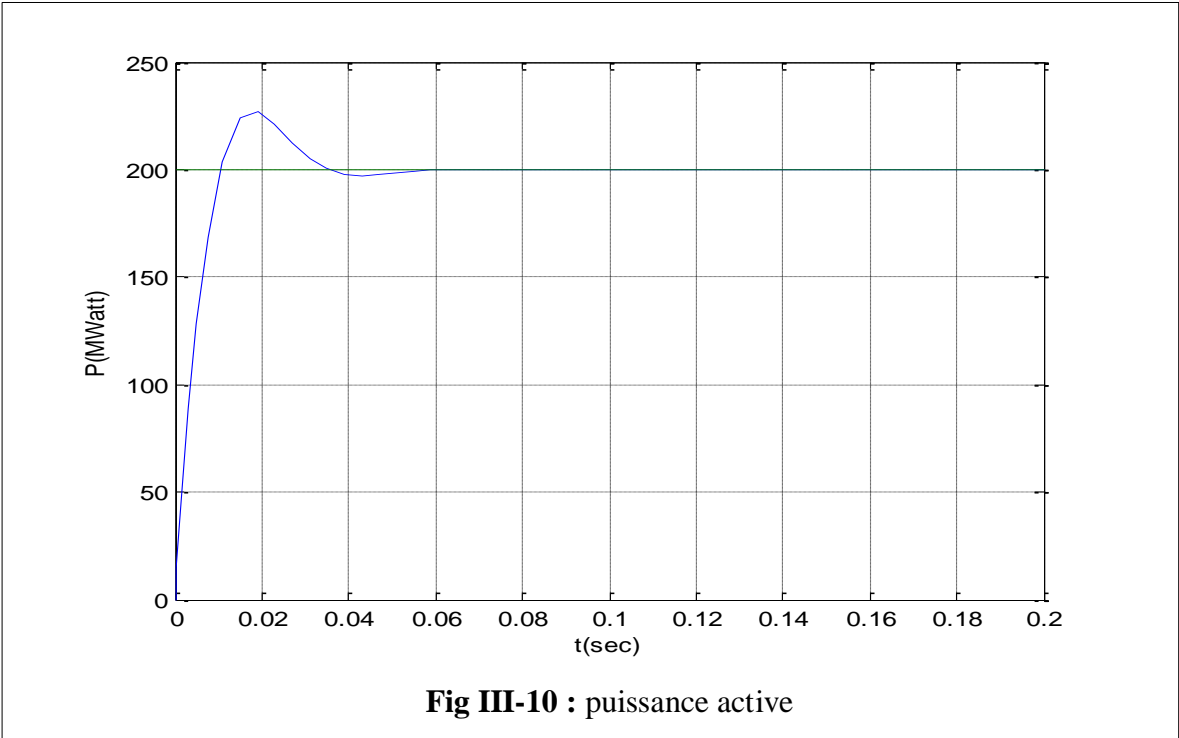
- Sans perturbations ($V_{sq} - V_{rq} = V_{sd} - V_{rd} = 0$):

