

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME  
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE  
INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUE  
**THEME**

**Calcul d'écoulement de puissance dans les  
réseaux électriques lors de l'intégration des  
fermes éoliennes et des dispositifs FACTS**

Proposé et dirigé par :

Présenté par :

-Dr. MESSALTI Sabir- FERAHTIA Saàd

Année Universitaire : 2012 / 2013

N°d'ordre : 055

سُبْحَانَكَ اللَّهُمَّ رَبَّ السَّمَاوَاتِ السَّبْعِ وَالْأَرْضِ وَالْعَرْشِ الْمَجِيدِ  
مُحَمَّدٌ عَبْدُكَ وَرَسُولُكَ

## **Remerciements :**

*Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. MESSALTI Sabir pour avoir*

*d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont Aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribués à notre formation*

*Nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui on Accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos*

*Amis et collègues pour le soutien moral et matériel...*

## *Dédicaces*

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
m' avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce  
Travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma mère et mon père*

*A mes très chers frères et mes sœurs.*

*A toute ma famille*

*A mes chers amis*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*A tous ceux qui connaissent **FERAHTIA SAAD.***

*A mon amis **NechSallah Eddine***

*A tous les amis d'études surtout ceux*

*D'électrotechnique*

*Promotion 2012/2013*

## Sommaire

Sommaire

Table de figure

Table de tableau

Liste des symboles et abréviations

**Introduction Générale**..... 1

### **Chapitre I :Fonctionnement du Réseaux Electrique**

I.1.Introduction .....	3
I.2. Définition d'un réseau électrique .....	3
I.3. Classification des réseaux électrique.....	4
I.3.1.Description des réseaux électrique.....	4
I.3.1.1.Le réseau de transport THT :.....	4
I.3.1.2.Le réseau de répartition HT :.....	4
I.3.1.3.Le réseau de distribution :.....	5
I.3.2.Les postes de transformation.....	5
I.3.2.1.Poste maçonné.....	5
I.3.2.2.Poste aérien accroché (ACC) .....	6
I.3.2.3. Postes sous enveloppe préfabriqué.....	7
I.4. Problématique du fonctionnement des réseaux.....	7
I.5. L'acheminement de la puissance.....	8
I.6. Modélisation des éléments du réseau .....	9
I.6.1. Modélisation d'une ligne de transport.....	9
I.6.2. Modélisation du transformateur .....	9
I.6.3. Modélisation d'une charge .....	9
I.7. Puissance transmissible dans une ligne.....	10
I.7.1. Chute de tension dans une ligne.....	11
I.8. Conclusion.....	11

### **Chapitre II :Calcul l'écoulement de puissance dans le réseau électrique**

II.1.Introduction.....	13
II.2. L'écoulement des puissances .....	13
II.2.1. Définition :.....	13
II.2.2. Classification des jeux de barre : .....	13
II.3. Méthodes itératives del'écoulement de puissance:.....	14
II.3.1.Equation du réseau électrique : .....	14
II.3.2. Méthode de Gauss-Seidel : .....	15
II.4. le Calcule d'écoulement de puissance: .....	15
II.4.1. Dans les nœuds PQ .....	16
II.4.2. Dans les nœuds PV .....	17
II.4.3. Dans le nœud balancier (slack).....	18

# Sommaire

---

II.5. Puissance dans une ligne.....	18
II.5.1. La puissance transit dans une ligne :.....	18
II.5.2. Les pertes de puissance dans un lignes.....	19
II.6. Calcul l'écoulement de puissance par la méthode de Gauss-Seidel :.....	22
II.6.1. Simulations de -6- jeux de barres:.....	22
II.6.2. Simulations de -14- jeux de barres :.....	24
II.6.3. Simulations de -30- jeux de barres :.....	26
II.7. Conclusion:.....	29

## Chapitre III Modélisation sur les systèmes éoliens

III.1.Introduction.....	30
III.2. Généralités sur les éoliennes.....	30
III.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	31
III.2.2. Développement de l'énergie éolienne.....	31
III.2.3. Les différents types d'éoliennes.....	31
III.2.3.1. Eoliennes à Axe Horizontal :.....	31
III.2.3.2. Eoliennes à Axe Vertical :.....	32
III.2.4. Fonctionnement selon type de vitesse :.....	33
III.2.4.1. Fonctionnement de vitesse fixe :.....	33
III.2.4.2. Fonctionnement de vitesse variable :.....	33
III.2.5.Principaux composants d'une éolienne :.....	33
III.3. Généralités sur la MADA :.....	35
III.3.1. Description de la MADA.....	35
III.3.2.Les formes application des machines asynchrones à double alimentation :.....	35
III.3.2.1.Application moteur :.....	35
III.3.2.2.Application génératrice :.....	35
III.3.3.Domaine d'applications de la GADA :.....	35
III.3.4.Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la MADA :.....	36
III.3.5.Le principe de machine asynchrone à double alimentation :.....	36
III.4.System de modélisation de la MADA :.....	37
III.4.1. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralise :.....	38
III.4.2.Equations magnétiques de GADA :.....	39
III.4.3.La transformée de Park :.....	39
III.4.4.Equations électriques et mécanique de la GADA dans leréférentiel (d,q) :.....	40
III.4.5.Mise sous forme d'équation d'état.....	42
III.5. simulation de GADA.....	47
III.5.1. Interprétations des résultats.....	47
III.6.Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique:.....	48
III.6.1 Loi de BETZ.....	48
III.6.2.modèle de la turbine d'éolienne.....	49
III.6.2.1Modèle du multiplicateur d'éolienne.....	52
III.6.2.1Modélisation de l'arbre de la turbine.....	52
III.7.Caractéristique de puissance.....	54
III.7.1.Commande en dessous de la puissance nominale (optimisation de la puissance).....	54
III.7.2.Principe de la MPPT.....	54
III.7.3.Commande indirecte de vitesse.....	54

# Sommaire

---

III.7.4. Le schéma globale de l'association GADA turbine : .....	57
III.7.5. Résultats de simulation (en dessous de la puissance nominale) .....	57
III.7.6. Interprétations des résultats .....	59
III.8. Control de puissance active et réactive par le GADA .....	59
III.8.1. Commande direct.....	59
III.8.2. Resultats de simulation.....	59
III.9. Amélioration de la tension de réseau électrique par intégration de puissance éolienne.....	59
III.9.1. Description du réseau étudié.....	63
III.9.2.Resultats de simulation.....	59
III.10. CONCLUSION .....	59
<b>Chapiter IV Les systèmes de transmission à courant alternatif flexible FACTS</b>	
IV.1. Introduction .....	66
IV.2. Classification des dispositifs FACTS.....	66
IV.3. Les différents types des systèmes FACTS .....	67
IV.3.1. Compensateurs parallèles .....	67
IV.3.1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors .....	69
IV.3.1.2. Compensateurs parallèles à base de thyristors GTO .....	71
IV.3.2. Compensateurs série.....	72
IV.3.2.1. Compensateurs série à base de thyristors .....	72
IV.3.2.2. Compensateurs série à base de thyristors GTO.....	73
IV.3.3. Compensateurs hybrides (série – parallèle).....	74
IV.3.3.1. Compensateurs hybrides à base de thyristors.....	74
IV.3.3.2. Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO.....	74
IV.4. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS .....	75
IV.5. Amélioration des performances des réseaux électriques par les dispositifs FACTS .....	76
IV.5.1. Introduction .....	76
IV.5.2. La variation de la tension et la puissance sur les réseaux de transport d'énergie électriques.....	76
IV.5.2.1. Une ligne résistive .....	77
IV.5.2.2. Une ligne inductive .....	78
IV.5.2.3. Une ligne inductive relie à deux grands réseaux : .....	79
IV.6. Exploitation d'un réseau électrique: .....	80
IV.7. Caractéristique d'un compensateur statique TCSC:.....	81
IV.7.1. Etude d'un TCSC .....	81
IV.7.2. Définition de TCSC:.....	81
IV.7.3. La structure d'un TCSC .....	82
IV.7.4. Schéma block globale de TCSC.....	84
IV.7.5. Les avantage de TCSC .....	84
IV.7.6. Résultat de simulation du TCSC .....	85
IV.7.7. Interprétation .....	85
IV.8. Compensateur statique shunt de puissance réactive (SVC) .....	86
IV.8.1. Définition du SVC.....	86
IV.8.2. Différents schémas de SVC .....	86
IV.8.3. Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC .....	86
IV.8.4. Les avantages de SVC.....	88

## Sommaire

---

IV.9. Conclusion.....	90
Conclusion générale .....	91
Annexe	
Références bibliographiques	
Résumé	

## Table des figures

Figure I.1 Schéma du réseau électrique .....	3
Figure I.2 Schéma simplifiée d'un réseau électrique .....	4
Figure I.3 Poste maçonné.....	6
Figure I.4 Post ACC.....	6
Figure I.5 Poste préfabriqué.....	7
Figure I.6 Schéma équivalent d'une ligne de transport : a-modèle en $\pi$ , b-modèle en T.....	9
Figure I.7 Schéma équivalent d'une charge.....	10
Figure I.8 Schéma monophasé équivalent.....	10
Figure I.9 Diagramme vectoriel de tensions .....	11
Figure II.1 Représenté la ligne reliant les nœuds i et j.....	18
Figure II.2 Organigramme de calcul d'écoulement de puissance avec le contrôle de l'énergie réactive .....	21
Figure II.3 Schéma unifilaire du réseau étudié de -6- jeux de barres .....	22
Figure II.4 Schéma unifilaire du réseau étudié de -14- jeux de barres .....	22
Figure III.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	30
Figure III.2 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.....	31
Figure III.3 Éolienne à axe horizontal.....	32
Figure III.4 Éolienne à axe vertical.....	32
Figure III.5 Eléments constituant une éolienne .....	34
Figure III.6 schéma de principe de la double alimentation .....	37
Figure III.7 Représentation schématique de la MADA.....	38
Figure III.8 Schémas de transformation de park .....	40
Figure III.9 Les composantes du courant statoriques et rotoriques.....	45
Figure III.10 Les composantes du flux statoriques et rotoriques .....	45
Figure III.11 Le couple électromagnétique .....	46
Figure III.12 La puissance active et réactive rotorique.....	46
Figure III.13 La puissance active et réactive statorique.....	46
Figure III.14 Les tensions d'alimentations triphasées statoriques .....	47
Figure III.15 Les courants statoriques triphasés avec un zoom.....	47
Figure III.16 Tube de courant d'air autour d'une éolienne .....	48
Figure III.17 Schéma d'une turbine éolienne.....	49
Figure III.18 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes .....	50
Figure III.19 Coefficient de puissance $C_p$ en fonction du rapport de vitesse $\lambda$ pour des angles d'attaque différents $\beta$ .....	51
Figure III.20 Schéma bloc de la turbine .....	52
Figure III.21 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne.....	53
Figure III.22 caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent.....	54
Figure III.23 Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.....	55
Figure III.24 Commande indirecte de vitesse.....	56
Figure III.25 schéma globale de l'association GADA turbine et MPPT.....	57
Figure III.26 schéma La courbe représenté le profil de vitesse du vent.....	57
Figure III.27 La courbe représenté la vitesse mécanique et la puissance produit.....	58
Figure III.28 La courbe représenté le coefficient de puissance $CP$ .....	58
Figure III.29 La courbe représenté la vitesse spécifique $\lambda$ .....	58
Figure III.30 Schéma de commande vectorielle direct .....	60
Figure III.31 Les Puissances de référence (P active ; Q réactive).....	61

## Table de figure

---

Figure III.32 Les puissances mesurées et référence (P active ; Q réactive).....	61
Figure III.33 Les puissances mesurées et référence avec zoom (P active ; Q réactive).....	63
Figure III.34 Les composantes du courant statorique et rotorique .....	62
Figure III.35 Les composantes du flux statorique .....	62
Figure III.36 Le couple électromagnétique .....	62
Figure III.37 Schéma unifilaire du réseau électrique 30 bus avec intégration de puissance éolienne ..	63
Figure IV.1 Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.....	67
Figure IV.2 Structure d'un TCR [2].....	69
Figure IV.3 Structure d'un TSC .....	69
Figure IV.4 structure d'un SVC, schéma équivalent. [13] .....	71
Figure IV.5 Schéma du TCBR .....	71
Figure IV.6 Schéma de base d'un STATCOM .....	72
Figure IV.7 Structure d'un TCSC [2].....	72
Figure IV.8 Structure d'un TCSR .....	73
Figure IV.9 Schéma de base du SSSC .....	73
Figure IV.10 Schéma de base d'un IPFC .....	74
Figure IV.11 Schéma de base d'un UPFC .....	75
Figure IV.12 Charge résistive alimentée par une ligne résistive.....	77
Figure IV.13 Courbe caractéristique d'une ligne résistive .....	77
Figure IV.14 charge résistive alimentée par un ligne inductive .....	78
Figure IV.15 Courbe caractéristique d'une ligne inductive .....	79
Figure IV.16 Une ligne inductive relie à deux grands réseaux .....	79
Figure IV.17 Caractéristique de puissance active en fonction de l'angle de déphasage.....	80
Figure IV.18 Puissance transitée entre deux réseaux.....	80
Figure IV.19 Schéma du TCSC .....	82
Figure IV.20 Insertion d'un TCSC sur une ligne .....	83
Figure IV.21 modèle de réactance TCSC.....	83
Figure IV.22 Schéma représenté le Modèle de contrôle du TCSC .....	84
Figure IV.23 la variation de la tension de réseau .....	85
Figure IV.24 la caractéristique de la puissance par variation de la réactance d'un TCSC .....	85
Figure IV.25 Compensateur statique de puissance réactive SVC .....	86
Figure IV.26 Modélisation du SVC .....	87
Figure IV.27 Susceptance Primaire réel et susceptance primaire mesuré contrôlé par le SVC	88
Figure IV.28 caractéristique de puissance réactive contrôlé par le SVC .....	88
Figure IV.29 Tension primaire réel et tension primaire mesuré contrôlé par le SVC .....	89

## Table des Tableaux

Tableau II.1 Spécification des différentes grandeurs des jeux de barres. [13].....	14
Tableau II.2 présentée les données du réseau de -6- jeux de barres.....	23
Tableau II.3 présentée les différents données du réseau de -6- jeux de barres .....	23
Tableau II.4 Les tension obtenues par la méthode de GAUSS-SEIDEL .....	24
Tableau II.5 Les données des branches du réseau de -14- jeux de barres.....	25
Tableau II.6 Les différents données du réseau de -14- jeux de barres .....	25
Tableau II.7 Résultats de simulation du Gauss-Seidel par réseau de -14- jeux de barres.....	26
Tableau II.8 Les données du réseau de -30- jeux de barres .....	25
Tableau II.9 Les différents données du réseau de -30- jeux de barres .....	28
Tableau II.10 Résultats de simulation du Gauss-Seidel avec réseau de -30- jeux de barres .....	28

## Table de figure

---

Tableau III.1 Simulation par l'intégration de puissance éolienne connectée au réseau de 6 générateurs 30 jeux de barres .....	64
Tableau IV.1 Principaux Dispositifs FACTS [1] .....	68

## Liste des symboles et abréviations

### abréviations

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSR	Thyristor Switched Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
SVC	Static Var Compensator
TCBR	Thyristor Control Breaking Resistor
STATCOM	Static Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor
TSSR	Thyristor Switched Series Reactor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
IPFC	Interline Power Flow Controller
UPFC	Unified Power Flow Controller
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	proportional intégrale

### Des symboles

#### dans le système FACTS

$V_s$	Tension au point de départ (génération)
$V_r$	Tension au point d'arrivée (le récepteur)
$V_{se}$	Tension générée par le compensateur série (SSSC)
$S_{sed}$	La composante directe de la tension générée par le compensateur série
$V_{seq}$	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur série
$V_{sh}$	Tension générée par le compensateur shunt (STATCOM)
$V_{shd}$	La composante directe de la tension générée par le compensateur shunt
$V_{shq}$	La composante quadrature de la tension générée par le compensateur shunt
$I_s$	Courant dans une phase dans le premier tronçon de la ligne
$I_{sd}$	Composante du courant $I_s$ selon l'axe d
$I_{sq}$	Composante du courant $I_s$ selon l'axe q
$I_r$	Courant dans une phase dans le deuxième tronçon de la ligne
$I_{rd}$	Composante du courant $I_r$ selon l'axe d

## Liste de notation et symboles

---

$I_{rq}$	Composante du courant selon l'axe q
$I_{sh}$	Courant fournit par le compensateur shunt
$I_{shd}$	Composante directe du courant fournit par le STATCOM
$I_{shq}$	Composante quadrature du courant fournit par le STATCOM
$P_s$	Puissance active fournit par le générateur
$Q_s$	Puissance réactive fournit par le générateur
$P_r$	Puissance active au point d'arrivée (le récepteur)
$Q_r$	Puissance réactive au point d'arrivée (le récepteur)
$P_{se}$	Puissance active fournit par le compensateur série (SSSC)
$P_{sh}$	Puissance active fournit par le compensateur shunt (STATCOM)
$Q_{se}$	Puissance réactive fournit par le compensateur série (SSSC)
$Q_{sh}$	Puissance réactive fournit par le compensateur shunt (STATCOM)
$\theta$	L'angle de charge (l'angle entre la tension de départ et la tension d'arrivée)
$B_{SVC}$	Susceptance du compensateur shunt SVC par unité de longueur.
$B_C$	Susceptance de capacité C de ligne par unité de longueur.
$B_L$	Susceptance inductive série L de la ligne par unité de longueur.
$\alpha$	Représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.
$Q_{SVC}$	Puissance réactive de compensation SVC
$Q_{ind}$	Puissance réactive inductive
$Q_{cap}$	Puissance réactive capacitive
$X_{TCSC}$	La réactance de compensation TCSC
L	Inductance de la ligne par unité de longueur.
C	Capacitance de la ligne par unité de longueur.
$E_S$	Tension de départ.
$E_R$	Tension au noeud de la réception.
$Y_{SVC}$	Admittance du compensateur statique SVC.
Y	Admittance shunt par unité de longueur.
Z	Impédance série de la ligne par unité de longueur.

### **dans l'écoulement de puissance**

$B_{ij}$	Parti réel de l'élément i- j de la matrice d'admittance
$G_{ij}$	Parti imaginaire de l'élément i- j de la matrice d'admittance
$P_L$	Puissance active demandée
$Q_L$	Puissance réactive demandée
$P_G$	Puissance active générée
$Q_G$	Puissance réactive générée
$Q_{min}$	Puissance réactive minimale.
$Q_{max}$	Puissance réactive maximale.
$V_i$	Module de tension au jeu de barres i

## Liste de notation et symboles

---

$\theta_i$	Angle de tension au jeu de barres $i$
$S_{Gi}$	La puissance apparente générée.
$S_{Di}$	La puissance apparente demandée.
$S_i$	La puissance apparente nette.
$Y_{ij}$	Admittance de la ligne $ij$ ,
$Y'_{ij}$	Admittance shunt total de la ligne $ij$ .

### **dans le système éolien**

$p$	Le nombre de paires de pôles.
$g$	La vitesse de glissement.
$f$	Le coefficient des frottements visqueux totaux de l'
$V$	La vitesse moyenne du vent.
$P_\theta$	La matrice de la transformation de PARK.
$P$	La puissance de l'éolienne.
$J$	L'inertie totale de l'éolienne.
$G$	Le rapport du multiplicateur de vitesse.
$\rho$	La densité de l'air.
$\lambda$	La vitesse spécifique de la turbine.
$\beta$	L'angle de calage des pales.
$\omega_s$	La pulsation statorique.
$\omega_r$	La pulsation rotorique.
$\omega$	La pulsation mécanique.
$\varphi_s \varphi_r$	Les flux statorique et rotorique respectivement.
$\varphi_{ds} \varphi_{qs}$	Les flux statoriques direct et en quadrature.
$\varphi_{dr} \varphi_{qr}$	Les flux rotoriques direct et en quadrature.
$\lambda_{opt}$	La vitesse spécifique optimale de la turbine.
$\Omega_T \Omega_g$	La vitesse de la turbine et la vitesse du générateur.
$C_r$	Le couple résistant.
$C_T C_g$	Le couple de la turbine respectivement du générateur.
$f_T f_g$	Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.
$V_s V_r$	La tension simple statorique et rotorique respectivement.
$V_{ds} V_{qs}$	La tension statorique directe et en quadrature.
$V_{dr} V_{qr}$	La tension rotorique directe et en quadrature.
$U_a U_b U_c$	La tension composée des phases a, b et c respectivement.
$R_s R_r$	La résistance par phase statorique et rotorique respectivement.
$R$	Le rayon des pales de la turbine.
$P_s Q_s$	Les puissances actives et réactive statoriques.
$P_r Q_r$	Les puissances actives et réactive rotorique

## Liste de notation et symboles

---

$M_{sr}M_{rs}$	Inductances mutuelles stator-rotor.
$M_sM_r$	La mutuelle Inductance entre les enroulements statoriques, respectivement rotorique.
$L_sL_r$	L'inductance propre statorique et rotorique respectivement.
$J_TJ_g$	L'inertie de la turbine et celle du générateur.

