

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
جامعة حسيبة بن بوعلي  
Université Hassiba Ben Bouali Chlef  
Faculté des Sciences & Sciences de l'Ingénieur



Département d'électrotechnique  
Option : Réseaux électrique

MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER

PRESENTE PAR

Mme RAHMOUNI NAIMA

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

SUJET DU MEMOIRE

**Amélioration de la stabilité d'un réseau  
électrique à l'aide d'un UPFC à base d'un  
onduleur à trois niveaux**

Soutenu publiquement le 09/06/2009 devant le jury composé de:

Pr M. Benarous	professeur, Université de Chlef	PRESIDENT
Pr B. Belmadani	Professeur, Université de Chlef	ENCADREUR
Mr A. Zegaoui	Maitre assistant A, Université de Chlef	CO-ENCADREUR
Dr A. Smaili	Maitre de conférences A, U. de Tiaret	EXAMINATEUR
Dr T. Allaoui	Maitre de conférences B, U. de Tiaret	EXAMINATEUR



## **Remerciements**

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur B. BELMADANI, Professeur à l'université de Chlef. Je tiens tout d'abord à lui exprimer ma profonde gratitude pour m'avoir encadrer.

J'ai été profondément honoré que monsieur M. BENAROUS, professeur à l'université de Chlef, ait accepté d'examiner ce travail et de présider ce jury.

Que Monsieur T. ALLAOUI, maître de conférence à l'université de Tiaret, trouve l'expression de mes sincères remerciements pour l'intérêt qu'il a voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner. Ses remarques constructives ont contribués à améliorer ce document.

Je remercié également Monsieur A. smaili, maître de conférence à l'université de Tiaret , d'avoir accepter d'examiner mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur A. ZAGAOUI, maître Assistant Chargé de cour à l'université de Chlef pour la confiance qu'il m'a témoignée. Ses conseils, ses encouragements m'ont été très précieux et m'ont permis de bien mener mon travail.

Ma considération et ma reconnaissance vont également à Monsieur :

Le chef de département de l'électrotechnique de l'université de Chlef, Monsieur ALLOUACHE ainsi qu'à Monsieur M. BENYAMINA qui m'a facilitée beaucoup la tache.

J'exprime toute ma reconnaissance à mes parents et à mon mari qui m'ont encouragé tout au long de ces années d'études. Qu'ils reçoivent ici ma profonde gratitude pour leurs innombrables sacrifices. Merci.

# SOMMAIRE

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

**INTRODUCTION GENERALE** 2

## **CHAPITRE I : Les systèmes de transmission flexibles à courants alternatifs : Les FACTS**

I.1	Introduction	5
I.2	Les systèmes FACTS	5
	I.2.1 Les compensateurs parallèles :	3
	I.1.2.1 Le SVC Compensateurs statiques :	4
	I.1.2.2 Le STATCOM :	4
	I.2.2 Les compensateurs séries	4
	1.2.2.1 Le TCSC compensateur série commandée par thyristors :	4
	1.2.2.2 Le SSSC Compensateur statique synchrone série :	4
	I.2.3 Les compensateurs déphaseurs :	4
I.3	Structure du variateur de charge universel :	5
	I.3.1 Le compensateur synchrone statique (STATCOM)	6
	I.3.1.1 Principe de fonctionnement du STATCOM	7
	I.3.2 Les compensateurs série (SSSC) :	8
	I.3.2.1 Principe de fonctionnement du SSSC.	9
I.4	Conclusion :	13

## **CHAPITRE II : Modélisation et synthèse de réglage de l'UPFC simple et à trois niveaux**

II.1	Introduction	17
II.2	Structure de l'UPFC	17

II.2.1	Modélisation de l'UPFC à deux niveaux	19
II.2.1.1	Technique de la modulation de largeur d'impulsion d'un onduleur simple	23
II.2.2	Modélisation de l'UPFC à trois niveaux	24
II.2.2.1	La Stratégie de la génération de la commande MLI d'un onduleur à trois niveaux	27
II.3	La description du convertisseur statique DC/AC (l'onduleur)	28
II.4	Configuration du circuit de réglage de L'UPFC à trois niveaux	28
II.4.1	Différentes configurations de réglage	28
II.5	Découplage par régulateur PI	32
II.6	Réglage de la tension $V_{dc}$	33
II.7	Résultats de simulation	35
II.8	Conclusion	40

### **CHAPITRE III : L'influence de court-circuit sur la stabilité des réseaux électriques**

III.1	Introduction	42
III.2	La stabilité de l'angle de transport	42
III.2.1	La stabilité statique	42
III.2.2	la stabilité dynamique	42
III.2.3	La stabilité transitoire	43
III.3	Instabilité de la tension	44
III.3.1	Causes de l'instabilité de la tension	44
III.3.2	Importance et incidents	44
III.4	Description du réseau	46
III.4.1	Modélisation de la machine synchrone	46
III.4.2	Réactance de la machine synchrone en régime transitoire	47
III.4.3	Equations du mouvement de la machine	48
III.4.3.1	Modèle de la ligne	52
III.4.3.2	Modèle du transformateur	53
III.4.3.3	Modèle de la charge	53
III.5	Simulation du réseau électrique sans défaut	54

III.5.1	Les résultats des simulations du réseau sain	55
III.6	Etude et simulation du défaut	56
III.6.1	Défaut symétrique	57
III.6.1.1	Elimination rapide du défaut	58
III.6.1.2	Elimination lente du défaut	58
III.6.1.3	Simulation d'un défaut symétrique rapide	59
III.6.1.4	Simulation d'un défaut symétrique lent	62
III.6.2	Défaut asymétrique	65
III.6.2.1	Défaut monophasé	65
III.6.2.2	Défaut diphasé	68
III.7	Influence de la position de court-circuit	70
III.8	Conclusion	73

## **CHAPITRE IV : L'Apport de l'UPFC sur la stabilité des réseaux électriques**

IV.1	Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique	75
IV.1.1	Amélioration conventionnelle	75
IV.1.1.1	Régulation de la tension du générateur	75
IV.1.1.2	Régulation de vitesse :	77
IV.1.2	Amélioration de la stabilité par UPFC:	78
IV.2	Simulation	79
IV.3	Comparaison entre le STATCOM et l'UPFC	83
IV.4	Conclusion	83

## **CONCLUSION GENERALE** 86

## **ANNEXE A : Transformation de Park** 89

## **ANNEXE B : Topologie des onduleurs à trois niveaux** 90

## **BIBLIOGRAPHIE** 91

## Liste des symboles et abréviations

### Abréviations

UPFC Unified Power Flow Controller  
PI contrôleur Proportionnel Intégral

### Variables:

$V_{sa}$	tension de la source correspondante à la phase A
$V_{sb}$	tension de la source correspondante à la phase b
$V_{sc}$	tension de la source correspondante à la phase c
$V_{ra}$	tension au niveau du récepteur correspondante à la phase A
$V_{rb}$	tension au niveau du récepteur correspondante à la phase B
$V_{rc}$	tension au niveau du récepteur correspondante à la phase C
$U_{ca}$	tension aux bornes de la capacité de la ligne phase A
$U_{cb}$	tension aux bornes de la capacité de la ligne phase B
$U_{cc}$	tension aux bornes de la capacité de la ligne phase C
$V_{sd}$	composante de la tension de la source sur l'axe d
$V_{sq}$	composante de la tension de la source sur l'axe q
$V_{rd}$	composante de la tension au niveau du récepteur sur l'axe d
$V_{rq}$	composante de la tension au niveau du récepteur sur l'axe q
$V_{cd}$	composante de la tension générée par le compensateur série sur l'axe d
$V_{cq}$	composante de la tension générée par le compensateur série sur l'axe q
$i_a$	courant de ligne de la phase A
$i_b$	courant de ligne de la phase B
$i_c$	courant de ligne de la phase C
$i_d$	composante du courant de ligne sur l'axe d
$i_q$	composante du courant de ligne sur l'axe q
$i'_a$	courant fourni ou absorbé par le compensateur shunt à la phase A
$i'_b$	courant fourni ou absorbé par le compensateur shunt à la phase B
$i'_c$	courant fourni ou absorbé par le compensateur shunt à la phase C
$i_d$	composante du courant de ligne sur l'axe d
$i_q$	composante du courant de ligne sur l'axe q
$i'_d$	composante du courant fourni par le compensateur shunt sur l'axe d
$i'_q$	composante du courant fourni par le compensateur shunt sur l'axe q
$P_s$	puissance active fournie par la source

$Q_s$	puissance réactive fournie par la source
$P_r$	puissance active absorbée par le récepteur
$Q_r$	puissance réactive absorbée par le récepteur
$V_{dc}$	tension aux bornes de la capacité du circuit continu

### **Paramètres**

$L_s$  : inductance de la source + inductance de fuite du transformateur série ;

$R_l$  : résistance de la ligne + résistance de fuite du transformateur série ;

$L_l$  : inductance de la ligne ;

$C_l$  : capacité de la ligne ;

$L_r$  : inductance du récepteur ;

$L_p$  : inductance de fuite du transformateur parallèle

$R_p$  : résistance de fuite du transformateur parallèle

$C$  : capacité du circuit continu



## Introduction générale

A l'heure actuelle, une des formes d'énergie la plus utilisée par l'homme est l'énergie électrique. Néanmoins, elle présente deux particularités : elle n'est pratiquement pas disponible dans la nature et elle ne peut être stockée. En conséquence, toute l'énergie produite doit être transportée pour être automatiquement livrée aux consommateurs, c'est à dire qu'on doit veiller à établir un équilibre permanent entre la production et la consommation. Avec le développement qu'a connu le monde industriel, la demande sur cette énergie est considérable et ne cesse d'accroître, pour cela on doit prévoir de grands ouvrages et de très grandes installations pour sa production, son transport et sa distribution ou réaliser des centres d'interconnexion afin de répondre à tous ces besoins en quantité et en qualité.

Par ailleurs, la diversité des charges et les réseaux qui les relient aux sources possèdent souvent des inerties mécaniques et électriques qui rendent cet équilibre difficile, surtout qu'il est censé de garantir une fréquence et une tension du réseau, constantes. Ces phénomènes perturbent le bon écoulement des puissances d'où en résulte un dysfonctionnement de tout le système.

Devant cette exigence remarquable sur la qualité d'énergie et afin de réduire les effets néfastes des variations des tensions et de toutes les perturbations, qui affectent le réseau deux moyens sont possibles :

- Rendre le fonctionnement des processus industriels moins sensibles à ces variations, chose qui va nous demander de revoir tous les systèmes même ceux qui sont déjà fonctionnels pour les équiper de dispositifs capables d'assumer cette tâche, chose qui n'est pas facile à réaliser.

- Penser à installer des dispositifs sur les réseaux capables de s'opposer à toute sorte de perturbation, cette solution adéquate demeure souvent très coûteuse, car elle a fait l'objet de plusieurs recherches qui se sont traduites par une mise sur le marché d'une grande gamme de produits à base d'électronique de puissance dans le but de réduire pour ne pas dire éliminer et d'une manière définitive toute sorte de fluctuation.

Ces dispositifs regroupés sous le terme de FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System), possèdent une structure, relativement complexe, composée dans la plupart des cas de condensateurs et d'éléments de contrôle.

Ce travail s'articule autour de la stabilité transitoire d'un alternateur connecté à un réseau infini, en utilisant le plus puissant des dispositifs FACTS, l'UPFC (Unified Power Flow Controller) qui est constitué de deux parties :

- ❖ une partie en parallèle qui injecte du courant au réseau,
- ❖ une partie en série qui injecte une tension en série avec le réseau.

Un rappel sur les systèmes FACTS est abordé au premier chapitre.

Dans le deuxième chapitre on a développé le modèle mathématique de l'UPFC simple et à trois niveaux et on a évalué les performances de l'UPFC avec le contrôleur PI (Régulateur Proportionnel-Integral) traditionnel.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié l'influence

- ❖ des différents types du défaut,
- ❖ de la localisation de défaut,
- ❖ du régulateur de tension,

Sur la stabilité transitoire d'un alternateur connecté à un réseau infini.

Enfin, dans le quatrième chapitre on met en évidence l'efficacité de l'UPFC à trois niveaux pour améliorer la stabilité transitoire des réseaux électriques.

Nous terminons ce rapport par une conclusion générale avec des perspectives pour une éventuelle continuité de ce travail.

## CHAPITRE I

### Les systèmes de transmission flexibles à courants alternatifs

#### Les FACTS

##### **I.1 Introduction:**

Devant les problèmes de transit de puissance, 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.

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieures à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux.

##### **I.2 Les systèmes FACTS :**

Il a été prouvé que la stabilité transitoire d'un réseau électrique, peut être améliorée si le dispositif de compensation de l'énergie active et réactive peut réagir rapidement.

Les progrès réalisés en électronique de puissance, comportent soit des thyristors blocables par impulsion négative GTO, soit des transistors IGBT. L'avantage des transistors IGBT réside dans la rapidité des commutations et la facilité de l'élaboration des signaux de commande à appliquer au niveau de la base des transistors. Parmi la nouvelle famille des systèmes fondés sur l'électronique de puissance FACTS nous allons citer les principaux :

##### **I.2.1 Les compensateurs parallèles :**

Appelés aussi compensateurs de puissance réactive par le contrôle du flux de puissance réactive dans la ligne, ces compensateurs permettent de maintenir la tension du réseau au point de connexion, dans une plage bien déterminée.

Parmi ses caractéristiques, ils ne peuvent être branché qu'en parallèle, Les compensateurs parallèles les plus courants sont les suivants:

➤ **Le SVC Compensateurs statiques : [1] [13] [14]**

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

➤ **Le STATCOM : [4], [5]**

Compensateur statique synchrone est un substitut du SVC et il est utilisé pour le contrôle des niveaux de tension, et par conséquent pour améliorer la stabilité dynamique du système.

### **I.2.2 Les compensateurs séries**

Ou compensateurs d'impédance; par l'ajustement de l'impédance de la ligne; ce type de compensateur est capable de contrôler le transit de puissance active dans la ligne.

Les compensateurs séries les plus courants sont les suivants [3] [5] [15] :

➤ **Le TCSC compensateur série commandée par thyristors :**

On peut faire varier la puissance transitant par une ligne triphasée en y ajoutant un condensateur ou plus, possédant une réactance  $X_C$  connectée en série avec la ligne, chaque condensateur peut aussi être connecté en parallèle avec une réactance inductive  $X_a$  au moyen d'une valve Q. Celle-ci est composée de deux thyristors tête-bêche. Ceci a pour effet de varier la réactance inductive de la ligne

➤ **Le SSSC Compensateur statique synchrone série :**

C'est un substitut du TCSC, et peut être utilisé pour le contrôle du flux de puissance dans la ligne de transport, en changeant l'amplitude de la tension série injectée.

### **I.2.3 Les compensateurs déphaseurs :**

Ces compensateurs modifient le flux de puissance active et réactive sur une ligne en changeant seulement son angle électrique de transport [16] [17]. Les dispositifs les plus courants sont les suivants :

- Le transformateur déphaseur à thyristor.
- Déphaseur Statique.

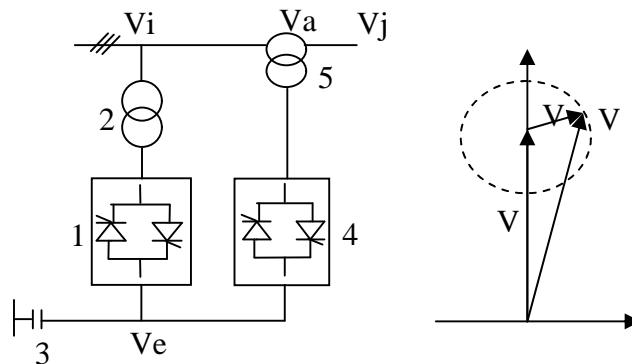
Parmi les différents systèmes de FACTS il existe un autre type de compensateur qui combine les fonctions des compensateurs série et parallèle.

Ce type de compensateur est appelé UPFC (Unified Power Flow Controller) ou variateur de charge universel et appelé aussi contrôleur unifié du flux de puissance.

### I.3 Structure du variateur de charge universel :

Son schéma de principe est donné par la figure I.1. Il est constitué de deux onduleurs triphasés de tension, qui peuvent faire varier les puissances active et réactive circulant sur une ligne à haute tension. Un premier convertisseur (1), appelé par la suite convertisseur parallèle, est connecté à la ligne à travers un transformateur (2). Ce convertisseur fonctionne comme redresseur à quatre quadrants afin de maintenir la tension  $V_e$  fixe sur le condensateur (3). Ce redresseur fournit de la puissance active à un deuxième convertisseur (4) connecté en série avec le réseau appelée par la suite convertisseur série, capable d'injecter une tension  $V_a$  en série avec la ligne à travers un transformateur (5). Cette tension additionnelle étant variable en module et en phase, il est possible, dans une certaine mesure, de faire varier la tension  $V_j$ .

Ainsi on peut modifier statiquement le flux des puissances active et réactive transmises par la ligne. Les convertisseurs sont interconnectés par un bus continu représenté par des condensateurs. [15].



**Figure I.1 :** Structure du variateur de charge

Ce dispositif est l'union d'un compensateur parallèle et d'un compensateur série. Il possède, à la fois, la fonctionnalité des deux compensateurs (STATCOM et SSSC). Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance

réactive. Et par conséquence il contrôle tous les paramètres associés au transit de puissance; la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport.

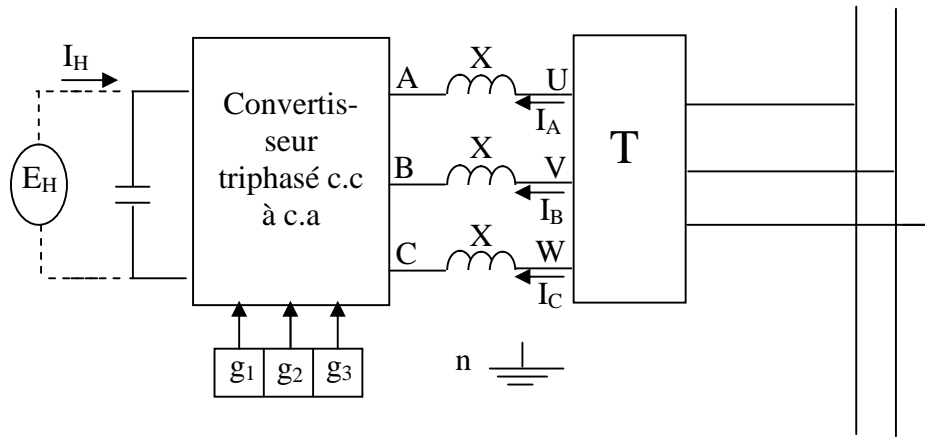
### **I.3.1 Le compensateur synchrone statique (STATCOM) [4] [5]:**

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

La figure (I-2) montre le schéma d'un STATCOM L'installation comprend une ligne triphasée à haute tension, un transformateur triphasé T ,trois réactances X, un convertisseur triphasé courant alternatif /courant continu, un condensateur C et une source de tension à courant continu  $E_H$ .

L'amplitude de la tension à courant alternatif entre les bornes A, B, et C est commandée, en faisant varier  $E_H$ , tandis que l'angle est commandé par l'enclenchement approprié des impulsions  $g_1, g_2, g_3$  appliquées aux gâchettes des thyristors GTO.

L'angle de la tension fondamentale entre les bornes A, B et C est ajustable à n'importe quelle valeur comprise entre zéro et  $360^\circ$ . Par contre, les tensions entre les bornes U, V et W au secondaire du transformateur demeurent essentiellement constantes. Elles reflètent les tensions entre les lignes de transport. En pratique, la réactance X de la figure (I-2) est la réactance de fuite du transformateur, le transformateur joue donc un double rôle: il transforme la tension et offre la réactance requise par la compensation [10]



**Figure I.2 : Schéma bloc d'un STATCOM**

### I.3.1.1 Principe de fonctionnement du STATCOM

D'après la figure (I-2). Le STATCOM peut générer ou absorber de la puissance réactive, le courant  $I_A$  doit être en avance ou en retard de  $90^\circ$  sur la tension  $E_{An}$ . Pour ce faire, il faut ajuster l'angle de  $E_{An}$  afin qu'elle soit en phase avec  $E_{Un}$ . Examinons maintenant trois cas spécifiques :

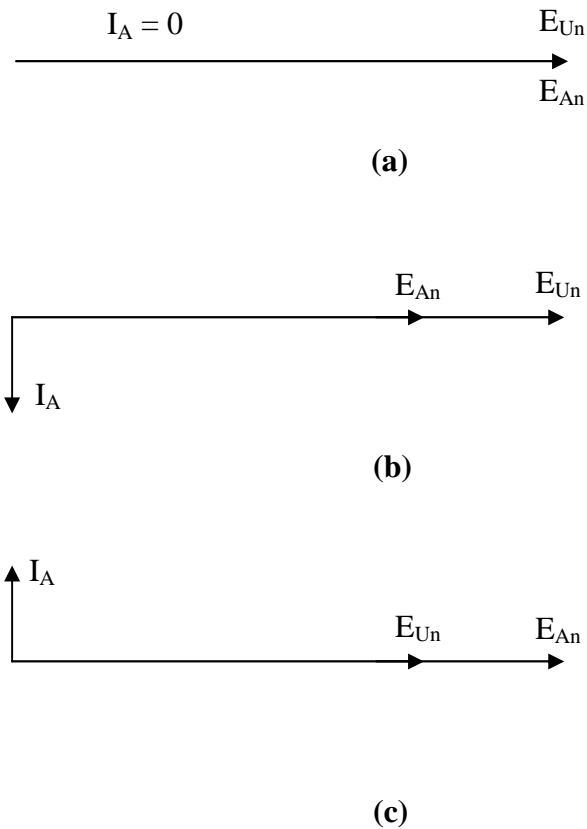
- 1) Si  $E_{An} = E_{Un}$  figure. (I-3-a) le courant  $I_A$  est nul, donc la compensation est nulle.
- 2) Si  $E_{An}$  est inférieure à  $E_{Un}$ , un courant  $I_A$  circulera dans la réactance  $X$ , ce courant sera en retard de  $90^\circ$  sur  $E_{Un}$  figure. (I-3-b) sa valeur est donnée par :

$$I_A = \frac{E_{Un} - E_{An}}{X} \quad (I-1)$$

Dans ce cas le compensateur absorbe de la puissance réactive de la ligne de transport.

La puissance réactive de la phase A équivaut à  $I_A E_{An}$  (VAR) et les deux autres phases en absorbent autant. Le compensateur se comporte donc comme une immense inductance, même si aucune bobine n'est présente et aucun champ magnétique n'est produit.

- 3) Si  $E_{An}$  est supérieur à  $E_{Un}$ , le courant  $I_A$  sera en avance de  $90^\circ$  sur  $E_{Un}$  indiqué figure (I-3-c) sa valeur est donnée par l'équation (I-1), sauf que  $I_A$  est maintenant négatif. Par conséquent, le convertisseur fournit de la puissance réactive à la ligne de transport. Le convertisseur se comporte comme un immense condensateur, même s'il n'y a pas de plaques électrostatiques, et aucun champ électrique.



**Figure I.3 :** le déphasage entre  $E_{Un}$  et  $I$  (+90 ou -90) dépend de la valeur de  $E_{An}$

**I.3.2 Les compensateurs série (SSSC) :**

Le compensateur SSSC est constitué d'un convertisseur statique avec une source d'énergie qui est connecté en série avec la ligne de transport de tension comme l'indique la figure (I.4).

Le SSSC permet de commander la puissance active transportée sur une ligne. Pour expliquer son fonctionnement, considérons deux régions: source et récepteur; qui sont tellement puissantes tel que leurs tensions et leurs angles respectifs ne s'influencent pas. C'est-à-dire qu'en régime normal, ce qui se passe dans la région source n'affecte pas la région réceptrice, et vice versa voir Figure (I-4).



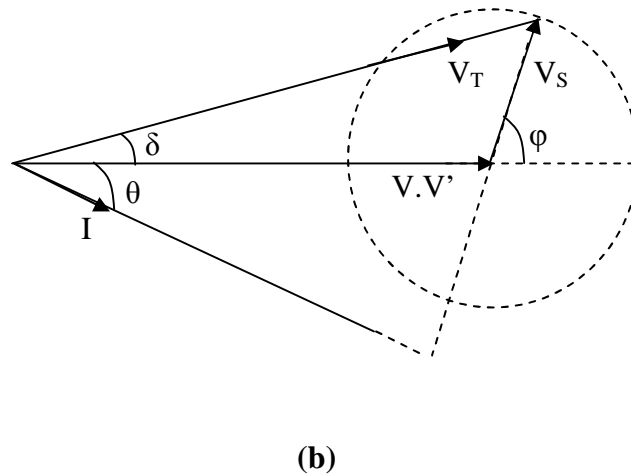
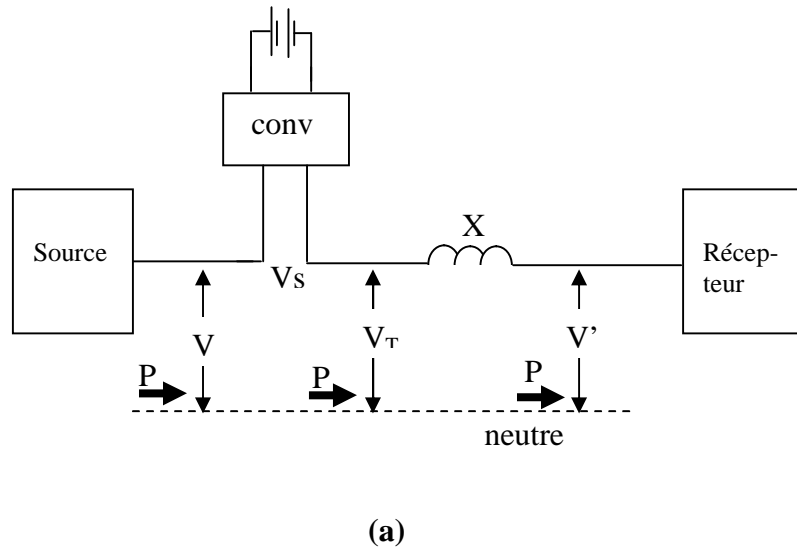


Figure I.4 : Introduction d'un compensateur en série avec la ligne.

### I.3.2.1 Principe de fonctionnement du SSSC.

Supposons que les tensions ligne à neutre  $V$  et  $V'$  soient égales et en phase. Dans ces conditions, si les régions sont réunies par une ligne ayant une impédance  $X$ , le courant de ligne sera nul car la différence de potentiel entre les deux extrémités est égales à zéro. Il n'y aura donc pas d'échange de puissance active ou réactive entre les deux régions.

Cela est regrettable parce qu'une région dispose peut-être d'un surplus de puissance qui serait bénéfique à l'autre. Ou encore, une perturbation dans la région source serait moins néfaste, si la région réceptrice pouvait lui venir en aide. Durant ces moments critiques, une réponse immédiate s'impose. Les puissances active et réactive appropriées doivent être transitées sur la ligne rapidement et sélectivement.