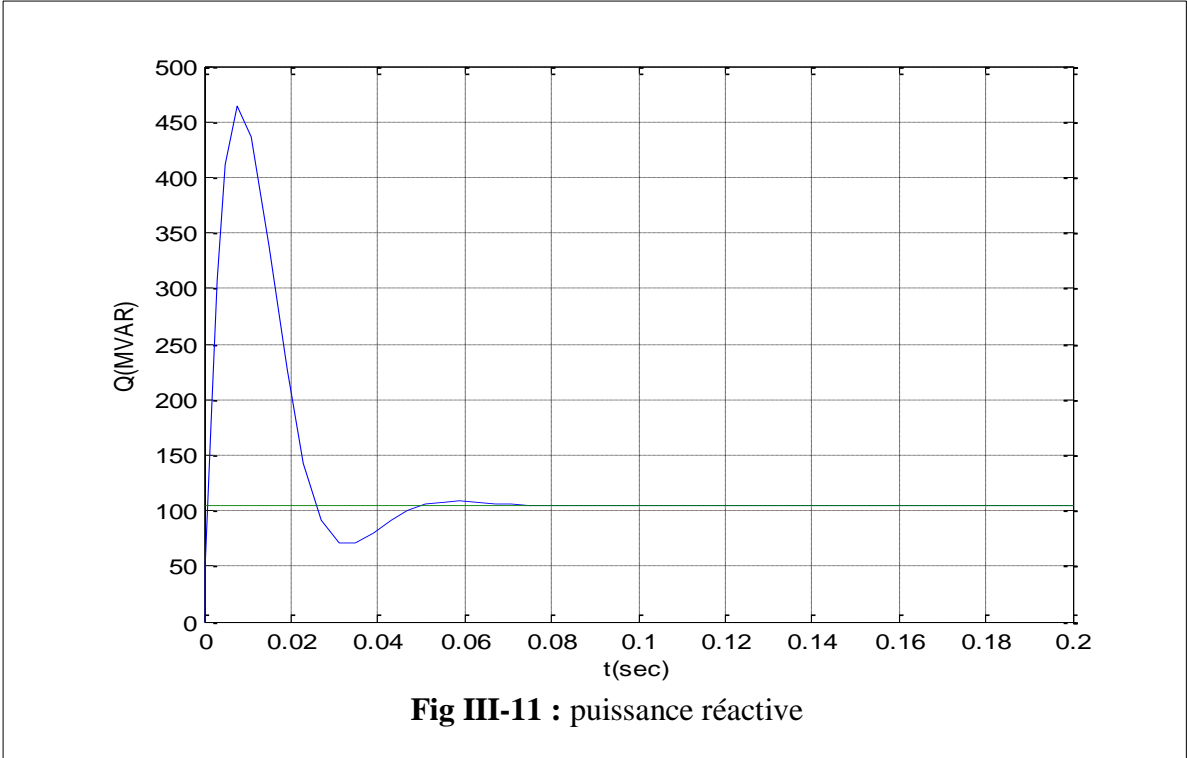




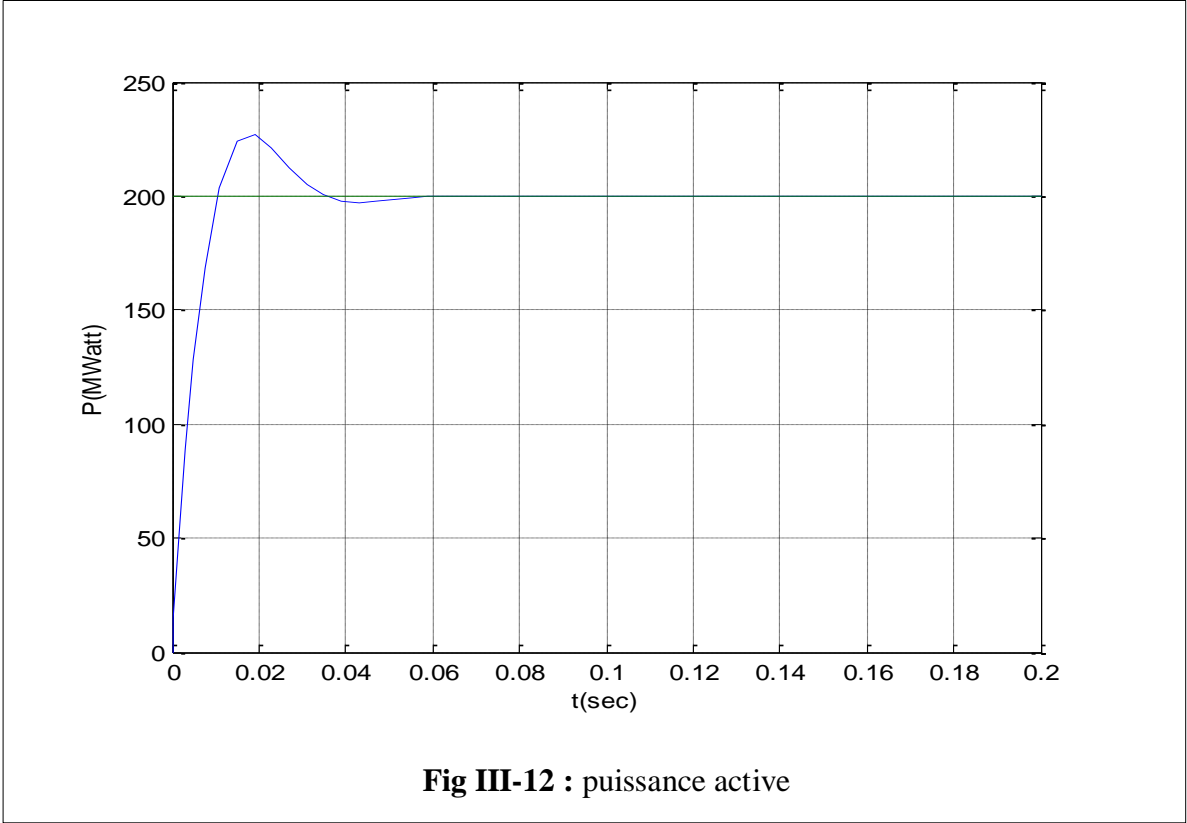
- Avec perturbations :