# Introduction Générale

Les problèmes d'approvisionnement en énergie rencontrés à l'échelle mondiale ne sont pas uniquement dus à la destruction de l'environnement et aux changements climatiques qui en découlent, mais bien aussi à une croissance de la consommation et à la tarification des ressources fossiles. Une consommation mondiale en hausse, en particulier en ce qui concerne l'énergie électrique et une tendance à la libéralisation sont à l'origine de changements considérables, tant dans le domaine des réseaux d'alimentation que pour le remplacement du parc des centrales électriques. Les conséquences, pour le moins préoccupantes, se répercutent sur la disponibilité et la qualité de l'énergie. C'est pourquoi les solutions recherchées doivent être réalisables techniquement parlant tout en répondant aux exigences en matière de durabilité de productions décentralisées à base d'énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque, entre autres).[1]

Ces productions seront intégrées au réseau, assurer la disponibilité de divers services pour les gestionnaires de réseau. En d'autres termes, le réseau doit évoluer vers un réseau flexible et intelligent qui intègre au mieux les énergies locales et/ou renouvelables pour minimiser les impacts engendrés par l'insertion de productions décentralisées et/ou par la recherche de nouvelles architectures. Ces deux solutions devraient permettre l'augmentation du taux de production décentralisée dans le réseau dans les meilleures conditions économiques et de sécurité.

L'énergie éolienne fut la première des sources d'énergies exploitées par l'homme, oubliée depuis long temps, cette source d'énergie inépuisable a connu un développement important depuis le début des années 1990 partout dans le monde. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 22 GW, suivi des états unis d'Amérique (USA) avec 16 GW et l'Espagne avec 15 GW [2].

Cependant, la technologie des turbines éoliennes semble avoir atteint la limite en matière de taille des hélices. En effet, les plus grandes éoliennes actuellement sur le marché, ont une hélice de plus 120 m de diamètre et une tour qui dépasse les 100 m de haut, pour produire une puissance électrique de 6 MW environ [2] .

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS « Flexible Alternating Current Transmission System ». Les dispositifs FACTS font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement

## Introduction générale

---

de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau.[3]

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques lors de l'intégration des fermes éoliennes et des dispositifs FACTS. Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous allons présenter le fonctionnement des réseaux électriques et modéliser les différentes composantes des réseaux électriques.

Le second chapitre a été consacré à l'étude de l'écoulement de puissance, où différentes méthodes itératives classiques à savoir les méthodes de Gauss, Gauss Seidel pour déterminer les tensions au niveau des jeux de barres d'un réseau électrique

Le troisième chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens, aussi la modélisation et la simulation de GADA, et avec la simulation de captage du maximum de puissance possible MPPT, et le contrôle de puissance active et réactive par la commande vectorielle directe. Dans ce même chapitre nous proposons, une comparaison entre des réseaux de test sans et avec l'intégration des fermes éoliennes.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude théorique des différents systèmes FACTS en générale, à savoir leurs classifications et leur principe de fonctionnement, et aussi étudie la variation de la tension et la puissance sur les réseaux de transport d'énergie électriques, et on présente les différentes configurations du SVC et TCSC sont présentées ainsi que sa simulation, sur le logiciel MATLAB.

Nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

# Chapitre I : Fonctionnement du Réseaux Electrique

## I.1.Introduction

Le stockage massif de l'énergie électrique sous une forme immédiatement disponible n'est, actuellement, pas possible. Le problème majeur des exploitant est donc de maintenir en permanence l'équilibre entre l'offre disponible et les demande potentielle, étant entendu que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production-transport- consommation, appelé souvent système électrique plutôt que réseau.

Pour des raisons économiques et techniques les unités de production sont souvent géographiquement concentrées. Par contre la consommation est beaucoup plus dispersée. Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent l'acheminement de l'énergie depuis ces unités vers les lieux de consommation à travers des lignes électriques (aériennes/ou souterraine). [1]

## I.2. Définition d'un réseau électrique

Un réseau électrique est l'ensemble des composantes requises pour produire, transporter, distribution l'énergie électrique de la source (générateur) à la charge (consommateur). Cet ensemble comprend des transformateurs, des lignes de transmission, des réactances, des condensateurs, des moyens de mesure et de contrôle, des protections contre la foudre et les courts circuits, ... ; autrement dit, un réseau électrique est l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques), vers les consommateurs d'électricité.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. [3]

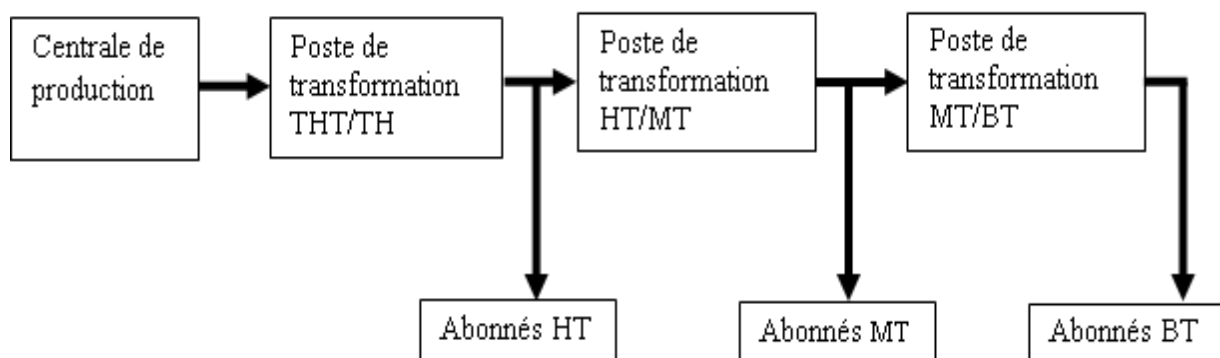


Figure I.1 Schéma du réseau électrique

## I.3. Classification des réseaux électrique

### I.3.1. Description des réseaux électrique

Les compagnies d'électricité divisent leurs réseaux en trois grandes catégories:

- 1) le réseau de transport.
- 2) le réseau de répartition.
- 3) le réseau de distribution.

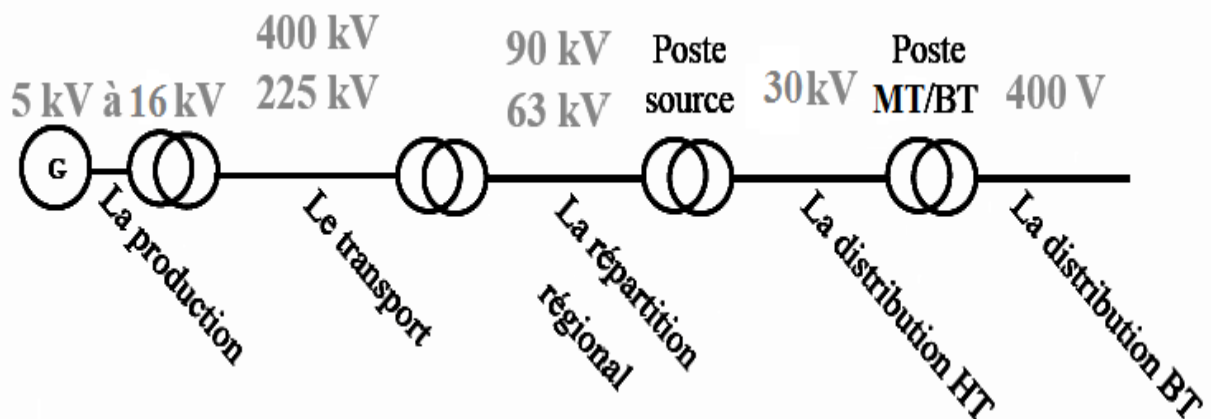


Figure I.2 Schéma simplifiée d'un réseau électrique

#### I.3.1.1. Le réseau de transport THT :

Le réseau de transport THT c'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation.

Ce réseau permet de relier les principales centrales de production aux grands postes alimentant les réseaux de répartition. Il est aérien, triphasé et le plus souvent maillé.

La tension se situe en général entre 225 kV et 400 kV, L'utilisation de ces tensions élevées est liée à un objectif économique (minimisation des pertes d'énergie)

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence. [5]

#### I.3.1.2. Le réseau de répartition HT :

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire,...

Les réseaux de répartition sont à haute tension (HT) de l'ordre de 50 à 150 kV (on rencontre le plus souvent le 63 et le 90 kV), ont pour but d'assurer à l'échelle régional la fourniture d'électricité.

### **I.3.1.3. Le réseau de distribution :**

Les réseaux de distribution sont généralement basés sur une structure arborescente de réseau à partir d'un poste source, l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation MT/BT. Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension [5] :

- Les réseaux à moyenne tension MT (de 3 à 33 kV).
- Les réseaux à basse tension BT (de 220 à 380 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

La distribution se fait souvent soit par des lignes aériennes ou des câbles sous terrain. Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale.

Contrairement aux réseaux de transport, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population..

#### **a)-les Réseaux de distribution à moyenne tension(MT)**

On appelle réseaux MT les réseaux couvrants la plage de 1 à 36 kV.

#### **b)-les Réseaux de distribution à basse tension(BT)**

Permet d'acheminer l'énergie électrique du réseau de distribution MT aux points de faible consommation. Ce réseau alimente un nombre très élevé de consommateurs du domaine domestique. La structure de ce réseau est de type aérien ou souterrain.

## **I.3.2. Les postes de transformation**

Un poste de transformation est composé d'un élément essentiel qui est le dispositif d'élévation ou d'abaissement de la tension transporté par le réseau vers les zones de consommation, et qui sont généralement des transformateurs abaisseurs qu'on les trouve sous deux types de postes.

### **I.3.2.1. Poste maçonné**

C'est une construction maçonnée qui contient un transformateur, un jeu de barres pour donner un départ vers une autre zone de consommation et un répartiteur ou une armoire pour donner plusieurs voies de distribution BT avec un dispositif de protection. (Voir la figure I.3).

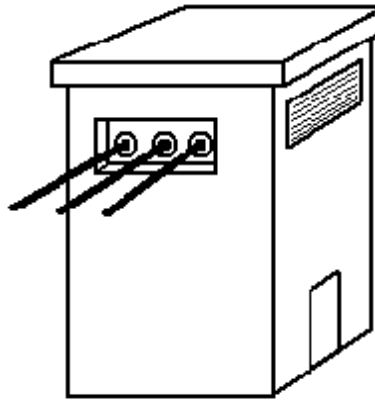


Figure I.3 Poste maçonné.

### I.3.2.2. Poste aérien accroché (ACC)

C'est un transformateur aérien accroché à un support MT avec un disjoncteur. On trouve ces types de postes dans les zones de consommation rurales (voir la figure (I.4)).

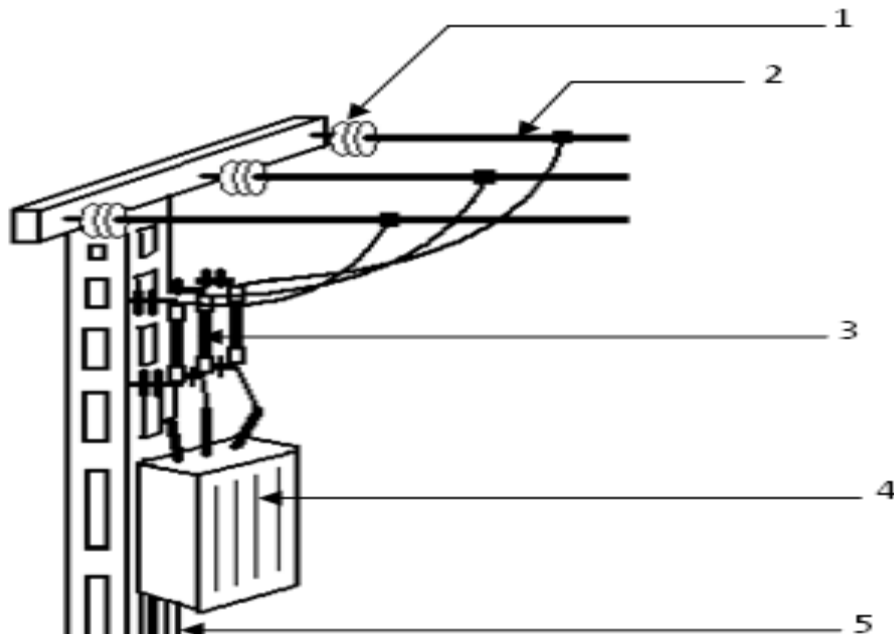


Figure I.4 Post ACC.

Légende

- 1- Chaine d'isolateur.
- 2- Ligne M.T
- 3- Fusible.
- 4- Transformateur.
- 5- Support BS.

### I.3.2.3. Postes sous enveloppe préfabriquée

Les postes MT/BT préfabriqués (figure I.5) sont réalisés en utilisant des composants : tableaux MT, tableaux BT, transformateur, etc.....regroupés dans une enveloppe ayant pour rôle la protection des équipements internes contre les influences externes et d'assurer un degré de protection vis à vis du public.

Ces postes sont fabriqués, câblés et testés chez le constructeur, regroupant le transformateur, l'appareillage BT et MT, les connexions et les équipements auxiliaires, limitent les temps d'étude et de réalisation. La fiabilité de l'ensemble est accrue, les clients bénéficient ainsi de la garantie constructeur pour l'ensemble [17].



Figure I.5 Poste préfabriqué

## I.4. Problématique du fonctionnement des réseaux

Les réseaux de transport et d'interconnexion (THT) assurent la liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation. Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée. Par ailleurs, le maillage du réseau contribue à la sécurité d'alimentation et permet de faire face, dans des conditions économiques satisfaisantes, aux aléas locaux ou conjoncturels qui peuvent affecter l'exploitation (indisponibilité d'ouvrage, aléas de consommation, incidents...). Les réseaux THT contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre, ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation [4].

Par ailleurs, la qualité du service est également un souci majeur de l'exploitant. Sur le plan pratique, cette qualité nécessite :

- de maintenir les caractéristiques du produit (tension, fréquence) dans les limites très précises du cahier des charges.

Les réseaux THT jouent aussi un rôle très important pour respecter ces contraintes car :

- Les références de tension qui vont conditionner l'ensemble du plan de tension dans le réseau sont fixées, par les groupes de production raccordés aux réseaux THT.

-La fréquence est, de même, fixée par les groupes de production qui doivent rester synchrones en régime permanent.

-La sécurité d'alimentation des grands centres de consommation dépend très fortement de la structure des réseaux de transport.

Sachant que, compte tenu de l'inertie mécanique relativement faible de certains composants des systèmes électriques (groupes de production et moteurs) et de la grande vitesse de propagation des phénomènes, les réseaux THT créent un couplage dynamique très fort entre les moyens de production, d'une part, et les charges (consommation), d'autre part. Au-delà de l'examen du problème de la répartition économique et en sécurité de la puissance, l'étude du fonctionnement de ces vastes systèmes interconnectés et fortement couplés est donc absolument nécessaire. Elle portera sur leur réglage et leur stabilité. [2]

## **I.5. L'acheminement de la puissance**

En général, il existe une multitude de plans de production qui permettent de faire face à la demande. Toutefois, certains de ces plans ne sont pas adaptés pour acheminer la puissance sur les lieux de consommation en respectant les contraintes technico-économiques d'exploitation (minimiser les coûts de production et le coût des pertes, respecter les limites thermiques des ouvrages, maintenir la tension dans certaines plages en chaque nœud du réseau, être capable de faire face le plus rapidement possible à certains types de défaillance...).

Le problème général de la production et de la répartition optimale et en sécurité de la puissance dans un système production-transport-consommation alternatif maillé est donc fort complexe. Le fonctionnement d'un système électrique est gouverné, à chaque instant, par l'équilibre nécessaire entre les puissances actives et réactives produites et consommées.

Lorsque cette condition nécessaire de fonctionnement est respectée, l'état du système est caractérisé, en régime stationnaire, par la fréquence  $f$  et les tensions. La fréquence  $f$  est fixée par la vitesse de rotation de toutes les machines qui doivent rester synchrones (en régime permanent). [2]

## I.6. Modélisation des éléments du réseau

### I.6.1. Modélisation d'une ligne de transport

Une ligne de transmission, reliant deux nœuds  $i$  et  $k$ , est habituellement modélisée par un circuit équivalent, comme le montre la figure (I.6) dont les quatre paramètres de la ligne de transmission sont réparties uniformément le long de la ligne.

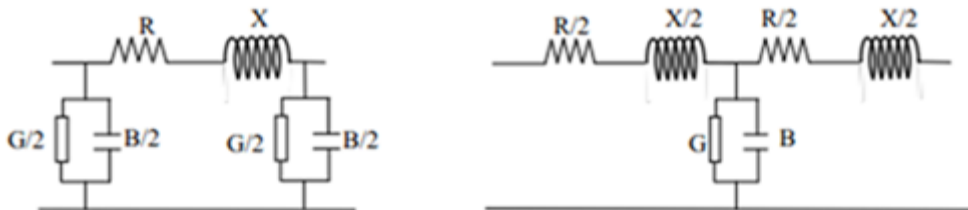


Figure I.6 Schéma équivalent d'une ligne de transport : a-modèle en  $\pi$ , b-modèle en T

Où

R : résistance de la ligne ;

X : réactance de la ligne ;

G : conductance de la ligne ;

B : réactance capacitive de la ligne.

### I.6.2. Modélisation du transformateur

Généralement le modèle d'un transformateur est donné par une réactance inductive.

### I.6.3. Modélisation d'une charge

Le modèle équivalent d'une charge est représenté par une admittance  $Y$  définie par :

$$Y_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^2} \quad (\text{I.1})$$

$V_i$  : Tension aux bornes de la charge.

$P_i, Q_i$ : Puissances active et réactive consommées par la charge  $i$ .

$Y_i$  : Admittance de la charge.

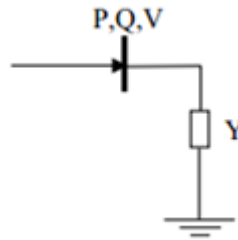


Figure I.7 Schéma équivalent d'une charge.

## I.7. Puissance transmissible dans une ligne

Contrairement à une idée très répandue, ce n'est pas l'échauffement maximal des conducteurs qui, en général, limite la puissance transmissible à travers une ligne.

En effet, considérons la figure (I.8) qui représente de manière très simplifiée, un dipôle d'impédance  $\bar{Z} = R + jX$ , une ligne destinée à alimenter la charge  $Z$ . Nous supposons, d'abord, que la résistance  $R$  de la ligne est nulle (elle est généralement très faible de la réactance  $X$ ) et que la puissance réactive  $Q_2$  de la charge est nulle (ce qui est vrai en cas d'une bonne compensation de puissance réactive).

Nous nous attacherons d'abord à montrer qu'il est important de réguler la tension aux bornes de la charge.

Si nous désignons par  $\theta$  l'angle entre les tensions  $\bar{V}_1$  et  $\bar{V}_2$ , nous avons, en considérant la figure (I.9) simplifiée (avec  $R = 0$ ) et  $X$  la réactance de la ligne, la puissance active est :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1}{X} V_2 \sin \theta \quad (\text{I.2})$$

Cette valeur maximale est atteinte pour  $\theta = 45^\circ$ . Si l'on maintient  $V_2$  constante, ce qui implique que  $Q_2$  n'est plus nulle, mais ne remet pas en cause l'expression (I.2), on a, pour  $V_1 = V_2$  :

$$P_{max} = \frac{V_1^2}{X} \quad (\text{I.3})$$

Soit le double de la valeur précédente.