Afin d'atteindre ces objectifs, supposons que l'on dispose d'une source de tension  $V_s$  branchée en série avec la ligne et dont la valeur et l'angle sont variables. Une façon de faire est d'intercaler un convertisseur Courant Continu /Courant alternatif, du côté de la région source, comme le montre la Figure (I-4-a.) La tension résultante  $V_T$  en amont de la réactance  $X$  est alors égale à la somme vectorielle des tensions. Si l'angle entre  $V_T$  et  $V'$  est alors de  $\delta$  degrés, il s'ensuit qu'une puissance active sera transportée sur la ligne. Cette puissance est donnée par :

$$P = \frac{V_T V'}{X} \sin \delta \quad (I-2)$$

Le diagramme vectoriel donné par la figure (I-4-b) montre les conditions lorsque  $V_s$  est en avance sur  $V$  et  $V'$  d'un angle  $\phi$ . Il s'ensuit que  $V_T$  sera en avance sur  $V'$  d'un angle  $\delta$ . Si l'on fait varier l'angle  $\phi$  du convertisseur tout en gardant la tension  $V_s$  constante, l'extrémité du vecteur tension  $V_s$  décrira un cercle. L'extrémité du vecteur  $V_T$  suivra ce cercle montré en pointillé. Par conséquent, l'angle  $\delta$  changera progressivement d'une valeur maximale positive à une valeur maximale négative en passant par une valeur nulle. Ainsi, selon l'équation (I-2), la puissance active transitée par la ligne peut être positive ou négative, ce qui revient à dire qu'elle peut circuler dans les deux sens. De plus, on peut faire varier la puissance en faisant varier l'amplitude de la tension  $V_s$ .

Notons que, lorsque les vecteurs  $V$  et  $V'$  sont égales et en phases comme le montre la figure (I-4-b), le vecteur courant  $I$  sera toujours en retard sur le vecteur  $V_s$  de  $90^\circ$ . De plus, sa valeur est donnée par l'équation  $I = V_s / X$ . Dans ces circonstances, aucune puissance active n'est débitée ni absorbée par le convertisseur. Cependant, le convertisseur fournit une puissance réactive donnée par:  $Q_s = V_s.I$  (var). Cela correspond précisément à la puissance réactive absorbée par la réactance  $X$  de la ligne.

En ce qui concerne les régions source et récepteur, si l'angle du vecteur tension  $V_s$  est ajusté afin que  $\phi = 90^\circ$ , la région source débitera une puissance active  $P = V.I$  a un facteur de puissance unitaire. Par contre, si  $\phi = 270^\circ$ , une puissance active de même valeur circulera de la région réceptrice vers la région source. Etant donné que la tension  $V$  est bien supérieure à  $V_s$ , il s'ensuit que la puissance active  $P$  transportée est beaucoup plus grande que la puissance réactive  $Q_s$  fournie par le convertisseur.

De la même façon, lorsque  $\varphi$  est ajusté à  $0^\circ$  ou à  $180^\circ$ , on peut forcer la circulation d'une puissance réactive importante de la région source vers la région réceptrice et vice versa.

Supposons maintenant que  $V$  et  $V'$  soient toujours en phase mais  $V'$  soit supérieure à  $V$  comme l'indique la figure (I-5-a et b). Le vecteur  $V_s$  pivote encore autour de l'extrémité du vecteur  $V$  en décrivant ainsi un cercle. La chute de tension dans la ligne est  $jXI = V_T - V'$  et le courant  $I$  se trouve à  $90^\circ$  en arrière de celle-ci. Par conséquent, dans le cas de la figure (I-5-b), Le vecteur courant  $I$  sera en avance sur les vecteurs tensions  $V$  et  $V'$  d'un angle  $\theta$  degrés. On peut écrire les équations suivantes:

- Puissance active débitée par la région source:  

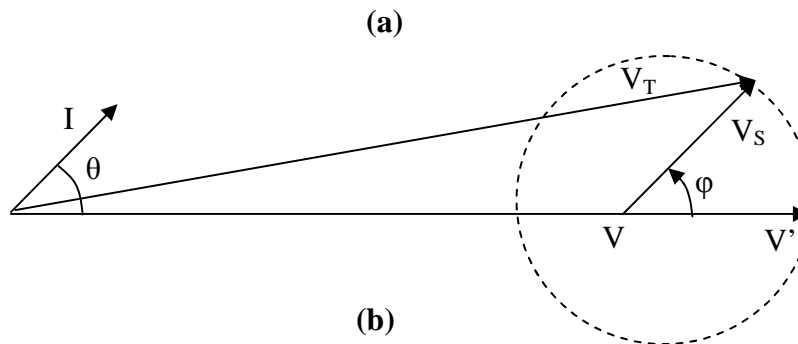
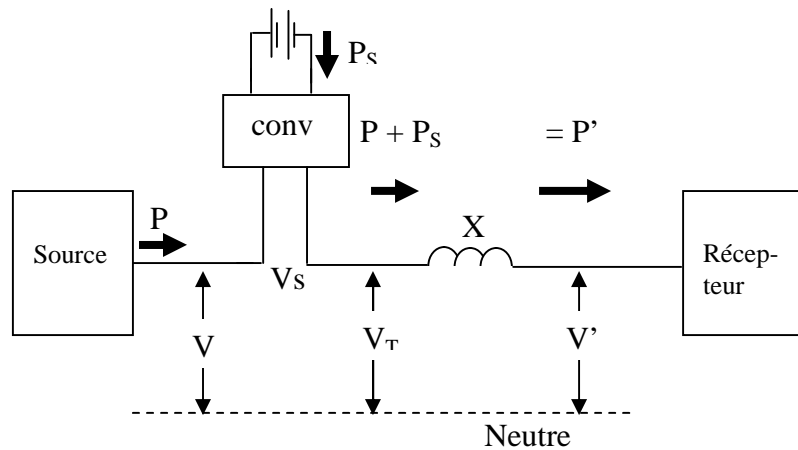
$$P = V \cdot I \cos \theta \tag{I-3}$$

- Puissance active reçue par la région réceptrice:  

$$P' = V' \cdot I \cos \theta \tag{I-4}$$

- La puissance active  $P_s$  débitée par le convertisseur est la différence entre  $P$  et  $P'$  soit:  

$$P_s = V_s \cdot I \cos (\varphi - \theta) \tag{I-5}$$

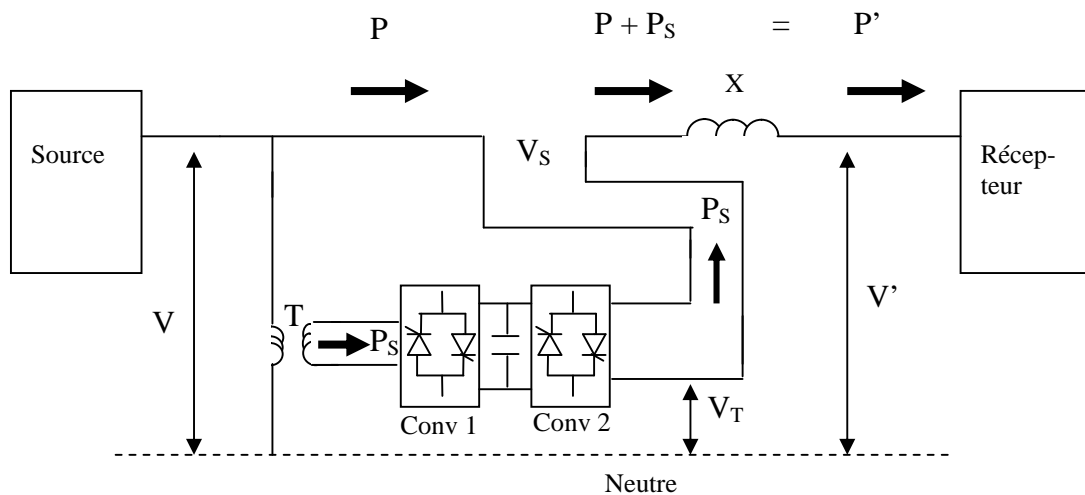


**Figure I.5 :** relations vectorielles lorsque  $V$  et  $V'$  sont en phase mais inégales.

Donc, la région source fournit une puissance  $P$ , le convertisseur débite une puissance active  $P_s$ , et la somme des deux puissances est égale à la puissance  $P'$  absorbée par la région réceptrice.

Comme le convertisseur fournit de la puissance active au système, il doit en absorber autant de l'accumulateur. Celui-ci se déchargera rapidement. Donc, au lieu d'utiliser un accumulateur, on pourrait le remplacer par un redresseur qui puise son énergie de la région source.

Cette solution demande l'installation de deux convertisseurs connectés par une liaison à courant continu comme le montre la figure (I-6). Le convertisseur 1 redresse la puissance à courant alternatif provenant du transformateur  $T$ , et l'envoie au circuit de liaison à courant continu. De là le convertisseur 2 la retransforme en puissance à courant alternatif et l'injecte dans la ligne de transport sous la tension  $V_s$ . L'ensemble des deux convertisseurs porte le nom de l'UPFC.



**Figure I.6 :** Schéma d'un contrôleur de puissance universel

L'UPFC peut imposer la valeur et la direction de la puissance active transportée sur la ligne. Par exemple, dans la figure. (I-6), lorsque la puissance  $P_s$  du convertisseur 2 change de sens, la puissance du convertisseur 1 change aussi de sens. Selon le besoin, et à l'intérieur de leurs limites, les convertisseurs 1 et 2 peuvent donc imposer la circulation de n'importe quelle puissance, active ou réactive, entre les deux régions. Pour ce faire, il suffit de contrôler l'amplitude et l'angle de la tension  $V_s$ .

Mais ce n'est pas tout. En plus de pouvoir fournir ou absorber de la puissance active de la ligne de transport, le convertisseur 1 peut simultanément absorber ou débiter de la puissance réactive selon les besoins de la région source le convertisseur 1 peut donc aussi agir comme STATCOM.

#### **I.4 conclusion :**

Dans ce chapitre, on a étudié un compensateur combinant les fonctions des compensateurs série et shunt, qui permettent de gérer les échanges d'énergie sur une partie d'un réseau maillé, On constate que l'UPFC est un contrôleur de puissance extrêmement flexible. Etant donné qu'il peut commander le flux de puissance sur la ligne.

Dans le chapitre suivant nous aborderons le modèle mathématique du compensateur UPFC.



## **CHAPITRE II**

### **Modélisation et synthèse de réglage de l'UPFC à deux et à trois niveaux**

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

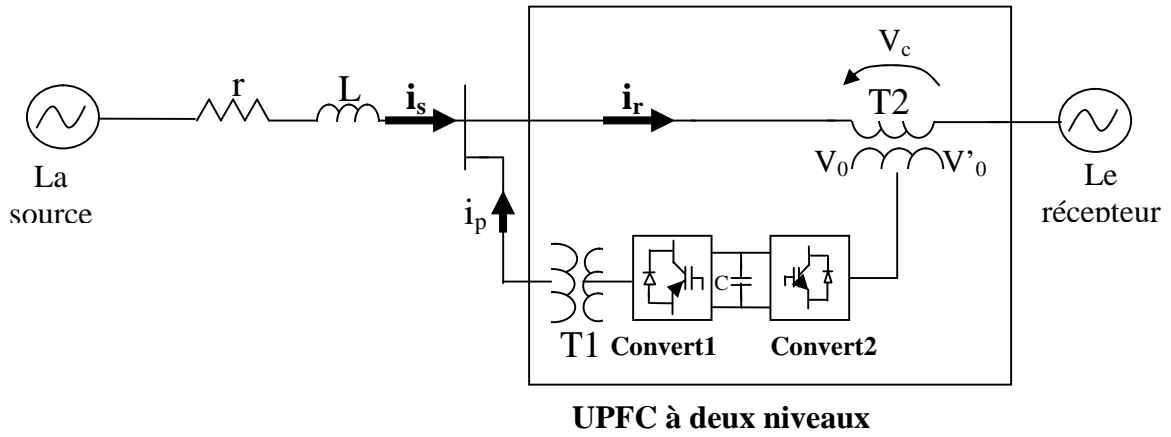
Actuellement l'UPFC ( Unified Power Flow Controller ) ou variateur de charge universel, représente le dispositif le plus récent qui attire l'attention d'un grand nombre de chercheurs, car il s'avère le seul capable de contrôler simultanément et indépendamment les puissances active et réactive d'un réseau. Union de deux compensateurs, un en série et l'autre en parallèle, il permet de commander les trois paramètres associés au transit des puissances à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport.

Dans ce chapitre, nous abordons la modélisation, et le synthèse de réglage de l'UPFC simple et L'UPFC à trois niveaux.

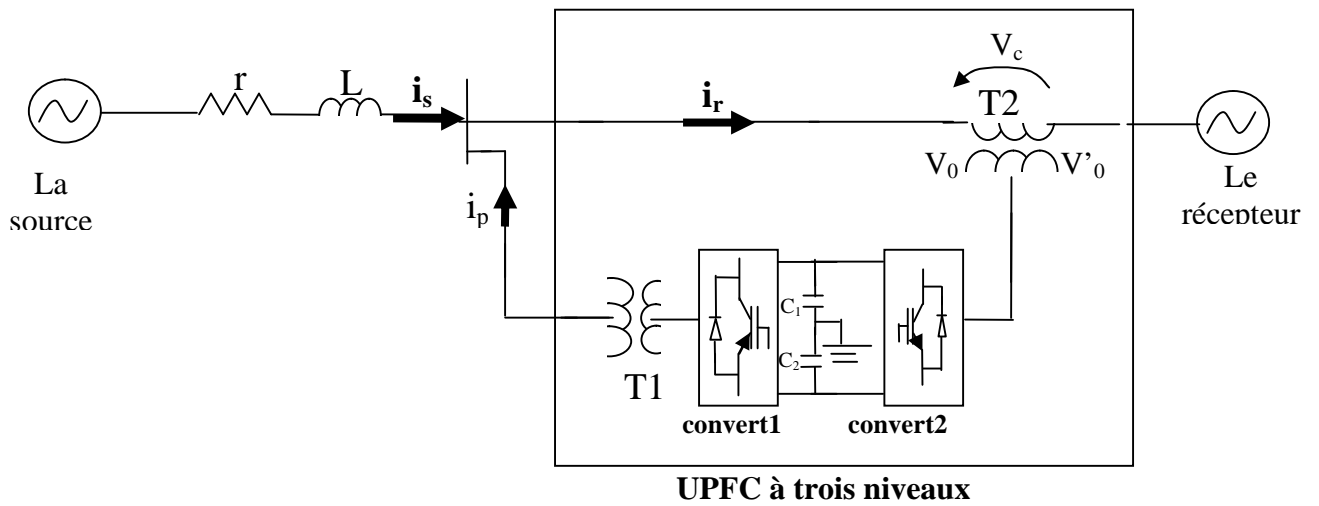
#### **II.2 Structure de l'UPFC**

L'UPFC est constitué de deux onduleurs à source de tension (VSC) qui sont connectés à travers un circuit continu commun (DC link). L'un est connecté en parallèle (STATCOM) et l'autre en série (SSSC) avec la ligne de transmission comme illustré par la figure (II.1.a) et la figure (II.1.b). L'UPFC est non seulement capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive .mais aussi d'améliorer la qualité d'énergie électrique.

Le convertisseur 2 accomplit la fonction principale de l'UPFC, en injectant en série une tension AC avec une amplitude et angle de phase réglable dans la ligne de transport à l'aide d'un transformateur série T2. La fonction fondamentale du convertisseur 1 est de fournir ou d'absorber de la puissance effective demandée par le convertisseur 2 à la liaison DC commune. Il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive selon la demande et assurer une compensation shunt indépendante à la ligne de transport. Le convertisseur 2 fourni ou absorbe la puissance réactive nécessaire localement et produit de la puissance active comme résultat de l'injection en série d'une tension [3].



**Figure II.1.a** Variateur statique de charge universel à l'aide de deux onduleurs à deux niveaux



**Figure II.1.b** Variateur statique de charge universel à l'aide de deux onduleurs à trois niveaux

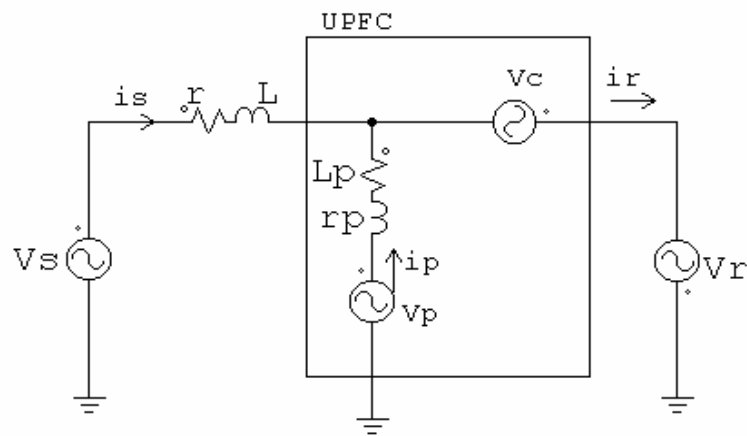


### **II.2.1 Modélisation de l'UPFC à deux niveaux**

Nous commençons la modélisation par la présentation et la simplification des équations mathématiques de notre système dans le repère triphasé ABC et dans le repère de Park  $d-q$ .

Le circuit simplifié de l'UPFC est représenté sur la figure (II.2). La modélisation de ce circuit est basée sur les hypothèses suivantes [17] :

- tous les interrupteurs sont supposés idéaux ;
- les trois tensions de la source alternative sont équilibrées ;
- toutes les chutes de tension à travers la ligne sont représentées par la résistance  $r$  ;
- l'inductance de la ligne est représentée par l'inductance  $L$  ;
- le transformateur parallèle est représenté par la résistance  $r_p$  et l'inductance  $L_p$  ;
- les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de la fermeture des interrupteurs sont négligées.



**Figure II.2** circuit équivalent de l'UPFC à deux niveaux

L'UPFC à deux niveaux est défini par trois systèmes d'équations qui sont détaillés dans les paragraphes suivants :

- Les équations dynamiques du compensateur série
- Les équations dynamiques du compensateur parallèle
- Les équations du circuit continu.

• **Equations dynamiques du compensateur série :**

L'application des lois de Kirchhoff aux mailles du circuit de la figure (II.2) nous donne :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sa} - V_{ca} - V_{ra} = ri_{sa} + L \frac{di_{sa}}{dt} \\ V_{sb} - V_{cb} - V_{rb} = ri_{sb} + L \frac{di_{sb}}{dt} \\ V_{sc} - V_{cc} - V_{rc} = ri_{sc} + L \frac{di_{sc}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.1})$$

En utilisant la transformation de park:

La matrice de transformation de park est donnée par :

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos\omega t - \frac{2\pi}{3} & \cos\omega t + \frac{2\pi}{3} \\ \sin\omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

On note que la matrice inverse de la matrice de park est la transposée de K :  $K^{-1} = K^T$

$$X_{dq0} = K X_{abc} \quad X_{abc} = K^T X_{dq0}$$

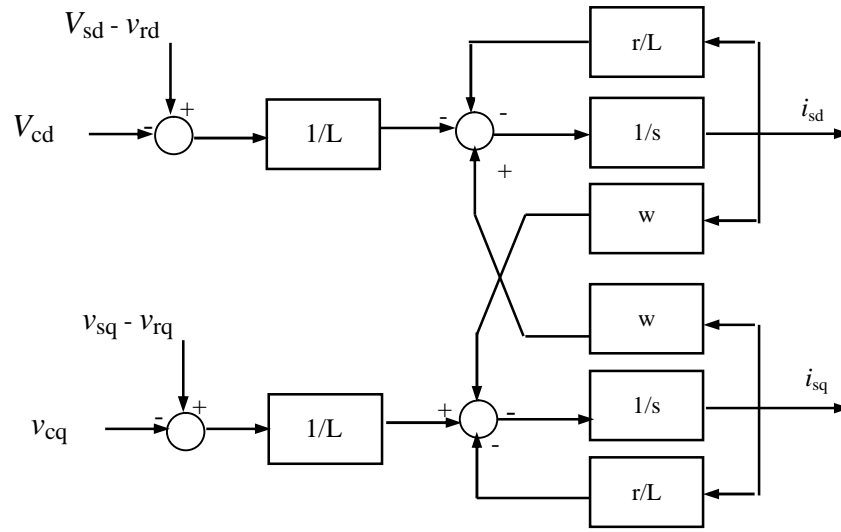
Donc le système devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} - V_{cd} - V_{rd} = ri_{sd} + L \frac{di_{sd}}{dt} - \omega Li_q \\ V_{sq} - V_{cq} - V_{rq} = ri_{sq} + L \frac{di_{sq}}{dt} + \omega Li_d \end{array} \right.$$

En utilisant la représentation matricielle sur le système :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{-r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{cd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{cq} - V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

La figure (II.3) montre le schéma équivalent de l'UPFC série dans les axes d-q basé sur le système d'équation (II.2).



**Figure II.3** Modèle mathématique du système de l'UPFC Série

- **Equations dynamiques du compensateur parallèle**

$$\begin{cases} V_{pa} - V_{ca} - V_{ra} = r_p i_{pa} + L_p \frac{di_{pa}}{dt} \\ V_{pb} - V_{cb} - V_{rb} = r_p i_{pb} + L_p \frac{di_{pb}}{dt} \\ V_{pc} - V_{cc} - V_{rc} = r_p i_{pc} + L_p \frac{di_{pc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

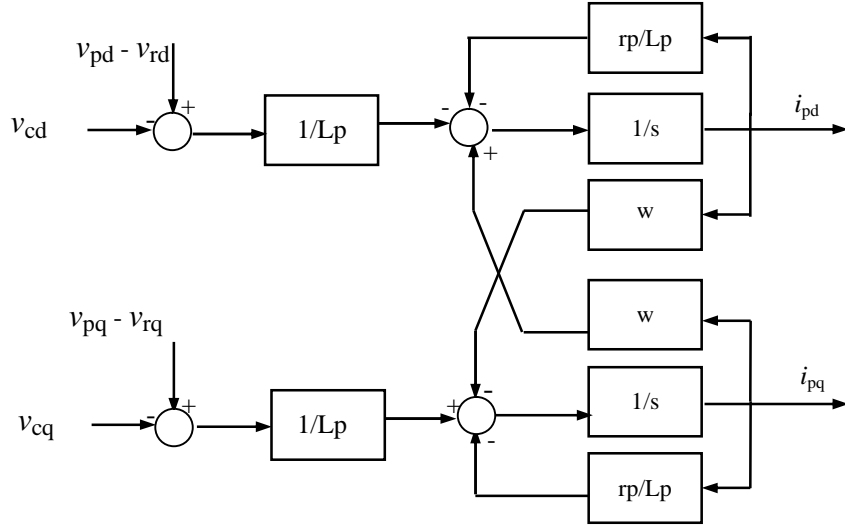
Dans le plan de park. ; ce système devient

$$\begin{cases} V_{pd} - V_{cd} - V_{rd} = r_p i_{pd} + L_p \frac{di_{pd}}{dt} - \omega L i_{pd} \\ V_{pq} - V_{cq} - V_{rq} = r_p i_{pq} + L_p \frac{di_{pq}}{dt} + \omega L i_{pq} \end{cases}$$

En utilisant la représentation matricielle:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p}{L_p} & \omega \\ -\omega & \frac{-r_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{pd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{pq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

Le bloc diagramme de l'UPFC shunt est donné par la figure (II.4) ci-dessous :



**Figure II.4** Modèle mathématique du système de l'UPFC shunt

• **Equations dynamiques du circuit continue :**

$$\frac{1}{2} c \frac{dV_{dc}^2}{dt} = p_e - p_{ep} \quad (II.5)$$

$$p_e = V_{ca} i_{ra} + V_{cb} i_{rb} + V_{cc} i_{rc}$$

$$p_{ep} = V_{pa} i_{pa} + V_{pb} i_{pb} + V_{pc} i_{pc}$$

Avec :

$c$  : Capacité du condensateur du circuit continu ;

$V_{dc}$  : Tension continue ;

$P_e$  : Puissance absorbée par le compensateur série et fournie au circuit commun.

$P_{ep}$  : Puissance active fournit par le compensateur parallèle et absorbée par le compensateur série.

L'équation dynamique du circuit continu s'écrit

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2 \cdot C_{V_{dc}}} \cdot (V_{cd} i_{rd} + V_{cq} i_{rq} - V_{pd} i_{pd} + V_{pq} i_{pq}) \quad (\text{II.6})$$

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd}$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq}$$

• **Calcul des puissances active et réactive instantanées de l'UPFC :**

Le calcul des puissances active et réactive instantanées générées et absorbées s'obtient au moyen de la formule classique [4] :

➤ les puissances active et réactive générées :

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (\text{II.7})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \quad (\text{II.8})$$

➤ puissances active et réactive absorbées :

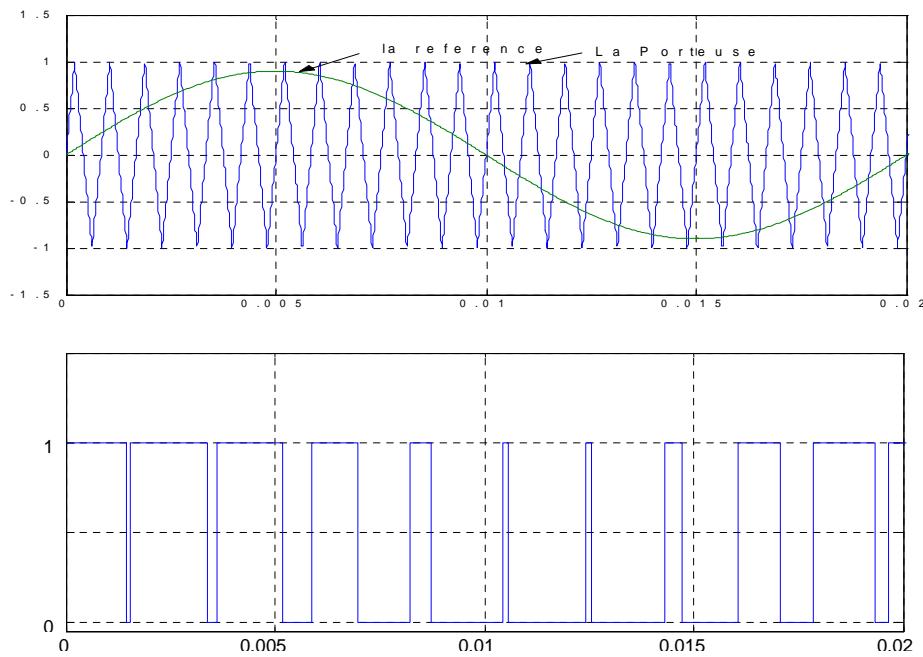
$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}) \quad (\text{II.9})$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq})$$

**II.2.1.1 Technique de la modulation de largeur d'impulsion d'un onduleur simple**

La technique MLI consiste à contrôler la tension et la fréquence du signal fondamentale ainsi que les distorsions dues aux harmoniques et ceci en variant la largeur des différentes impulsions de la tension obtenues après modulation.

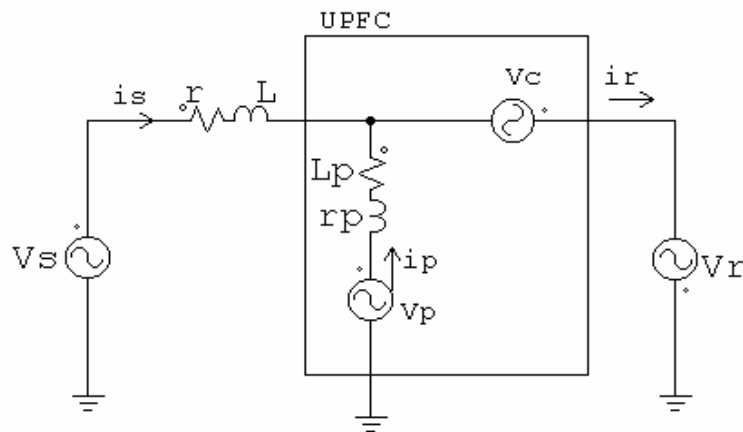
La commande MLI compare à chaque instant la porteuse et la tension de commande. Leurs intersections envoient les ordres d'allumage ou d'extinction aux interrupteurs correspondants.