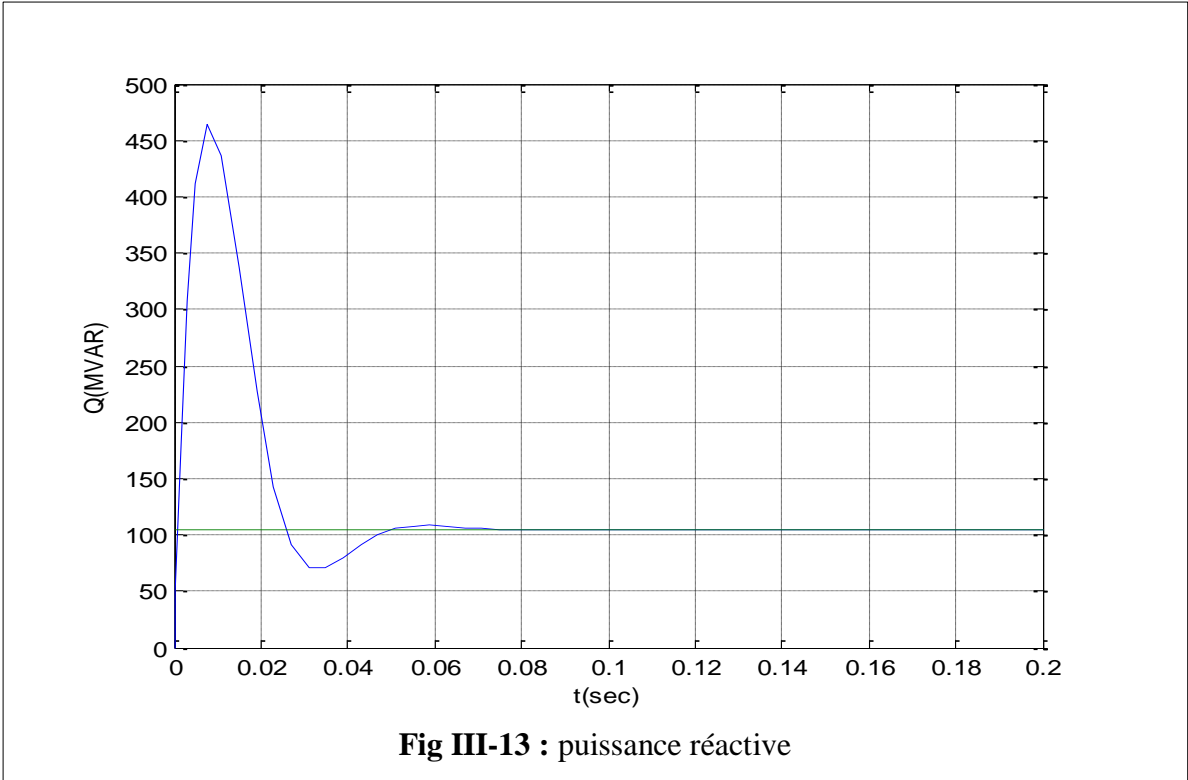
Pour : $V_{sq} = 100kV$, $V_{rq} = 50kV$, $V_{sd} - V_{rd} = 0$