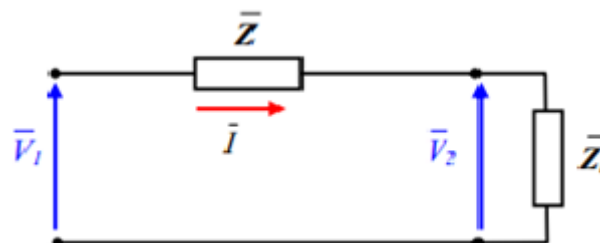


Figure I.8 Schéma monophasé équivalent

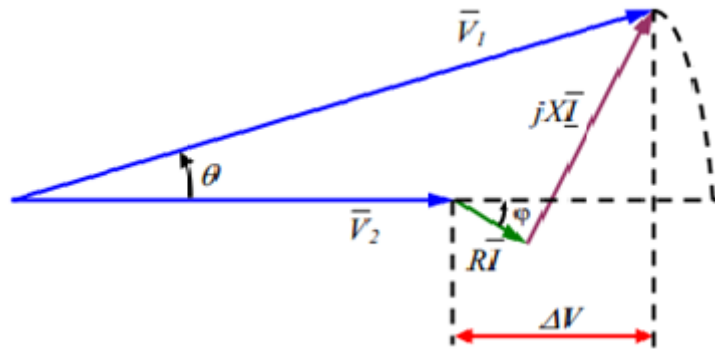


Figure I.9 Diagramme vectoriel de tensions

Pour améliorer la capacité de transfert des réseaux, on voit donc qu'il est essentiel de disposer du plus grand nombre possible de points à tension fixée.

### I.7.1. Chute de tension dans une ligne

Concédons la figure (I.4) qui représente une ligne de transport d'impédance complexe  $\bar{Z} = R + jX$ , et que la tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1 (coté générateur), l'extrémité 2 (Coté charge) absorbant une puissance  $\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2$ .

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme de tension donné par la figure (I.9) conduit à assimiler la chute de tension  $\Delta V$  à :

$$\Delta V \approx V_1 \cos \theta - V_2 \quad (\text{I.4})$$

Soit, pour un réseau triphasé et en notant  $U$  la tension composée correspondant à  $V$ ,  $P$  et  $Q$  les puissances de transit triphasé :

La chute de tension est donnée par relation suivant :

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{RP + XQ}{U^2} \quad (\text{I.5})$$

$$\sin \theta \approx \frac{XP - RQ}{U^2} \quad (\text{I.6})$$

On peut également noter que si,  $R \ll X$  ( $R \approx 0$ ) :

$$\Delta U = \frac{XQ}{U} \quad (\text{I.7})$$

$$\sin \theta = \frac{XP}{U^2} \quad (\text{I.8})$$

Dans ces conditions, les relations (I.10) et (I.11) illustrent le fait que :

- La chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par l'extrémité réceptrice ;
- L'angle de transport  $\theta$  dépend principalement de la puissance active transmise.

**I.8. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique on commençant par définition des réseaux, leurs classifications des réseaux électrique et leurs architectures et l'acheminement de puissance à travers ces réseaux. On a vu brièvement les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport et la chute de tension dépend de puissance réactive consommée.

## Chapitre II :

### Calcul l'écoulement de puissance dans le réseau électrique.

#### II.1.Introduction

La résolution du problème de l'écoulement de puissance, nous permet de déterminer les valeurs du module et de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données. Ce qui nous permettra de calculer les puissances transitées et générées et les pertes. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de l'opération en régime permanent, d'un système de puissance.

Dans ce chapitre; on présente les techniques de résolution du problème d'écoulement de puissance à savoir de quelques méthodes de calculs :

- Méthode de GAUSS.
- Méthode de GAUSS-SEIDEL. [8]

#### II.2. L'écoulements des puissances

##### II.2.1. Définition :

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé de plusieurs nombres de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production et de charge et les niveaux des tensions du réseau. Les calculs permettant d'obtenir ces informations sont connus sous le nom (écoulement des puissances ou encore power flow) [2].

##### II.2.2. Classification des jeux de barre :

Dans l'analyse d'écoulement de puissance on peut classer les jeux de barres en trois catégories en fonction des spécifications des variables utilisées:

- A. Jeu de barres de référence (SLACK ou SWING BUS)** ou  $V$  et  $\theta$  sont défini, connecté à une centrale électrique dont la puissance est la plus élevée.
- B. Jeu de barres de charge (type P-Q bus)** ou la puissance active  $P$  et la puissance réactive  $Q$  sont définies.
- C. Jeu de barres à tension contrôlée (type PV bus)** ou la puissance active  $P$  et le module de la tension  $V$  sont défini. [13]

Types de jeux de barres	Grandeurs connues	Grandeurs inconnues
Jeux de barres de références	$V, \theta$	$P, Q$
Jeux de barres de génération	$P, V$	$Q, \theta$
Jeux de barres de charge $PQ$ bus	$P, Q$	$V, \theta$

Tableau II.1 Spécification des différentes grandeurs des jeux de barres. [13]

### II.3.Méthodes itératives l'écoulement de puissance:

La résolution du problème de l'écoulement de puissance est basée sur un processus itératif. On utilise des valeurs estimées des tensions des jeux de barres pour calculer un ensemble de nouvelles valeurs, qui sont fonctions des valeurs estimées des tensions, des puissances actives et réactives spécifiées et des admittances du réseau. Chaque fois qu'un ensemble des valeurs de tensions est obtenue, le nombre d'itérations augmente d'une unité.

Depuis longtemps plusieurs méthodes ont été proposées par différents chercheurs pour la résolution des systèmes d'équations modélisant le fonctionnement en régime permanent du Système électrique. Pour calculer les tensions des jeux de barres des réseaux électriques on utilise l'une des méthodes suivantes :

1. La méthode de Gauss.
2. La méthode de Gauss-Seidel.
3. La méthode de Newton Raphson. [13][8]

#### II.3.1.Equation du réseau électrique :

L'équation décrivant les relations entre courants et tensions aux jeux de barres est donné par :

$$I_{BUS} = Y_{BUS} * V_{BUS} \quad (II.1)$$

Où :

$V_{BUS}$ : Vecteur des tensions des jeux de barres.

$$V_{BUS} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

$I_{BUS}$ : Vecteur des courants des jeux de barres.

$$I_{BUS} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$Y_{BUS}$ : La matrice admittance du réseau électrique donnée par :

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n Y_{1i} & -Y_{12} & \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & \sum_{i=0}^n Y_{2i} & \dots & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & \dots & \sum_{i=0}^n Y_{ni} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La matrice  $Y_{BUS}$  présente les propriétés suivantes :

1. Matrice carrée d'ordre n.
2. Matrice symétrique  $Y_{BUS}(i, k) = Y_{BUS}(k, i)$
3. Matrice complexe.
4. Chaque élément  $Y_{BUS}(i, k)$  en dehors de la diagonale est l'opposé de l'admittance de la branche  $Y_{BUS}(k, i)$  entre les nœuds i et k.
5. Chaque élément de la diagonale  $Y_{BUS}(k, k)$  est la somme des admittances de toutes les branches liées au jeu de barres k.

$Z_{BUS}$  : L'impédance des jeux de barres

$$Z_{BUS} = \frac{1}{Y_{BUS}} \quad (\text{II.5})$$

### II.3.2. Méthode de Gauss-Seidel :

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une de plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance. [8]

On désigne comme <<SWING BUS>> le jeu de barre1 .donc les calculs commenceront pour le jeu de barre2.

$$S_2 = V_2 I_2^* = P_2 + JQ_2 \quad (\text{II.6})$$

$$I_2^* = \frac{P_2 + JQ_2}{V_2} \quad (\text{II.7})$$

$$I_2 = \frac{P_2 - JQ_2}{V_2^*} \quad (\text{II.8})$$

En faisant intervenir les éléments de la matrice admittance on aura :

$$I_2 = \frac{P_2 - JQ_2}{V_2^*} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (\text{II.9})$$

D'où on tire la tension au jeu de barre 2

$$V_2 = \frac{1}{Y_{22}} \left[ \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \right] \quad (\text{II.10})$$

Pour un réseau de  $N$  jeux de barres, la tension calculée à n'importe quel jeu de barre  $k$ , où

$P_K$  et  $Q_K$  sont données par :

### GAUSS

$$V_K^{(i)} = \frac{1}{Y_{KK}} \left[ \frac{P_K - jQ_K}{V_K^{*(i-1)}} - \sum_{n \neq K}^N Y_{Kn} V_n^{(i-1)} \right] \quad (\text{II.11})$$

### GAUSS-Seidel

$$V_K^{(i)} = \frac{1}{Y_{KK}} \left[ \frac{P_K - jQ_K}{V_K^{*(i-1)}} - \sum_{i=1}^{K-1} Y_{Ki} V_i^{(i)} - \sum_{i=K+1}^N Y_{Ki} V_i^{(i-1)} \right] \quad (\text{II.12})$$

Le processus itératif est obtenu quand l'expression suivante est satisfaite

$$\max |V_i^{k+1} - V_i^k| \leq \varepsilon \quad (\text{II.13})$$

Le processus peut être accéléré, en diminuant le nombre d'itérations, par l'introduction d'un facteur d'accélération  $\alpha$  :

$$V_{i,accl}^{k+1} = V_i^k + \alpha(V_i^{k+1} - V_i^k) \quad (\text{II.14})$$

Dans chaque itération la tension est déterminée pour tous les jeux de barres sauf le <<SWING BUS>>. Le processus est répété plusieurs fois jusqu'à ce que les tensions dans deux itérations successives ne se diffèrent pas l'une de l'autre de plus que la tolérance. Ce processus de résoudre les équations linéaires est connu sous le nom de la méthode itérative de GAUSS Seidel. Si le même ensemble des valeurs des tensions est utilisé dans une itération complète (au lieu de substituer les nouvelles valeurs chaque fois qu'elles sont déterminées pour calculer la tension du jeu de barre suivant), le processus serait appelé la méthode itérative de Gauss. [8][35]

## II.4. Calcul d'écoulement de puissance:

Puisque les nœuds sont classés, chaque type de nœuds comporte deux paramètres connus et deux inconnus qu'il faut déterminer.

En se basant sur la solution de l'itération ( $k$ ), le calcul des nouvelles tensions à l'itération ( $k+1$ ) dépend du type de nœud concerné.

### II.4.1. Dans les nœuds PQ

Une formule générale pour déterminer la tension complexe (l'amplitude  $|V_i|$  et la phase  $|\theta_i|$ ) du nœud  $i$  peut être développée en substituant l'équation :

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k)*}} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \quad i = 2 \dots n \quad (\text{II.15})$$

Il faut noter que le nœud 1 est choisi comme nœud balancier dont l'amplitude et la phase de tension sont connues. Cela explique pourquoi on commence les calculs pour  $i = 2$ .

#### II.4.2. Dans les nœuds PV

Si le nœud  $i$  est un nœud de génération, la puissance réelle  $P_i$  et l'amplitude de tension  $|V_i|$  sont connus, et il reste à déterminer la puissance réactive et la phase de tension au début de chaque itération.[35]

Aussi, pour le générateur du nœud  $i$ , on a:

$$I_{gi} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n \quad (\text{II.16})$$

D'où, on tire:

$$P_i - jQ_i = V_i^{(k)*} \left[ \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \quad (\text{II.17})$$

En prenant la partie imaginaire de l'équation (II.15), on obtient la puissance réactive du nœud de génération  $i$ :

$$Q_i = -\text{Im} \left[ V_i^{(k)*} \left[ \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right] \quad (\text{II.18})$$

Il faut remarquer que les meilleures valeurs de tension sont utilisées dans le calcul de la puissance réactive  $Q_i$ . Une fois  $Q_i$  est déterminée, on utilise l'équation (II.15) pour calculer la nouvelle valeur de  $V_i$  du nœud de génération  $i$  et en tirer la phase  $\theta_i$ . Habituellement, une limite maximum et/ou minimum :

$$Q_{min} \leq Q \leq Q_{max} \quad (\text{II.19})$$

$Q$  doit être spécifié. Si  $Q_{min}$  excède la limite spécifiée  $Q_{max}$ , cette dernière est alors choisie à la place de la valeur calculée pour être utilisée dans (II.15). Si l'amplitude de tension  $|V_i|$  de la nouvelle valeur calculée de  $V_i$  est plus grande que la valeur spécifiée d'amplitude de tension du nœud de génération  $i$ , la nouvelle tension est corrigée en la multipliant par le facteur correspondant au rapport de l'amplitude de tension spécifiée par l'amplitude de tension calculée, tout en gardant la phase de tension de la valeur calculée. En d'autres termes, seule l'amplitude doit être corrigée.

En résumé, le processus itératif de Gauss-Seidel commence en prenant des valeurs initiales pour les amplitudes et phases de tension inconnues (sauf pour le cas du nœud balancier) et calcule les nouvelles valeurs, qui sont ainsi des valeurs corrigées. Au niveau de chaque nœud, et à chaque itération, la tension corrigée est remplacée dans l'équation (II.15) comme une valeur estimée afin de calculer une nouvelle valeur. Ce processus est répété jusqu'à convergence.[8]

### II.4.3. Dans le nœud balancier (slack)

Une fois que toutes les tensions aux nœuds  $V_2, V_3, \dots, V_n$  sont calculées, la puissance du nœud balancier est alors calculée:

$$\frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + \dots + V_{1n}V_n \quad (\text{II.20})$$

$$P_1 - jQ_1 = V_1^*Y_{11}V_1 + V_1^*Y_{12}V_2 + \dots + V_1^*V_{1n}V_n \quad (\text{II.21})$$

## II.5. Puissance dans une ligne

### II.5.1. La puissance transit dans une ligne :

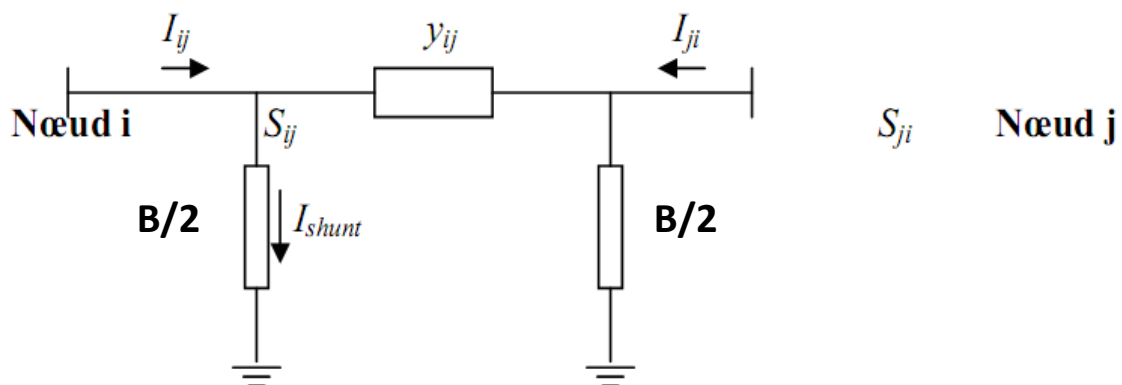


Figure II.1: Représenté la ligne reliant les nœuds i et j.[8]

le courant de ligne  $I_{ij}$  peut s'exprimer par:

$$I_{ij} = I_{série} + I_{shunt} = (V_i - V_j)Y_{ij} + V_i \frac{B}{2} \quad (\text{II.22})$$

Où

$Y_{ij}$  admittance de la ligne ij,

$B$  admittance shunt total de la ligne ij.

La puissance complexe transité le long de la ligne ij s'écrit:

$$S_{ij} = P_{ij} - jQ_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (\text{II.23})$$

En substituant l'expression de (1.17) dans (1.18), on obtient:

$$S_{ij} = P_{ij} - jQ_{ij} = V_i(V_i^* - V_j^*)Y_{ij}^* + V_i V_i^* \left(\frac{B}{2}\right)^* \quad (\text{II.24})$$

De manière similaire, les puissances active et réactive de transit du nœud i au nœud j s'exprime donc:

$$S_{ij} = P_{ij} - jQ_{ij} = V_j(V_j^* - V_i^*)Y_{ji}^* + V_j V_j^* \left(\frac{B}{2}\right)^* \quad (\text{II.25})$$

### II.5.2. Les pertes de puissance dans lignes :

Au niveau de J.d.B la puissance apparente nette est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée. Pour un J.d.B « i », On a : [8]

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (\text{II.26})$$

$S_{Gi}$  : la puissance apparente générée

$S_{Di}$  : la puissance apparente demandée.

$S_i$  : la puissance apparente nette

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = F_{iP} \quad (\text{II.27})$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = F_{iQ} \quad (\text{II.28})$$

$$\sum P_i = \sum F_{iP} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \quad (\text{II.29})$$

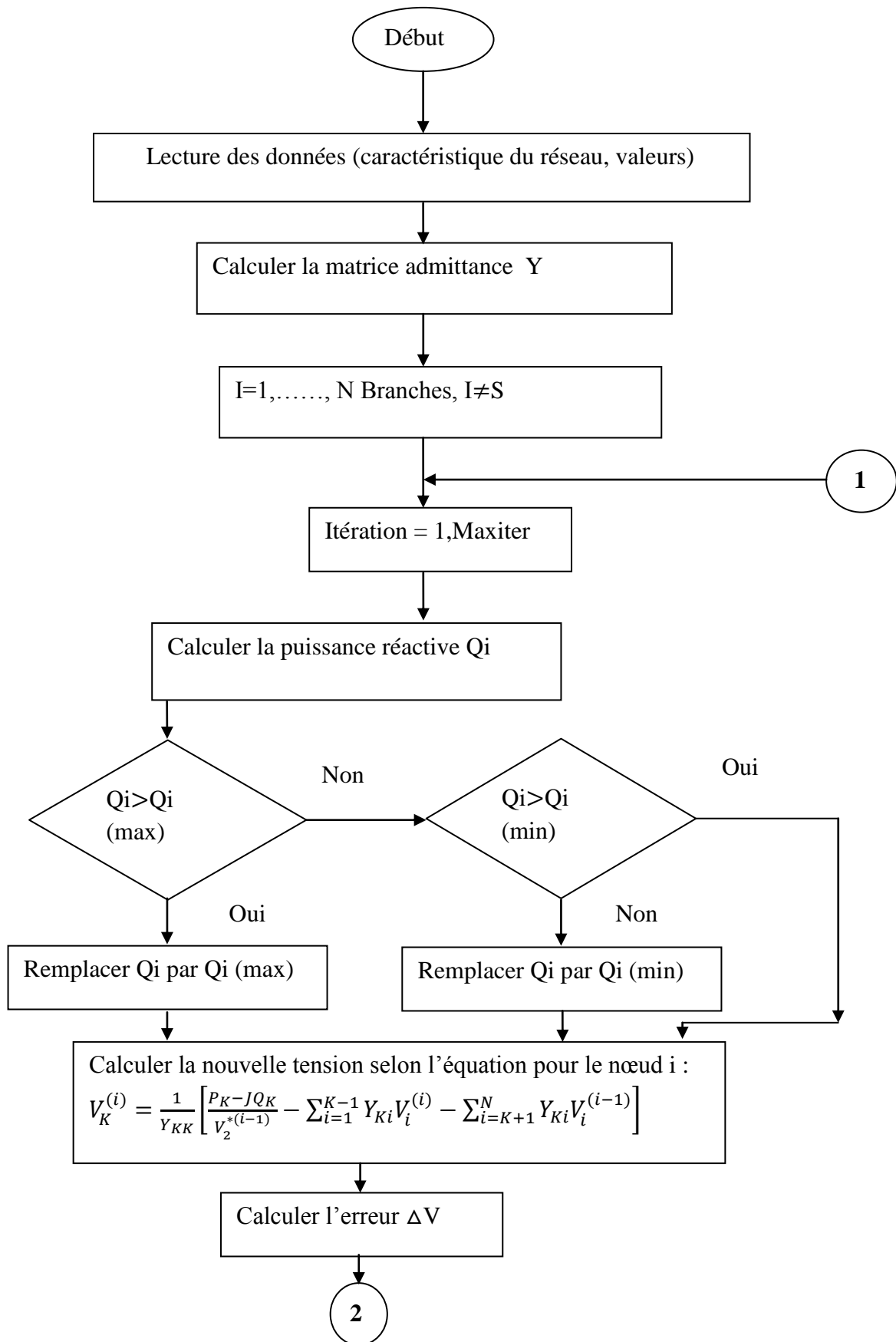
$$\sum Q_i = \sum F_{iQ} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (\text{II.30})$$

On calcule les pertes au niveau des lignes puis la somme donne l'expression des pertes.

$$P_{Lij} = P_{ij} - P_{ji} \quad (\text{II.31})$$

$$Q_{Lij} = Q_{ij} - Q_{ji} \quad (\text{II.32})$$

L'organigramme de calcul d'écoulement de puissance est donné par la figure suivante :