**Figure II.5** Principe de la MLI en sin-triangle d'une phase d'un onduleur à deux niveaux

### II.2.2 Modélisation de l'UPFC à trois niveaux

Le circuit simplifié de l'UPFC à trois niveaux est représenté sur la figure (II.6). La modélisation de ce circuit est basée sur les mêmes hypothèses précédentes.



**Figure II.6** circuit équivalent de l'UPFC à trois niveaux

• **Equations dynamiques du compensateur série**

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sa} - V_{ca} - V_{ra} = r i_{sa} + L \frac{di_{sa}}{dt} \\ V_{sb} - V_{cb} - V_{rb} = r i_{sb} + L \frac{di_{sb}}{dt} \\ V_{sc} - V_{cc} - V_{rc} = r i_{sc} + L \frac{di_{sc}}{dt} \end{array} \right. \quad (II.10)$$

• **Equations dynamiques du compensateur parallèle**

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{pa} - V_{ca} - V_{ra} = r_p i_{pa} + L_p \frac{di_{pa}}{dt} \\ V_{pb} - V_{cb} - V_{rb} = r_p i_{pb} + L_p \frac{di_{pb}}{dt} \\ V_{pc} - V_{cc} - V_{rc} = r_p i_{pc} + L_p \frac{di_{pc}}{dt} \end{array} \right. \quad (II.11)$$

Etant donné que les deux compensateurs sont des onduleurs à trois niveaux, les trois sources de tension  $V_{ca}$ ,  $V_{cb}$ ,  $V_{cc}$ ,  $V_{pa}$ ,  $V_{pb}$ ,  $V_{pc}$  peuvent être écrites sous la forme suivante ;

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} V_{pa} \\ V_{pb} \\ V_{pc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} S_{1A} \cdot S_{2A} \\ S_{1B} \cdot S_{2B} \\ S_{1C} \cdot S_{2C} \end{bmatrix} V_{dc1} - \begin{bmatrix} S_{3A} \cdot S_{4A} \\ S_{3B} \cdot S_{4B} \\ S_{3C} \cdot S_{4C} \end{bmatrix} V_{dc2} \end{array} \right\} \\ \\ \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} S_{1A} \cdot S_{2A} \\ S_{1B} \cdot S_{2B} \\ S_{1C} \cdot S_{2C} \end{bmatrix} V_{dc1} - \begin{bmatrix} S_{3A} \cdot S_{4A} \\ S_{3B} \cdot S_{4B} \\ S_{3C} \cdot S_{4C} \end{bmatrix} V_{dc2} \end{array} \right\} \end{array} \right. \quad (II.12)$$

Où ;  $v_{dc1}$  et  $v_{dc2}$  sont les deux tensions continues de l'onduleur à trois niveaux.

En utilisant la transformation de park, les trois systèmes (II.10), (II.11), et (II.5) peuvent être réécrit sous la forme suivante ;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{-r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{cd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{cq} - V_{rq} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p}{L_p} & \omega \\ -\omega & \frac{-r_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{pd} - v_{cd} - v_{rd} \\ v_{pq} - v_{cq} - v_{rq} \end{bmatrix}$$

Ou  $(V_{sd}, V_{sq}), (V_{rd}, V_{rq}), (V_{cd}, V_{cq})$  sont respectivement les deux composantes d et q des tensions  $v_s, v_r, v_c$  et  $v_p$ .

L'équation dynamique du circuit continu s'écrit :

$$\frac{dy_{dc}}{dt} = \frac{3}{2 \cdot C_{dc}} \cdot (V_{cd} i_{rd} + V_{cq} i_{rq} - V_{pd} i_{pd} + V_{pq} i_{pq}) \quad (\text{II.13})$$

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd}$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq}$$

$$V_{dc} = V_{dc1} + V_{dc2}$$

• **Calcul des puissances active et réactive instantanées de l'UPFC :**

➤ les puissances active et réactive générées :

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (\text{II.14})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \quad (\text{II.15})$$

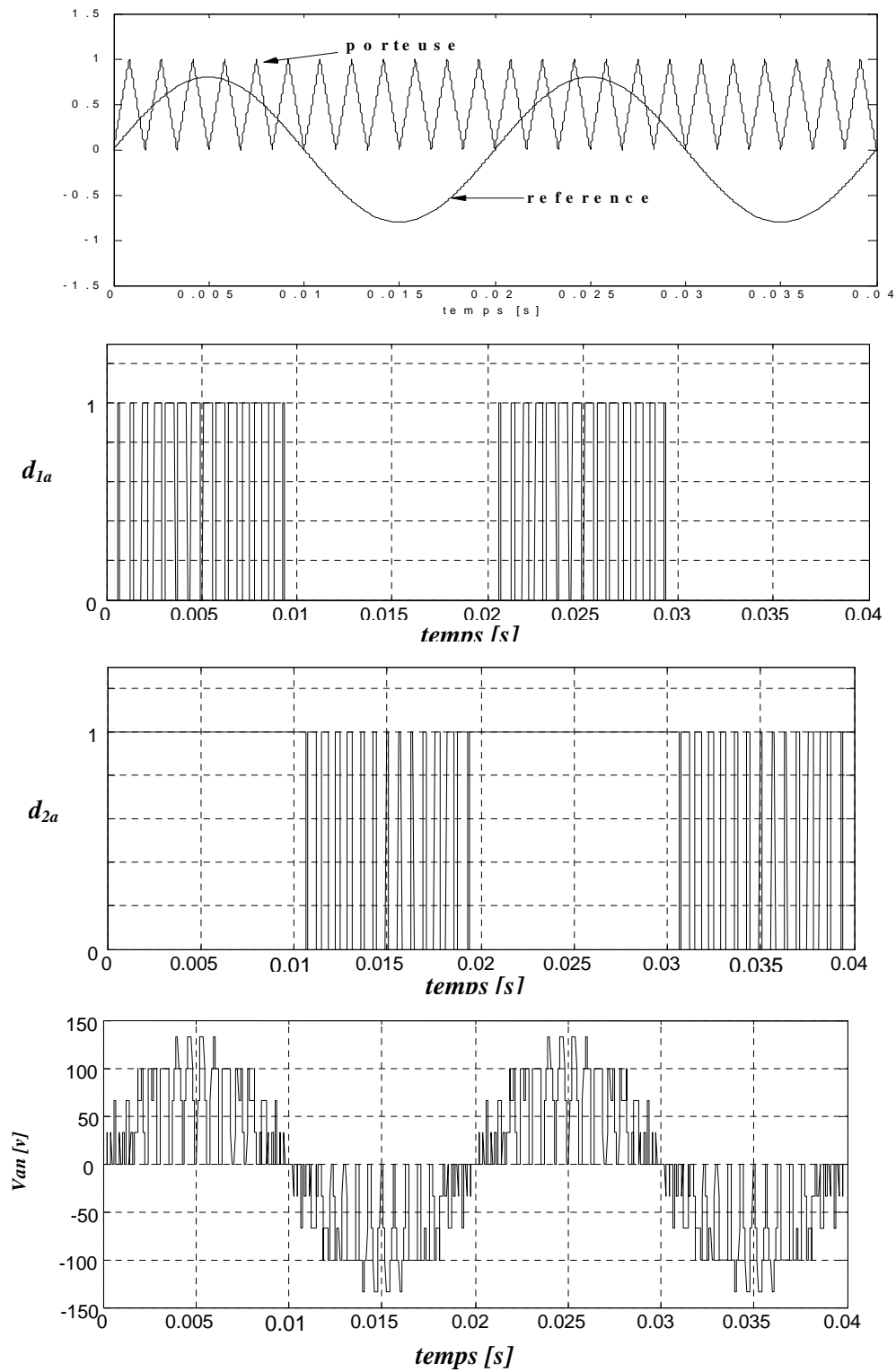
➤ puissances active et réactive absorbées :

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}) \quad (\text{II.16})$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq})$$



### II.2.2.1 La Stratégie de la génération de la commande MLI d'un onduleur à trois niveaux



**Figure II.7** Stratégie de commande MLI pour l'onduleur à trois niveaux

### **II.3 La description du convertisseur statique DC/AC (l'onduleur)**

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative.

Il existe des onduleurs :

- Non autonomes : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la source du coté alternatif « le réseau ».
- Autonomes : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la commande et la source du coté continu.

On distingue deux grands types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension : alimenté par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant : alimenté par une source de courant continu.

Il existe plusieurs types de commande permettant de commander les convertisseurs statiques. Le choix de l'une ou l'autre de ces commandes dépend principalement de l'application envisagée. Les convertisseurs utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI) sont très flexibles, ils peuvent générer une tension de n'importe quelle forme, et de n'importe quelle fréquence et de n'importe quelle phase, une autre raison justifiant l'emploi des convertisseurs MLI est qu'ils peuvent générer des tensions sinusoïdales à 60 Hz, par conséquent on peut les installer dans un réseau de distribution, en recourant à des petits filtres harmoniques de quelques kilohertz [1] [10] [15].

### **II.4 Configuration du circuit de réglage de L'UPFC à trois niveaux :**

#### **II.4.1 Différentes configurations de réglage :**

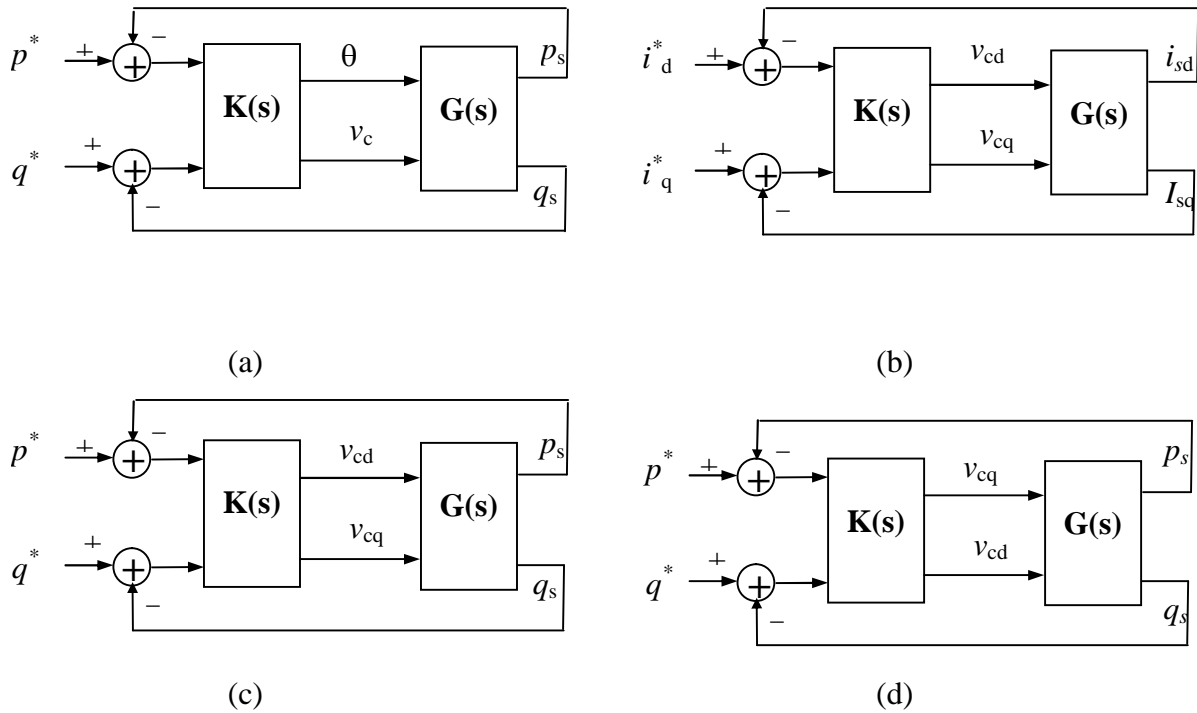
Théoriquement, l'UPFC devrait être traité comme un système multi variable car les deux convertisseurs série et parallèle sont connectés d'un coté à la ligne de transmission et l'autre coté au circuit continu DC et donc comportent chacun deux sorties. Cependant pour faciliter la synthèse des réglages, le traitement des deux convertisseurs se fera séparément.

La possibilité de cette séparation est justifiée par deux facteurs principaux. Premièrement, le couplage entre les deux convertisseurs sur la ligne de transmission est assez faible. Deuxièmement, la variation dynamique de la tension du coté du continu DC est dominée par le convertisseur parallèle. Ceci est justifié par le fait que la variation de la tension du coté DC est beaucoup moins sensible au contrôle du convertisseur série. Pour cela, du point de vue dynamique, le convertisseur série peut être vue comme une source de tension pure dans le système de transmission.

Le contrôle du convertisseur parallèle dans l'UPFC est très similaire au celui du compensateur ASVC.

Dans la suite, on développera les différents réglages seulement pour le compensateur série.

Il y a plusieurs configurations possibles pour contrôler ce compensateur. La figure (II.8) illustre quatre configurations.



**Figure II.8** les différentes configurations de réglage de l'UPFC

Dans la configuration (a), les entrées sont l'amplitude et l'angle de phase de la tension série insérée et les sorties sont la puissance active transmise et la puissance réactive au point de mesure[5]. L'idée de base de cette configuration vient des équations des puissances, lesquels montrent clairement que la puissance active et réactive peut être changées en changeant l'amplitude et l'angle de phase de la tension série.

Notons que la fonction liant les puissances active et réactive et l'angle de phase est extrêmement non linéaire et de plus elle n'est pas monotone quand l'angle varie de 0° à 360°. Cette caractéristique rend le système basé sur la configuration (a) fondamentalement difficile à contrôler. En conséquence, les réponses du système de boucle fermée sont souvent très faibles, avec un temps de réponse d'environ 100ms.

Dans la configuration (b), les entrées sont les deux composantes d et q de la tension série, et les sorties sont les deux composantes du courant de la ligne de transmission. Les

courants de référence sont calculés à partir des puissances active et réactive et des tensions mesurées. L'idée de cette configuration vient des équations des tensions (II.2) et (II.4) [6]. Le problème de non linéarité est évité dans le cas de la configuration (b) en considérant seules les composantes fondamentales pour le contrôle du système. Par conséquent, le système basé sur la configuration (b) est beaucoup plus facile à contrôler comparé avec le système basé sur (a). Dans ce cas, les réponses du système en boucle fermée dépendent de régulateurs conçus beaucoup [6].

La différence entre les deux configurations (c) et (b) est que dans (c) la puissance active transmise et la puissance réactive sont mesurées et sont contrôlées directement. Ceci rend le découplage entre les deux boucles de contrôle plus difficile. Dans notre travail la configuration (b) a été choisie.

Le principe de cette méthode est transformer les grandeurs mesurées du courant et de la tension des trois phases sur les deux axes d-q en utilisant la transformation de park. En suite on impose les valeurs des puissances active et réactive et on calcule les courants de références à partir de ces valeurs (les puissances désirées) et les valeurs des tensions mesurées, par les deux équations (II.17) et (II.18).

$$i_{sd}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{(p_s^* V_{sd} - q_s^* V_{sq})}{V_{sd}^2 + V_{sq}^2} \quad (\text{II.17})$$

$$i_{sq}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{(p_s^* V_{sq} + q_s^* V_{sd})}{V_{sd}^2 + V_{sq}^2} \quad (\text{II.18})$$

La figure (II.9), montre le schéma de principe des circuits de réglage complets. Le circuit de réglage complets d'un variateur de charge universel se compose de trois systèmes de réglage comme le montre la figure (II.9) l'onduleur série commandé par le régulateur Rs , l'onduleur parallèle commandé par le régulateur Rp et la tension continue commandée par le régulateur Rp[16].

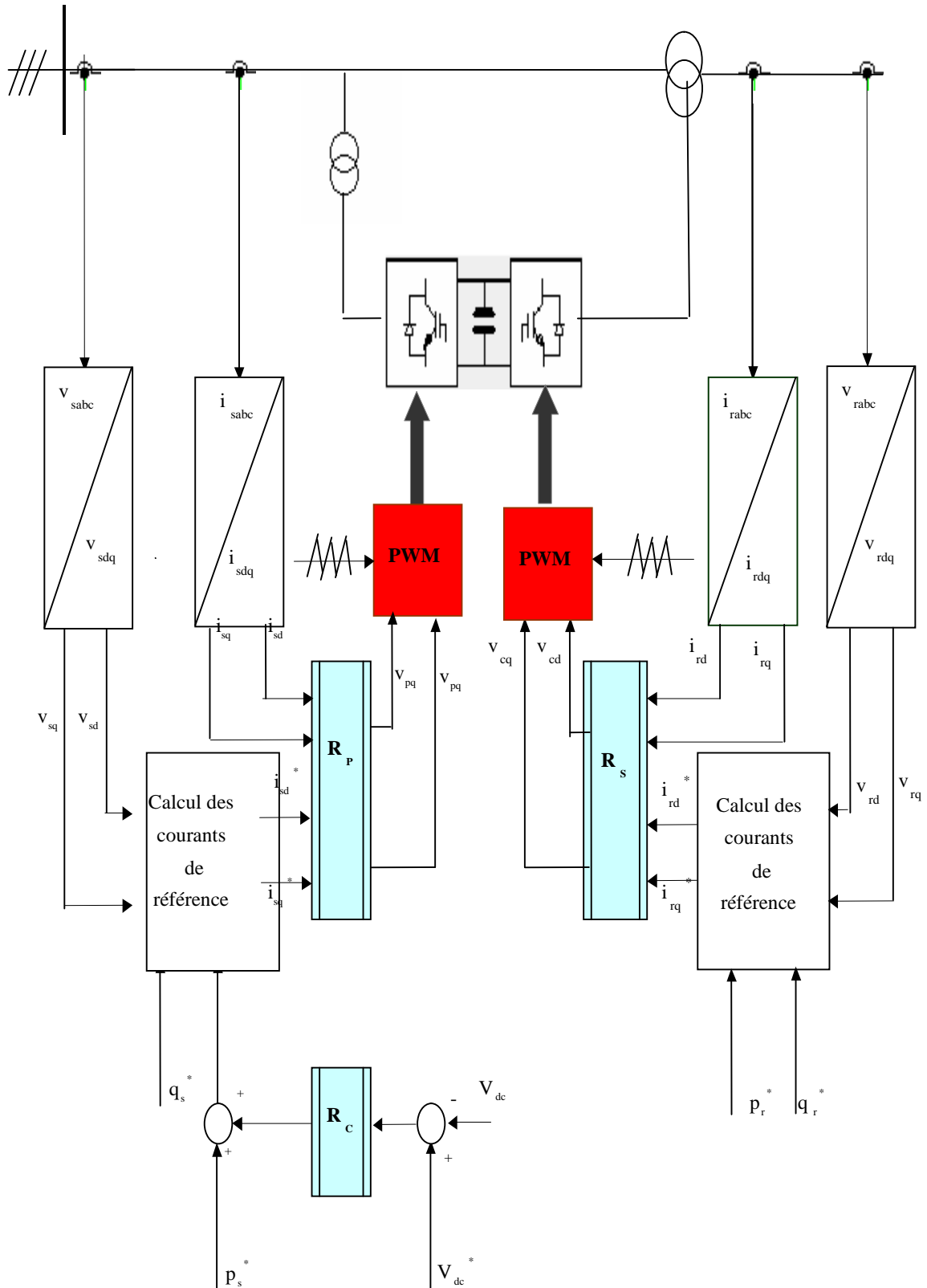


Figure II.9 circuit de réglage de l'UPFC.

### II.5 Découplage par régulateur PI :

La régulation classique type proportionnelle intégrale (PI) est la technique la plus répandue à l'échelle industrielle, cela est dû évidemment à la simplicité de sa mise en oeuvre, de ses performances acceptables, tel son coût réduit par rapport à ceux utilisées dans les techniques avancées.

Les performances des régulateurs PI sont obtenues par un choix judicieux de ses paramètres «Kp, Ki», qui représentent respectivement le gain proportionnel et le gain intégrale [17].

D'après les deux systèmes d'équation (II.2) et (II.4), on voit qu'il y un couplage entre les deux composantes du courant, pour pouvoir aboutir à une commande aisée du système, il est indispensable de procéder à un découplage des deux composantes.

Une inspection de toutes les équations du système (II.2), nous mène directement à la règle qui nous fournira une commande par découplage des courants id et isq. Ainsi le vecteur des tensions de sortie de l'onduleur série peut être commandé de la manière suivante ;

On pose ;

$$X_1 = \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{cd} - V_{rd}) \quad (II.19)$$

$$X_2 = \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{cq} - V_{rq})$$

$$X_1 = \left( K_p + \frac{K_i}{p} \right) (i_{sd}^* - i_d) - \omega i_{sq} \quad (II.20)$$

$$X_2 = \left( K_p + \frac{K_i}{p} \right) (i_{sq}^* - i_q) + \omega i_{sd} \quad (II.21)$$

X<sub>1</sub> et X<sub>2</sub> étant les sorties des deux régulateurs PI données par les courants isd et isq respectivement.

En substituant les équations (II.19), (II.20) et (II.21) dans le système d'équations (II.2), on aboutit à un système de deux équations découplées avec les fonctions de transfert en boucle fermée suivantes ;

$$F_{11}(P) = \frac{i_{sd}(P)}{i_{sd}^*(P)} = \frac{K_I + K_p P}{K_I + \left( \frac{r}{L} + K_p \right) P + P^2} \quad (II.22)$$

$$F_{22}(P) = \frac{i_{sq}(P)}{i_{sq}^*(P)} = \frac{K_I + K_p P}{K_I + \left( \frac{r}{L} + K_p \right) P + P^2} \quad (II.23)$$

Le schéma bloc du ce système est représenté sur la figure (II.10). Le découplage est réalisé par la séparation du système en deux boucles fermées, où le contrôle est optimal par rapport au critère de l'erreur dynamique quadratique si les gains sont maximaux. Le système se transforme en un système du premier ordre.

$$\begin{aligned} K_{Popt} &= K_{Pmax}; \\ K_{Iopt} &= K_{Imax} \end{aligned} \quad (II.24)$$

En introduisant la condition simple suivante liant les paramètres du régulateur

$$K_I = \frac{r}{L} K_P \quad (II.25)$$

Nous obtenons la fonction de transfert du premier ordre avec une constante de temps

$$T = 1/K_P$$

$$F_{11}(P) = F_{22}(p) = -\frac{K_P}{K_P + P} \quad (II.26)$$

La détermination de la constante de temps dépend des changements admissibles maximaux des grandeurs de contrôle  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  pour le compensateur série et  $V_{pd}$  et  $V_{pq}$  pour le compensateur parallèle. Étant données les équations (II.21) et un choix convenable de la valeur de  $T$  ( $T \geq 5$  ms), les gains  $K_P$  et  $K_I$  peuvent être obtenus comme suit :

$$K_P = \frac{1}{T} \quad K_I = \frac{r}{L} \cdot \frac{1}{T} \quad (II.27)$$

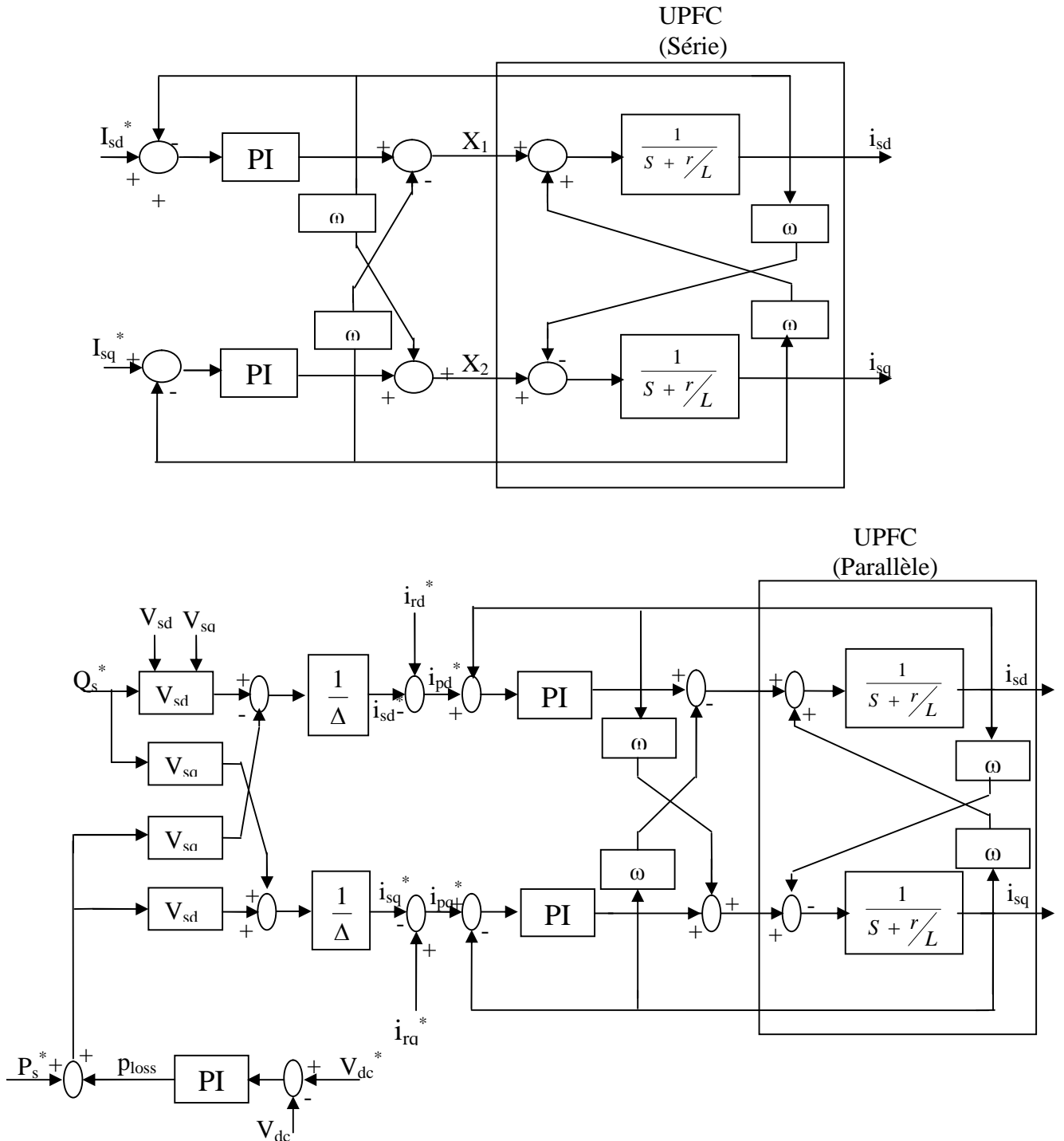
## **II.6 Réglage de la tension $V_{dc}$**

Le diviseur capacitif n'est pas tout à fait fiable pour maintenir le niveau intermédiaire de la tension à niveau stable. Mais dans l'utilisant des onduleurs dans le domaine des FACTS .ce problème est contourné par un circuit de réglage qui maintient le niveau de tension à une valeur plus stable.

Le circuit intermédiaire à tension continue comporte les condensateurs tampon  $c_1$  et  $c_2$  qui sert au maintien de la tension. Le niveau de la tension  $V_{dc}$  doit être constant aussi que possible parce que lors des échanges de puissance active, les condensateurs tampon jouent un rôle primordiale. Si l'on soutire trop de courant à partir des condensateurs, il peut se produire une chute de tension.

D'autre part, si l'on charge trop les condensateurs, le niveau de la tension peut augmenter.

La figure (II.10) illustre la représentation schématique du réglage de cette tension continue ainsi le découplage entre les deux composantes du courant utilisant un régulateur PI pour le compensateur série et parallèle.