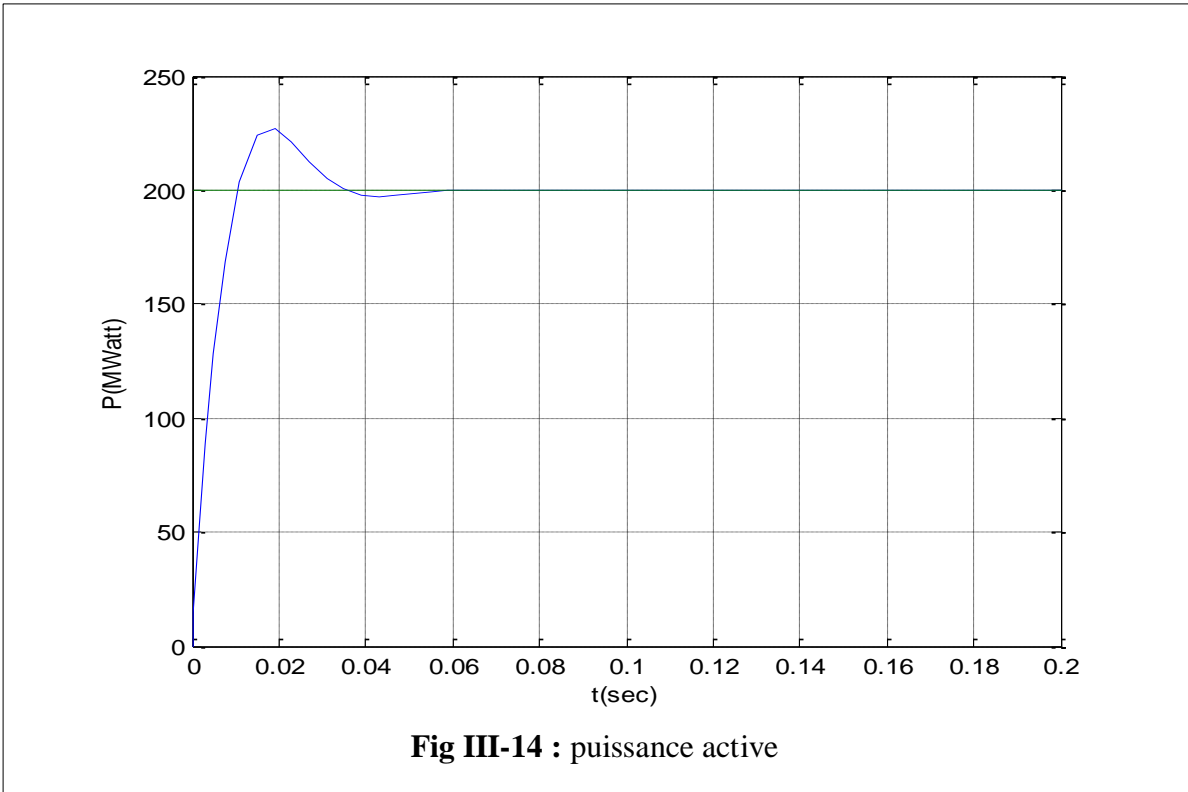


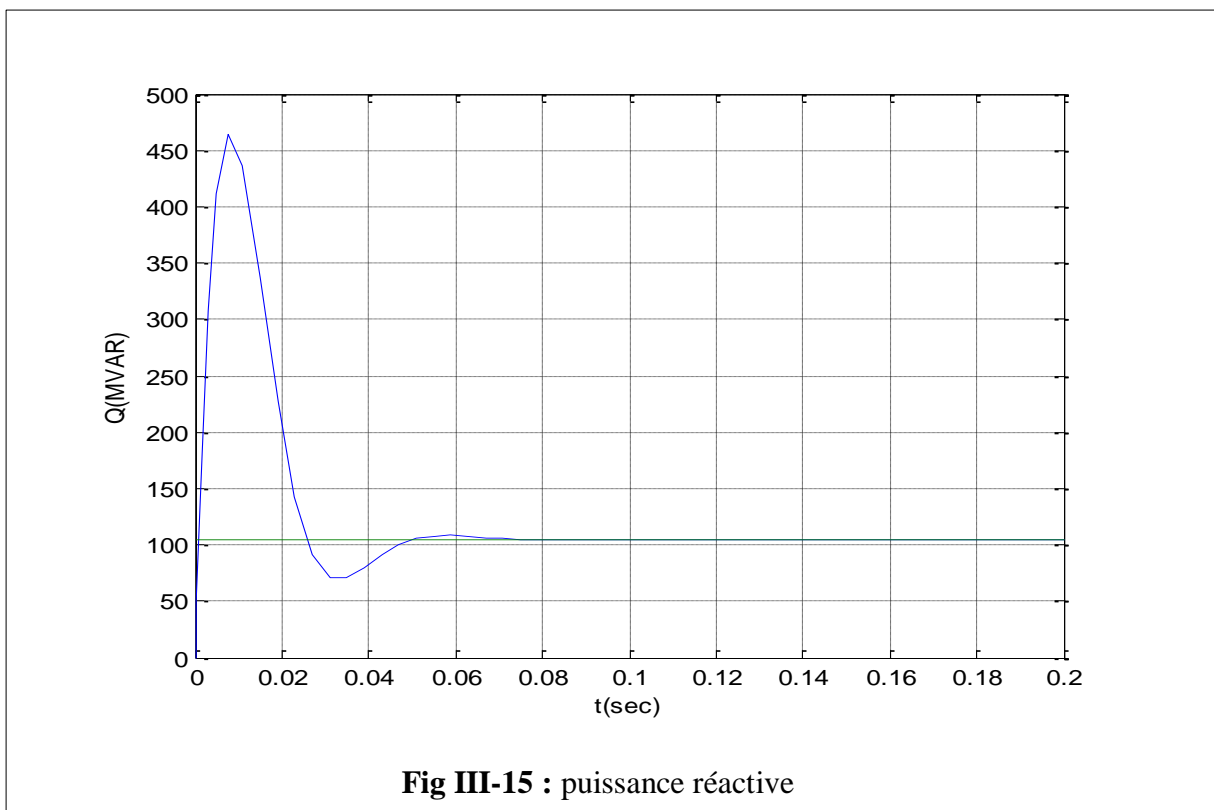
Pour : $V_{sq} - V_{rq} = 0$ kV, $V_{sd} = 100$ kV, $V_{rd} = 50$ kV