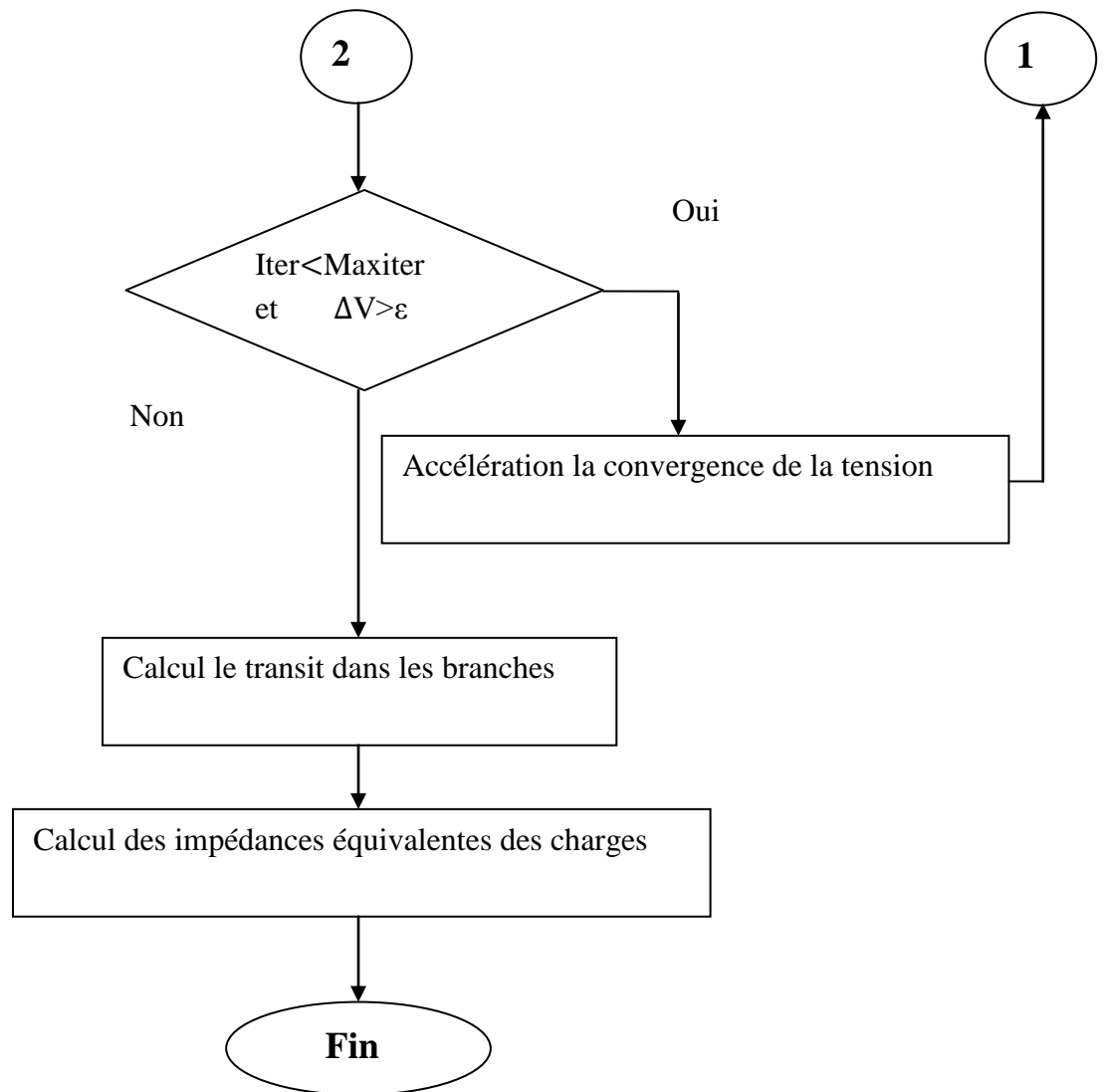


Figure II.2 Organigramme de calcul d'écoulement de puissance avec le contrôle de l'énergie réactive

## II.6. Calcul l'écoulement de puissance par la méthode de Gauss-Seidel :

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation du calcul d'écoulement de puissance par la méthode de Gauss-Seidel, pour plusieurs réseaux :

- résultats des simulations de -6- jeux de barres.
- résultats des simulations de -14- jeux de barres.
- résultats des simulations de -30- jeux de barres.

### II.6.1. Simulations de -6- jeux de barres:

La figure (II.3) représente la structure du réseau de 6 jeux de barres avec tension de base :

$$V_{base} = 220K$$

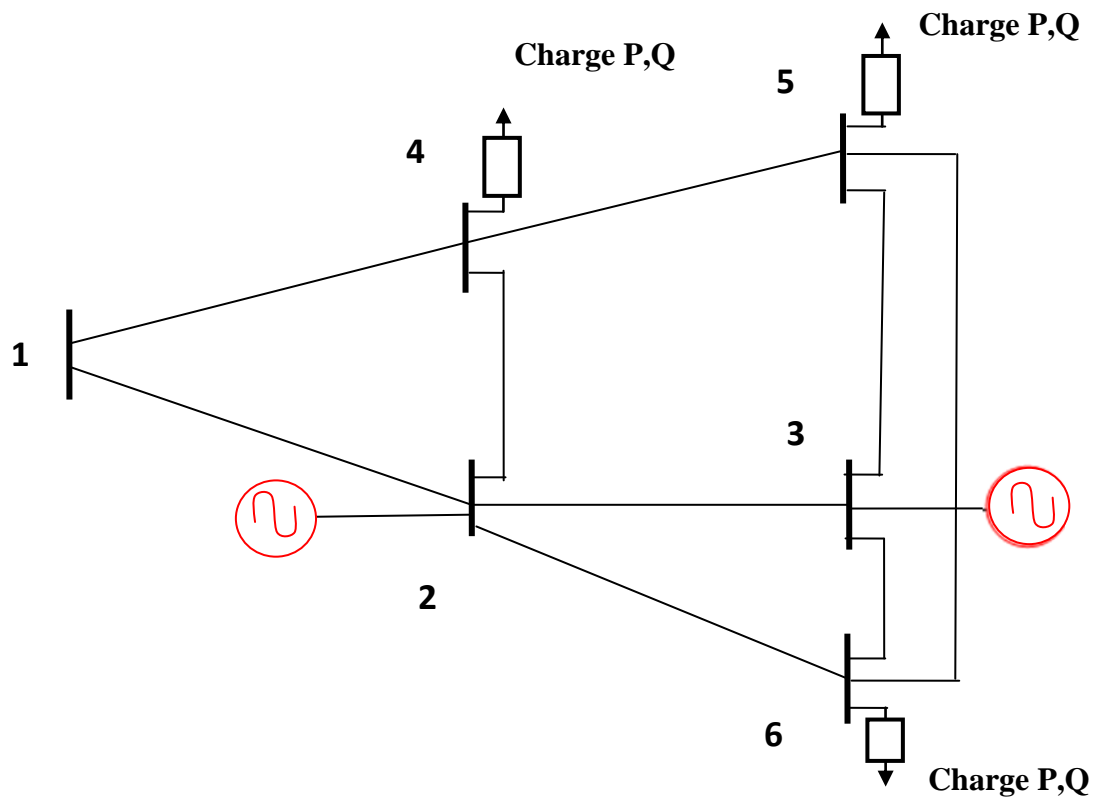


Figure II.3: Schéma unifilaire du réseau étudié de -6- jeux de barres.

Les données du réseau à -6- jeux de barres sont présentées par le tableau (II.2) suivant:

La tension de base est égale 220KV, la puissance de base est égale 100MVA

Nœuds de départ	Nœuds de d'arrivée	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)
1	2	0.10	0.20	0.02
1	4	0.05	0.20	0.02
1	5	0.08	0.30	0.03
2	3	0.05	0.25	0.03
2	4	0.05	0.10	0.01
2	5	0.10	0.30	0.02
2	6	0.07	0.20	0.025
3	5	0.12	0.26	0.025
3	6	0.02	0.10	0.01
4	5	0.20	0.40	0.04
5	6	0.10	0.30	0.03

**Tableau II.2** présenté les données du réseau de -6- jeux de barres

Les données de jeux de barres sont :

jeux de barres	Type	tension	Angle $\Theta$	P Gi	Q Gi	P Li	Q Li	Q min	Q max
1	1	1.05	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.05	0	0.5	0	0	0	-0.5	1
3	2	1.07	0	0.6	0	0	0	-0.5	1.5
4	3	1.0	0	0.0	0	0.7	0.7	0	0
5	3	1.05	0	0.0	0	0.7	0.7	0	0
6	3	1.0	0	0.0	0	0.7	0.7	0	0

**Tableau II.3**présenté les différents données du réseau de -6- jeux de barres

Le travail est fait en unités relatives et par conséquent on choisit les tensions estimées de tous les jeux de barres avec un argument égal à 0.

- La matrice admittance caractérisant sur le réseau est:

Y =

4.00 -11.74i	-2 + 4i	0	-1.17 + 4.70i	-0.82 + 3.11i	0
-2.00 + 4.00i	9.32 -23.19i	-0.76 + 3.84i	-4.00 + 8.00i	-1.00+ 3.00i	-1.55 + 4.45i
0	-0.76 + 3.84i	4.15 -16.56i	0	-1.46 + 3.17i	-1.92 + 9.61i
-1.17 + 4.70i	-4.00 + 8.00i	0	6.17 -14.63i	-1.00 + 2.00i	0
-0.82 + 3.11i	-1.00 + 3.00i	-1.46 + 3.17i	-1.00 + 2.00i	-1.46 + 3.17i	-1.00 + 2.00i
0	-1.55 + 4.45i	-1.92 + 9.61i	0	-1.00 + 3.00i	4.48 -17.00i

**Les résultats de simulations**

Les résultats de simulation obtenus par la méthode de Gauss-Seidel avec réseau électrique sont donnés dans le tableau suivant :

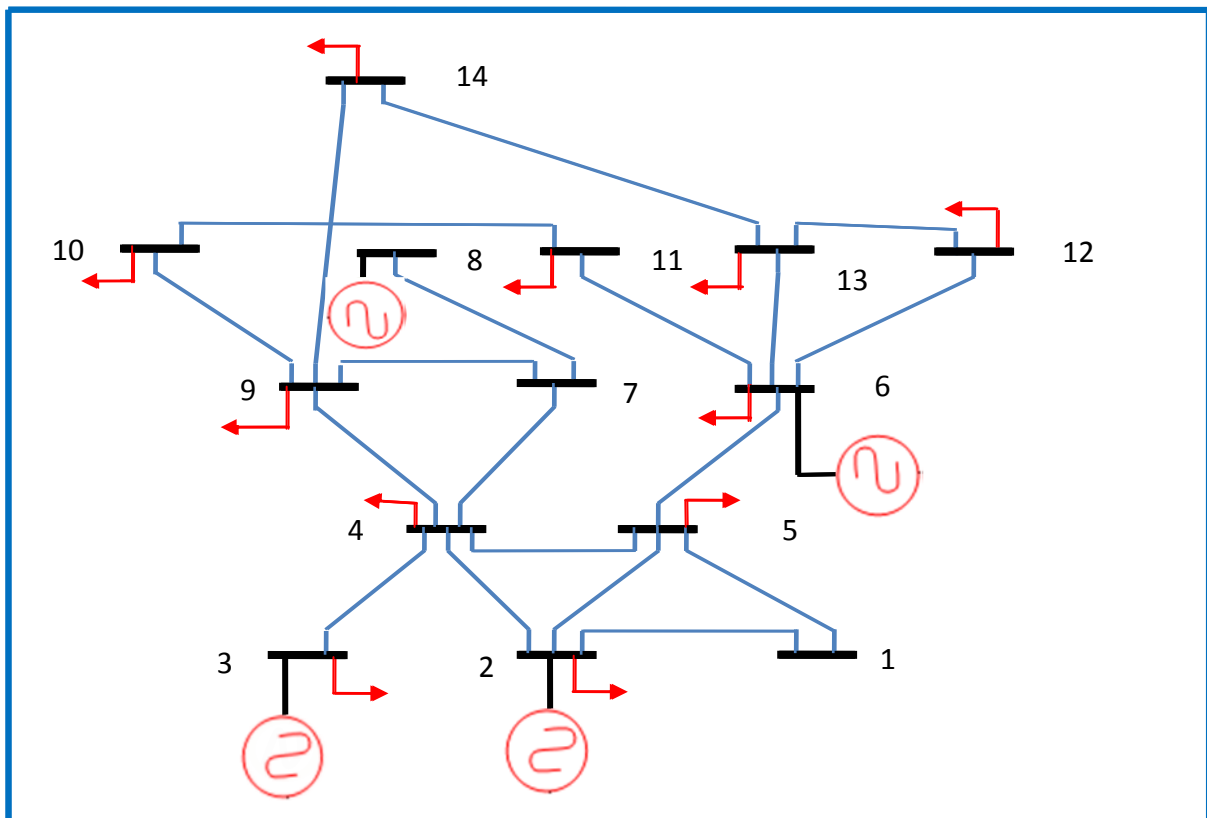
Le nombre d'itération = 21

Jeux de barres	1	2	3	4	5	6
Les tensions	1.0500	1.0500	1.0700	0.9893	0.9855	1.0045
L'angle	0	-3.5947	-4.1764	-4.1427	-5.2099	-5.8620

**Tableau II.4 les tensions obtenues par la méthode de Gauss-Seidel.**

**II.6.2. Simulations de -14- jeux de barres :**

La figure (II.4) représenté la structure du réseau -14- jeux de barres



**Figure II.4: Schéma unifilaire du réseau étudié de -14- jeux de barres.**

Les données du réseau à -14- jeux de barres sont présentées par le tableau (II.5) suivant:

Nœuds de départ	Nœuds de d'arrivée	R (pu)	X (pu)	B/2(pu)
1	2	0.01938	0.05917	0.0264
1	5	0.05403	0.22304	0.0246
2	3	0.04699	0.19797	0.0219
2	4	0.05811	0.17632	0.0170
2	5	0.05695	0.17388	0.0173
3	4	0.06701	0.17103	0.0064
4	5	0.01335	0.04211	0.0
4	7	0.0	0.20912	0.0
4	9	0.0	0.55618	0.0
5	6	0.0	0.25202	0.0
6	11	0.09498	0.19890	0.0
6	12	0.12291	0.25581	0.0
6	13	0.06615	0.13027	0.0
7	8	0.0	0.17615	0.0
7	9	0.0	0.11001	0.0
9	10	0.03181	0.08450	0.0
9	14	0.12711	0.27038	0.0
10	11	0.08205	0.19207	0.0
12	13	0.22092	0.19988	0.0
13	14	0.17093	0.34802	0.0

**Tableau II.5** Les données des branches du réseau de -14- jeux de barres

Les données de jeux de barres sont :

jeux de barres	Type	Tension	Angle $\Theta$	P Gi	Q Gi	P Li	Q Li	Q min	Q max
1	1	1.060	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.045	0	0.4	0.424	0.217	0.127	-0.4	0.5
3	2	1.010	0	0	0.234	0.942	0.19	0	0.4
4	3	1.0	0	0	0	0.478	-0.039	0	0
5	3	1.0	0	0	0	0.076	0.016	0	0
6	2	1.070	0	0	0.122	0.112	0.075	-0.06	0.24
7	3	1.0	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.090	0	0	0.174	0	0	-0.06	0.24
9	3	1.0	0	0	0	0.295	0.166	0	0
10	3	1.0	0	0	0	0.090	0.058	0	0
11	3	1.0	0	0	0	0.035	0.018	0	0
12	3	1.0	0	0	0	0.061	0.016	0	0
13	3	1.0	0	0	0	0.135	0.058	0	0
14	3	1.0	0	0	0	0.149	0.05	0	0

**Tableau II.6** Les différents données du réseau de -14- jeux de barres

**Les résultats de simulations**

Les résultats de simulation obtenus par la méthode de Gauss-Seidel sont donnés dans les tableaux suivants :

Le nombre d'itération = 69

Nœud de Jeu de barres	Les tensions	L'angle
1	1.06	0
2	1.045	-4.9575
3	1.0028	-12.614
4	1.0147	-10.230
5	1.0214	-8.7728
6	1.029	-14.81
7	1.0212	-13.476
8	1.0610	-13.476
9	1.0010	-15.216
10	0.9982	-15.451
11	1.0100	-15.266
12	1.0128	-15.723
13	1.0069	-15.772
14	1.0145	-16.561

**Tableau II.7 Résultats de simulation du Gauss-Seidel pour le réseau de -14- jeux de barre**

**II.6.3. Simulations de réseau-30- jeux de barres :**

Les données du réseau -30-jeux de barres sont présentées par le tableau (II.8):

Nœuds de départ	Nœuds de d'arrivée	R (pu)	X (pu)	B/2 (pu)
1	2	0.0192	0.0575	0.0264
1	3	0.0452	0.1652	0.0204
2	4	0.0570	0.1737	0.0184
3	4	0.0132	0.0379	0.0042
2	5	0.0472	0.1983	0.0209
2	6	0.0581	0.1763	0.0187
4	6	0.0119	0.0414	0.0045
5	7	0.0460	0.1160	0.0102
6	7	0.0267	0.0820	0.0085
6	8	0.0120	0.0420	0.0045
6	9	0.0	0.2080	0.0
6	10	0.0	0.5560	0.0
9	11	0.0	0.2080	0.0
9	10	0.0	0.1100	0.0
4	12	0.0	0.2560	0.0
12	13	0.0	0.1400	0.0
12	14	0.1231	0.2559	0.0
12	15	0.0662	0.1304	0.0
12	16	0.0945	0.1987	0.0
14	15	0.2210	0.1997	0.0

16	17	0.0824	0.1923	0.0
15	18	0.1073	0.2185	0.0
18	19	0.0639	0.1292	0.0
19	20	0.0340	0.0680	0.0
10	20	0.0936	0.2090	0.0
10	17	0.0324	.0845	0.0
10	21	0.0348	0.0749	0.0
10	22	0.0727	0.1499	0.0
21	23	0.0116	0.0236	0.0
15	23	0.1000	0.2020	0.0
22	24	0.1150	0.1790	0.0
23	24	0.1320	0.2700	0.0
24	25	0.1885	0.3292	0.0
25	26	0.2544	0.3800	0.0
25	27	0.1093	0.2087	0.0
28	27	0.0	0.3960	0.0
27	29	0.2198	0.4153	0.0
27	30	0.3202	0.6027	0.0
29	30	0.2399	0.4533	0.0
8	28	0.0636	0.2000	0.0214
6	28	0.0169	0.0599	0.065

Tableau II.8 Les données du réseau -30- jeux de barres.

Les données de jeux de barres sont :

jeux de barres	Type du nœud	Tension (pu)	Angle (dégrée)	P Gi	Q Gi	P Li	Q Li	Q min	Q max
1	1	1.06	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.043	0	0,4	0.5	0.217	-0.127	0.4	0.5
3	3	1	0	0	0	0.024	0.012	0	0
4	3	1.06	0	0	0	0.076	0.016	0	0
5	2	1.01	0	0	0.37	0.942	0.19	-0.4	0.4
6	3	1	0	0	0	0	0	0	0
7	3	1	0	0	0	0.228	0.109	0	0
8	2	1.01	0	0	0.373	0.3	0.3	-0.1	0.4
9	3	1	0	0	0	0	0	0	0
10	3	1	0	0	0.19	0.058	0.02	0	0
11	2	1.082	0	0	0.162	0	0	-0.06	0.24
12	3	1	0	0	0	0.112	0.075	0	0
13	2	1.071	0	0	0.106	0	0	-0.06	0.24
14	3	1	0	0	0	0.062	0.016	0	0
15	3	1	0	0	0	0.082	0.025	0	0
16	3	1	0	0	0	0.035	0.018	0	0
17	3	1	0	0	0	0.09	0.058	0	0
18	3	1	0	0	0	0.032	0.009	0	0
19	3	1	0	0	0	0.095	0.034	0	0
20	3	1	0	0	0	0.022	0.007	0	0
21	3	1	0	0	0	0.175	0.112	0	0
22	3	1	0	0	0	0	0	0	0

23	3	1	0	0	0	0.032	0.016	0	0
24	3	1	0	0	0.043	0.087	0.067	0	0
25	3	1	0	0	0	0	0	0	0
26	3	1	0	0	0	0.035	0.023	0	0
27	3	1	0	0	0	0	0	0	0
28	3	1	0	0	0	0	0	0	0
29	3	1	0	0	0	0.024	0.009	0	0
30	3	1	0	0	0	0.106	0.019	0	0

Tableau II.9 les différents données du réseau de -30- jeux de barres

### Les résultats de simulations

Les résultats de simulation obtenus par la méthode de Gauss-Seidel sont donnés dans le tableau suivant :

Le nombre d'itération = 187

Nœud de Jeu de barres	Les tensions	L'angle	Nœud de Jeu de barres	Les tensions	L'angle
1	1.0600	0	16	1.0180	-15.8897
2	1.0430	-5.3190	17	1.0146	-16.2333
3	1.0268	-7.5681	18	1.0021	-16.9206
4	1.0192	-9.3230	19	0.9999	-17.1108
5	1.0100	-14.1011	20	1.0044	-16.9105
6	1.0143	-11.0676	21	1.0049	-16.5981
7	1.0048	-12.8385	22	1.0113	-16.4116
8	1.0085	-11.7201	23	1.0044	-16.6050
9	1.0337	-14.3436	24	0.9982	-16.7758
10	1.0209	-16.0678	25	0.9920	-16.3008
11	1.0800	-14.3435	26	0.9738	-16.7426
12	1.0286	-15.2562	27	0.9969	-15.7380
13	1.0603	-15.2562	28	1.0126	-11.7106
14	1.0145	-16.1694	29	<b>0.9765</b>	-17.0341
15	1.0111	-16.2658	30	<b>0.9647</b>	-17.9675

Tableau II.10 Résultats de simulation du Gauss-Seidel avec réseaude -30- jeux de barres

### Interprétation

Dans la simulation de -30-jeux des barres on remarque les tensions aux niveaux des bus (14 et 15) sont (0.9765 pu = 214.83Kv) et (0.9647 pu = 212.23Kv) respectivement, sont très inférieure à la tension nominale, dont l'intérêt de l'amélioration par le système de l'éolien.