**Figure II.10** Schéma bloc de la commande de l'UPFC



## II.7 Résultats de simulation

Nous allons simuler le comportement du modèle de la figure (II.7) en insérant des régulateurs PI. Il était nécessaire de montrer le comportement des régulateurs PI en simulant les puissances, les tensions et les courants. Ceci a été réalisé avec l'outil MATLAB / SIMULINK.

Les paramètres du modèle de simulation sont listés ci-dessous.

V <sub>s</sub> (v)	V(v)	V <sub>dc</sub> (v)	F(HZ)	R(Ω)	L(mH)	r <sub>p</sub> (Ω)	L <sub>p</sub> (mH)	C(μF)
220	220	280	50	0.80	10	0.8	10	2000

**Tableau II.1** Paramètre du modèle de simulation

Afin de démontrer l'avantage de l'UPFC à trois niveaux par rapport au UPFC simple nous présentons dans cette partie les résultats obtenus pour les deux structures avec le régulateur PI.

Les figures (II.11), (II.12), (II.13), et (II.15), (II.16), (II.17) illustrent le comportement transitoire du réglage du L'UPFC pour les deux structures avec un changement des consignes de puissances comme perturbations. A l'instant 0.15s la puissance réactive varie de la valeur 1000var à une valeur nulle , cela provoque une variation de la puissance active  $P_s$  avec un régime transitoire un peu prononcé qui est dû a l'interaction entre les deux puissances. Ce dernier provoque une variation de la composante de courant  $i_{sd}$  de  $-2.5$  à  $0$  et par suite une variation du courant de source  $i_s$  avec un régime transitoire comme illustré par la figure (II.13) et (II.17).

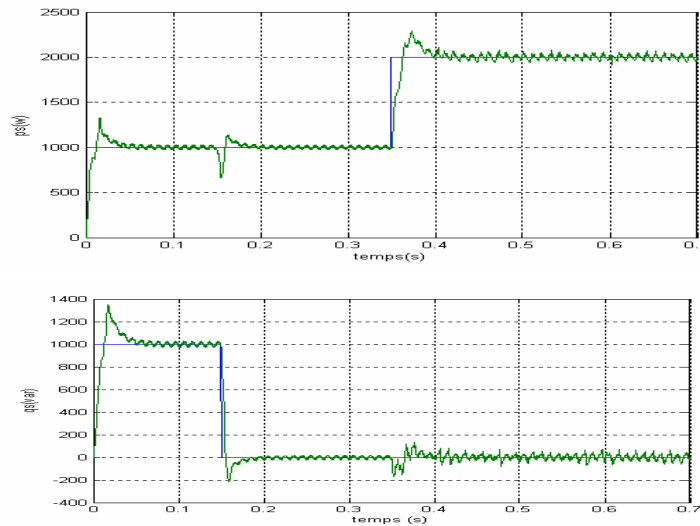
Les Figures (II.14) et (II.18) correspondent au changement des tensions de fréquences de la 1<sup>er</sup> phase du compensateur série pour les deux structures simple et à trois niveaux respectivement.

Grâce à ce changement , on peut compenser les erreurs de réglage entre la puissance active et la puissance réactive et par suite entre les deux composantes de courant  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  de 1000var à une valeur nulle . cela provoque une variation de la puissance active  $P_s$  avec un régime transitoire un peu prononcé qui est dû a l'interaction entre les deux puissances . Ce dernier provoque une variation de la composant de courant  $i_{sd}$  de  $-2.5$  à  $0$  et par suite une variation du courant de source  $i_s$  avec un régime transitoire correspondant à celui de la figure (II.13) et (3.17) respectivement.

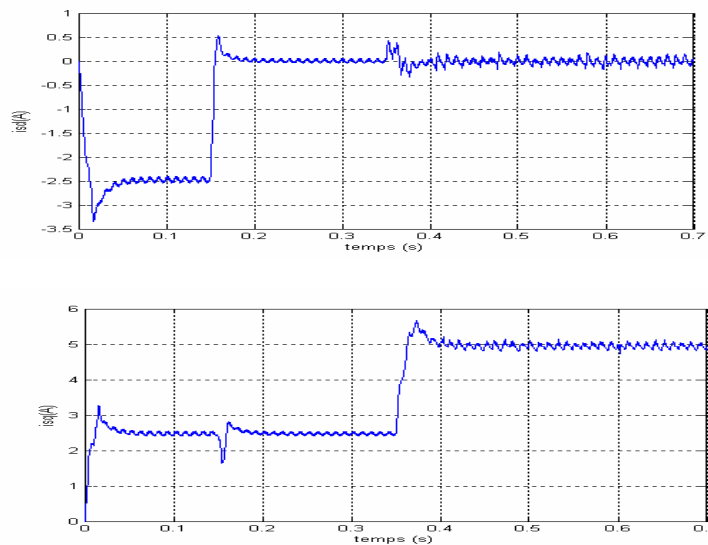
En examinant l'allure de ces courbes, on remarque que pour la structure à trois niveaux toutes les grandeurs présentent une faible oscillation par rapport à la structure à deux niveaux.

Pour la structure à deux niveaux les figures présentent une large bande de fortes oscillations au niveaux des puissances et les deux composantes  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ , ce qui traduit par un taux d'harmonique élevé par rapport à la structure à trois niveaux. On peut remarquer aussi que la courbe de la tension simple du compensateur dans le cas d'une structure à trois niveaux est plus proche de la sinusoïde que la structure à deux niveaux.

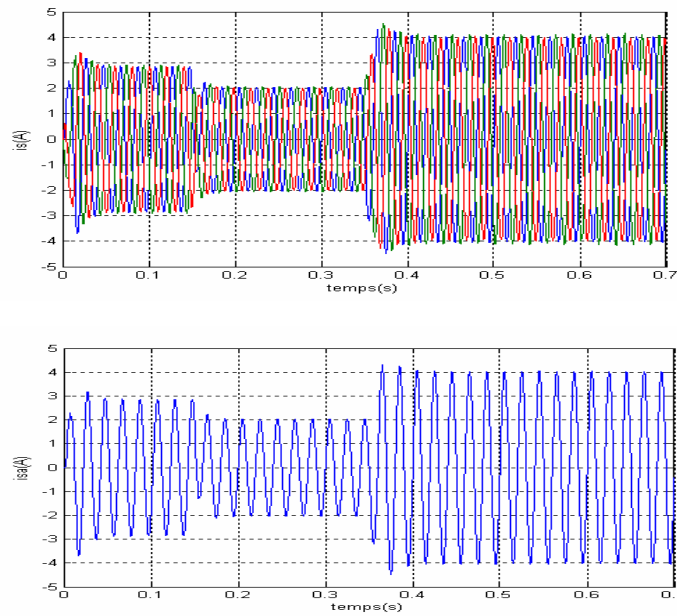
➤ **Résultats de simulation de l'UPFC à deux niveaux :**



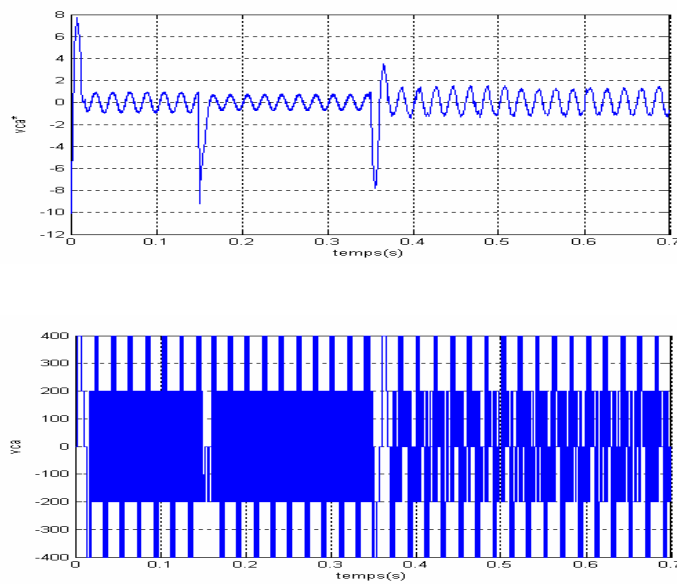
**Figure II.11** changement de référence pour les deux puissances



**Figure II.12** variation des composantes  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  du courant.

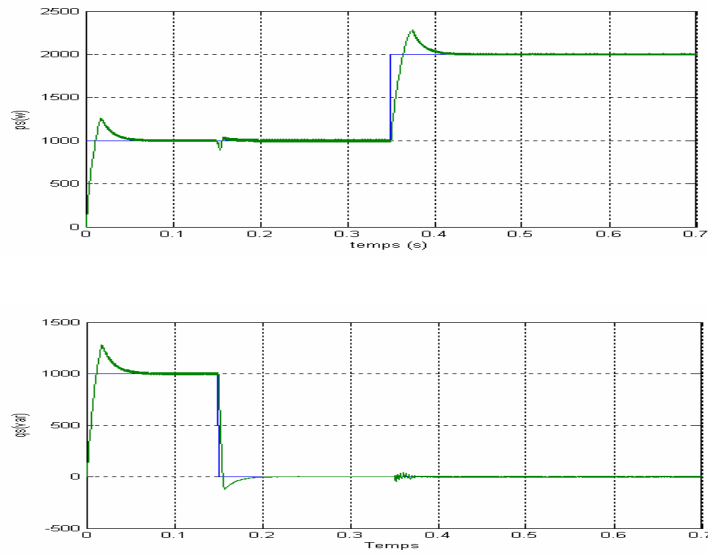


**Figure II.13** comportement transitoire du courant  $i_s$

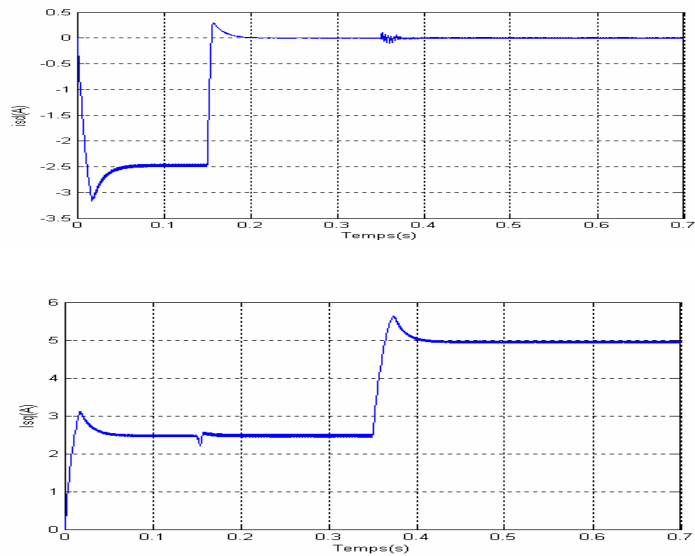


**Figure II.14** comportement transitoire d'une phase de la tension  $V_{ca}$  et sa référence

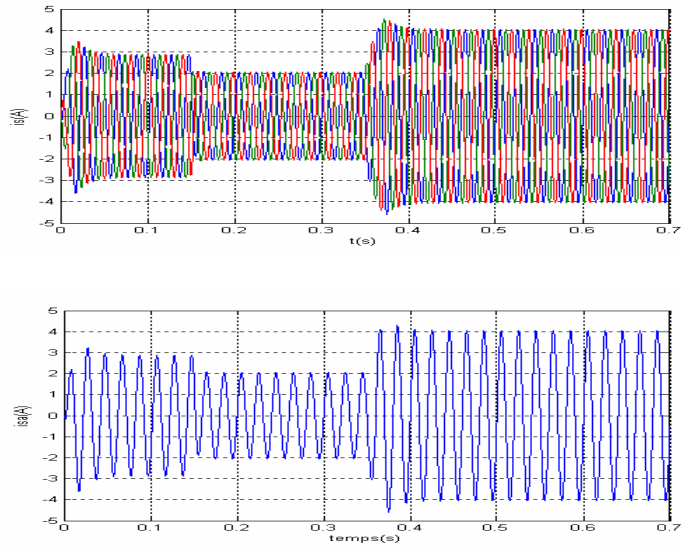
➤ **Résultats de simulation de l'UPFC à trois niveaux :**



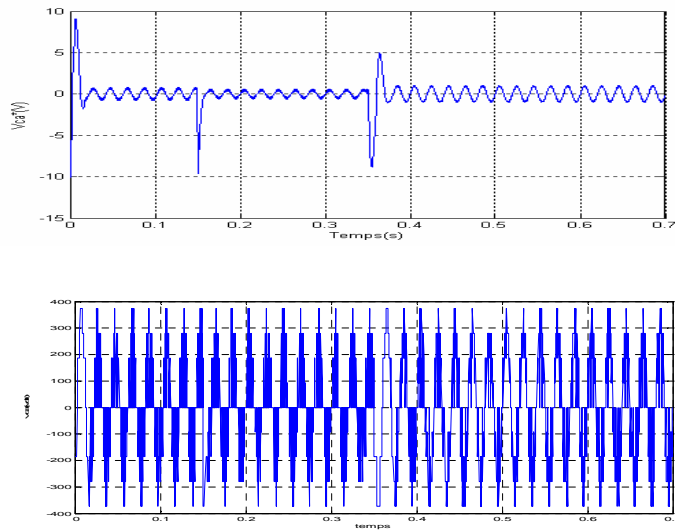
**Figure II.15** changement de référence pour les deux puissances



**Figure II.16** comportement transitoire du  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$



**Figure 3.17** comportement transitoire du  $i_s$



**Figure 3.18** comportement transitoire d'une phase de la tension  $v_{ca}$  et sa référence

## **II.8 Conclusion :**

Ce chapitre traite la modélisation mathématique pour les différents circuits constitués l'UPFC dans le repère abc et dans le repère dq. Une étude comparative entre l'UPFC à deux niveaux et à trois niveaux avec le régulateur PI a été faite, ce qui nous permet de conclure que la nouvelle structure est plus avantageuse que la structure classique surtout pour les applications de grandes puissances. La structure à deux niveaux donne naissance à une large bande de fortes oscillations au niveau des puissances ainsi que les composantes  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ , ce qui traduit par un taux d'harmoniques élevé par rapport à la structure à trois niveaux

## **CHAPITRE III**

### **L'influence de court-circuit sur la stabilité des réseaux électriques**

#### **III.1 Introduction**

Les courants et tensions qui apparaissent lors d'une perturbation affectant les réseaux électriques, jouent un rôle important dans la stabilité du système. Dans ce chapitre, nous étudions la stabilité des machines de forte puissance lors de perturbation importante. Nous pouvons citer comme exemple de perturbation un court-circuit qui provoque un déséquilibre important entre le couple moteur et le couple résistant. Lors des simulations nous considérons comme instantanés, les phénomènes rapides tels que les transitoires propres du réseau ayant une constante de temps inférieure à 0.10. Nous allons étudier l'influence de différents types de court-circuit sur la stabilité d'un réseau électrique. Nous avons également montrée l'apport de l'UPFC à trois niveaux pour améliorer la stabilité d'un réseau mono machine [12].

#### **III.2 La stabilité de l'angle de transport**

##### **III.2.1 La stabilité statique**

Le réseau a un comportement stable ; cela signifie que lorsqu'il est soumis à de petites perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.

##### **III.2.2 la stabilité dynamique**

Il arrive que de petites oscillations apparaissent sur les signaux, à cause d'un changement dans la structure du réseau, dans les conditions d'exploitation, dans les systèmes d'excitation ou au niveau des charges. Ces oscillations peuvent aboutir à déstabiliser un alternateur, une partie ou tout le réseau. Dans ce cas nous pouvons utiliser des modèles linéaires afin de simuler le réseau. Les principaux éléments tels que les machines synchrones, les excitatrices, les systèmes de régulation de vitesse, la turbine et le PSS (Power System Stabilizer) dont les dynamiques ne sont pas négligeables seront pris en compte dans ces modèles.

### **III.2.3 La stabilité transitoire**

La stabilité transitoire d'un réseau de transport d'énergie électrique est son aptitude à retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude.

Cette perturbation peut écarté notablement le réseau de sa position initiale. Le phénomène de stabilité transitoire concerne les grandes perturbations. Nous pouvons citer :

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines,
- La Perte d'ouvrages
- La Perte de groupes de production, etc.

Les conséquences de ses défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau.

La stabilité transitoire dépend :

- du type de perturbation
- de la durée de perturbation
- du lieu de perturbation
- de la performance des systèmes de protection (relais, rênclenchement)
- du point de fonctionnement avant défaut
  - ✓ *Niveau de puissance active*
  - ✓ *Topologie du réseau*
  - ✓ *Degré d'excitation des machines*
- des caractéristiques dynamiques
  - ✓ Des générateurs
  - ✓ Des charges
  - ✓ Des régulateurs mis en place dans les stations
  - ✓ Des stabilisateurs comme le PSS.



### **III.3 Instabilité de la tension**

On définit la stabilité de la tension comme la capacité de maintenir une tension de barre constamment acceptable à chaque noeud du réseau, dans des conditions normales de fonctionnement, après avoir subi une perturbation [14] [15]. L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable de la tension, aboutissant en un effondrement généralisé de la tension.

#### **III.3.1 Causes de l'instabilité de la tension**

Le phénomène de l'instabilité de la tension est attribuable à l'exploitation du réseau à sa limite de puissance transmissible maximale, à l'insuffisance de dispositifs de compensation de la puissance réactive. Les principaux facteurs qui contribuent à un effondrement de la tension sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive [10] [14] [15].

#### **III.3.2 Importance et incidents**

Bien que les problèmes associés à la stabilité de la tension ne soient pas nouveaux pour le fournisseur d'électricité, ils suscitent actuellement beaucoup d'intérêt et une attention spéciale dans plusieurs grands réseaux. Au début, le problème de la stabilité de la tension était associé à un réseau faible et isolé, mais cette question est actuellement devenue source de problèmes dans les réseaux bien développés en raison de l'accroissement de la charge. Des instabilités et effondrements de la tension sont survenus à plusieurs reprises dans des réseaux importants à travers le monde au cours des dernières années.

Les tableaux (III.1) et (III.2) [15] présentent respectivement une liste des incidents qui ont provoqué un effondrement de la tension et de creux qui n'ont pas été suivis d'un effondrement.

Certains des incidents mentionnés sont complexes et mettent en cause d'autres phénomènes qui créent l'instabilité de la tension, par exemple la perte d'une génératrice, la limitation du

**CHAPITRE III : L'influence de court-circuit sur la stabilité des réseaux électriques**

courant inducteur, le déclenchement d'un transformateur, la perte d'un transformateur, la perte de circuits ou un accroissement excessif de la demande.

Tableau III.1: Incidents suivis d'un effondrement [15] [55]		
date	lieu	Durée
22-08-1970	Japon	30 minutes
22-09-1977	Jacksonville, Floride, É-U.	Quelques minutes
19-12-1978	France	4 heures de coupure
04-08-1982	Belgique	4.5 minutes
27-12-1983	Suède	1 minutes
12-01-1987	Ouest de la France	6-7 minutes
Été 1996	Ouest USA	Plusieurs heures
03 -02-2003	Algérie	Plus de 3 heures
31-03-2003	Iran	8 heures
28-08-2003	Ville de Londres, Angleterre	Quelques heures
23-09-2003	Suède et Danemark	Quelques heures
28-09-2003	Italie	Plus de 4 heures
18-01-2005	Arc lémanique	1 heure
25-05-2005	Moscou, Russie	5 heures de panne
Tableau III.2: Incidents non suivis d'un effondrement [15]		
date	lieu	Durée
22-09-1970	État de New York, É-U	Incertitudes pendant des heures
02-03-1979	Zealand, Denmark	15 minutes
10-08-1981	Longview, Wash, É-U	Quelques minutes
17-09-1981	Centre de l'Oregon, É-U	Quelques minutes
21-05-1983	Caroline du nord, É-U	2 minutes
11-06-1984	Nord-est des É-U	Incertitudes pendant des heures

20-05-1986	Angleterre	5 minutes
20-07-1987	Illinois et Indiana, É-U	Incertitudes pendant des heures
03-02-1990	Ouest de la France	Quelques minutes
05-07-1990	Baltimore, Wash É-U	Incertitudes pendant des heures
Nov-1990	Ouest de la France	Quelques minutes

Compte tenu de l'ampleur croissante du problème, plusieurs entreprises de service public ont mis au point des méthodes spéciales de réglage de la tension et de la puissance réactive. Électricité de France a mis en place un dispositif automatique centralisé de réglage secondaire de la tension (RST). L'ENEL (Italie) a, de la même façon, développé un dispositif régulateur automatique de la tension et de la puissance réactive utile des génératrices. La Tokyo Electric Power Company possède un dispositif de réglage adaptatif de l'alimentation en puissance réactive et a installé un nouveau système de surveillance en ligne pour assurer la sécurité de la tension.

### **III.4 Description du réseau**

#### **III.4.1 Modélisation de la machine synchrone**

La f.e.m de la machine synchrone est donnée par la relation suivante :

$$E' = V_t + r_a \cdot I_t + jX'_d \cdot I_t \quad (\text{III.1})$$

Où:

$E'$  : f.e.m transitoire de la machine synchrone.

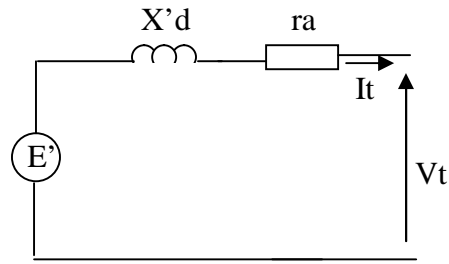
$V_t$  : Tension aux bornes de la machine.

$I_t$  : Courant de la machine.

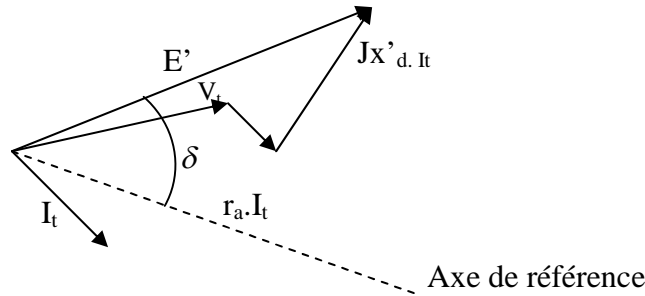
$r_a$ : Résistance statorique de la machine.

$X'_d$  : Réactance transitoire de la machine.

La représentation de la machine synchrone utilisée pour la solution du réseau et le diagramme de phase sont schématisés dans la figure (III.1)



(a) circuit équivalent



(b) diagramme de phase.

**Figure III.1** Représentation simplifiée d'une machine synchrone

Les composantes de la tension  $V_t$  aux bornes de la machine suivant les axes d et q sont :

$$V_d = E'_d - rI_d - X'_q I_q \quad \text{(III.2)}$$

$$V_q = E'_q - rI_q - X'_d I_d \quad \text{(III.3)}$$

### III.4.2 Réactance de la machine synchrone en régime transitoire

Lorsqu'une perturbation (court-circuit, brusque variation de la charge etc.) tend à faire la force magnétomotrice (f.m.m) de l'induit ou la position de ses pôles par rapport à ceux de l'inducteur, le passage d'un fonctionnement à l'autre ne peut être instantané, il y a un régime transitoire.

L'inducteur, les amortisseurs et toutes les pièces massives du rotor traversés par un flux variable sont les sièges de courants induits qui créent des flux s'opposant à la variation qui leur a donné naissance. Durant les régimes transitoires le flux créé par les courants de l'induit est inférieur à celui qu'ils créent en régime établi la réactance de l'induit est diminuée.

Nous utiliserons pour l'étude de la machine le modèle à deux axes, donné par la transformation de PARK ce modèle permet de montrer les variations de la f.e.m transitoire suivant les axes d, q.

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{[-E'_d - (X_q - X'_q)I_q]}{T'_{q0}} \quad (\text{III.4})$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{[E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d)I_d]}{T'_{d0}} \quad (\text{III.5})$$

$E_{fd}$  est la tension d'excitation.

$T'_{d0}$  et  $T'_{q0}$  sont respectivement les constantes de temps à circuit ouvert en régime transitoire suivant l'axe d et q.

Dans cette étude on néglige la variation de la f.e.m transitoire selon l'axe d. Donc la machine sera représentée par un modèle simplifié décrit par une équation, caractérisant la variation du flux sur l'axe q du modèle de PARK et par suite, tenir compte de la variation uniquement sur l'axe q soit l'équation (III.5)

### **III.4.3 Equations du mouvement de la machine**

Une grande perturbation donne naissance à des phénomènes électromécaniques transitoires dans le système électro-énergétique.

Pour décrire ces phénomènes il est nécessaire de résoudre l'équation différentielle décrivant le mouvement du rotor de la machine synchrone. L'étude de la stabilité transitoire fait intervenir des équations non seulement des paramètres électriques (tension, courant, f.e.m flux, etc.), mais aussi des paramètres mécaniques (couples, vitesses, etc.).

Le couple résultant agissant sur l'arbre du générateur est donné par la relation suivante :

$$C = J.\alpha \quad (\text{III.6})$$

Où

C: somme algébrique de tous les couples [N.m].

J : moment d'inertie des masses tournantes [kg.m<sup>2</sup>].

$\alpha$  : Accélération angulaire mécanique [rad/s<sup>2</sup>].

L'angle électrique  $\theta_e$  est égal au produit de l'angle mécanique  $\theta_m$  et du nombre de paire de pôles  $p$  soit :

$$\theta_e = p.\theta_m \quad (\text{III.7})$$

La fréquence  $f$  en tours par seconde est:  $f = \frac{p.N}{60}$  (III.8)

Où:

$N$  : Vitesse de rotation en [tr/min].

A partir des équations (III.7) et (III.8) l'angle électrique est:

$$\theta_e = \frac{60.f}{N}.\theta_m \quad (\text{III.9})$$

La dérivée seconde de l'équation (III.9) donne :

$$\frac{d^2\theta_e}{dt^2} = \frac{60.f}{N} \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (\text{III.10})$$

Le déplacement de l'angle rotorique  $\delta$  par rapport à une référence synchrone est donné par l'équation suivante :

$$\delta = \theta_e - \omega_0.t \quad (\text{III.11})$$

Où:

$\omega_0$  : Vitesse synchrone nominale [rad/s].

$t$ : Temps [s].

Si nous dérivons l'équation (III.11) par rapport au temps nous obtenons :

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (\text{III.12})$$

Une seconde dérivation donne.

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_0}{dt^2} \quad (\text{III.13})$$

$\frac{d\delta}{dt}$  et  $\frac{d^2\delta}{dt^2}$  représentent la vitesse angulaire [rad. électrique/s] et l'accélération angulaire [rad électrique/s<sup>2</sup>] respectivement par rapport à une vitesse synchrone.

Des équations (III.10) et (III.13) nous obtenons :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{60.f}{N} \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2} \quad (\text{III.14})$$

Où:

$\frac{d^2\theta_m}{dt^2}$  Représente l'accélération angulaire mécanique ( $\alpha$ ).

Par substitution de l'équation (III.14) dans l'équation (III.6) nous trouvons :

$$C = J \cdot \frac{N}{60.f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (\text{III.15})$$

Pour la simplicité des calculs il est préférable d'exprimer le couple en «per-unit ».