Pour : $V_{sq} = 100$ kV, $V_{rq} = 50$ kV, $V_{sd} = 100$ kV, $V_{rd} = 50$ kV





Interprétation des résultats :

A partir des résultats de simulation, il est constaté que :

- Le régime permanent est atteint rapidement ($t_{\text{active}} = 0,028\text{s}$, $t_{\text{réactive}} = 0,047\text{s}$).
- L'erreur statique est nulle.
- Néanmoins, il y a lieu de noter le fort dépassement (pic de 25MW/360 MVAR) qui est dû à l'insuffisance de ce type de commande classique dans la réalisation du découplage sans oublier le choix des paramètres de réglage du correcteur PI qui n'ont pas fait l'objet d'une détermination rigoureuse.

En simulant pour différentes valeurs des perturbations (V_{sd} , V_{rd} , V_{sq} , V_{rq}), il a été constaté que la réponse reste la même (l'effet de la perturbation est rejeté par le régulateur).

Conclusion :

Au cours de ce présent chapitre, il a été proposé une méthode moderne pour parer à la surcharge des lignes, qui est l'utilisation d'un dispositif FACTS de type SSSC.

Pour le contrôle du SSSC, la méthode de régulation PI a été adoptée en choisissant des paramètres de telle façon à aboutir à des résultats satisfaisant.

Les résultats de simulation montrent que les valeurs de puissances (active et réactive) désirées ont été atteintes, sachant qu'on peut toujours améliorer les résultats (élimination du dépassement) et cela en utilisant un autre type de commande plus exacte et plus robuste.



**Conclusion
générale**

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 flexible 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 de l'écoulement de puissance (Power 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 série SSSC capable de contrôler l'écoulement de puissance et éliminer ainsi les éventuelles surcharges de lignes. Pour atteindre cet objectif, il a fallu procéder par une étude de l'écoulement de puissance en régime permanent en deux scénarios (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 suggère la construction d'une nouvelle ligne en parallèle. Cette solution coûteuse et lente de construction peut être substituée par une autre solution moderne à base de l'électronique de puissance du type SSSC, lequel dispositif permet de soulager le réseau en contrôlant indépendamment le flux de puissances active et réactive par l'intermédiaire d'un dispositif de commande classique utilisant des corrections classiques de type PI.