**II.7. Conclusion:**

L'objectif principal visé dans ce chapitre c'est d'introduire l'étudiant au problème de calcul d'écoulement de charge dans un réseau électrique. Nous avons vu en modélisant tous les éléments du réseau que le problème d'écoulement de puissance et déterminer les valeurs de tension et la phase dans chaque nœud par utiliser la méthode de GAUSS-SEIDEL, pour ce la des techniques d'amélioration sont nécessaire, tel que les dispositifs FACTS et les éoliennes dont nous utiliserons dans la suite de ce travail, afin d'améliorer le transit de puissance dans les réseaux électriques.

## Chapitre III : Modélisation sur les systèmes éoliens.

### III.1. Introduction

Le besoin croissant des sources d'énergie ont conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations fin de prévoir d'autre source renouvelable à savoir l'éolien ou photovoltaïque, et conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

L'énergie éolienne générée par le vent est utilisée depuis longtemps. Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Soit cette énergie est utilisée directement comme dans les éoliennes de pompage, soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas, on parle d'aérogénérateurs. [21]

Dans ce chapitre présent un rappelle sur les notions élémentaires du fonctionnement d'une éolien basée sur génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Aussi que la modélisation des différentes parties de la turbine. En suite, la stratégie de commande dans la zone de fonctionnement en dessous de la puissance nominale, afin de maximiser l'énergie capturée par l'éolienne.

### III.2. Généralités sur les éoliennes.

#### III.2.1. Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur (Figure III.1).[20][23]

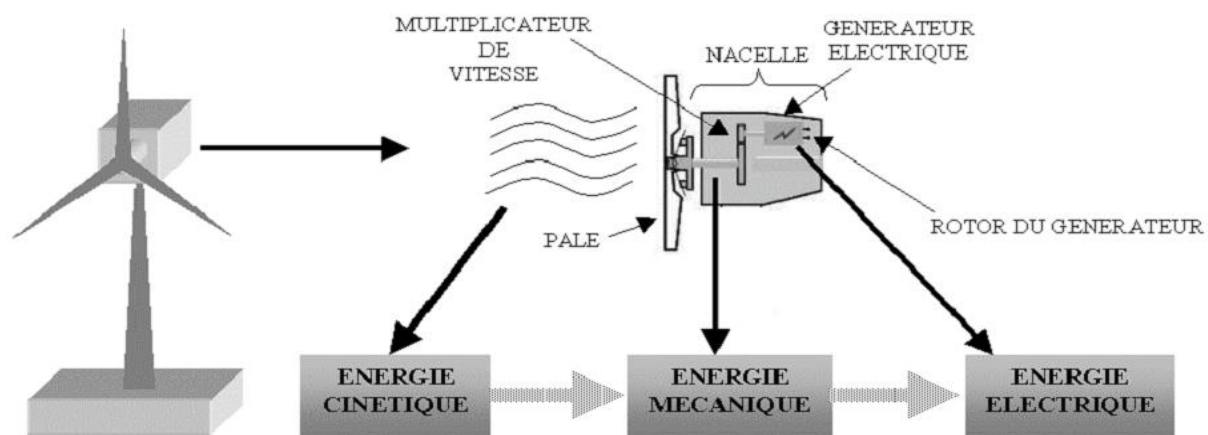


Figure III .1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.[27]

### III.2.2. Développement de l'énergie éolienne

Depuis ces dernières années, la production d'électricité éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier (figure III.2). ceci principalement du à deux raison :

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

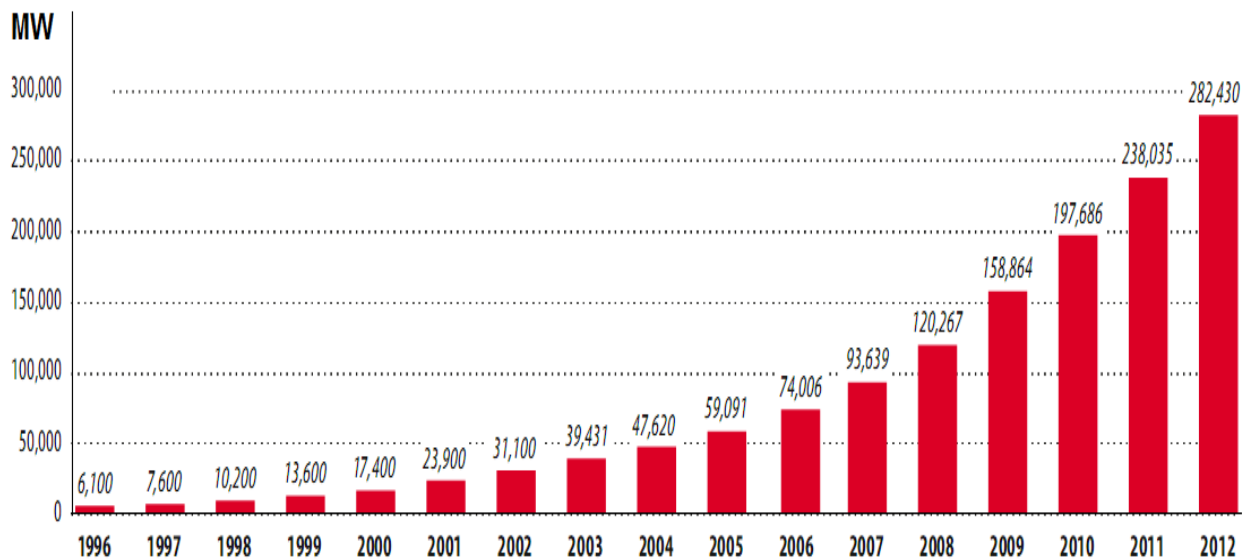


Figure III.2 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.[36]

### III.2.3. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

#### III.2.3.1. Eoliennes à Axe Horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien, ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important.[23]



(a) Éoliennes trois pales



(b) Éoliennes deux pales

**Figure III.3** Éolienne à axe horizontal.

### III.2.3.2. Eoliennes à Axe Vertical :

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal.[23]



**Figure III.4** Éolienne à axe vertical.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou

agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles, le niveau sonore d'une éolienne est de 50Db à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne.

### **II.2.4. Fonctionnement selon type de vitesse :**

Le fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable constitue l'une des plus importantes spécifications des aérogénérateurs, Nous allons respectivement citer en ce qui suit les avantages de l'un par rapport à l'autre :

#### **III.2.4.1. Fonctionnement de vitesse fixe :**

- Système électrique plus simple ;
- Plus grande fiabilité ;
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne ;
- Pas besoin de système électrique de commande ;
- Moins cher.

#### **III.2.4.2. Fonctionnement de vitesse variable :**

- Augmentation du rendement énergétique,
- Réduction des oscillations du couple,
- Réduction des efforts subis par le convertisseur de puissance,
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

### **III.2.5. Principaux composants d'une éolienne :**

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales.

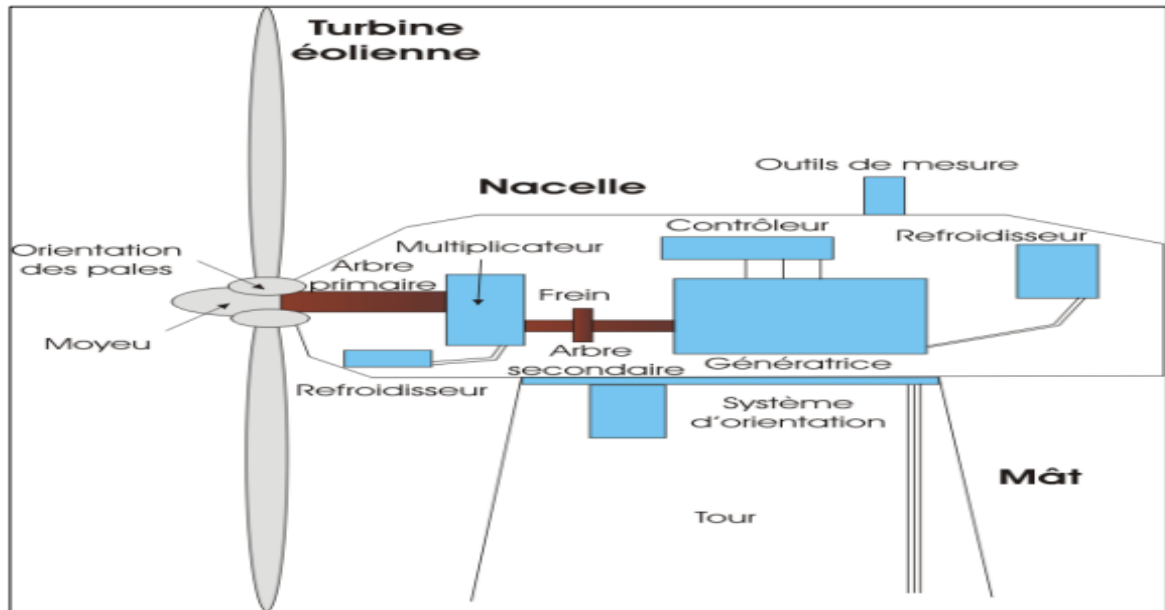


Figure III.5 Eléments constituant une éolienne. [21]

### Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.[21]

### La nacelle :

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.[20]

### Le rotor :

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept

danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

### **III.3. Généralités sur la MADA :**

#### **III.3.1. Description de la MADA**

La machine asynchrone à double alimentation (doublyfed induction machine en anglais) est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles [Den04]. Son stator est identique à celui de la machine asynchrone à cage d'écureuil (MAS) ou d'une machine synchrone (MS), les enroulements rotoriques sont disposés de la même façon que ceux statoriques.

#### **III.3.2. Les applications des machines asynchrones à double alimentation :**

La machine asynchrone doublement alimentée est utilisée dans diverses applications soit en mode moteur ou en mode générateur. Nous citerons, dans ce qui suit, les applications plus envisagées dans l'industrie. [20]

##### **III.3.2.1. Application moteur :**

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et Asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. En générale La MADA représente une nouvelle solution dans le domaine des entraînements de forte puissance, notamment ceux exigeant un large domaine de fonctionnement étendu à puissance constante et une grande plage de variation de la vitesse comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime. [20]

##### **III.3.2.2. Application génératrice :**

C'est surtout le mode de fonctionnement en génératrice qui nous intéresse car il correspond parfaitement dans notre cas, à la MADA utilisée dans une éolienne, la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

### III.3.3. Domaine d'applications de la GADA :

La machine à double alimentation offre de nombreux avantages par rapport à la Machine asynchrone classique et synchrone. Surtout en ce qui concerne la gamme de la vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La GADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et Navales. [21]

### III.3.4. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la MADA :

On adopte les hypothèses simplificatrices qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, conduisent à des résultats suffisamment précis pour la plupart des applications ; ces hypothèses sont les suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé ;
- On admet de plus que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale. [19]

### III.3.5. Le principe de machine asynchrone à double alimentation :

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone à cage. [28]

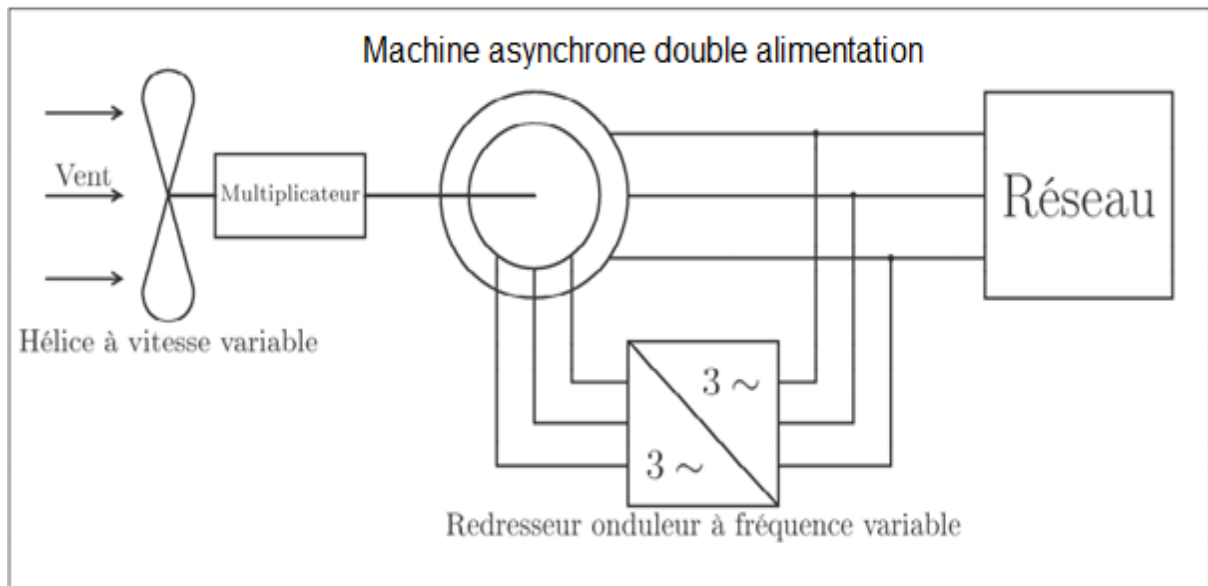


Figure III.6 schéma de principe de la machine asynchrone double alimentation. [28]

### III.4. Modélisation de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec les répartitions de ses enroulements et sa géométrie propre, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter les hypothèses simplificatrices suivantes afin de pouvoir élaborer un modèle simple.

- La machine est symétrique et à entrefer constant.
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté ; il en résulte que les pertes fer et par hystérésis sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
- La f.m.m créée dans une phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.

La MADA est représentée schématiquement par la figure (III.7) :

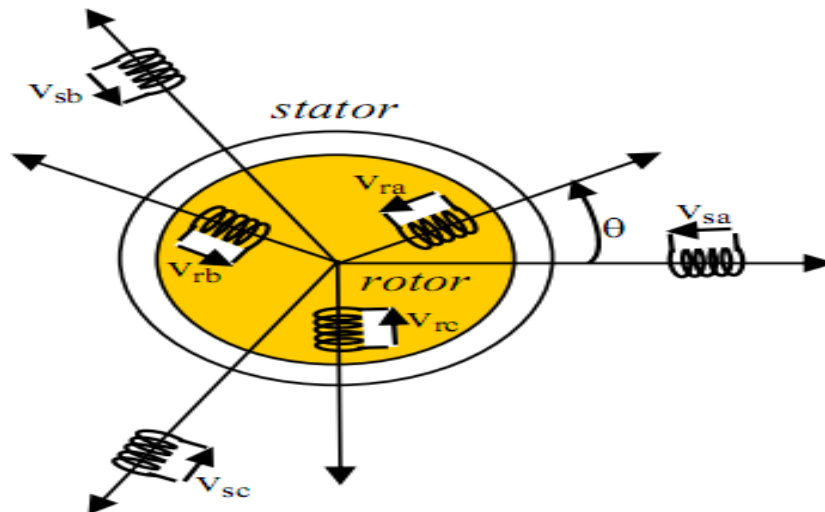


Figure III.7 Représentation schématique de la MADA. [19]

### III.4.1. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralisé :

La machine asynchrone à double alimentation « GADA » comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de  $(2\pi/3)$  et aussi trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator.

Les équations générales de génératrice asynchrone double alimentation dans un repère triphasé en mode hypo synchrone s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = -[R_s][I_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{rabc}] \end{cases} \quad (III.1)$$

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix};$$

$[V_{sabc}]$ ,  $[V_{rabc}]$  : Sont respectivement les vecteur destensions statoriqueset rotoriques

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; [\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix}; [\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix};$$

$[I_{sabc}]$ ,  $[I_{rabc}]$  : Sont respectivement les vecteur des courants statoriques et rotoriques ;

$[\varphi_{sabc}]$  ,  $[\varphi_{rabc}]$  : sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes a,b,c.

Avec :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix};$$

$[R_s]$  et  $[R_r]$  : sont respectivement les matrices les résistances statoriques et rotoriques par

Phase.

### III.4.2. Equations magnétiques de GADA :

Les équations des flux statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} [\varphi_s] = -[L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] - [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (III.2)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix}$$

Où

$I_s, I_r$  sont respectivement les inductances principales de fuite statoriques et rotoriques ;

$M_s, M_r$  : sont respectivement les inductances mutuelles statoriques et rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles (ou matrice de couplage rotor- stator) est donnée par :

$$[M_{rs}] = [M_{sr}] = M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

### III.4.3. La transformée de Park :

Appelée souvent transformation des deux axes , cette transformation a été présente par PARK en 1929 lors de l'étude de la machine asynchrone comme moyen de simplifier les équations de celle-ci . fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

\* D'axes directs (indice d) ;

\* D'axes en quadrature (indice q). [20]

L'idée de Park repose sur le fait qu'un champ tournant crée par un système triphasé peut l'être aussi à l'identique par deux courants  $I_d$  ,et  $I_q$  ,et deux tension . la transformation qui traduit ce passage est donné par :

$$[V]_{dq} = [P(\theta_a)] \cdot [V]_{abc} \quad \text{et} \quad [I]_{dq} = [P(\theta_a)] \cdot [I]_{abc}$$

$[P(\theta_a)]$  est la matrice de Park :

$$[P(\theta_a)] = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III.4)$$

Pour la transformation inverse , c'est-à-dire pour le passage du système biphasé au système triphasé, on utilise la matrice de Park inverse suivante :

$$[P(\theta_a)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}; \quad (III.5)$$

La matrice  $[P(\theta_a)]^{-1}$  est appelée matrice de transformation de Park inverse.

**Equation matricielle :**

Tension :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Courant :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

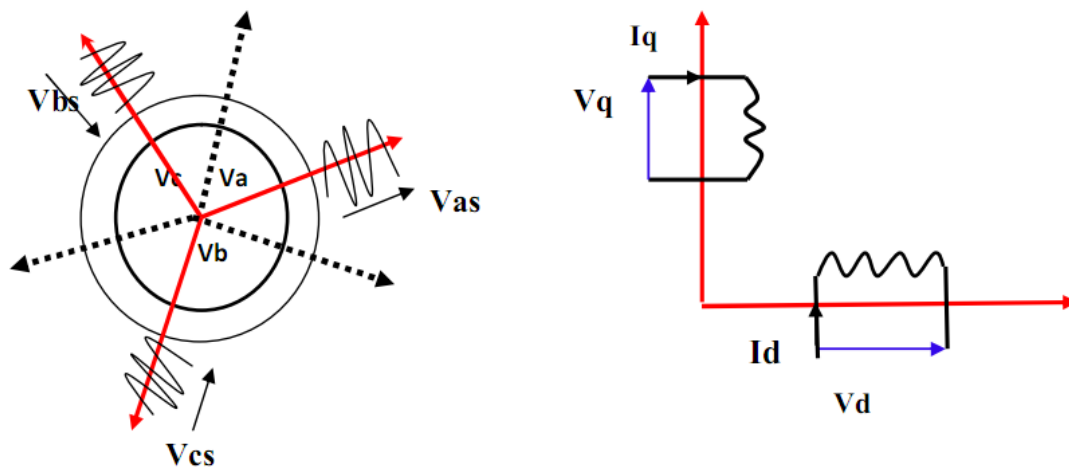


Figure III.8 : Schémas de transformation de park

### III.4.4. Equations électriques et mécanique de la GADA dans le référentiel

**(d,q) :**

Le modèle mathématique de la génératrice asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Les composantes des flux statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Avec

$$\omega_r = \omega_s - \omega, \omega = p \cdot \Omega$$

Avec respectivement:

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$  les tensions statoriques et rotoriques directs en système diphasé.