Le couple de base  $C_{base}$  est défini comme étant le couple nécessaire pour développer une puissance électrique et une vitesse nominale. [19]

$$C_{base} = \frac{S_{base}}{2\pi \left( \frac{N}{60} \right)} \quad (\text{III.16})$$

Le couple en « per-unit » est :

$$C = \frac{J \cdot 2\pi \left( \frac{N}{60} \right)^2}{S_{base}} \cdot \frac{d^2S}{dt^2} \quad (\text{III.17})$$

Dans l'étude de la stabilité transitoire des machines synchrones liées au réseau électrique, il est préférable d'utiliser une constante d'inertie  $H$  qui est défini comme suit: [9] [19]

$$H = \frac{\text{Energie cinétique emmagasinée en (MWS)}}{\text{Puissance de base en(MVA)}}$$

D'où :

$$H = \frac{\frac{1}{2} J (2\pi)^2 \left(\frac{N}{60}\right)^2}{S_{base}} \quad (\text{III.18})$$

Si nous substituons l'équation (III.18) dans l'équation (III.17) nous obtenons :

$$C = \frac{H}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (\text{III.19})$$

Les couples électrique et mécanique agissant sur le rotor de la machine sont de signes opposés, donc le couple accélérateur  $C_a$  est donné par la relation suivante :

$$C_a = C_m - C_e \quad (\text{III.20})$$

Où:

$C_m$  : Couple mécanique développée par la turbine.

$C_e$  : Couple électrique dans l'entrefer.

L'équation (III.19) devient alors :

$$\frac{H}{\pi \cdot f_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = C_m - C_e \quad (\text{III.21})$$

Puisque le couple et les puissances exprimées en per-unit (p.u) sont égaux pour des petites variations de vitesse, l'équation (III.21) peut être écrite sous la forme :

$$\frac{H}{\pi \cdot f_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = [P_m - P_e - D(\omega - \omega_0)] \quad (\text{III.22})$$

Où:

$D$  : Coefficient d'amortissement en général négligeable

$P_m$  : Puissance mécanique en (p.u).



$P_e$  : Puissance électrique en (p.u).

$D_\omega$  : Puissance tenant compte des frottements.

Puisque 
$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt}$$

L'équation (III.22) peut être écrite simultanément en deux équations différentielles non linéaires du premier ordre :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi \cdot f_0}{H} \cdot (P_m - P_e) \quad (III.23)$$

Et

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 = (\omega - \omega_0) \quad (III.24)$$

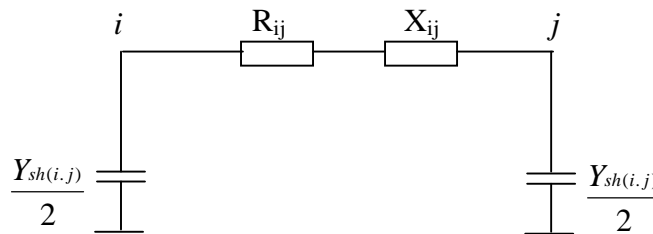
Puisque la vitesse synchrone nominale en radian par seconde est égale à  $2\pi \cdot f_0$   
L'équation (III.24) devient

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi \cdot f_0 \quad (III.25)$$

### III.4.3.1 Modèle de la ligne

Le modèle de la ligne est donné, sachant que le réseau est équilibré. Il est donc possible d'utiliser la représentation monophasée du réseau. La ligne de transport entre les deux nœuds  $i$  et  $j$  est représentée par le modèle en  $\pi$  comme indiqué par la figure III.2 :

$$Y_{ij} = Y_{ji} = \frac{1}{R_{ij} + jX_{ij}} \quad (III.26)$$



**Figure III.2** : Schéma en  $\pi$  de la ligne

$R_{ij}$  : résistance de la ligne i-j.

$X_{ij}$  : réactance de la ligne i-j.

$Y_{sh (i,j)}$  : demi-susceptance ou admittance shunt de la ligne i-j.

### **III.4.3.2 Modèle du transformateur**

Dans notre réseau les transformateurs à deux enroulements sont schématisés également par un quadripôle en  $\pi$  mais contenu de leur position, une présentation par un dipôle comprenant une réactance suffit.

### **III.4.3.3 Modèle de la charge**

Les charges d'un réseau sont représentées par des circuits équivalents et peuvent être traitées de plusieurs façons, pendant la période transitoire. Les modèles les plus utilisés sont des impédances ou admittances reliées à la terre.

La puissance de la charge est constante et égale à une puissance active et réactive. Les paramètres associés à l'impédance statique sont obtenus à partir de la puissance et la tension nodale calculées à partir de l'écoulement des puissances du système avant l'apparition de la perturbation.

La charge est représentée par une admittance constante passive.

Sachant que la puissance apparente de la charge est:  $S_L = P_L + j Q_L$

Où:

$P_{Li}$  et  $Q_{Li}$  sont respectivement la puissance active et réactive de la puissance injectée dans le nœud i;

$E_i$  : Tension nodale calculée.

On obtient son admittance équivalente  $Y_L$  par l'expression ci-dessous :

$$Y_L = G_L + j B_L \quad \text{(III.27)}$$

Où : la valeur réelle est la conductance  $G_L$  et la valeur imaginaire ou susceptance est  $B_L$  de l'admittance.  $Y_L$  :

$$G_L = \frac{P_L}{|V_t|^2}$$

$$B_L = \frac{-Q_L}{|V_t|^2}$$

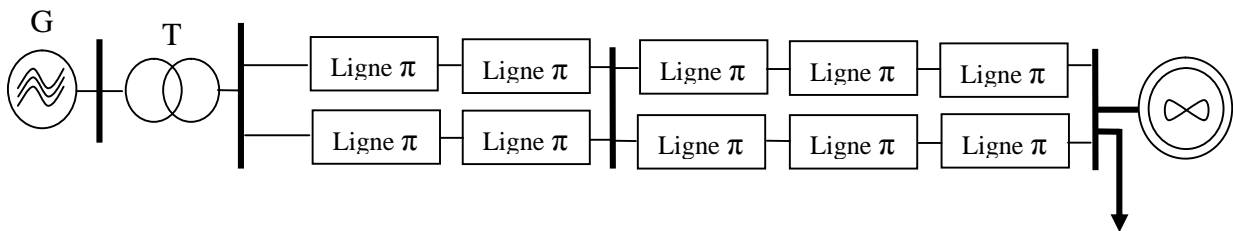
$V$  est la tension aux bornes de l'alternateur alimentant la charge. La figure III.3 représente l'admittance équivalente de la charge.



**Figure III.3 :** Modèle de la charge

### III.5 Simulation du réseau électrique sans défaut :

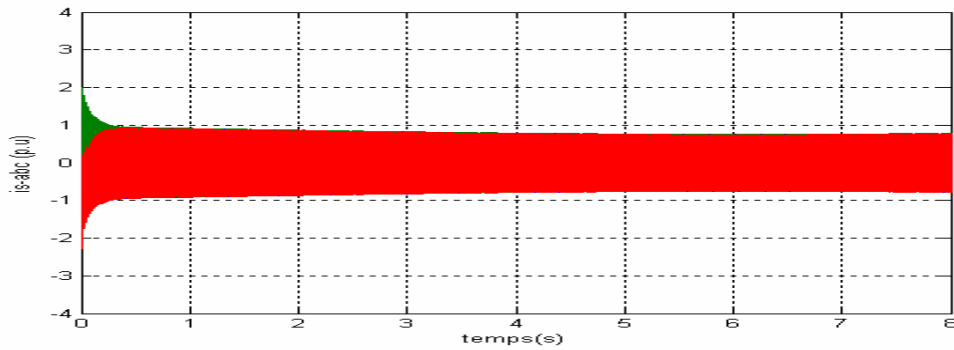
La figure III.4 représente un alternateur connecté à un réseau infini par le transformateur T et 500 Km de la ligne de transmission d'énergie sans défaut :



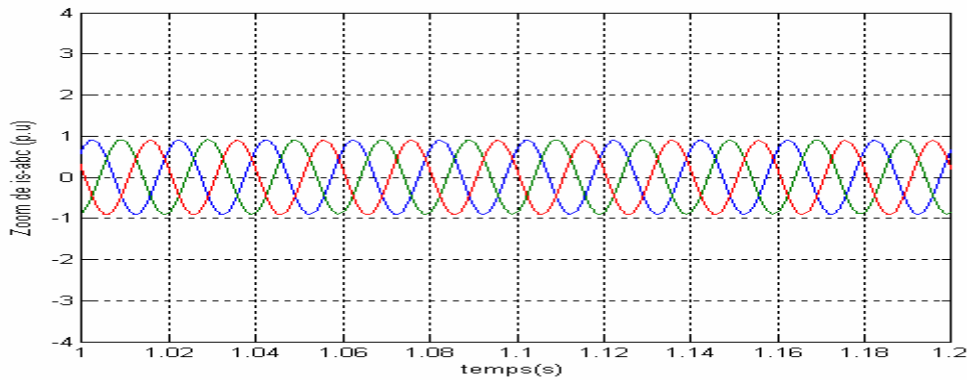
**Figure III.4:** Schéma global de réseau étudié

On remarque que le réseau à l'état sein est stable, la tension et le courant sont équilibrés et l'angle de charge est de  $53.8^\circ$ . quant à la puissance, elle est de 0.5pu. La tension aux bornes du générateur est de 15kv.

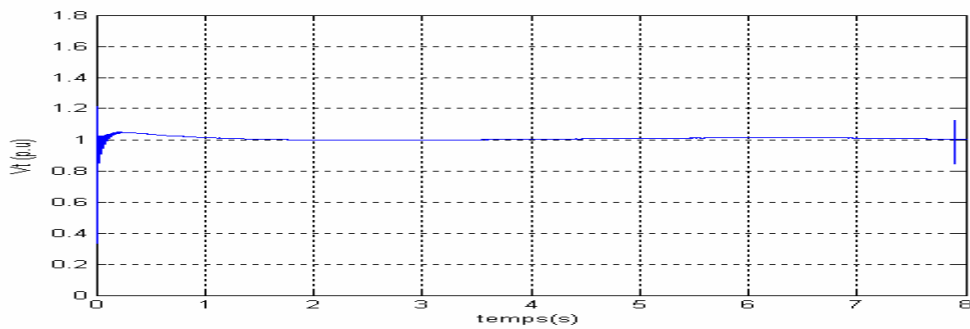
**III.5.1 Les résultats des simulations du réseau sain sont :**



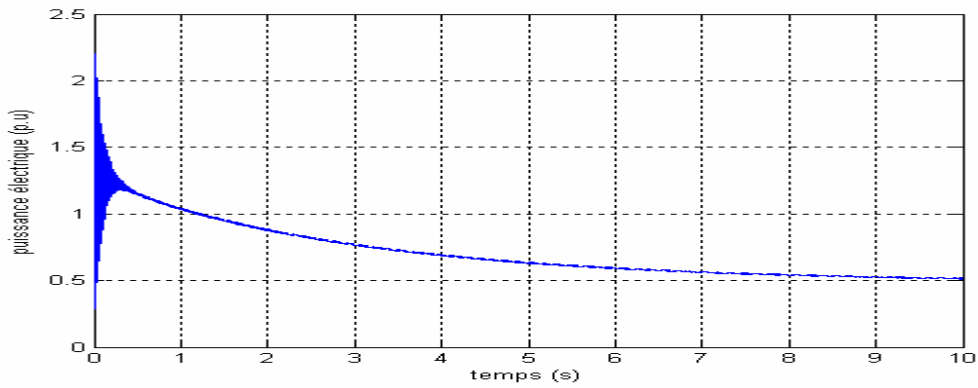
**Figure III.5 : Courants côté générateur**



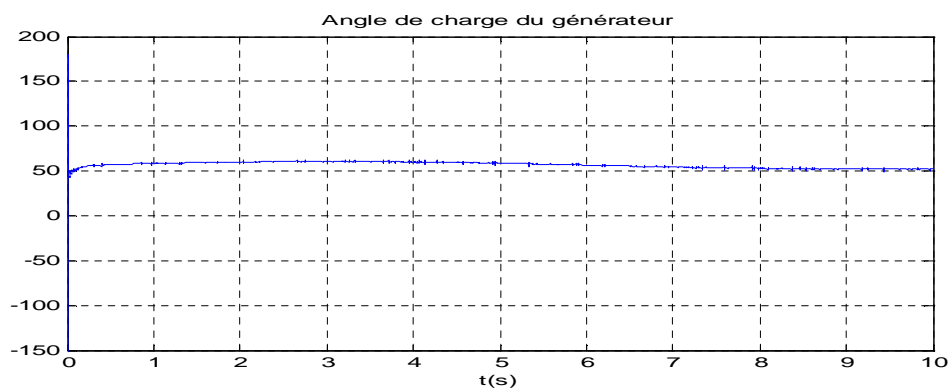
**Figure III.6 : zoom de courant du générateur**



**Figure III.7 : Tension aux bornes du générateur**



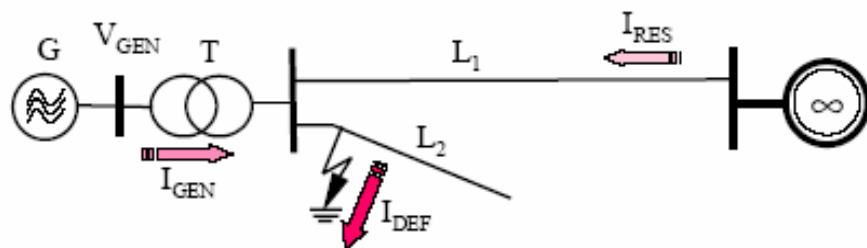
**Figure III.8 :** puissance coté générateur



**Figure III.9 :** angle de charge du générateur

### III.6 Etude et simulation du défaut

Le schéma (III.10) montre un exemple d'un défaut. La ligne L1 est en exploitation et la ligne L2 est sous tension et ouverte, l'impédance équivalente du réseau après l'élimination du défaut n'est pas modifiée.



**Figure III.10 :** Schéma d'un générateur connecté au réseau

Nous allons étudier les différents types de défaut :

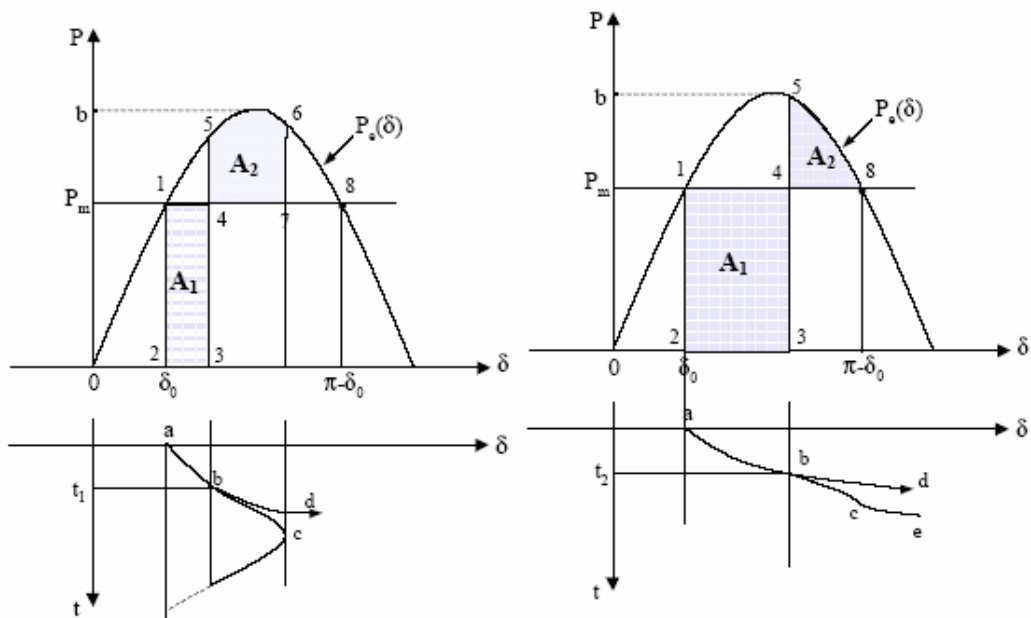
**III.6.1 Défaut symétrique**

Lors d'un court-circuit triphasé, La puissance active à la sortie du générateur est presque nulle et le courant est inductif.

Pendant le court-circuit, et en négligeant La puissance d'amortissement  $P_d$ , nous pouvons récrire l'équation (III.22) comme suit :

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{M} = \text{constante} = \varepsilon \quad \text{D'où} \quad \delta = \frac{1}{2}\varepsilon t^2 + \delta_0 \quad \text{(III.28)}$$

Cette équation correspond à la courbe a-b-d représentée sur la figure (III.11) :



(a)  $A_1 < A_2$

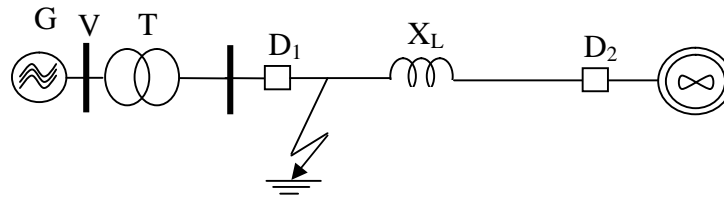
(b)  $A_1 > A_2$

**Figure III.11** : Les aires d'accélération et de décélération,

a) temps d'isolement court,

b) temps d'isolement long

A l'instant initial ( $t=0$ ) avant la perturbation , l'alternateur tourne à la vitesse synchrone, la position angulaire du rotor est  $\delta_0$  et la puissance mécanique d'entraînement  $P_m$  est égale à la puissance électrique  $P_e$  telle que l'indique la figure (III.11). En cas de court circuit tel qu'indiqué sur par exemple la figure (III.12) (défaut latéral) ou  $D_1$  et  $D_2$  représentent des disjoncteurs aux extrémités de la ligne,  $P_e$  devient nulle et  $P_m$  reste constante. [7]



**Figure III.12 : court- circuit latéral**

### III.6.1.1 Elimination rapide du défaut

Avant la suppression du défaut, l'angle interne a évolué du point 2 au point 3 et le rotor a absorbé une énergie cinétique proportionnelle à la surface A1 (Fig.III.11.a).

A l'instant t1 de l'élimination du défaut, l'angle interne ne varie pas, par contre, la puissance évolue du point 3 au point 5. Dans ce cas  $P_e > P_m$ , donc la vitesse du rotor va diminuer mais l'angle interne va augmenter jusqu'à ce que les surfaces A1 et A2 soient égales. La surface A1 correspond à l'énergie cinétique absorbée par le rotor lors du défaut et A2 à sa restitution après élimination du défaut. Au point 6, la vitesse du rotor arrive à la vitesse synchrone, à ce moment nous avons :  $A_1 = A_2$

Dans ces conditions, le rotor oscille autour du point (1) et le générateur ne perd pas le synchronisme.

### III.6.1.2 Elimination lente du défaut

La figure (III.11.b) montre la même situation que précédemment mais cette fois, la durée de défaut est plus grande. Dans ce cas, le réseau ne peut pas absorber l'énergie cinétique représentée par la surface A1. Par conséquent le rotor ne retrouve pas le synchronisme.

L'angle interne va donc dépasser le point d'équilibre instable (8), dans cette situation  $P_e < P_m$  et le rotor continue à accélérer et le générateur est instable.

A partir des explications précédentes, un des indices de stabilité peut être défini comme suit :

$$K_{surface} = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \quad (III.29)$$

Cet indice se définit en utilisant le temps critique de l'élimination du défaut :

$$K_{temps} = \frac{t_{cr} - t_{el}}{t_{cr}} \quad (\text{III.30})$$

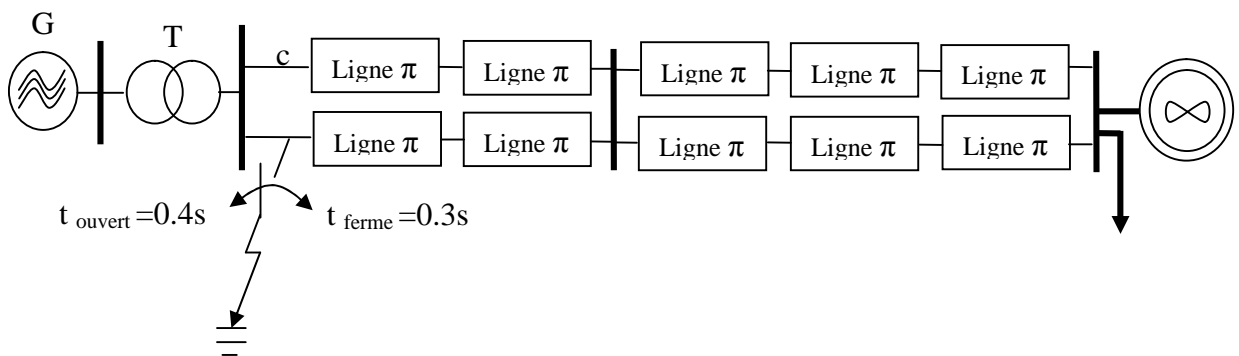
Avec :

$t_{cr}$  : temps maximum d'élimination du défaut en conservant la stabilité du système,

$t_{el}$  : temps d'élimination du défaut.

### III.6.1.3 Simulation d'un défaut symétrique rapide

Nous avons considéré pour notre étude un réseau de 400 kV, indiqué par la figure (III.13). Dans cette partie nous considérons un court-circuit triphasé symétrique pendant 100 ms au point C, comme représenté sur la figure suivante.



**Figure III.13** réseau de test

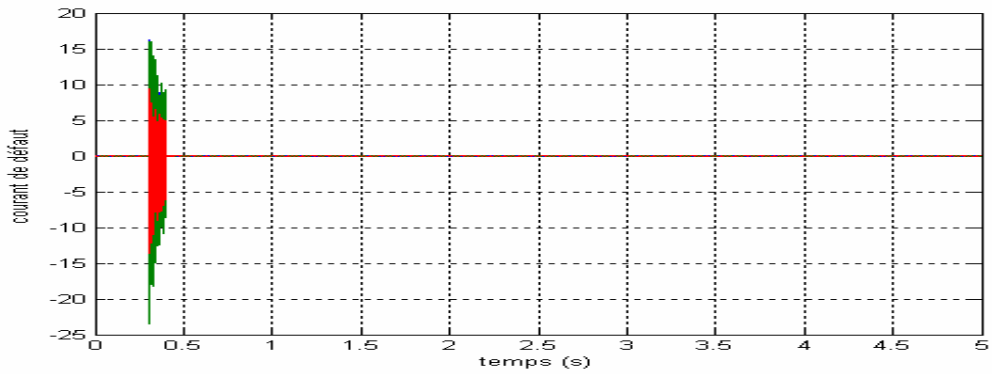
Le courant de défaut possède deux termes. Le premier est le courant injecté par le générateur et le second terme est le courant injecté par le réseau.

Les courants de défaut sont équilibrés.

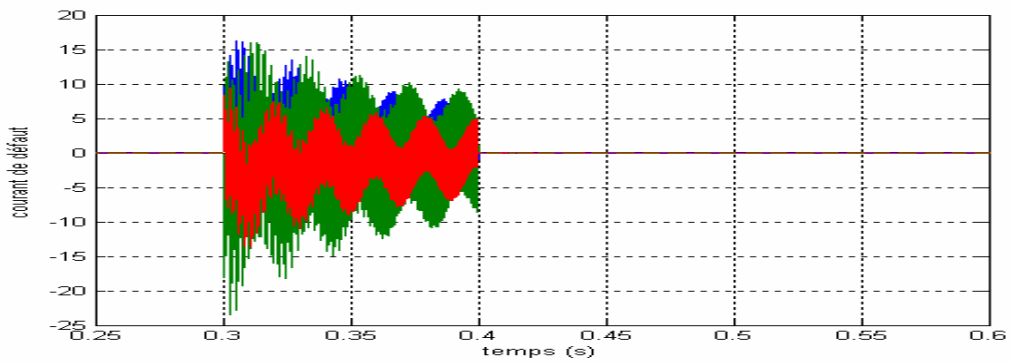
D'après les résultats, pour un court-circuit symétrique durant 100ms dans le cas d'une élimination rapide inférieur au temps critique le générateur conserve sa stabilité.



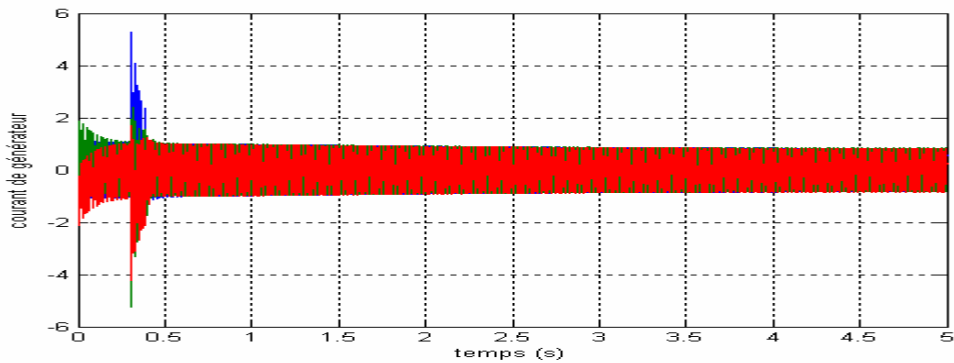
➤ **Résultats de simulations pour un court-circuit triphasé de 100 ms**



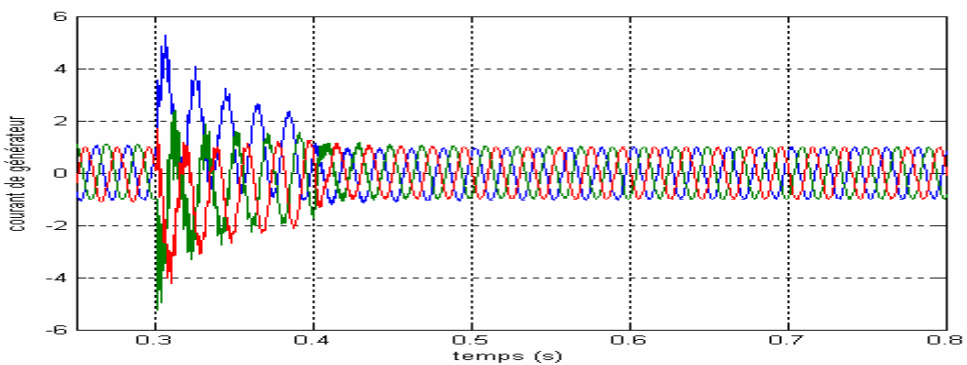
**Figure III.14 : Courant de défaut**



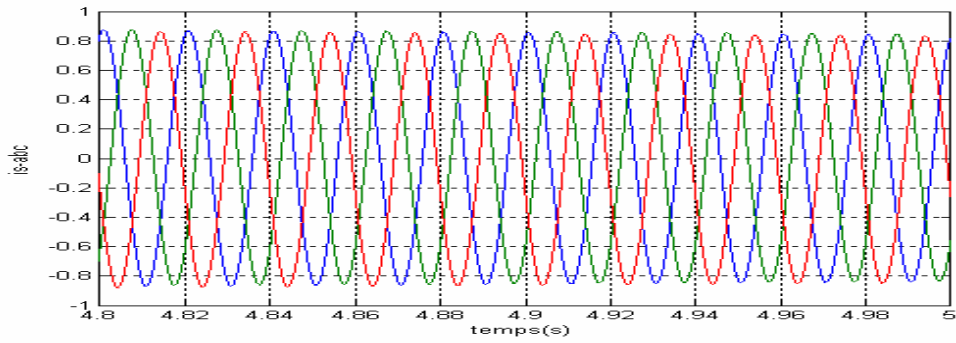
**Figure III.15 : Zoom de courant de défaut**



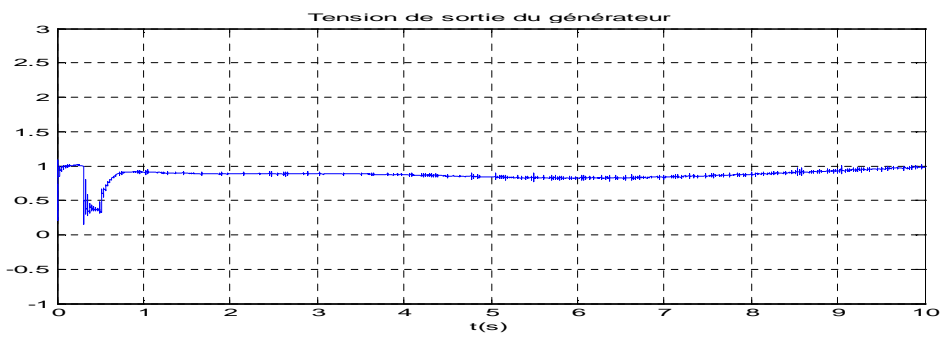
**Figure III.16 : Courant de générateur**



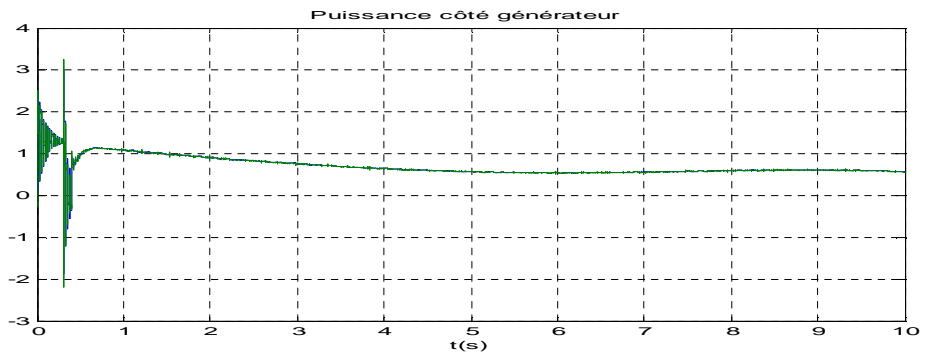
**Figure III.17 : Zoom de courant de générateur de 0,25s à 0,8s**



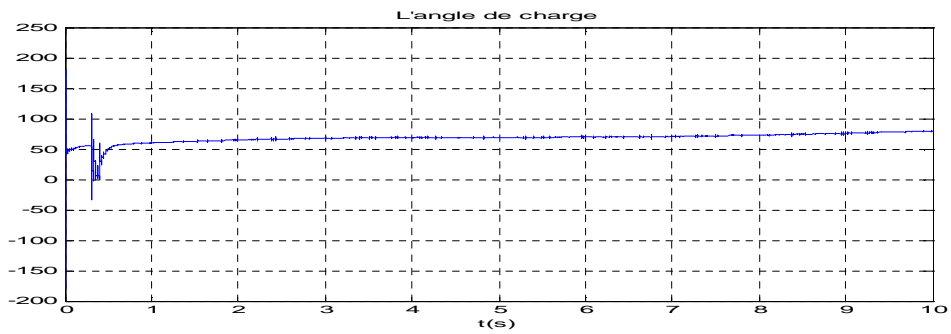
**Figure III.18 : Zoom de courant de générateur de 4.8s à 5s**



**Figure III.19 : Tension de sortie du générateur**



**Figure III.20 : Puissance coté générateur**



**Figure III.21 : l'angle de charge**

#### **III.6.1.4 Simulation d'un défaut symétrique lent**

Nous avons augmenté la durée du court-circuit de 100 ms à 200 ms. Dans ce cas la surface A2 est inférieure à la surface A1, comme indiquée sur la figure (III.11) Le générateur va perdre sa stabilité comme cela est visible sur les figures ci-dessous.