Conclusion générale

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

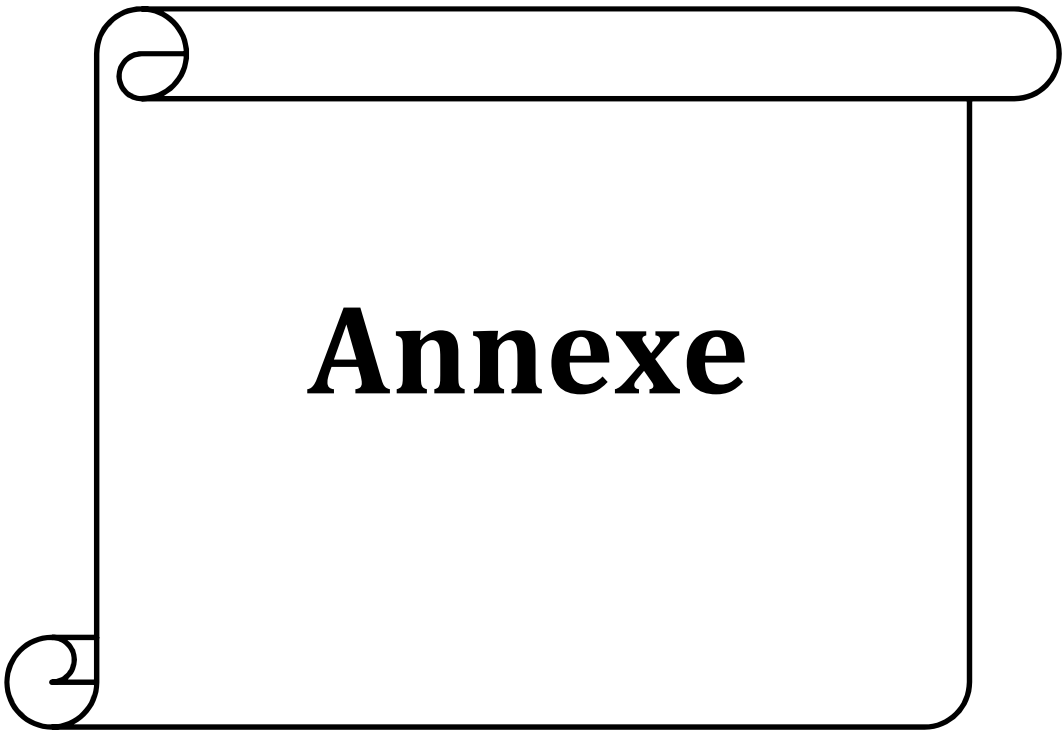
Comme perspective à ce travail, il serait intéressant d'étendre l'étude aux cas des clients industriels à demande irrégulière comme les hauts fourneaux et les fonderies à arc.



Bibliographie

Bibliographie

- (1) **Luc LASNE**, « ELECTROTECHNIQUE », DUNOD 2008.
- (2) **Rachida HAIMOUR**, « *Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, *ENSET – ORAN, 2008-2009*.
- (3) **M. Crappe**, « *Commande et régulation des réseaux électriques* », Lavoisier 2003.
- (4) **Djamel AMMOUR, Mohand Arezki SADOUR**, « *Mise en œuvre d'un outil de calcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques* », MEMOIRE D'INGENIEUR EN ELECTROTECHNIQUE, *Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou 2008*.
- (5) **Enrique ACHA**, « *FACTS, Modeling and simulation in power network* », John Wiley & Sons Ltd 2004.
- (6) **Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal**, « *Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control* », Springer 2005.
- (7) **Rabah BENABID**, « *Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, *UAT Laghouat 2007*.
- (8) **Louardi DELENDI**, « *Contrôle de l'écoulement de puissance active par systèmes FACTS* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, *Université de Batna 2009*.
- (9) **Abdelaàli ALIBI**, « *Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, *Université de Batna 2009*.



Annexe

Transformation de Park

La transformation de Park dite transformation d-q est la transformation des grandeurs électriques triphasées (espace vectoriel tridimensionnel) en grandeurs synchrones (espace vectoriel bidimensionnel). L'avantage marquant de cette transformation est que les grandeurs après transformation ne sont plus alternatives mais continues par conséquent, elles sont facilement manipulables.

Cette transformation se fait en deux étapes. La première étape consiste à projeter les grandeurs alternatives triphasées dans le repère diphasé fixe (α, β) (transformation de Concordia) ; dans ce repère les grandeurs biphasées restent sinusoïdales (figure). Vient par la suite la seconde étape (transformation d-q) qui à partir des projections dans le repère fixe renvoie les composantes du vecteur tournant dans le repère synchrone (tournant à la vitesse de synchronisme).