$I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$  et  $I_{rq}$  les courants statoriques et rotoriques directs en système diphasé.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}, \varphi_{rd}$  et  $\varphi_{rq}$  les flux statoriques et rotoriques directs en système diphasé.

$\omega_s, \omega_r$  sont les pulsations statoriques et rotoriques ; des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par les relations suivantes :

$$\begin{cases} C_{em} = -P \frac{M}{L_r} (\varphi_{rd} I_{qs} - \varphi_{rq} I_{ds}) \\ C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\varphi_{sd} I_{rq} - \varphi_{sq} I_{rd}) \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

L'équation mécanique est donnée par

$$C_{em} - C_r = f \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III.11})$$

Avec respectivement :

$C_{em}$ : Couple électromagnétique.

$C_r$  : Couple résistant.

f: Le coefficient de frottement visqueux de la GADA ;

$\Omega$ : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA ;

J: L'inertie des parties tournantes.

Les puissances active et réactive statoriques sont représentées par :

$$\begin{cases} P_S = -(I_{ds} V_{ds} + I_{qs} V_{qs}) \\ Q_S = -(I_{ds} V_{qs} - I_{qs} V_{ds}) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

$P_S$  : La puissance active statoriques.

$Q_S$  : La puissance réactive statoriques.

Les puissances active et réactive rotoriques sont représentées par :

$$\begin{cases} P_r = (I_{rq}V_{rq} + I_{rd}V_{rd}) \\ Q_r = (I_{rd}V_{rq} - I_{rq}V_{rd}) \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

$P_r$  : La puissance active rotoriques.

$Q_r$  : La puissance réactive rotoriques.

### III.4.5.Mise sous forme d'équation d'état

Pour la génératrice asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courant rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante:

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.14})$$

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les

Courant statoriques et les flux rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

$$[X] = [I_{dr} \quad I_{qr} \quad \varphi_{ds} \quad \varphi_{qs}]' \quad (\text{III.15})$$

$$[U] = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad V_{dr} \quad V_{qr}]' \quad (\text{III.16})$$

A partir d'expressions (II.9), on déduit les expressions des flux rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

A partir d'expressions (II.9), on déduit les expressions des courants statorique :

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{1}{L_s} \varphi_{sd} + \frac{M}{L_s} I_{rd} \\ I_{sq} = -\frac{1}{L_s} \varphi_{sq} + \frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

Le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{sd} - L_s \frac{d}{dt} I_{sd} + M \frac{d}{dt} I_{rd} + \omega_s L_s I_{sq} - \omega_s M I_{rq} \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} - L_s \frac{d}{dt} I_{sq} + M \frac{d}{dt} I_{rq} - \omega_s L_s I_{sd} + \omega_s M I_{rd} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \frac{d}{dt} I_{rd} - M \frac{d}{dt} I_{sd} - (\omega_s - \omega) \cdot L_r I_{rd} + (\omega_s - \omega) \cdot M I_{sd} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \frac{d}{dt} I_{rq} - M \frac{d}{dt} I_{sq} + (\omega_s - \omega) \cdot L_r I_{rq} - (\omega_s - \omega) \cdot M I_{sq} \\ J \frac{d\Omega}{dt} = -P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) - C_r - K_f \Omega \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Après le calcul et la simplification du système d'équations (III.19), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} I_{dr} = -\delta I_{dr} + \omega_r \cdot I_{qr} + \alpha \cdot \varphi_{ds} - \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qs} - \frac{M}{\sigma L_r L_s} \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot V_{dr} \\ \frac{d}{dt} I_{qr} = -\delta I_{qr} - \omega_r \cdot I_{dr} + \alpha \cdot \varphi_{qs} + \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \varphi_{ds} - \frac{M}{\sigma L_r L_s} \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} \cdot V_{qr} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{ds} = -\frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \varphi_{qs} + \frac{M}{T_s} \cdot I_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d}{dt} \varphi_{qs} = -\frac{1}{T_s} \cdot \varphi_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + \frac{M}{T_s} \cdot I_{qr} + V_{qs} \end{array} \right. \quad (III.20)$$

La matrice d'état A s'écrit :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\delta & \omega_r & \alpha & -\beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ -\omega_r & -\delta & \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) & \alpha \\ \frac{M}{T_s} & 0 & -\frac{1}{T_s} & \omega_s \\ 0 & \frac{M}{T_s} & -\omega_s & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \quad (III.21)$$

La matrice des entrées B s'écrivent:

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.22)$$

On rappelle que :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s = \frac{L_s}{R_s} \\ T_r = \frac{L_r}{R_r} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \\ \alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_r L_s} \\ \delta = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right) \\ \beta = \frac{M}{\sigma L_r L_s} \end{array} \right.$$

Pour facilité la simulation, nous avons écrits la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + \omega_s [A_2] + \omega_r [A_3] \quad (III.23)$$

$$[A_1] = \begin{bmatrix} -\delta & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & -\delta & 0 & \alpha \\ \frac{M}{T_s} & 0 & -\frac{1}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{M}{T_s} & 0 & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix}; [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\beta \\ 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}; [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \beta \\ -1 & 0 & -\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

A partir des équations (II, 18) et (II, 19) (II, 20) le modèle peut être exprimé dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U]$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta & \omega_r & \alpha & -\beta \cdot (\omega_s - \omega_r) \\ -\omega_r & -\delta & \beta \cdot (\omega_s - \omega_r) & \alpha \\ \frac{M}{T_s} & 0 & -\frac{1}{T_s} & \omega_s \\ 0 & \frac{M}{T_s} & -\omega_s & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.24)$$

### III.5. Simulation de GADA :

La génératrice asynchrone à double alimentation a été modélisée par des équations mathématiques, et de simuler la machine, on a fait appel au logiciel Matlab-SIMULIK.

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous présenté le modèle de la génératrice asynchrone à double alimentation , de puissance 4KW, et la machine est entraînée à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min. alimentée directement par deux sources de tension triphasés , l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50 Hz et d'amplitude de  $(220 * \sqrt{2}V)$  .et au niveau du rotor avec une fréquence du réseau qui est 2 Hz et d'amplitude de  $(12 * \sqrt{2}V)$  ( les paramètres de simulation représenté sur l'annexe ) .

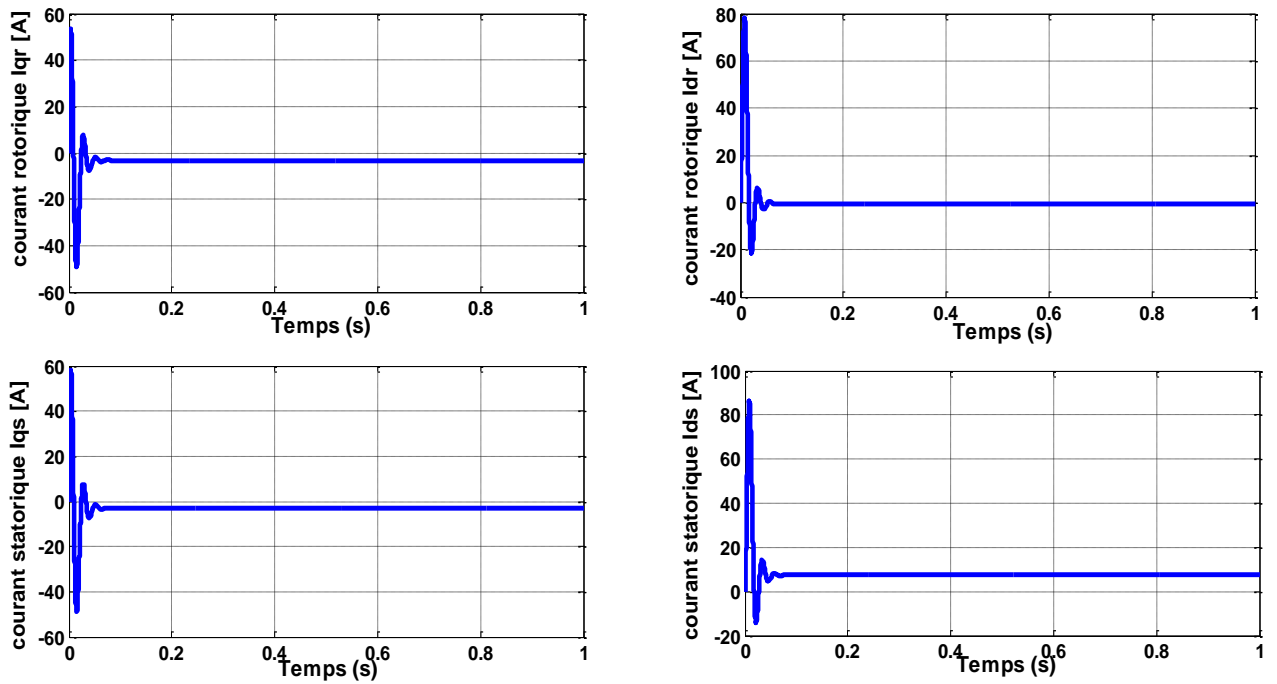


Figure III.9 Les composantes du courant statoriques et rotoriques

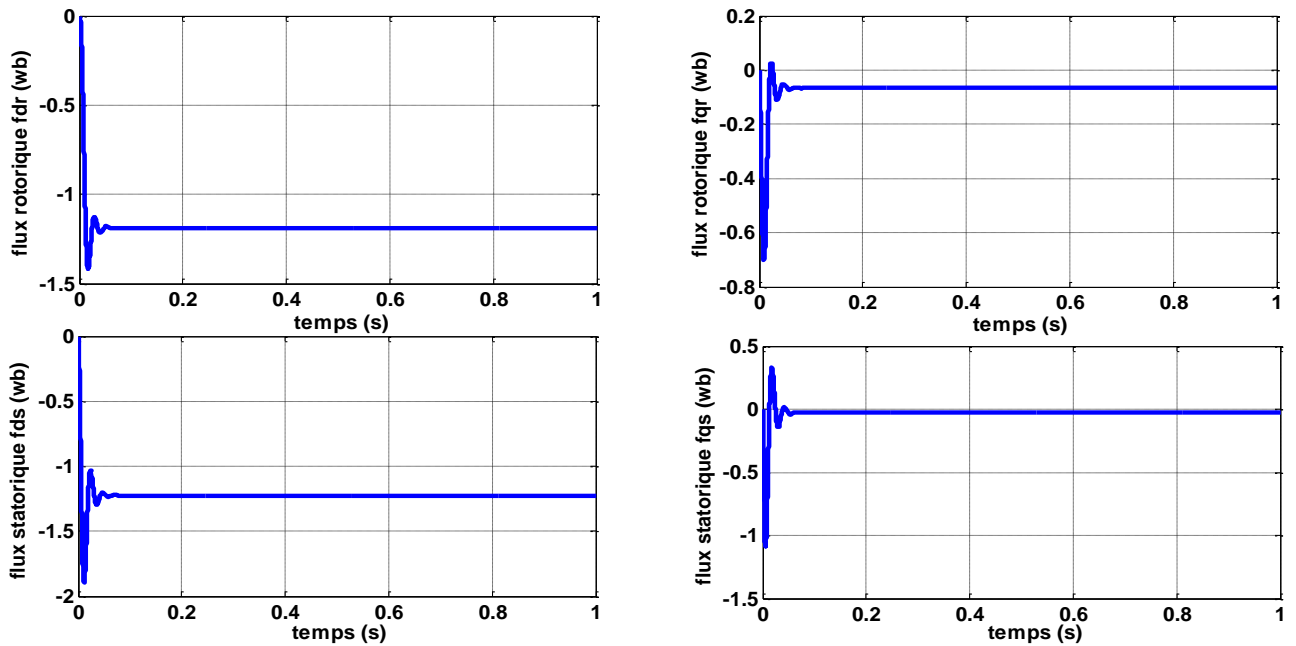


Figure III.10 Les composantes du flux statoriques et rotoriques

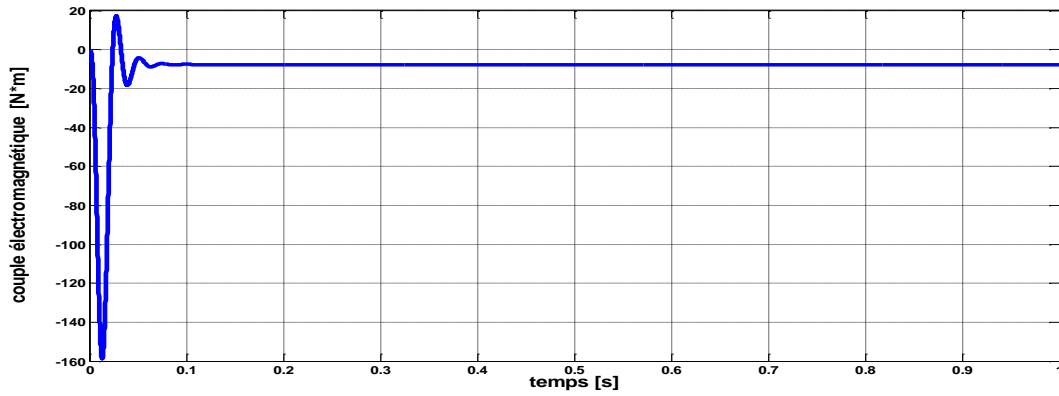


Figure III.11 Le couple électromagnétique

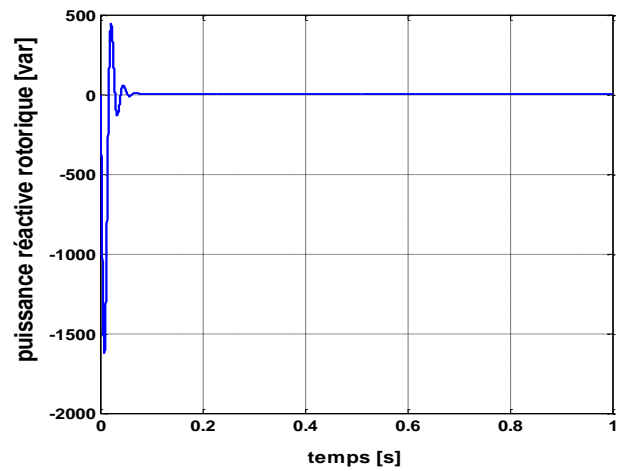
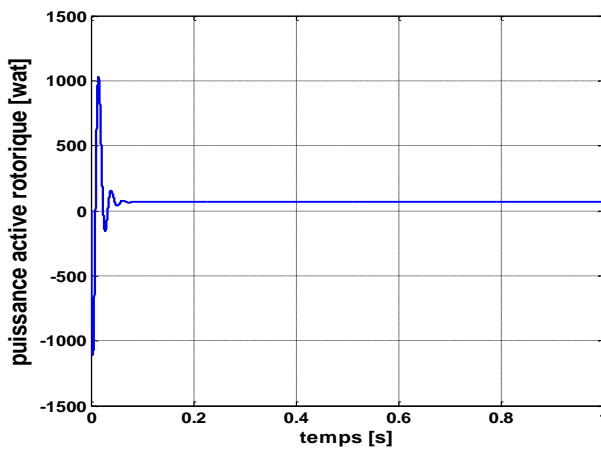


Figure III.12 La puissance active et réactive rotorique.

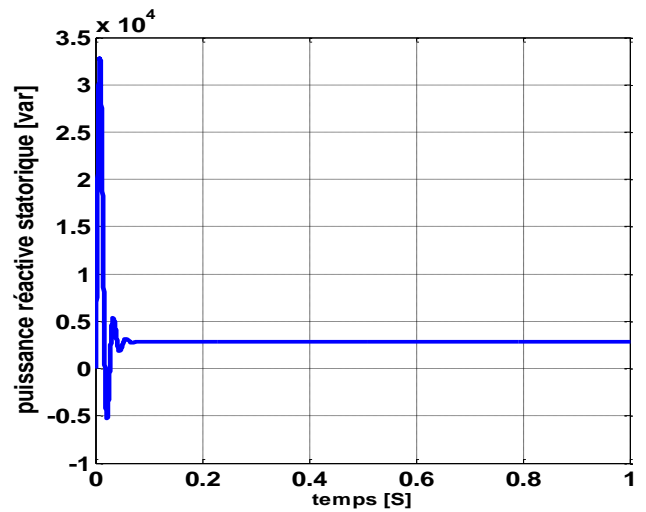
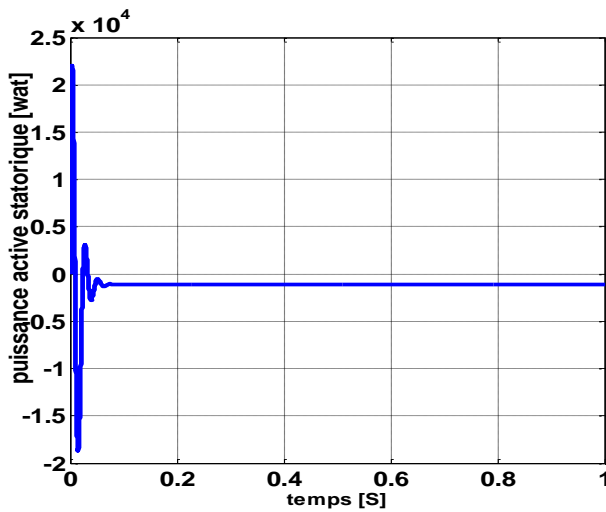


Figure III.13 La puissance active et réactive statorique.