Si la puissance du générateur pendant le défaut n'est pas nulle, la surface A1 est diminuée, par conséquent la marge de stabilité du système d'après l'équation II.29 est augmentée.

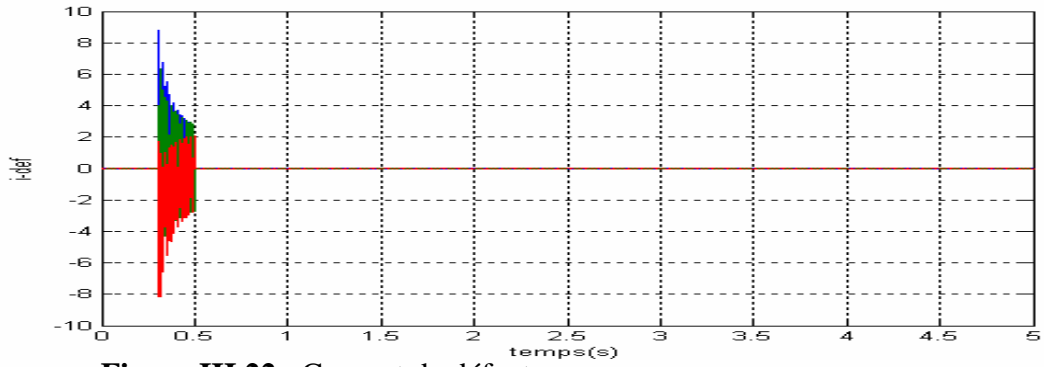
Dans la figure (III.24), on remarque qu'après apparition du défaut durant un laps de temps de 0.3 à 0.5s, soit 200ms, le générateur perd sa stabilité, chose illustré par une diminution de la puissance délivrée qui atteint un niveau plus bas qu'à l'état sein. D'où la nécessité d'une compensation via l'UPFC

La tension chute brusquement suite à l'impact du défaut, comme indiqué par la figure (4.25)

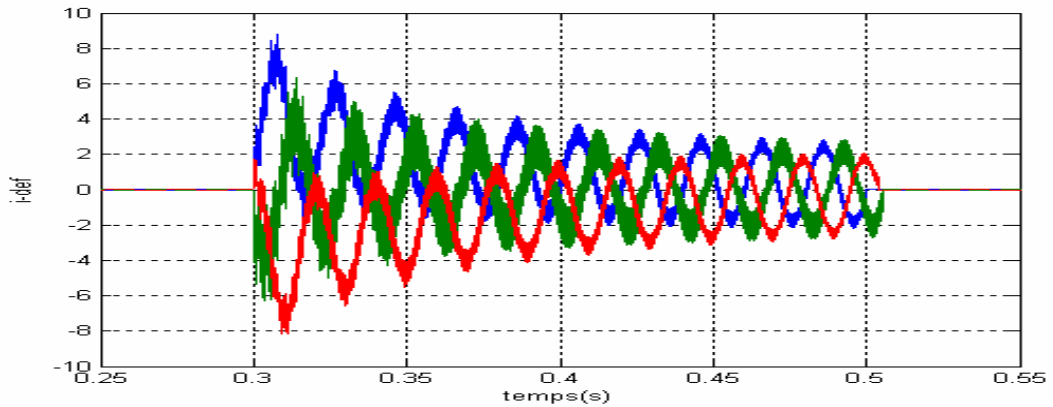
La figure (III.26) nous indique que la machine est fortement perturbé du l'effet du défaut triphasé lent,

A l'apparition du défaut le courant délivrés par l'alternateur suivant le trajet du court-circuit, et aucune puissance électrique ne sera généré ; la puissance mécanique de la turbine sera transformé en énergie cinétique ceci nous amène à déduire qu'il y a une accélération de masses tournantes, qui se traduit par une augmentation des angles de charges.

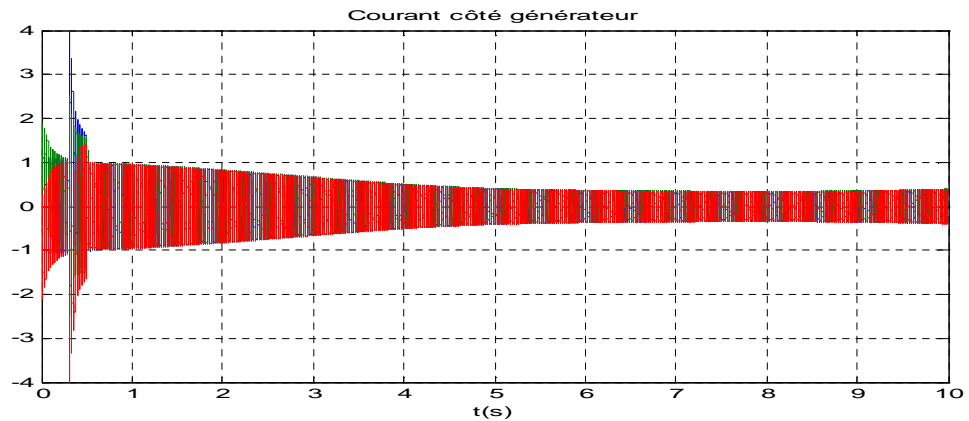
➤ **Résultats des simulations pour un court-circuit triphasé de 200ms**



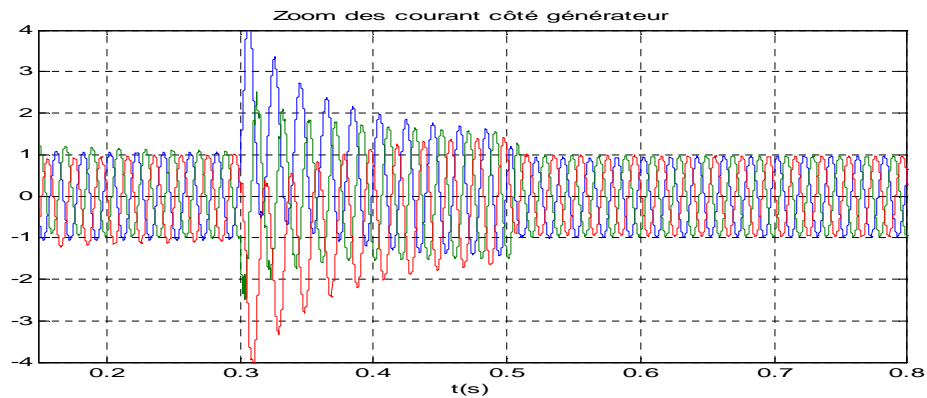
**Figure III.22 : Courant de défaut**



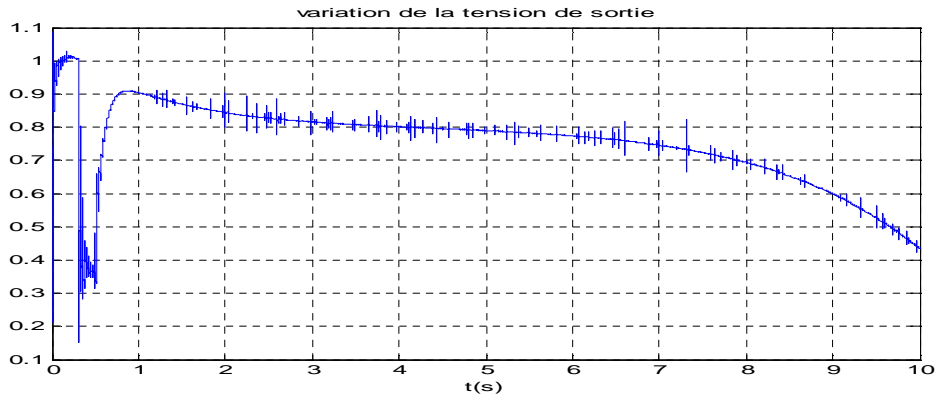
**Figure III.23 : Zoom de courant de défaut**



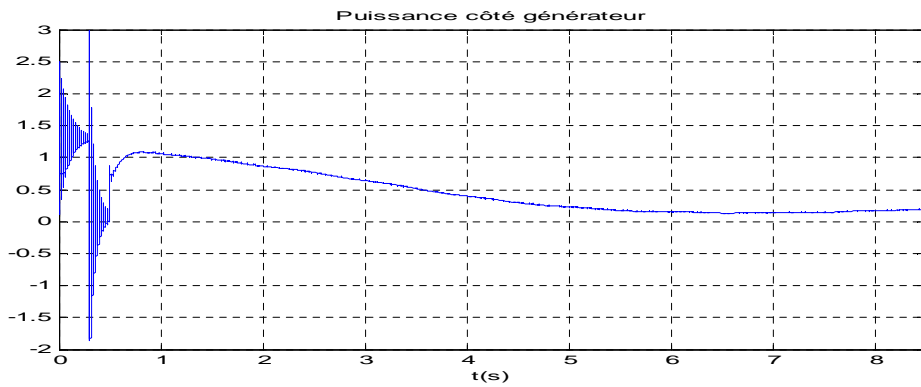
**Figure III.24 : Courant côté générateur**



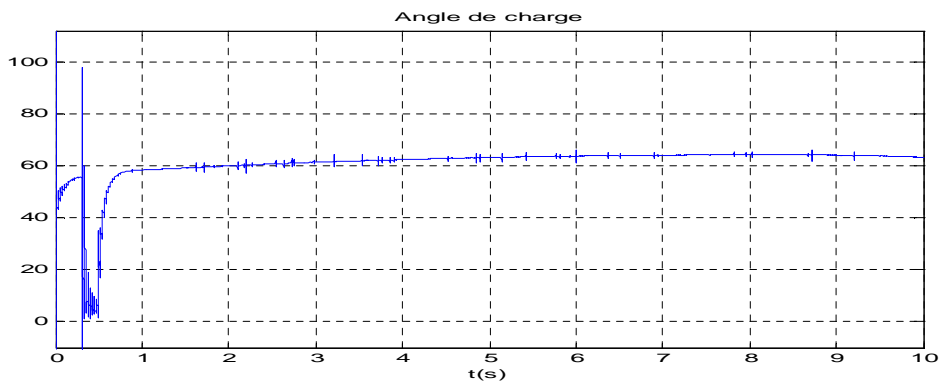
**Figure III.25 : Zoom de courant côté générateur**



**Figure III.26 : Variation de la tension de sortie**



**Figure 4.26 : puissance cotée générateur**



**Figure 4.27 : Angle de charge**

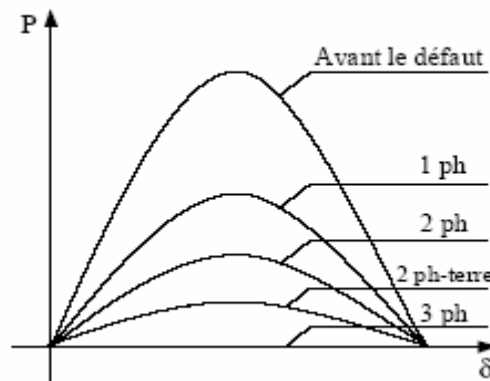
Dans cette partie nous avons étudié l'élimination rapide et lente d'un défaut symétrique.

Ensuite nous avons vérifié les résultats de notre étude théorique avec les simulations effectuées sous l'environnement de SimPowerSystem et Simulink/Matlab. Les résultats obtenus par les simulations confirment l'étude théorique qui les a précédée. C'est-à-dire que le système retrouve sa stabilité après l'élimination du défaut si celle-ci intervient avant 200 ms. Au-delà de cette valeur, le système est instable.

### **III.6.2 Défaut asymétrique**

Dans le cas d'un défaut asymétrique, la puissance électrique injectée par le générateur pendant le défaut ne sera pas nulle.

Cette puissance augmente de zéro, pour un défaut triphasé, à sa valeur maximale pour un défaut monophasé Fig.III.27.



**Figure III.27** : Puissance injectée par le générateur dans les cas différents.

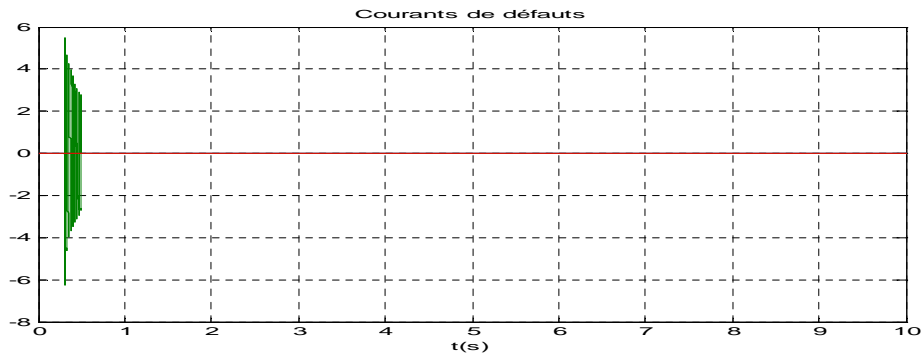
Il est évident que le cas le plus défavorable est le défaut triphasé car la puissance du générateur sera nulle. De ce fait, si le générateur garde sa stabilité après un défaut triphasé il sera toujours stable pour tout autre défaut.

#### **III.6.2.1 Défaut monophasé**

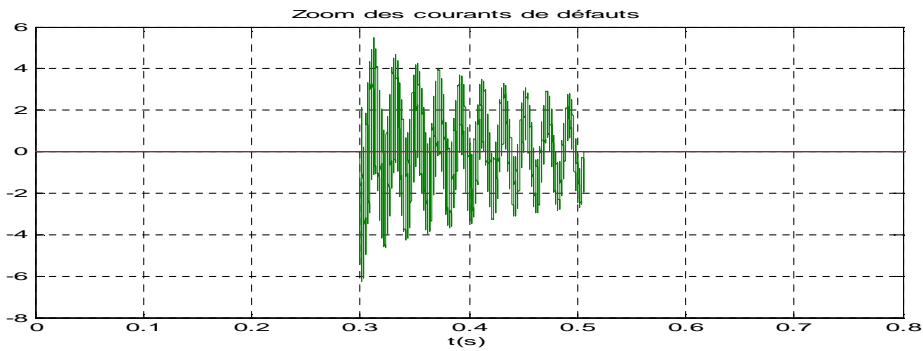
Nous considérons que la phase "a" au point C est reliée directement à la terre (Fig.III.13). Le neutre du réseau est également connecté à la terre.

Les figures ci-dessous montrent que le générateur reste stable pour un court-circuit asymétrique monophasé même avec une élimination lente (200ms) le cas où le système était instable pour un court-circuit symétrique. On constate que le défaut monophasé ne perturbe pas la stabilité du réseau même si il est lent.

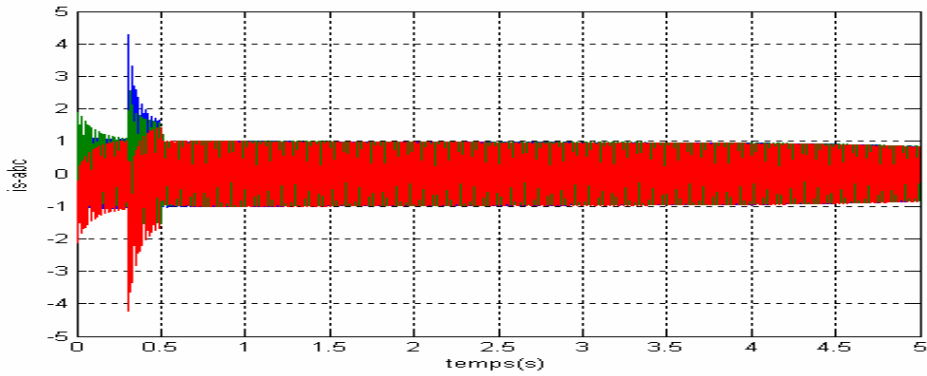
➤ **Résultats des simulations pour un court-circuit monophasé de 200ms**



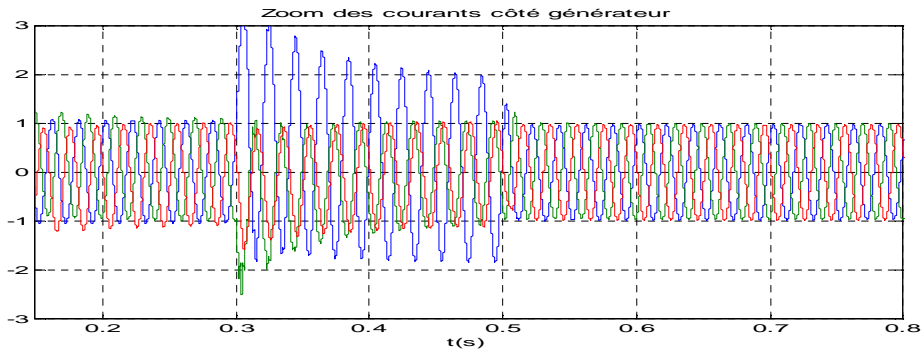
**Figure III.28 : courant de défaut**



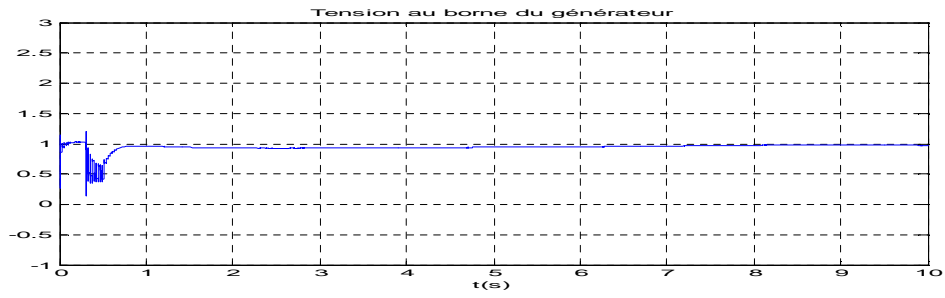
**Figure III.29 : Zoom de courant de défaut**



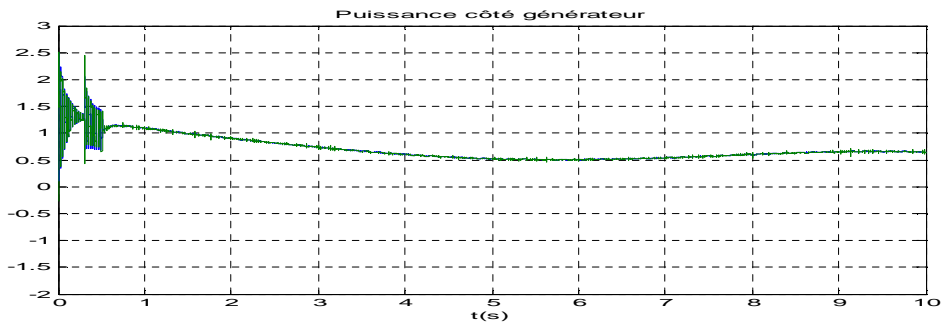
**Figure III.30 : Courant de generateur**



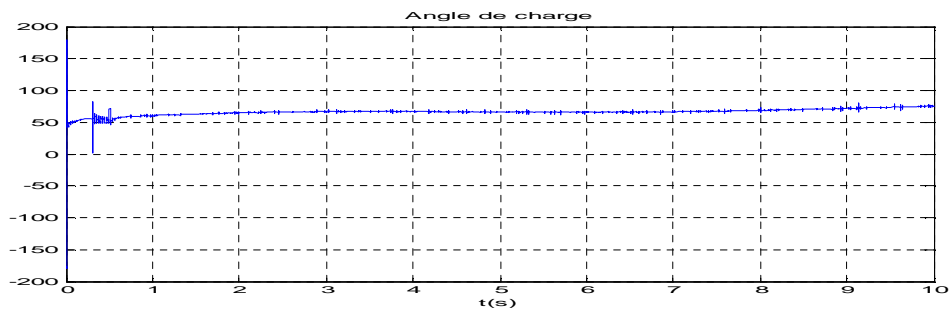
**Figure III.31 : Zoom de courant de générateur**



**Figure III.32 : Tension de sortie**



**Figure III.33 : Puissance coté générateur**



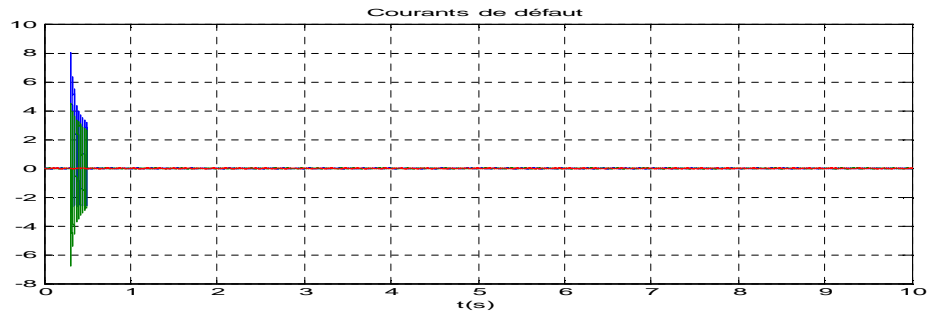
**Figure III.34 : Angle de charge**



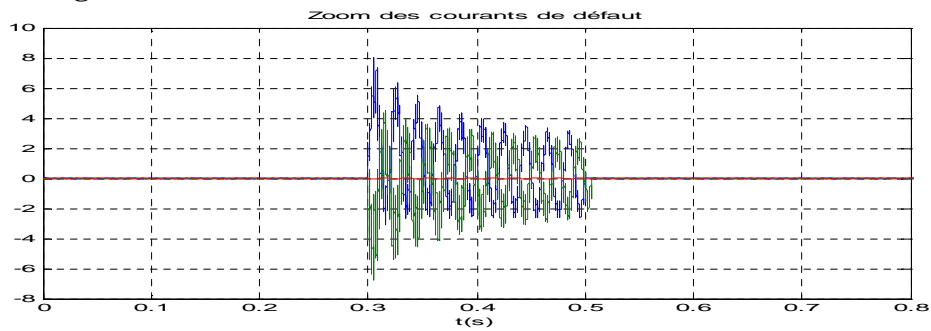
**III.6.2.2 Défaut diphasé :**

Nous considérons que les phases "b et c" au point C dans la figure (III.13) rentrent en contact accidentel entre elles. Les résultats de simulations pour ce défaut sont représentés sur les figures suivantes. On peut constater que pour un court circuit diphasé le générateur conserve sa stabilité même si le cas une élimination lent de défaut.