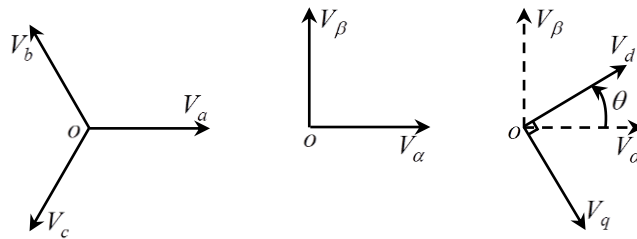


Fig 1. Transformation de Park d'un système de tension triphasé.

L'expression analytique de la transformation intermédiaire (Concordia) est donnée par:

$$\begin{pmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \\ V_0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

Où la matrice $\mathbf{T}_{\alpha\beta}$ est telle que :

Annexe : transformation de Park

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Avec : V_α : Première composante diphasée,

V_β : Seconde composante diphasée,

V_0 : Composante homopolaire,

$(V_a V_b V_c)^T$: Système de tension triphasée.

La matrice de transformation inverse de Concordia est donnée par:

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La transformation d-q est donnée par l'expression (rotation d'un angle θ par rapport à l'axe normal au plan (α, β) dans le sens direct)

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{dq} \begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{pmatrix}$$

Où : la matrice \mathbf{T}_{dq} est telle que :

$$\mathbf{T}_{dq} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Et où : θ est l'angle de synchronisme formé par les vecteurs \vec{V}_a et \vec{V}_d ; il est donné par l'expression :

$$\theta = a \tan 2(V_\beta, V_\alpha)$$

La matrice de transformation d-q inverse est donnée par l'expression :

Annexe : transformation de Park

$$\mathbf{T}_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Il est à noter que toutes les transformations précédentes sont orthogonales ; elles conservent donc la puissance instantanée dans les circuits équivalents.

La matrice de transformation de Park est le produit des matrices de transformation \mathbf{T}_{dq} et $\mathbf{T}_{\alpha\beta}$; elle est donnée par :

$$\mathbf{P} = \mathbf{T}_{dq} \cdot \mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La matrice inverse est :

$$\mathbf{P}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Transformation de Park d'une équation électrique d'un circuit triphasé inductif :

Le circuit de la figure 1 représente une phase d'un circuit triphasé inductif équilibré; il est régi par l'équation électrique donnée par :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & R + L \frac{d}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \dots (1)$$

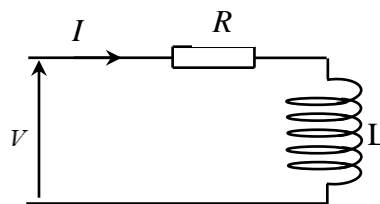


Fig 1 : Une phase d'un circuit électrique triphasé inductif.

Annexe : transformation de Park

Sous forme compacte, l'équation 1 peut être réécrite comme suit :

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{R}\mathbf{I}_{abc} + L\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{abc} \dots (2)$$

$$\text{Avec : } \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{I}_{abc} = (i_a \quad i_b \quad i_c)^T$$

$$\mathbf{V}_{abc} = (V_a \quad V_b \quad V_c)^T$$

Par application de la transformation inverse de Park à l'équation 2 ; il est possible d'écrire :

$$\mathbf{P}^{-1}\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{R}(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{dq}) + L\frac{d}{dt}(\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{dq}) \dots (3)$$

Soit en multipliant à gauche par \mathbf{P} :

$$\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{P}\mathbf{R}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{I}_{dq} + L\mathbf{P}\left(\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt}\mathbf{I}_{dq} + \mathbf{P}^{-1}\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{dq}\right) \dots (4)$$

Ce qui donne :

$$\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{R}\mathbf{I}_{dq} + L\left(\mathbf{P}\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt}\mathbf{I}_{dq} + \frac{d}{dt}\mathbf{I}_{dq}\right) \dots (5)$$

On démontre que :

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \dots (6) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \omega \end{aligned}$$

En remplaçant dans l'équation 5 le terme $\mathbf{P}\frac{d\mathbf{P}^{-1}}{dt}$ par son expression, l'équation 5 devient :

Annexe : transformation de Park

$$\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{R}\mathbf{I}_{dq} + \begin{bmatrix} 0 & -L\omega & 0 \\ L\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{I}_{dq} + L \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq} \dots (7)$$

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour le circuit diphasé équivalent :

$$\begin{cases} V_d = Ri_d - L\omega i_q + L \frac{di_d}{dt} \\ V_q = Ri_q + L\omega i_d + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \dots (8)$$