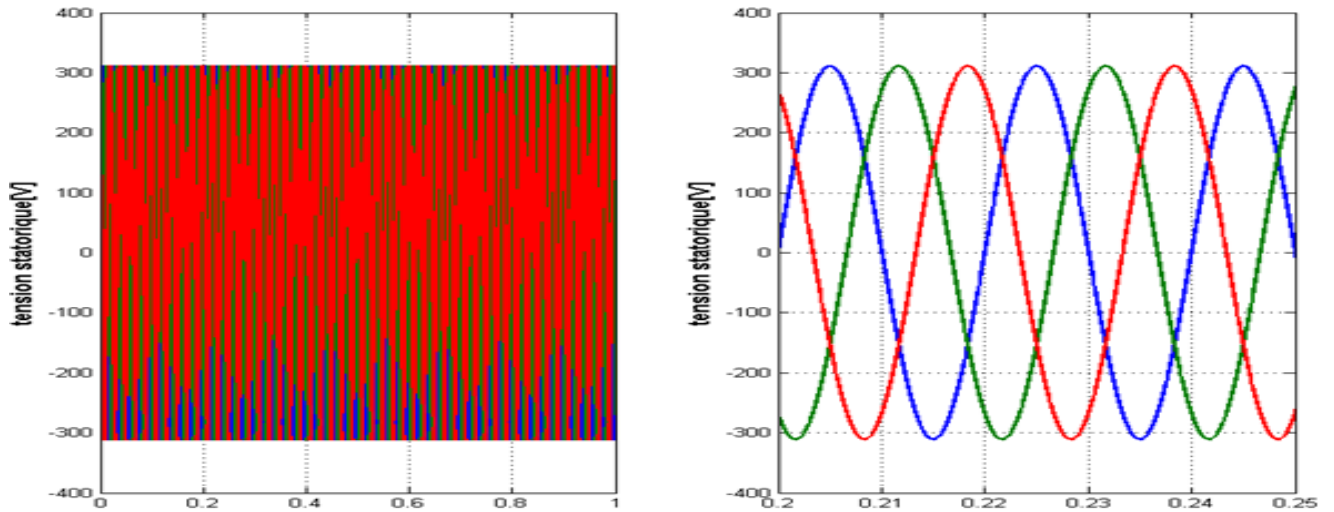


Figure III.14 Les tensions d'alimentations triphasées statoriques

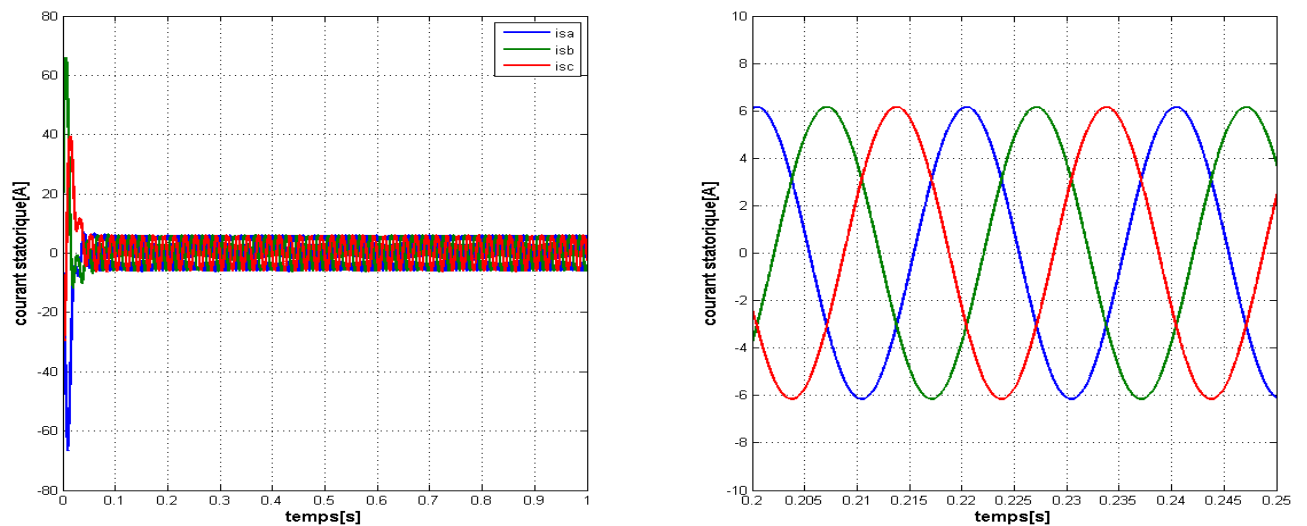


Figure III.15 Les courants statoriques triphasées avec un zoom

### III.5.1. Interprétations des résultats

Les figures précédentes représentent les réponses dynamiques de quelques caractéristiques de la génératrice asynchrone alimentée au stator par un réseau triphasé équilibré d'une fréquence 50Hz et d'amplitude de  $(220 \cdot \sqrt{2} \text{V}, 50 \text{ Hz})$ , et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de  $(12 \cdot \sqrt{2} \text{V}, 2 \text{ Hz})$ .

On remarque que pendant la période de démarrage le courant de phase statorique dans la figure (III.9) atteint une valeur importante de 80 A pour démarrage de la génératrice asynchrone et présente des oscillations considérables, puis décroît jusqu'à sa valeur en régime permanent.

D'autre part, l'allure du couple électromagnétique(III.11) présente une valeur de (-157 N.m) pendant le démarrage puis diminue et équilibre le couple des frottements en régime établi.

### III.6. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique:

#### III.6.1 Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  : [20][25]

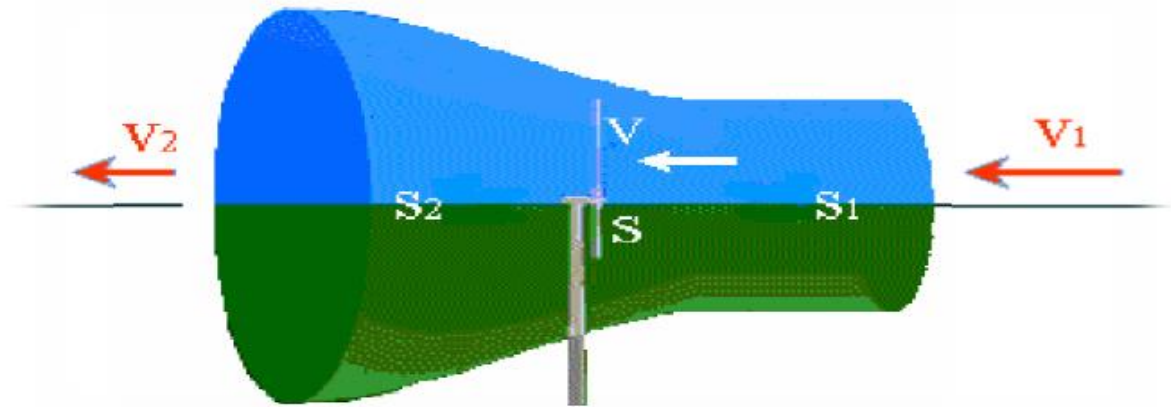


Figure III.16 Tube de courant d'air autour d'une éolienne

Dans la figure (III-16) on peut écrire le principe de l'incompressibilité de l'air et la continuité de l'écoulement :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{III.25})$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.26})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho \cdot S V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.27})$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse d'où:

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.28})$$

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S V \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

En déduit :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.29})$$

En remplaçant l'expression de dans les relations (III.26) et (III.27) on obtient :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.30})$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot (V_1 + V_2) \quad (III.31)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface sans diminution de vitesse soit à la vitesse, la puissance correspondante (mécanique théorique) serait alors:

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (III.32)$$

On définit le rapport entre les deux puissances  $C_p$  Puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible qui est appelé le coefficient de puissance : [28]

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (III.33)$$

Ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative. [24][28]

### III.6.2. modèle de la turbine d'éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. [22]

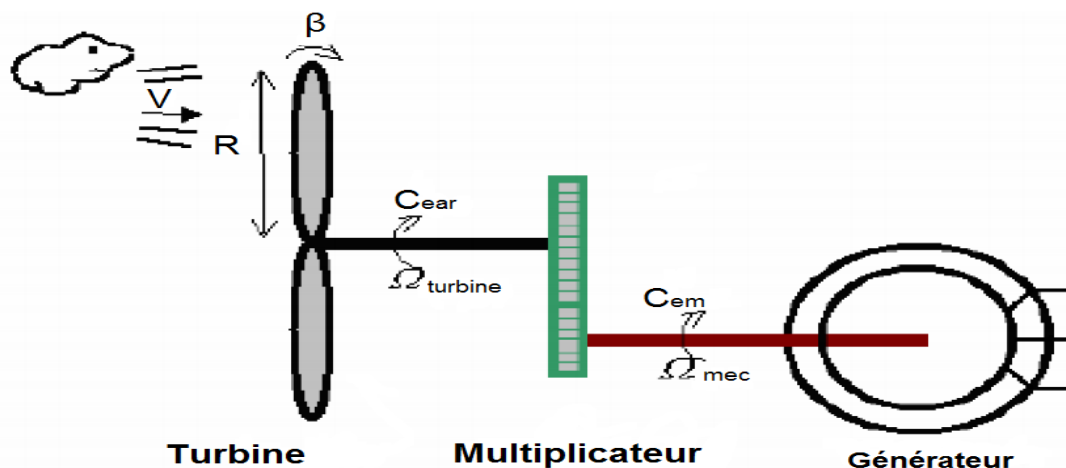


Figure III.17 Schéma d'une turbine éolienne. [27]

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. à partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, le  $C_p$  donnée par l'équation suivante: [23]

$$C_p = f(\lambda, B) = C_1 \left[ \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 * B - C_4 \right) * e^{(C_5/\lambda_i)} + C_6 * \lambda \right] \quad (III.34)$$

$$C_1 = 0.5176 \quad ; \quad C_2 = 116 \quad ; \quad C_3 = 0,4 \quad ; \quad C_4 = 5 \quad ; \quad C_5 = 21 \quad ; \quad C_6 = 0.0068.$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 * B} - \frac{0.035}{B^3 + 1} \quad (III.35)$$

Le ratio de la vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et le

vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t * R}{V} \quad (III.36)$$

Avec

$C_p$  : Le coefficient de performance ou coefficient de puissance.

$\lambda$  : Le ratio de la vitesse.

$B$  : L'angle de l'orientation de la pale.

$R$  : La longueur de la pale.

$\Omega_t$  : La vitesse de rotation de la turbine.

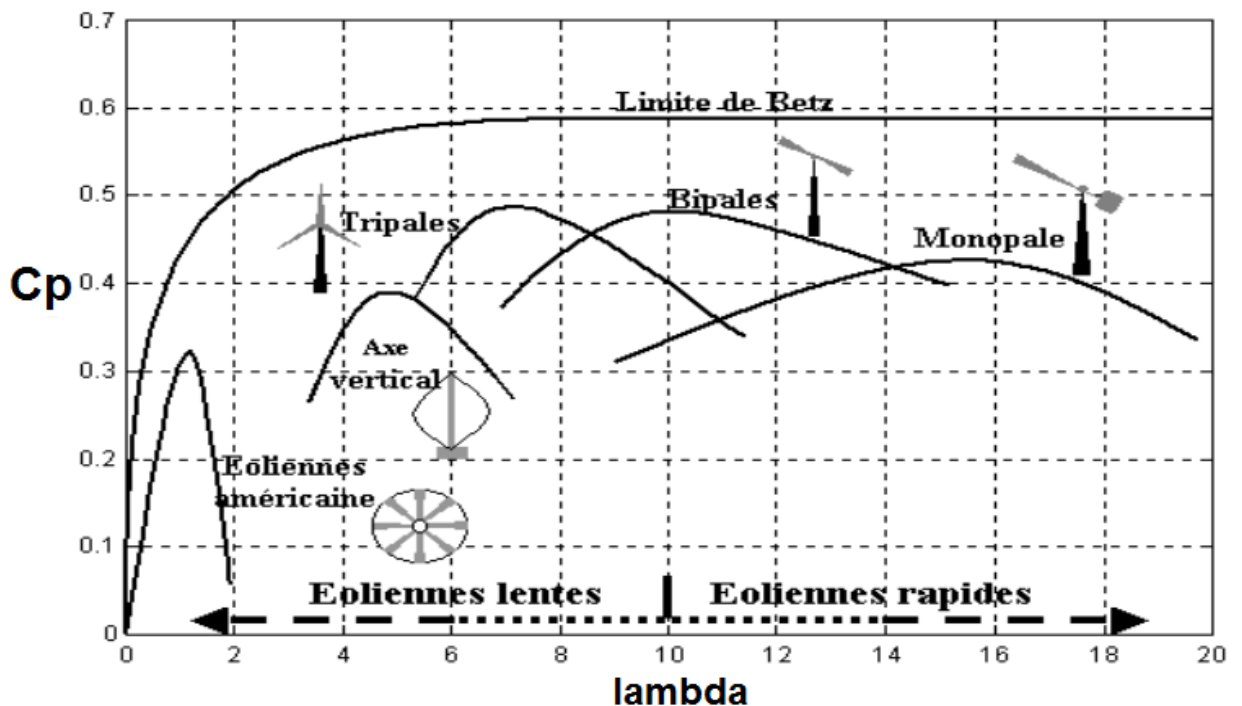
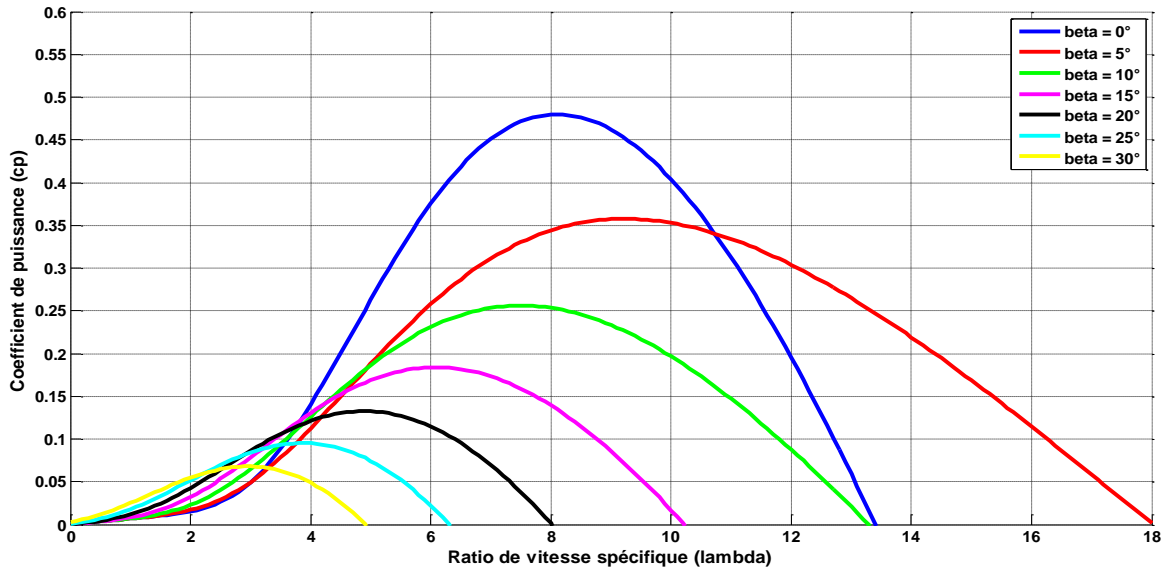


Figure III.18 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Ainsi comme il est illustré dans la figure (III-19), il est possible de constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ( $C_p = 0.48$ ) est atteint pour une valeur du rapport d'avance ( $\lambda = 8.2$ ) et de l'angle d'orientation des pales

( $\beta = 0$ ) Avec cette valeur la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement. [21]



**Figure III.19 Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour des angles d'attaque différents  $\beta$ .**

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme:

$$P_{aer} = C_p(\lambda, \beta) * \frac{\rho * S * V^3}{2} \quad (III.37)$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = C_p * \frac{\rho * S * V^3}{2} * \frac{1}{\Omega_t} \quad (III.38)$$

et

$$S = \pi * R^2 \quad (III.39)$$

avec

$C_{aer}$  : Le couple aérodynamique

$P_{aer}$  : La puissance aérodynamique

$\rho$  : la densité de l'air.

$v$  : la vitesse du vent.

$S$  : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

III.6.2.1. Modèle du multiplicateur d'éolienne

Le multiplicateur est modéliser mathématiquement comme suit :

$$C_{mec} = \frac{C_{aer}}{G} \tag{III.40}$$

Avec :

$C_{mec}$  : couple issu du multiplicateur ;

$C_{aer}$  : couple aérodynamique ;

$G$  : gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{III.41}$$

III.6.2.2. Modélisation de l'arbre de la turbine :

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f * \Omega_{mec} \tag{III.42}$$

$J$  : Inertie totale des parties tournantes

$f$  : Coefficient de frottements visqueux.

$C_T = C_{mec} + C_{em}$  : Couple total de l'éolienne.

$C_{em}$  = Couple électromagnétique du générateur en (N.m)

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté Générateur c'est-à-dire :

$$J = (J_{turbine}/G^2) + J_g \tag{III.43}$$

$J_g$  : l'inertie de la génératrice électrique.

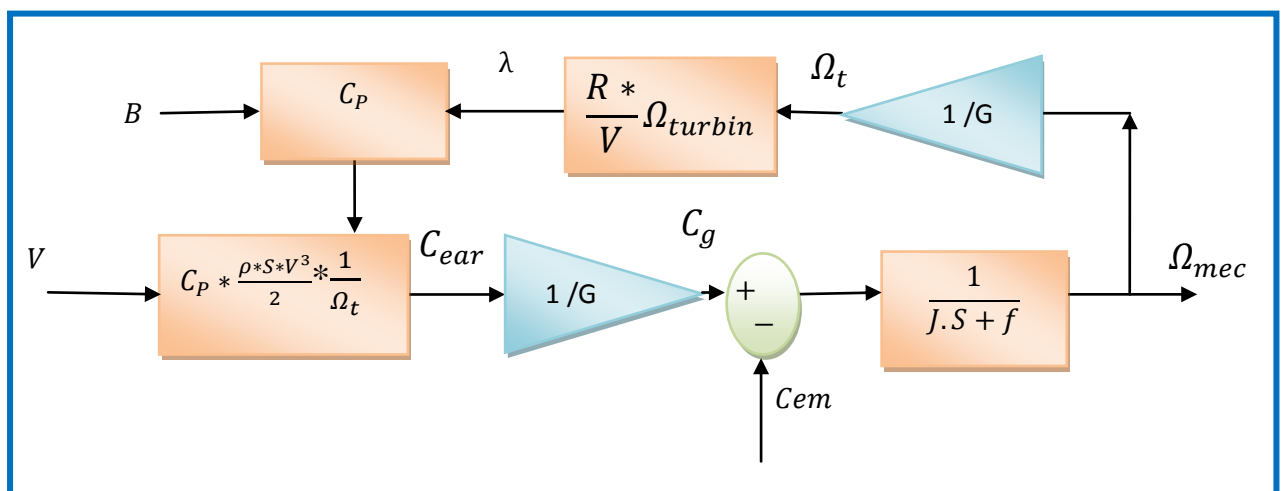


Figure III.20 Schéma bloc de la turbine

### III.7. Caractéristique de puissance

Les objectifs que nous venons de les citer permet de tracer la caractéristique que la turbine doit suivre pour répondre aux exigences de la commande. Cette caractéristique est représentée sur la figure ci-dessous.

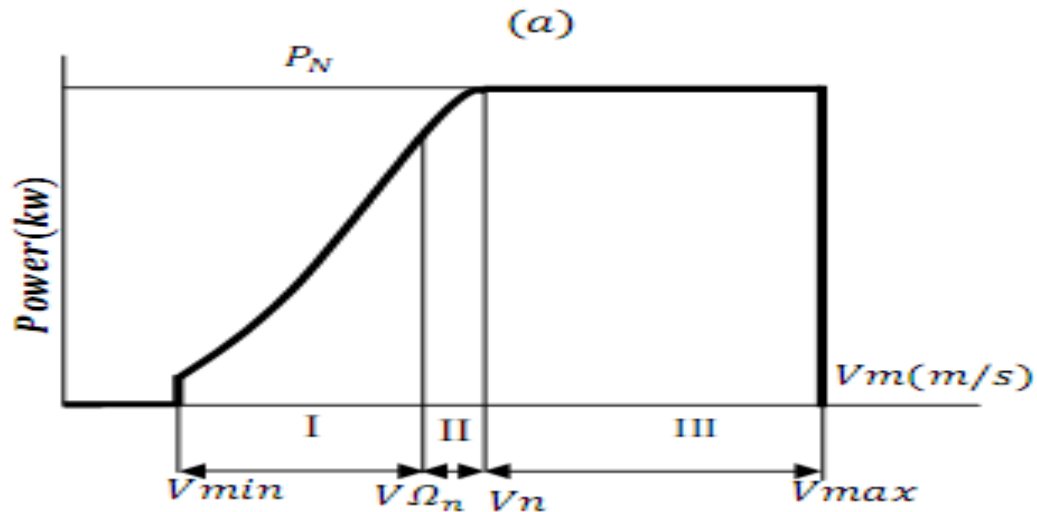


Figure III.21 Caractéristique puissance - vitesse d'une éolienne

**Zone I:** Correspond aux faibles vitesses du vent, la puissance disponible dans cette zone est inférieure à la puissance nominale de la turbine. L'objectif dans cette zone est d'extraire le maximum de puissance du vent en appliquant des techniques appelées techniques d'extraction de maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking).

**Zone II:** Zone de transition entre la zone de charge partiel (Zone I) et la zone de charge nominale (Zone II). Dans cette zone, la vitesse de rotation est maintenue constante pour des raisons mécaniques (contraintes des pales) et acoustiques (bruits générés).

**Zone III:** Correspond aux vents forts, l'objectif dans cette zone est de limiter la puissance produite à une valeur égale à la puissance nominale de l'éolienne pour éviter les surcharges. Cela se fait par action sur l'angle de calage des pales.

#### III.7.1. Commande en dessous de la puissance nominale (optimisation de la puissance)

Dans cette zone, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le système de contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda = \lambda_{opt}$ . Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale  $C_{pmax}$ .