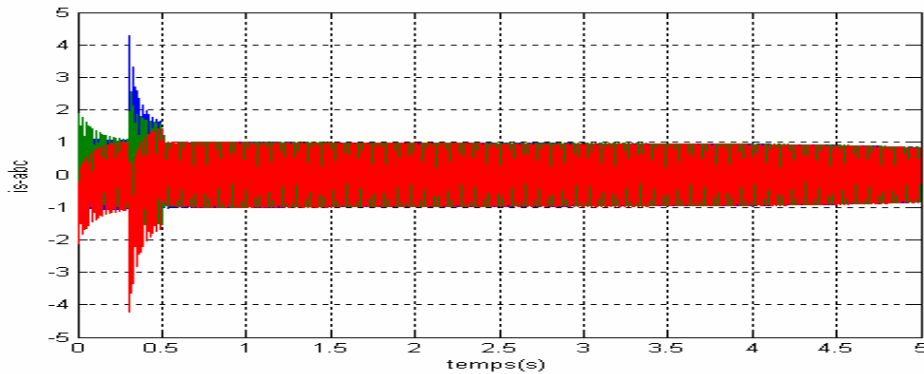
**Résultats des simulations pour un court-circuit biphasé de 200ms**



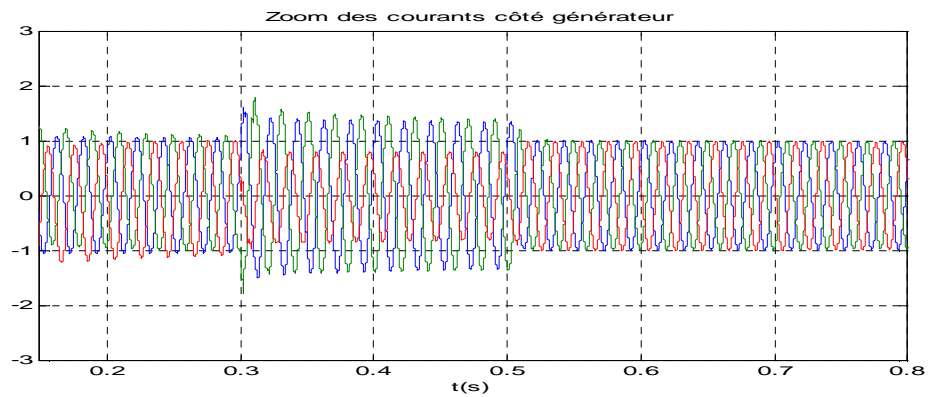
**Figure III.35 : Courant de défaut**



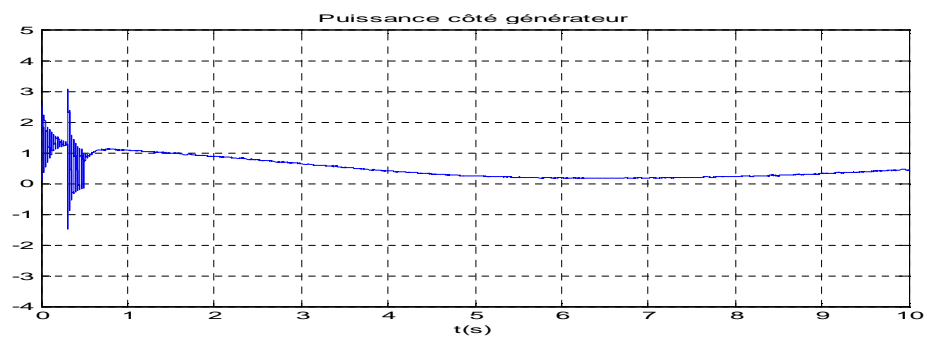
**Figure III.36 : Zoom de courant de défaut**



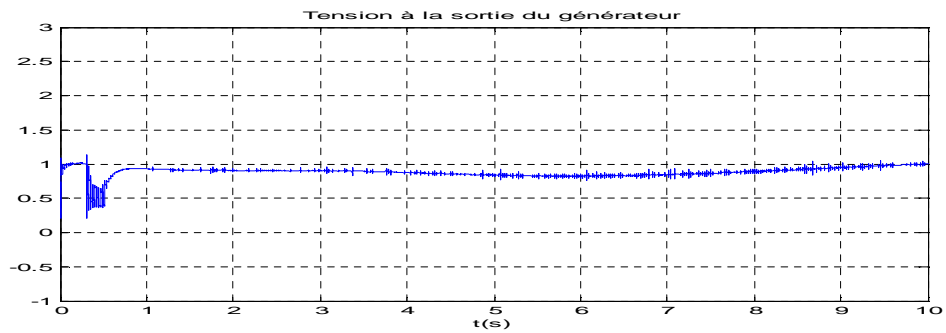
**Figure III.37 : courant coté générateur**



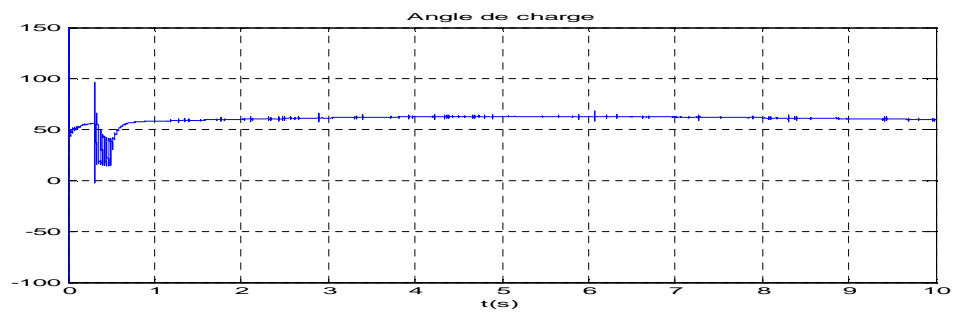
**Figure III.38 : Zoom de courant de générateur**



**Figure III.39 Puissance coté générateur**



**Figure III.40 : Tension à la sortie de générateur**

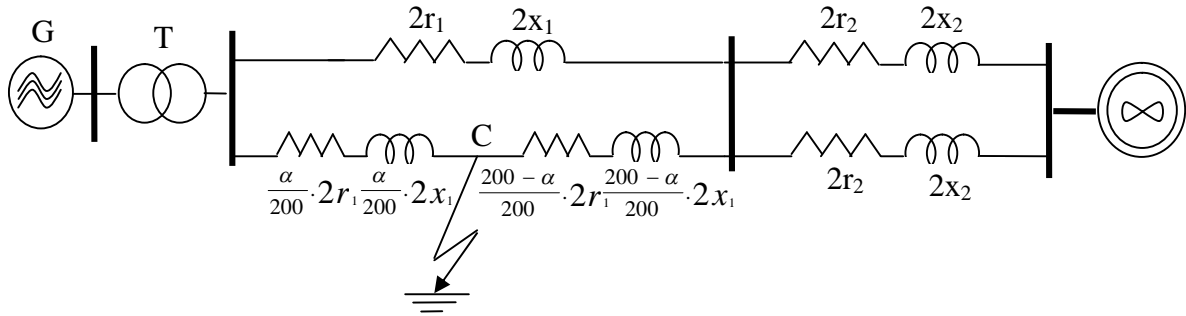


**Figure III.41 Angle de charge**

**III.7 Influence de la position de court-circuit :**

Si le point de court-circuit est situé loin du générateur, la puissance  $P_{GEN}$  n'est pas nulle. Cela veut dire que la surface d'accélération  $A_1$  est diminuée, par conséquent la marge de stabilité ( $K_{surface}$ ) est augmentée. Nous considérons que la position du court-circuit est représentée par un facteur  $\alpha$  (point C sur la figure(III.42)).

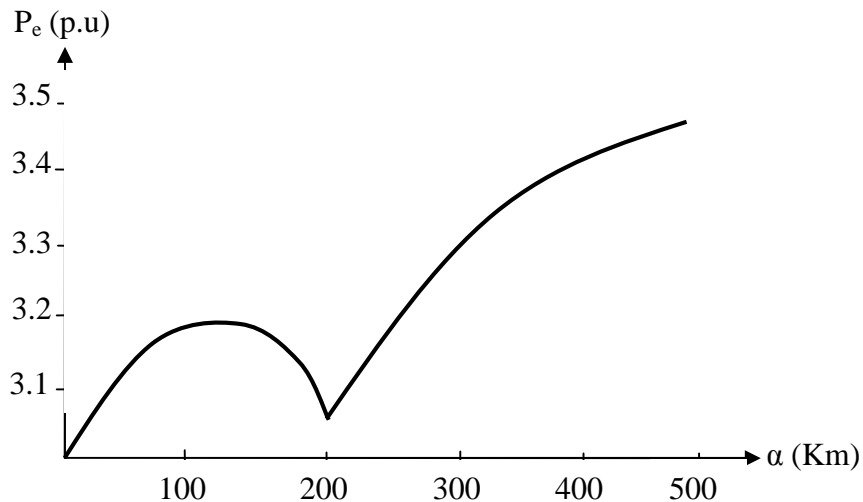
La figure (III.42) montre notre système d'étude dans la nouvelle situation.



**Figure III.42:** Schéma global de réseau étudiant en considérant un défaut à  $\alpha$  Km

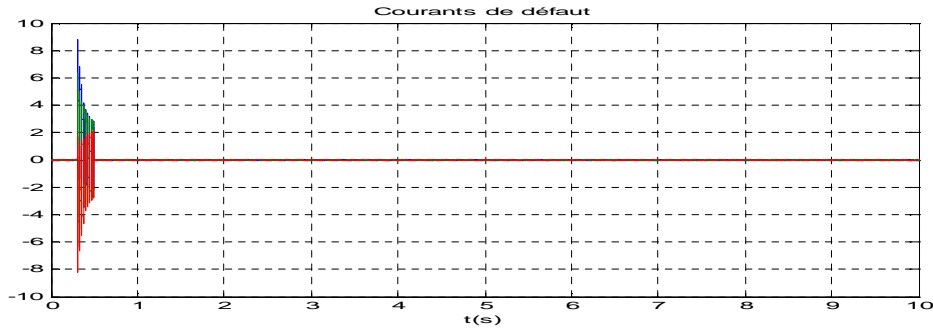
La variation de la puissance active en fonction de  $\alpha$  est donnée par l'équation III.31 et est représenté sur la figure (4.43).

$$P_e(\alpha) = \begin{cases} \frac{398.7}{200 - \alpha} + \frac{1.19(\alpha - 567)(\alpha - 304)(\alpha - 285)(\alpha^2 + 281\alpha - 20507)}{(200 - \alpha)(\alpha - 303)^2(\alpha + 128)} + 1.993 & 0 \leq \alpha < 200 \text{ Km} \\ \frac{-625\alpha + 21138}{(109 - 2.47\alpha)^2} + 0.738 & 200 \leq \alpha < 500 \text{ Km} \end{cases} \quad (III.31)$$

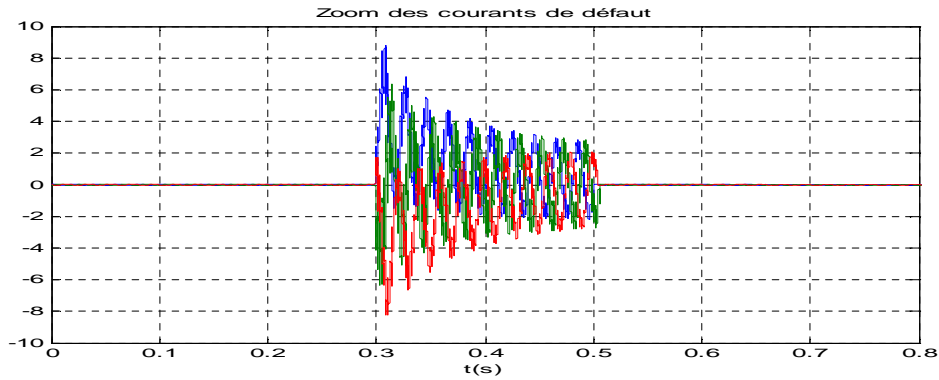


**Figure III.43 :** Variation de la puissance injectée par le générateur en fonction du lieu de court-circuit

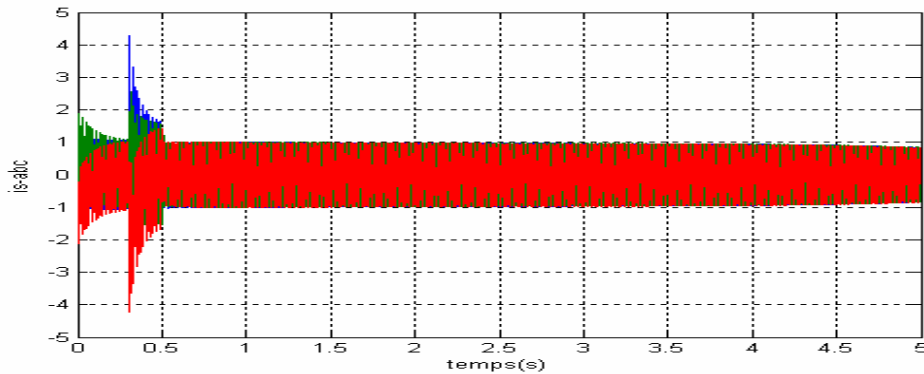
En se positionnant loin de générateur,  $P_e$  augmente car cette puissance peut passer par la ligne saine. A 200 Km du générateur la puissance injecté devient minimum (laquelle correspond aux pertes du réseau), car nous avons un court-circuit sur les deux lignes. Les résultats de simulation pour un court-circuit à 100 Km du générateur sont représentés les figures qui suivent. Dans ce cas le générateur garde sa stabilité.



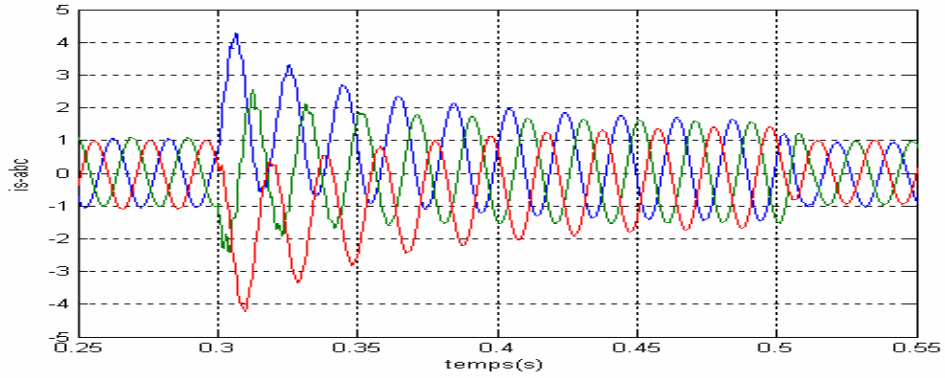
**Figure III.44 : Courant de défaut**



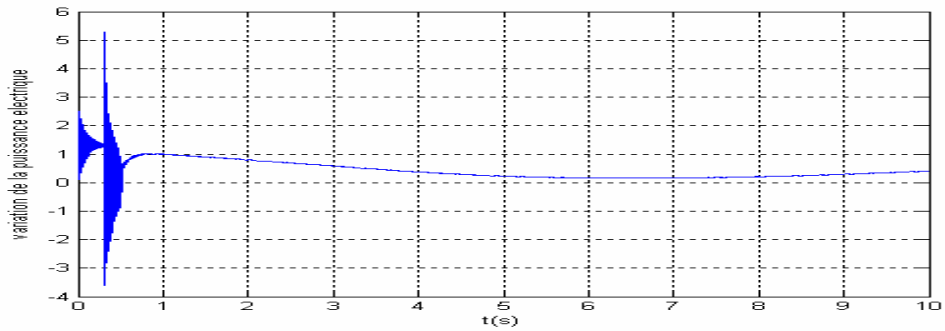
**Figure III.45 : Zoom de courant de défaut**



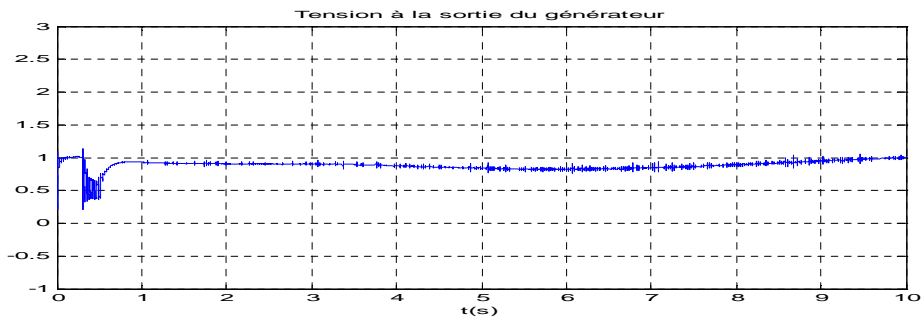
**Figure III.46 : Courant de générateur**



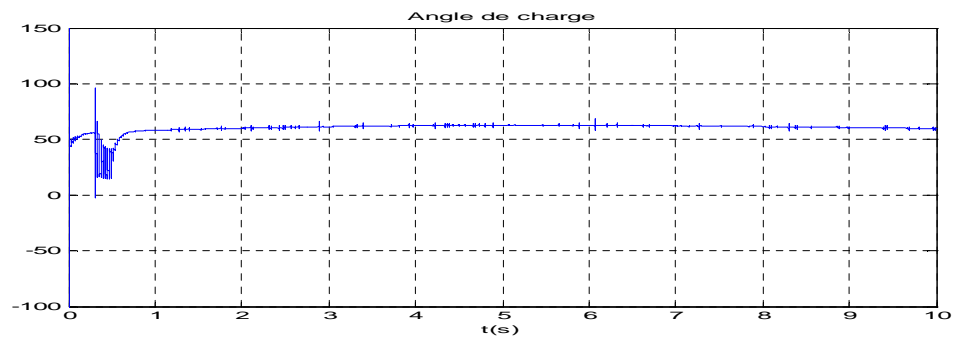
**Figure III.47 : Zoom de courant de générateur**



**Figure III.48 : Variation de la puissance électrique**



**Figure III.49 : Tension à la sortie de générateur**



**Figure III.50 : Angle de charge**

### **III.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents types de court-circuit ainsi que ses influences sur la stabilité transitoire d'un générateur connecté à un réseau infini via une ligne de transport d'énergie. Nous avons également étudié l'influence de la position du défaut sur la stabilité transitoire.

Nous avons constaté que parmi les défauts existants, le cas le plus défavorable pour la stabilité du système est le défaut symétrique. Par conséquent, nous considérons ce cas pour étudier l'apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques, si dans ce cas, le système conserve sa stabilité, il sera stable dans tous les autres cas.

## CHAPITRE IV

### L'Apport de l'UPFC sur la stabilité des réseaux électriques

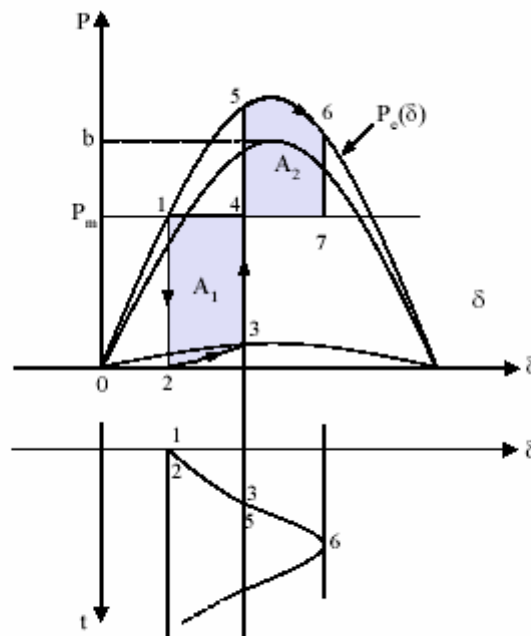
#### IV.1 Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique :

##### IV.1.1 Amélioration conventionnelle.

##### IV.1.1.1 Régulation de la tension du générateur

Le régulateur de tension (nommé l'AVR : Automatic Voltage Regulator) a une influence directe sur la puissance électrique développée par la machine. Au niveau des groupes de Production, un régulateur primaire de tension agit sur la tension d'excitation commandant le courant rotor de la machine de façon à asservir la tension stator à une valeur de consigne fixée a priori. Dans le cas de forte perturbation, l'AVR peut améliorer la stabilité transitoire. Juste après l'apparition d'un défaut et avant son élimination, l'AVR peut empêcher la perte du synchronisme. Ceci peut être expliqué comme suit.

Lors d'un défaut, la tension à la sortie du générateur diminue. Une erreur de la régulation  $\Delta V$  force donc le régulateur de tension à augmenter le courant d'excitation du générateur.



**Figure IV.1 :** L'effet du Régulateur de Tension du Générateur

Cependant le courant d'excitation ne peut pas changer immédiatement à cause des constantes de temps du régulateur, de l'excitation et du gain du régulateur.

Pour examiner l'effet du régulateur sur la stabilité transitoire, nous supposons que dans le Système présenté sur la figure (III.10), un court-circuit triphasé se produit à une distance  $L_2$ .

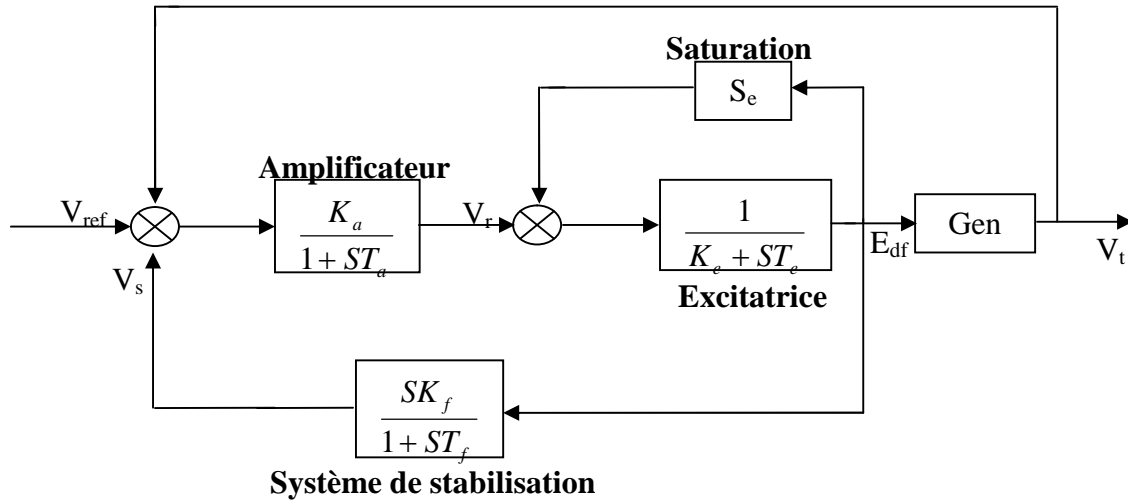
Nous avons vu que pour un court-circuit dont la durée vaut 200 ms, le système sans régulateur est instable, L'effet du régulateur, présenté sur la figure (IV.1), est d'augmenter le courant d'excitation du générateur. Cette augmentation du courant d'excitation, par conséquent de la tension  $E'$ , a deux effets positifs :

- lorsque  $E'$  augmente, la puissance d'accélération et aussi l'aire d'accélération  $A_1$  Diminue.
- à l'instant de l'élimination du défaut, la caractéristique  $P=f(\delta)$  s'accroît, donc la Puissance de décélération et aussi l'aire de décélération  $A_2$  augmentent (Fig.IV.2).

La régulation a été testée pour un temps d'élimination de défaut critique c'est-à-dire pour un temps qui ne permet pas au réseau de retrouver son équilibre si aucune régulation n'est installée. Les résultats de simulation pour ce défaut dans le cas d'un régulateur de tension AVR sont représentés sur les figures (IV.5 et IV.10). on peut remarquer, comparativement ceux obtenus sans régulation et montrés par les figures(IV.5, IV.10), que l'AVR améliore la stabilité transitoire de générateur en augmentant le temps critique ce qui montre que la régulation de la tension conventionnelle est efficace moyennant un choix adéquat des paramètre de régulation.

La régulation de la tension peut améliorer la stabilité du réseau, lors de défaut, la tension à la sortie du l'alternateur diminue induisant un écart  $\Delta V$  entre la valeur réelle  $V$  et la valeur de référence  $V_{\text{réf}}$ . Le régulateur consiste à détecter cet écart et générer des actions sur la tension d'excitation  $E_d$  en induisant une augmentation du courant d'excitation. La figure (IV.2) schématisant un régulateur de tension de type IEEE.





**Figure IV.2 : Schéma du régulateur de tension IEEE.**

$$\dot{V}_r = \frac{1}{T_a} V_r - \frac{K_a}{T_a} V_s - \frac{K_a}{T_a} V_t + \frac{K_a}{T_a} V_{ref} \quad (IV.1)$$

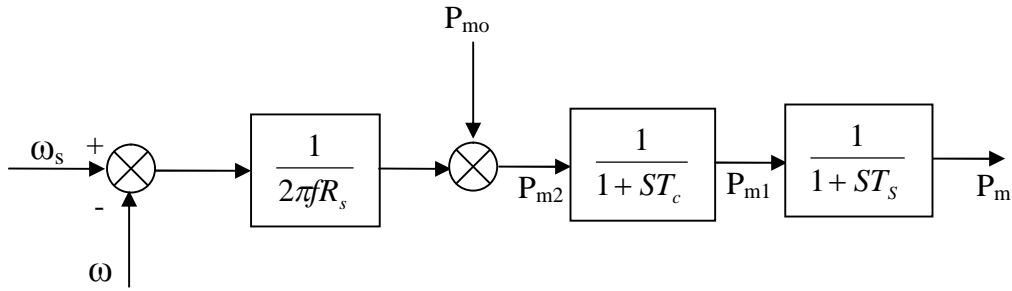
Les équations différentielles liées à ce type de régulation s'écrivent :

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{1}{T_e} V_r - \frac{S_e + K_e}{T_e} E_{fd} \quad (IV.2)$$

$$\dot{V}_s = \frac{K_f}{T_f T_e} V_r - \frac{K_f (S_e + K_e)}{T_f T_e} E_{fd} - \frac{1}{T_f} V_s \quad (IV.3)$$

#### **IV.1.1.2 Régulation de vitesse :**

A la suite d'une perturbation, le régulateur de vitesse des machines agit sur les organes d'amission du fluide afin de rétablir l'équilibre du réseau. La réserve de puissance permet d'assurer la correction de l'écart entre la fréquence de référence et la fréquence réelle. La puissance mécanique développée par la turbine est essentiellement fonction de la position des soupapes d'admission du fluide, elles même sous le contrôle du générateur de vitesse dont le schéma fonctionnel est celui de la figure (IV.3) qui suppose le régulateur de vitesse sans zone d'insensibilité [18].



**Figure IV.3** Schéma de régulation de vitesse

$R_s$  : le statisme.

$P_{m0}$  : la puissance mécanique d'entraînement à l'équilibre.

$T_c$  : le temps de réponse du circuit de commande.

$T_s$  : le temps de réponse du circuit de vapeur.

Les équations régissant la puissance mécanique liée à la régulation de vitesse de la structure donnée par la figure IV.3 sont les suivantes :

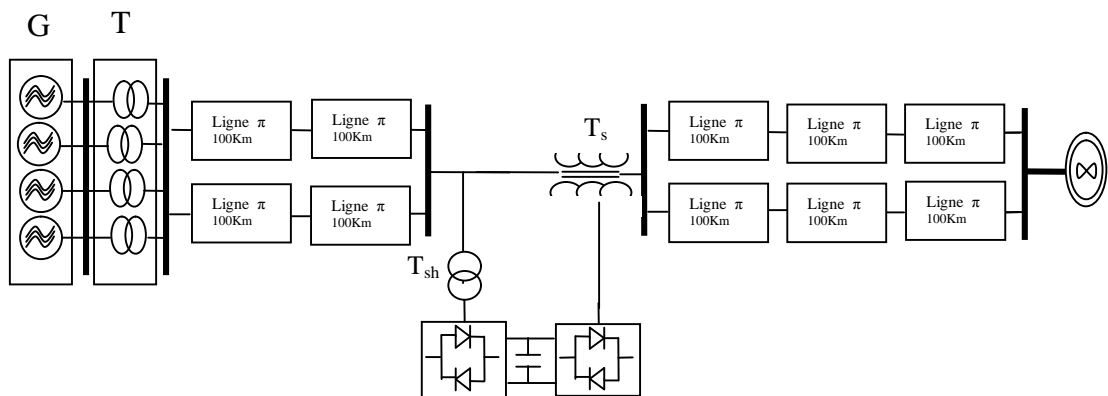
$$\dot{P}_m = \frac{1}{T_s} P_{m1} - \frac{1}{T_s} P_m \quad (IV.4)$$

$$\dot{P}_{m1} = \frac{1}{T_c} P_{m2} - \frac{1}{T_c} P_{m1} \quad (IV.5)$$

$$P_{m2} = P_{m0} - \frac{\omega_s - \omega}{2\pi f R_s} \quad (IV.6)$$

#### **IV.1.2 Amélioration de la stabilité par UPFC:**

Dans cette deuxième partie, on se propose d'étudier le comportement du réseau dans le cas de grandes perturbations et d'évaluer les effets positifs de l'UPFC. Nous considérons que le réseau est soumis à un court-circuit triphasé, nous allons également négliger les effets du régulateur de tension pour un court-circuit symétrique près du générateur dans les études suivantes, car ils ne peuvent être que favorables au maintien de la stabilité du réseau.



**Figure IV.4 : Schéma global du réseau étudié**

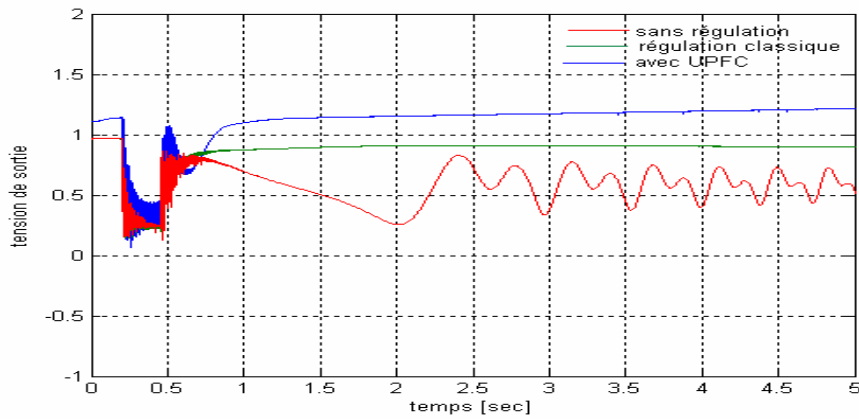
Le générateur G représente le modèle équivalent de quatre générateurs en parallèles de 250 MVA-5.7KV chacun. De même, le transformateur T est le modèle équivalent de quatre transformateurs en parallèles de 250MVA chacun. Le transformateur est destiné à l'élévation de la tension de sortie du générateur de 15.7 KV à 400 KV. Chaque section de 100 Km de ligne est modélisée par son propre modèle en  $\pi$ . Le transformateur  $T_{sh}$  sert à abaisser la tension de 400 KV (tension de réseau) à 20 KV (tension d'entrée des convertisseurs).  $T_s$  sert d'une part à adapter la tension de sortie de ces convertisseurs (20 KV) à la tension à injecter en série.

## IV.2 Simulation

Pour évaluer les performances de notre contrôleur FACTS, nous allons procéder à quelques simulation : nous allons présenter les résultat de l'évolution de l'état électrique du réseau lors du régime de fonctionnement perturbé. La perturbation introduite dans ce cas là est un court-circuit triphasé appliqué à l'instant  $t=0.3s$  et qui dure 200ms.

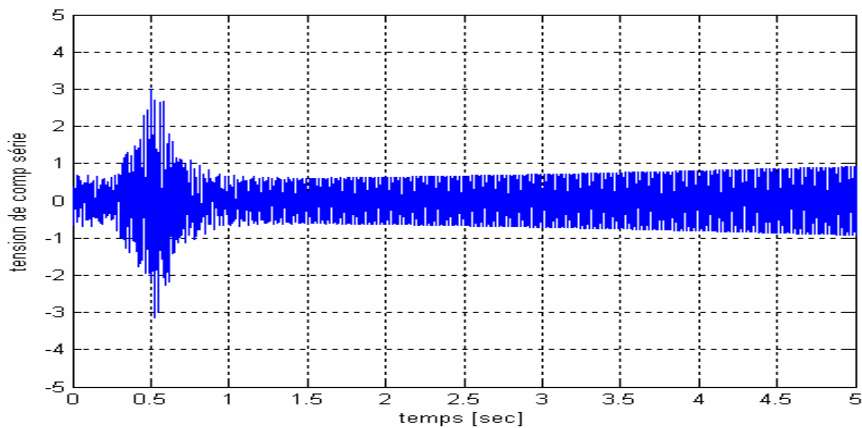
D'après la figure IV.5, dans le cas du réseau sans régulation, dès l'apparition de la perturbation, la tension chute, puis elle oscille. Car le régulateur classique (l'AVR) améliore la stabilité transitoire de générateur en augmentant le temps critique ce qui montre que la régulation de la tension conventionnelle est efficace moyennant un choix adéquat des paramètres de régulation.

Après l'intervention de l'UPFC une surtension apparaît dès le premier temps d'application du défaut puis elle revient à son état initiale. La présence de l'upfc permet que l'onduleur série injecte une tension additionnelle à la tension de la ligne de transmission.

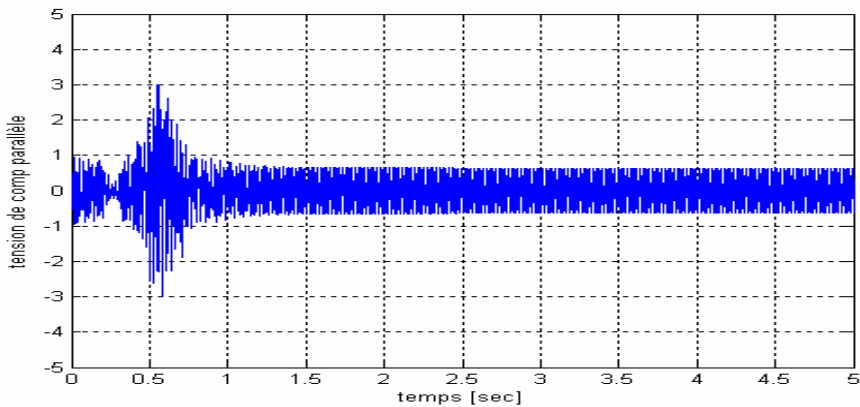


**Figure IV.5** : Variation de la tension de sortie de l'alternateur

Après l'application de la perturbation, nous constatons que la tension de compensateur série-parallèle oscille puis revient à sa valeur initial (figure IV.6 et figure IV.7). L'augmentation de cette tension due à la quantité importante de puissance réactive que doit fournir l'onduleur shunt pour soutenir la tension.

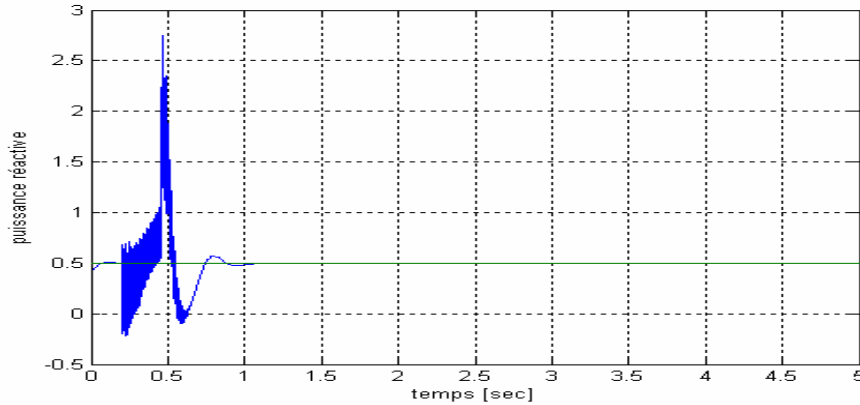


**Figure IV.6** : Variation de la tension de compensation série



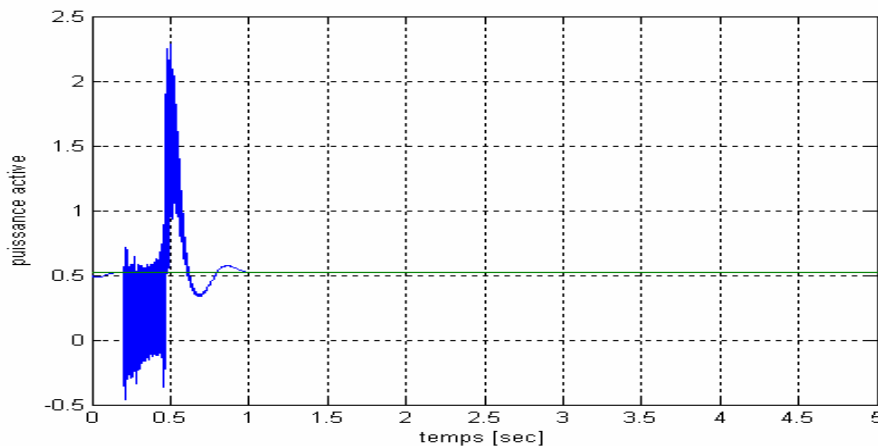
**Figure IV.7** : Variation de la tension de compensation parallèle

Dans le cas du réseau avec UPFC, la puissance réactive augmente avec un pic important (2.7pu) figure (IV.8), l'UPFC fournit de l'énergie réactive au réseau, il a ainsi un comportement capacitif, la puissance réactive perturbe pendant le défaut puis revient à sa valeur initial (0.5pu).



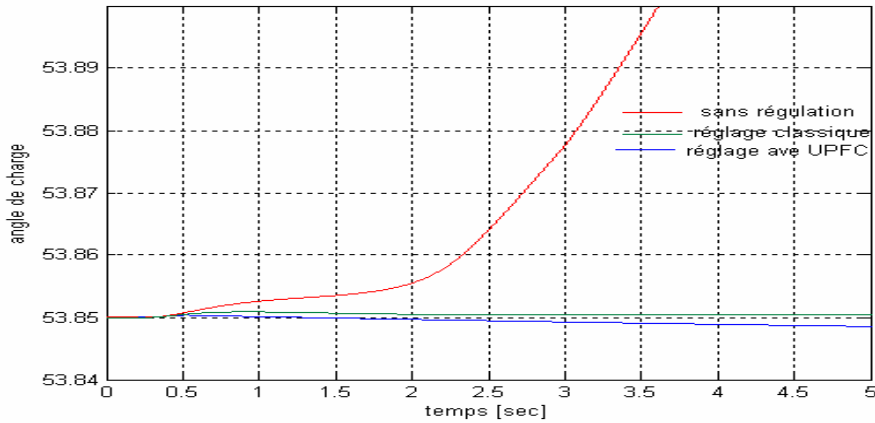
**Figure IV.8 :** Variation de puissance réactive transporté sur la ligne

Dans le cas du réseau sans UPFC, la puissance est instable (figure III.26). cependant, dans le cas avec UPFC nous remarquons l'apparition d'un variation notable due à l'échange de la puissance active entre le réseau et l'UPFC en effet, la perturbation à l'instant [0.3-0.5s], entraîne une variation de la tension de la ligne, l'UPFC va entrer en fonctionnement et permettra un transit de puissance active entre le générateur et le réseau.



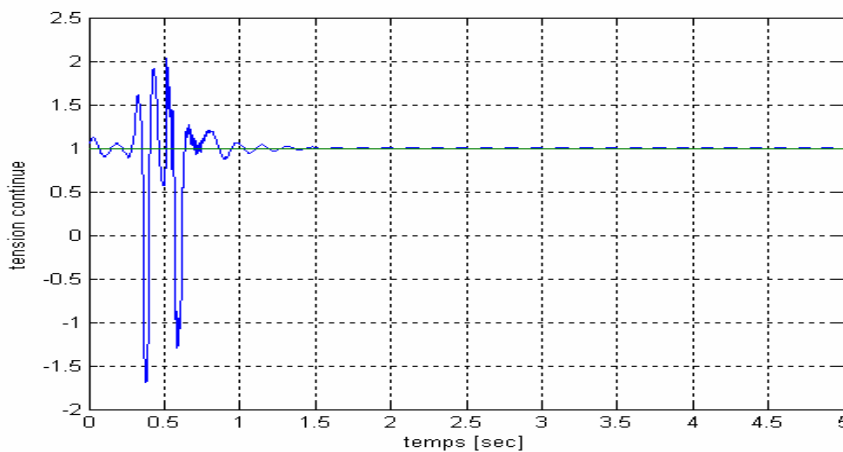
**Figure IV.9 :** Variation de puissance active transporté sur la ligne

On voit aussi dans la figure (IV.10) que l'angle de charge en présence de défaut dépasse énormément les valeurs prescrites par les normes en vigueur à savoir (53.8degrès). Avec le régulateur classique ou l'UPFC, on voit que l'angle de charge repris les valeurs normalisées.



**Figure IV.10** : Variation de l'angle de charge

La figure IV.11 présente l'allure de la tension du coté continue qui subi une augmentation relativement faible. Cette augmentation est due à la charge de son condensateur pour maintenir un niveau de tension constant. Ensuite, cette tension oscille au bout de 0.7s puis retourne à sa valeur de régime établi 1 pu



**Figure IV.11** : Variation de la tension continue  $V_{dc}$ .

### IV.3 Comparaison entre le STATCOM et l'UPFC

Comme il a été décrit auparavant, le convertisseur de tension contrôlé de façon appropriée peut générer une tension alternative de sortie au point de raccordement avec une fréquence fondamentale donnée et une amplitude variable (de 0 jusqu'à sa valeur maximale), ainsi qu'un angle de phase variant (de 0 à 360°). Via le transformateur, la tension de sortie du convertisseur est injectée dans la ligne, ce qui change la chute de tension effective à travers l'impédance de la ligne et par la suite le courant dans la ligne. Par conséquent, l'écoulement des puissances active et réactive dans la ligne de transmission peut être contrôlé indépendamment par l'ajustement de l'angle de phase et de l'amplitude de la tension série injectée. Un certain échange de puissances active et réactive prend place entre le système alternatif et le convertisseur série. La puissance active absorbée ou générée sera renvoyée ou fournie par le système alternatif à travers le convertisseur shunt. Ainsi, le convertisseur parallèle permet par voie directe de fournir la puissance réelle demandée par le convertisseur série. La puissance active absorbée ou générée par le convertisseur série provient de la circulation de l'énergie dans les trois phases. L'UPFC peut assurer plusieurs fonctions lorsque la tension injectée  $V_c$  prend plusieurs valeurs d'amplitude et de phase. Il peut fonctionner comme un régulateur de tension lorsque la tension introduite en série, est en phase avec la tension  $V_0$ . Il fonctionne comme un compensateur série lorsque la tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne. Il est aussi possible que l'UPFC puisse fonctionner comme un régulateur d'angle de phase lorsque la tension  $V_c$  possède un angle variable et une amplitude constante ou comme une combinaison de la régulation de l'angle de phase et du contrôle de la tension. L'UPFC assure non seulement les fonctions multiples de contrôle, mais aussi une grande flexibilité d'agir qui se manifeste par une capacité dans l'accomplissement de trois fonctions incluant la régulation de l'angle de phase, la compensation série et la régulation de la tension de la ligne simultanément et aussi bien une transition douce d'une régulation à une autre.

### IV.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié l'influence de régulateur de tension sur la stabilité transitoire, nous avons également étudié si l'UPFC est capable d'améliorer de la stabilité en présence d'une perturbation la plus dangereuse sur le réseau tel que le court circuit triphasé.

#### **CHAPITRE IV : L'Apport de l'UPFC sur la stabilité des réseaux électriques**

L'UPFC à un effet bénéfique pour l'amélioration de la stabilité lorsqu'il est contrôlé convenablement et est installé dans la zone la plus perturbée du réseau.



## **Conclusion générale**

L'étude de la stabilité transitoire des réseaux électrique de transport d'énergie électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux, comme nous avons pu le constater le long de ce mémoire.

Notre travail a été consacré à l'étude de l'UPFC à trois niveaux comme étant le dispositif FACTS le plus puissant qui permet d'améliorer la stabilité d'un réseau électrique.

Dans la première partie, nous avons présenté la description des différents systèmes FACTS existant. Par suite, on a défini le projet ambitieux qui faisant appel à l'électronique de puissance dénommés FACTS. Parmi ces derniers on cite le contrôleur électronique de flux de puissance unifié (UPFC) qui combine à la fois la compensation série et la compensation parallèle. C'est le système FACTS le plus puissant, dans la mesure où il permet de régler les trois grandeurs du réseau dans la ligne de transmission.

Le variateur de charge universel UPFC composé de deux onduleurs de tension, un connecté en série l'autre en parallèle et reliés par un circuit continu tout en détaillant sa structure, son principe et sa modélisation. relativement aux différents moyens cités plus haut, il présente plusieurs avantages car il est capable de contrôler simultanément et indépendamment les puissances active et réactive, c'est-à-dire qu'il peut agir sur les trois paramètres associés au transit des puissances active et réactive dans le réseau en occurrence la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport.

Dans la partie modélisation, nous avons présenté le modèle mathématique d'un UPFC à trois niveaux, nous avons opté pour la commande MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion), car les puissances mises en jeu sont importantes, ce qui nécessite un contrôle de la fréquence des commutations.

Les performances du contrôleur PI a été développé et évalué en simulations sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats des simulations montrent que le contrôleur PI donne un meilleur résultat.

Finally, we have analyzed the behavior of the UPFC incorporated in an electrical network in order to improve its stability when it is subjected to a perturbation. We have observed that the UPFC has a beneficial effect when it is connected in the optimal location. As future work, we wish that this work be finalized by conversion of the ideal to the real by introducing the multilevel inverter so that the results could have a more practical aspect, study the stability of multimachine networks using advanced control techniques.

## ***Bibliographie***

- [1] **Allaoui Tayeb** : Réglage robuste de l'UPFC pour améliorer les performances d'un réseau mono et multi machines. Thèse de doctorat, département d'électrotechnique, USTO Oran Janvier 2007
- [2] **Allaoui Tayeb** : Réglage robuste de l'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissances dans un réseau électrique. Thèse magister, département d'électrotechnique, USTO Oran Avril 2002
- [3] **Nicolas Buyaut** : Etude de commande généralisée des filtres actifs parallèles. Thèse de doctorat, école doctorale science pour l'ingénieur de LANPES 1999
- [4] **Tahir Yamina** : simulation et modélisation d'un STATCOM pour des études de stabilité, These de magister Université Mohamed Boudiaf, Faculté de génie électrique, département électrotechnique, Septembre 2003
- [5] **K. Bouleriel** : Etude et simulation d'une commande du contrôleur électrique d'écoulement de puissance unifié UPFC, These de magister Université Mohamed Boudiaf, Faculté de génie électrique, département d'électrotechnique, Juillet 2003
- [6] **M. Belghanem** : Etude et analyse d'un onduleur a trois niveaux utilisé comme compensateur statique d'énergie réactive. Thèse de magister Université Mohamed Boudiaf, Faculté de génie électrique, département d'électrotechnique, Juillet 1999.
- [7] **A.Tahri** : Analyse et développement d'un compensateur statique avancé pour l'amélioration de la stabilité transitoire des systèmes électroénergétiques, mémoire de magéster Université Mohamed Boudiaf, Faculté de génie électrique, département d'électrotechnique, Juillet 1999.
- [8] **J.B.Ekanayke, N.Jenkins**, « Selction of passive elements for a three-level inverter based Static Synchronous Compensator », IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.14, No.2, April 1999.

- [9] **M.B.Bechir, E.M.Berouk, A.Henni, M.Tadline, G.Manesse**, « Commande non linéaire par mode glissant et par la théorie de Lyapounov d'un redresseur MLI à deux niveaux application au réglage des tensions d'entrée d'un onduleur de tension triphasée à trois niveaux, International Conférence on Elettrotecnisc », ICEL 2000, U.S.T. Oran, ALgeria, 13-15 Novembre 2000.
- [10] **Uzunovic E, Reeve J.**, « EMTP studies of UPFC power oscillation damping », NAPS, California, octobre 1999.
- [11] **Yu Q., Round S.D., Norum L., Undeland T.M.**, « Performance of a Unified Power Flow Controller Using a d-q Control Systeem », to be published at Proc. Of IEEE AC/DC transmission conference London, 19996
- [12] **B.Yoo and W.Ham**, « Adaptive fuzzy sliding mode control of nonlinear system », IEEE Trans.on Fuzzy Syst, Vol.6, N2, pp.315-321, 1998.
- [13] **Denai M.A, Allaoui T.**, « Robust International Model Control of UPFC-Based Power Flow Compensation », Confarence sur le genie électrique CGE'04, EMP 25-26 décembre 2001.
- [14] **J.P.Barret, P.Bornard and B.Meyer**, « Simulation des réseaux électriques », EYROLLES, 1997.
- [15] **M.Berbiche**, « Sur la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique approché par reconnaissance des formes statique », thèse de Doctorat de l'université PAUL SABATIER de TOULOUSE (Science), 5 juillet, 1990.
- [16] **S.M.Sadeghzadeh**, « Amélioration de la stabilité transitoire et de l'amortissement des oscillation d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC », Thèse de Doctorat de l'INPG 13 Mars 1998.
- [17] **S.M. Sadeghzadeh, M.Ehsen, N.Hajd Said et al**, « Improvement of Transient Stability limit in power system transmission lines using fuzy control of FACTS devices », IEEE Trans. On power systems, vol. 13, No.3, pp.917-922, August 1998.
- [18] **E.GShahalami**, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy, France, 13 octobre 2003.

- [19] **L.G.Gyugyi, C.D.Schauder, K.K. Sen**, « Static Synchronous Serie Compensator. A solide-state approach to the Serie Compensation of transmission line », IEEE Trans. On power Delivery, Vol.12, No.1, January 1997.
- [20] **S.Hajri, M.Benrejeb and P.Borne**, « Sur une nouvelle approche de la commande par mode glissant », JTEA'95, Nabeul, Tunisie, 1995.
- [21] **Hauth R.L., Human T., Newell R.J.**, « Applications of a Static VAR Compensator in Western Nebraska », IEEE Transactions. On PAS, PAS-97, No5, 1978, p.1955-1964.
- [22] **Y.Yu, C.Jianye, H.Yingdue**, « STATCOM modeling and analysis in damping power system oscillations », copyright (C) 2000 by Tsinghua Univarsity, Beijing, China Published by American Istitute of Aeronautics and Astronautics, Inc.with permissiom.
- [23] **N.Dizdarevié**, « Unified Power Flow Controller In Alleviation of Voltage Stability Problem », thèse de doctorat, Université Zagreb, 2001.
- [24] **G.Garcia**, « Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique par reconnaissance des formes », thèse de doctorat de l'Institut National des Science Appliquées de Toulouse, 20 Juin 1988.
- [25] **A.Garcia-cerrada and P.Garcia-gonzalez**, « Control System for a Transmission Line », 8th European conference on power electronics and applications, EPE 99, Lausanne, Swiss, 1999.
- [26] **Bergqvist L.E, Hillberg C., Prasad M. and Kumar D.**, « Desing of modulation controller for stabilization of parallel AC lines in the Rihand-Dehli HVDC transmission », Cgré symposium, boston, 1987, paper 300-14.
- [27] **H.BUHLER**, « Réglage de systèmes d'électronique de puissance », presses polytechniques et universitaire romandes, CH-1025 Lausanne, 1999.
- [28] **Chai T., Mao K., Qin X.**, « Decoupling design of multivariable generalized predictive control », IEEE proceeding on control thaory and applications, 1994.vol.141, No3, p.197-201.
- [29] **Benyamina Maâmar**, « Commande multivariable d'un UPFC pour la compensation des puissances dans un réseau miltimachines », mémoire de magister, département d'électrotechnique, USTO Oran, Juin 2005.

- [30] **A.Nabavi and M.R.Iravani**, « Steady state and dynamic model of Unified Power Flow Controller for power system studies », IEEE Trans. On power systems, Vol.11, No.4, pp.1937-1943, November 1996.
- [31] **Z.Huang, Y.Ni, C.M, Shen, et al**, « Application of power controller in interconnected power systems-modeling, Interface, control strategy, and case study », IEEE Trans. On power systems, Vol.15, No.2, pp.817-824, May 2000.
- [32] **A.J.Keri et al**, « Unified Power Flow ontroller : modeling and analysis », IEEE Trans. On power Delivery, Vol.14, No.2, pp.684-654, April 1999.
- [33] **K.L.Lo and T.T.Ma**, « UPFC damping control strategy based on transient energy function », Electric power systems research, Vol. 56, pp. 195-203.
- [34] **A.M.gole and V.K.Sood**, « A Static Compensator model for use with electromagnetic transient simulation programs », IEEE Trans. On power systems, Vol. 16, No.4, pp. 678-688, November 2001.
- [35] **S.A.Al-Mawsawi**, « Comparing and avaluating the voltage regulation of a UPFC and STATCOM », Electric power and Energy systems, No.25, pp. 1-6, 2003.
- [36] **C.Schauder, E.Stacey, M.Lund, L.Gyughy, .Kovalsky, A.Keri, A.Mehraban, A.Edris**, « AEP UPFC projet : Installation, Commissioning and Operation of the  $\pm 160$  MVA STATCOM, IEEE Trans. On power Delivery Vol. 13, No 4, pp.1530-1535, Octobre 1998
- [37] **Prasad Nenjiti and Ranlit Jakkli**, « Optimal power control strategies for Neutral point clamped (NPC) Inverter Topologie », IEEE Trans. On Ind, Application, Vol.28, No 3, May/June 1992.
- [38] **Y.Benromdhane, E.Berkouk, G.Manese**, « PWM contrôle of single phase converter with Five-level Voltage Feeding inductive load ». IEEE, Trans. On Power and Energy Systems, N° 38, P.P 2004.
- [39] **A.Tahri**, « Analyse et développement d'un Compensateur Statique Avancé pour l'amélioration de la stabilité transitoire des systèmes Electro-énergétiques », Thèse de magister, Institut d'Electrotechnique USTO 1999.

- [40] **Alain LEDU**, « Pour un réseau électrique plus performant : projet FACTS », RGE No.6/92, pp.105-121, Juin 1992.
- [41] **Padiyar, K.R.Kulakarni, A.M.**, « Control design and simulation of Unified Power Flow Controller », IEEE Trans. On power Delivery, Vol.13, No.4, octobre1998.
- [42] **Y.Ye, Kazerani**, « Operating constraints of FACTS Devices », IEEE-PES. Singapore, July 2000.
- [43] **Belhacel Kheira**, « Modélisation et simulation d'un UPFC pour des études de la stabilité transitoire des systèmes électro- énergétiques ». Thèse magister, département d'électrotechnique, USTO Oran Juin 2005.

**Résumé :** L'UPFC est le système FACTS le plus puissant .IL est constitué de deux onduleur de puissance qui sont connectés à travers un circuit continu commun .L' un des onduleurs, connecté en parallèle, assure la compensation de la puissance réactive. L'autre, branché en série avec la ligne de transmission, permet de contrôler le transit de puissance active et réactive. Le but de ce travail est d'étudier en détails la qualité de l'énergie et les performances dynamiques du régulateur PI pour contrôler un UPFC à trois niveaux afin d'améliorer la stabilité de transit de puissances dans un réseau électrique. Les résultats de simulations montrent que le régulateur PI donne une meilleure réponse.

**Mots clés :** FACTS, UPFC, onduleur à trois niveaux, PI, transit de puissance, stabilité du réseau.

**Abstract :** The UPFC is one of the most versatile topologies of the FACTS family. The UPFC can be decomposed in two defferent power circuits : the parallele one maintains the network bus voltage by consuming or producing reactive power, and the series one controls the active and reactive power flow through the insertion of a series voltage in transmission line. The aim of the presente pape is to investegate in details the power quality and the dynamic performance of the control PI for the 3- level UPFC in oeder to improve the stabilité of the power system hence providing security under increased power flow conditions. The results demonstrate that the control PI is very effective in improving the transient power system stability.

**Keywords :** FACTS, UPFC, 3- level voltage source inverter, PI, power flow, power system stability.

## ملخص

يعتبر المنظم الموحد للتدفق الطاقة من أهم أنظمة نقل التيار المتغيرة .المستعملة .يتكون من موجين يشتركان في الدارة المستمرة .يربط أحدهما على التفرع بتعويض الطاقة الردية بينما يربط الموج الثاني على التسلسل ليسهل مراقبة الطاقة الفعالة و الردية .في هذا الإطار يأتي هذا البحث بدراسة شبكة الطاقة الكهربائية عبر استغلال المنظم الموحد لتدفق الطاقة ذا ثلاث مستويات باستخدام المنظم الكلاسيكي و هذا لتسهيل عملية مراقبة تدفق الطاقة من جهة ،و لتحسين عملية استقرار الشبكة الكهربائية من جهة أخرى . إن النتائج المتحصل عليها تبين مدى تحسين هذا المنظم للاستجابة العابرة .