La technique d'optimisation de la puissance utilisée dans cette zone de fonctionnement des éoliennes à vitesse variable est la technique de la MPPT.[24]

### III.7.2.PrincipedelaMPPT

La MPPT (Maximum PowerPoint Tracking) est une méthode de contrôle très fiable, Robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Pour agir sur la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ , on s'intéresse au sens de variation de la grandeur  $\frac{dP}{d\Omega_t}$ . Ce gradient vaut zéro lorsque l'on a atteint le maximum de la puissance, point que l'on recherche. On le déduit à partir l'équation :

$$\frac{dP}{d\Omega_t} = \frac{dP}{dt} \left( \frac{d\Omega_t}{dt} \right)^{-1} \quad (\text{III.44})$$

La recherche du maximum de puissance peut se faire par action sur le couple (commande indirect de la vitesse)

### III.7.3.Commande indirecte de vitesse

Cette technique a la particularité de considérer que l'éolienne est en régime permanent. Quoique simples d'utilisation, elles présentent quelques inconvénients. Il est naturel de Considérer qu'un système éolien est stable autour d'un point d'équilibre quelconque de la courbe de rendement maximal pour un couple du générateur et une vitesse du vent constants. La courbe de rendement aérodynamique maximal est définie dans le plan  $(\Omega_T, C_T)$  par l'ensemble des points  $E(\Omega_{T_{opt}}, C_{T_{opt}})$  correspondant à l'intervalle des vitesses du vent dans la quelle l'éolienne fonctionne (Figure III.22) suivant:[24]

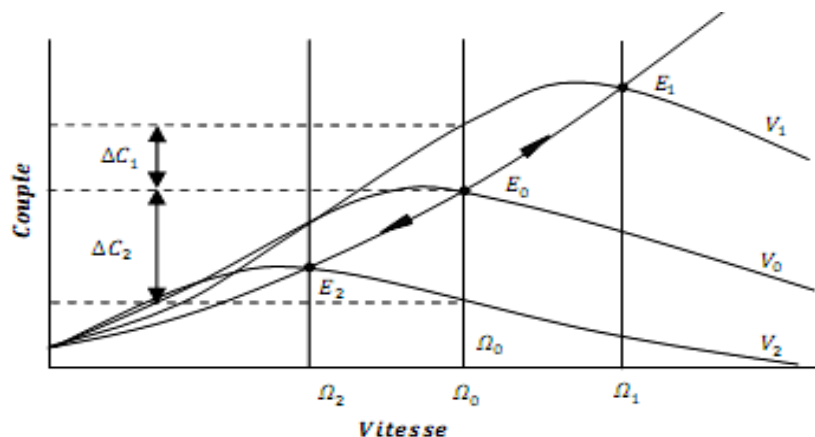
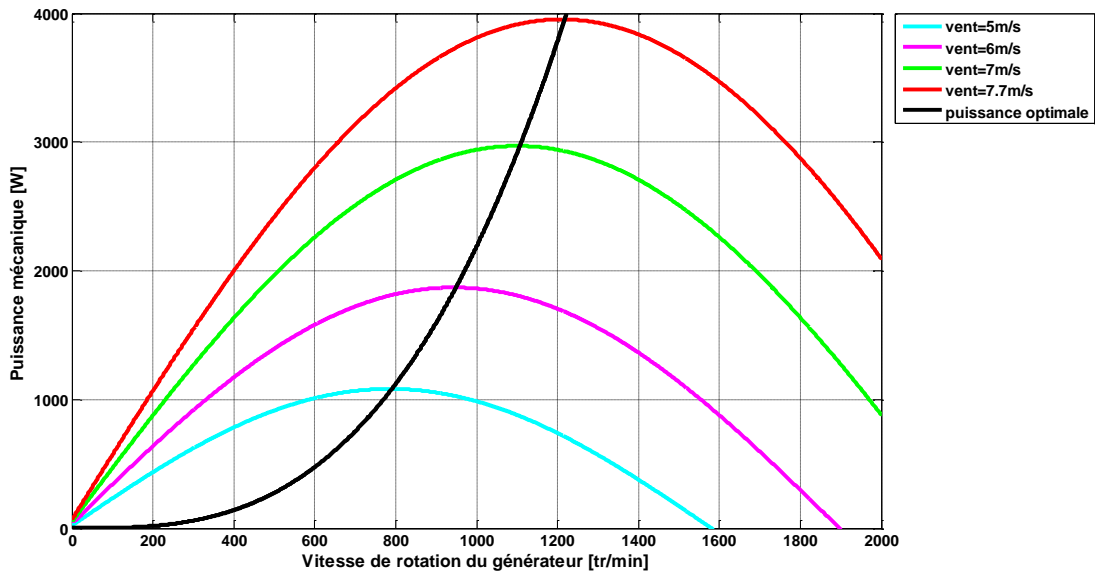


Figure III.22 caractéristique couple-vitesse pour différentes vitesses de vent.[20]

Le résultat de simulation montrant le principe de MPPT est présenté sur la figure (III.23) :



**Figure III.23 Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différents vitesses du vent.**

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2} * \rho * \pi * R_T^3 * V^2 * \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (III.45)$$

$C_{T_{opt}}$  : Le couple optimale.

$\lambda_{opt}$  : La vitesse spécifique optimale.

Cette équation est écrite sur l'arbre lent de l'éolienne, pour la ramener sur l'arbre rapide (l'arbre du générateur) il suffit de la diviser par le rapport du réducteur de vitesse G.

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2G} * \rho * \pi * R_T^3 * V^2 * \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}} \quad (III.46)$$

Une estimation de la vitesse du vent est souvent utilisée pour contourner ce problème. Connaissant la vitesse de rotation de la turbine, la vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit.

$$V = \frac{\Omega_t * R}{\lambda_{opt}} \quad (III.47)$$

$$C_{T_{opt}} = \frac{1}{2G} * \rho * \pi * R_T^5 * \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} * \Omega_T^2 \quad (III.48)$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor au point de fonctionnement.

$$C_{T_{opt}} = k_{T_{opt}} * \Omega_T^2 \quad (III.49)$$

Tel que :

$$k_{opt} = \frac{1}{2G} * \rho * \pi * R_T^5 * \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \quad (III.50)$$

En régime permanente, l'équation mécanique s'écrit sous la forme.

$$\frac{C_T}{G} - C_g - f\Omega_g = 0 \quad (III.51)$$

En remplaçant par son expression, on trouve

$$\frac{k_{opt}}{G} * \Omega_T^2 - C_g - f\Omega_g = 0 \quad (III.52)$$

Avec :

$$\Omega_g = G * \Omega_T \quad (III.53)$$

D'où

$$C_{gopt} = \frac{k_{Topt}}{G^3} * \Omega_T^2 - f\Omega_g \quad (III.54)$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimale de l'éolienne. Le schéma block de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous

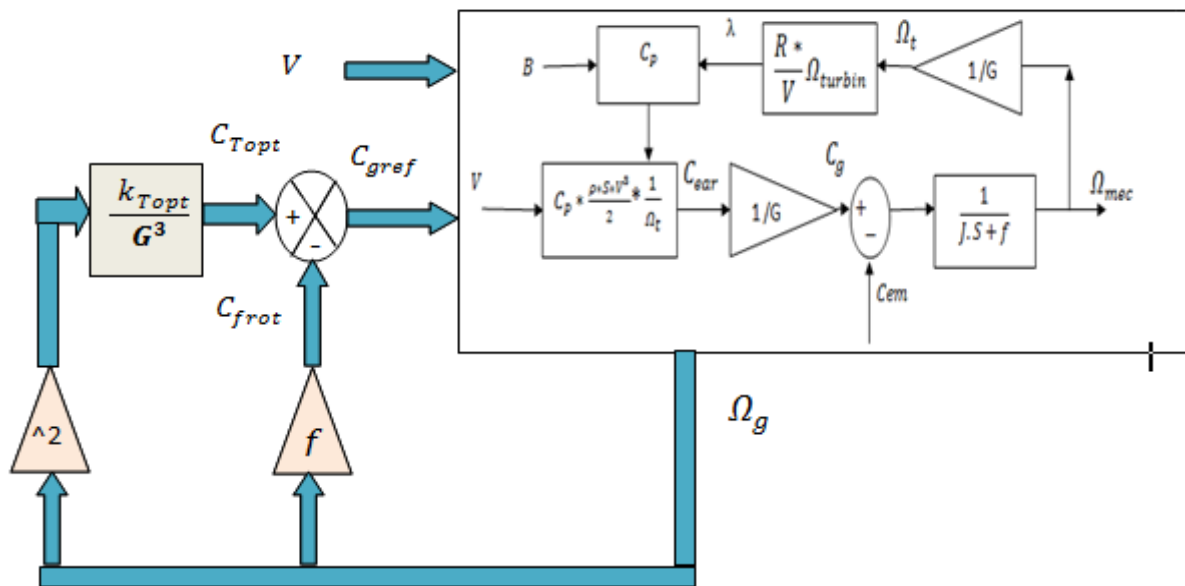


Figure III.24 Commande indirect de vitesse.

III.7.4. Le schéma globale de l'association GADA turbine :

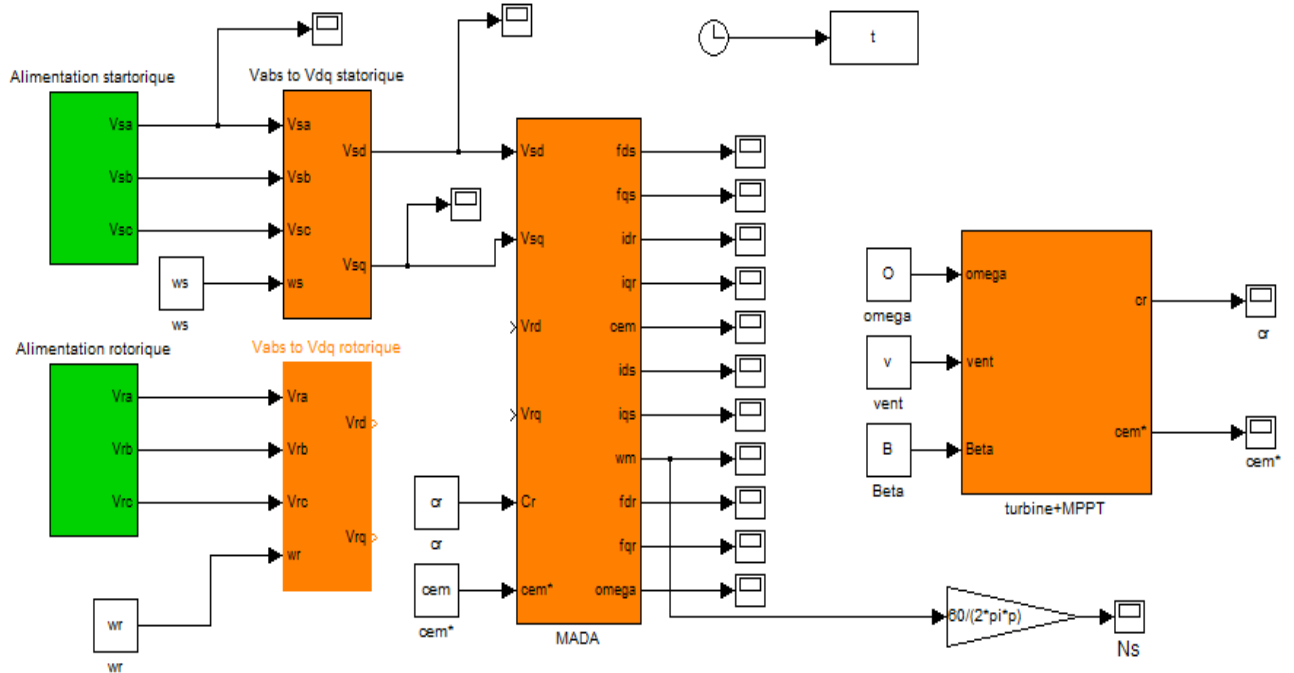


Figure III.25 schéma globale de l'association GADA turbine et MPPT.

III.7.5. Résultats de simulation (en dessous de la puissance nominale)

( les paramètres de simulation représenté sur l'annexe )

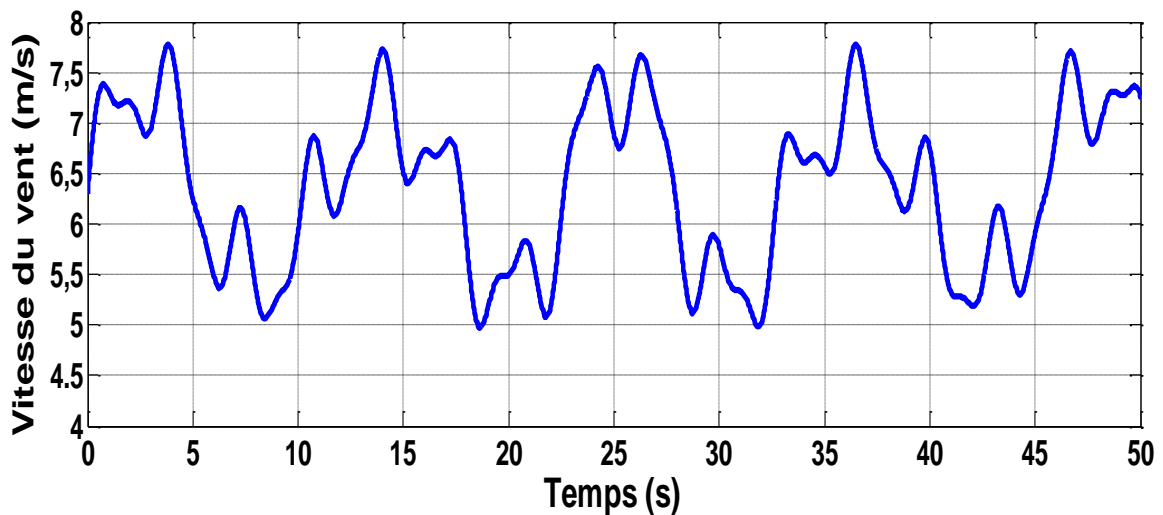


Figure III.26 La courbe représenté le profil de vitesse du vent

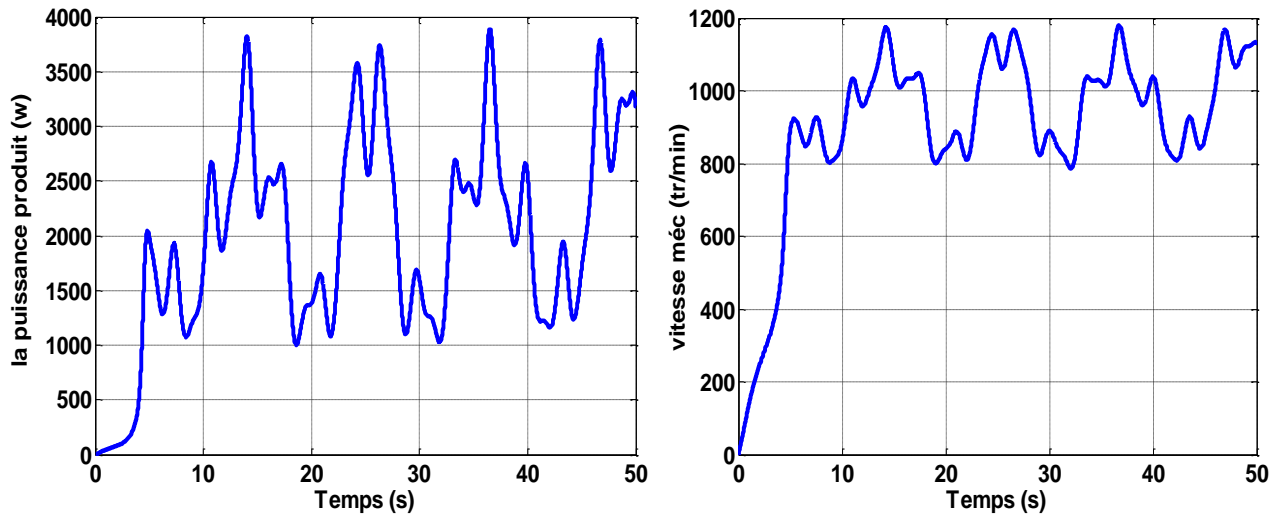


Figure III.27 La courbe représenté la vitesse mécanique et la puissance produit

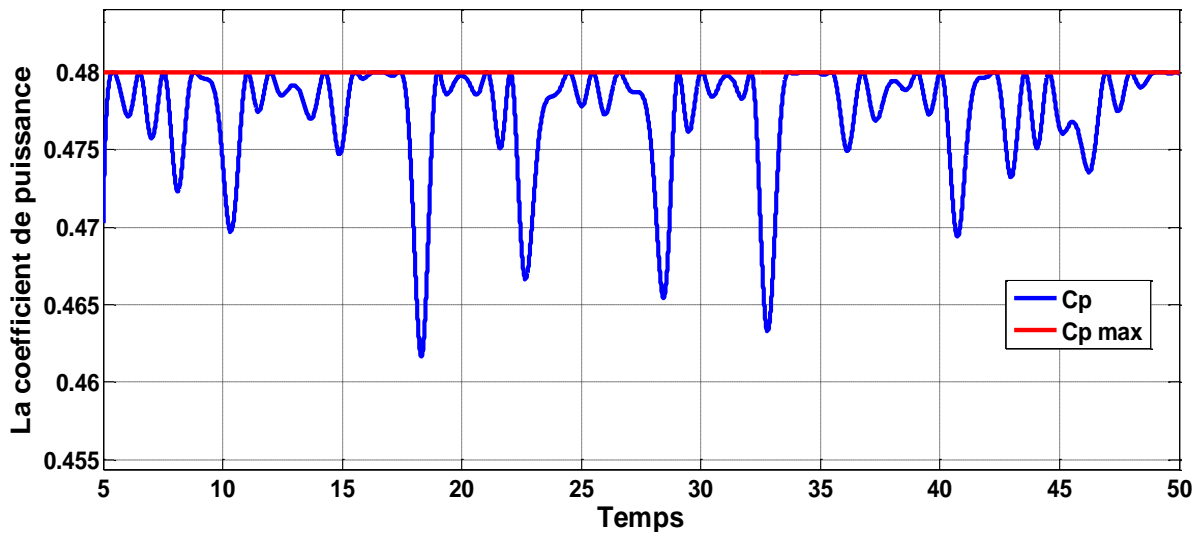


Figure III.28 La courbe représenté le coefficient de puissance  $C_p$ .

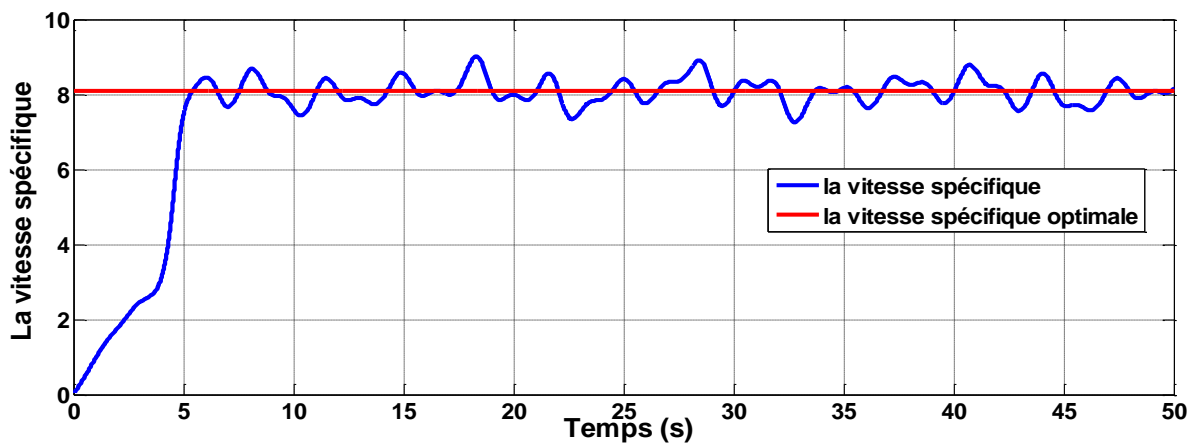


Figure III.29 La courbe représenté la vitesse spécifique  $\lambda$ .

### III.7.6. Interprétations des résultats

La simulation nous a permis de vérifier la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent. La figure (III-26) présente le profile du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur faibles est autour de (7.5m/s). Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, et cette dernière, est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonctionne de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

### III.8. Contrôle de puissance active et réactive par la GADA

Dans le contrôle vectoriel direct, l'idéede cette technique consiste à contrôler indépendamment et directement les puissances  $P_s$  et  $Q_s$  de la GADA, après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la GADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire des puissances active et réactive de références. [20][24]

L'expression (IV.11) représenté le contrôle des puissances active et réactive au stator :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (III.55)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système sont :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.56)$$

#### III.8.1. Command Direct :

Si l'on observe les équations (IV.55), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme  $\frac{V_s M}{L_s}$  De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (III.56) disparaissent en régime permanent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.57)$$

En revanche, le terme  $g \frac{M \cdot V_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient

un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe (Figure IV.2).[28][20][24]

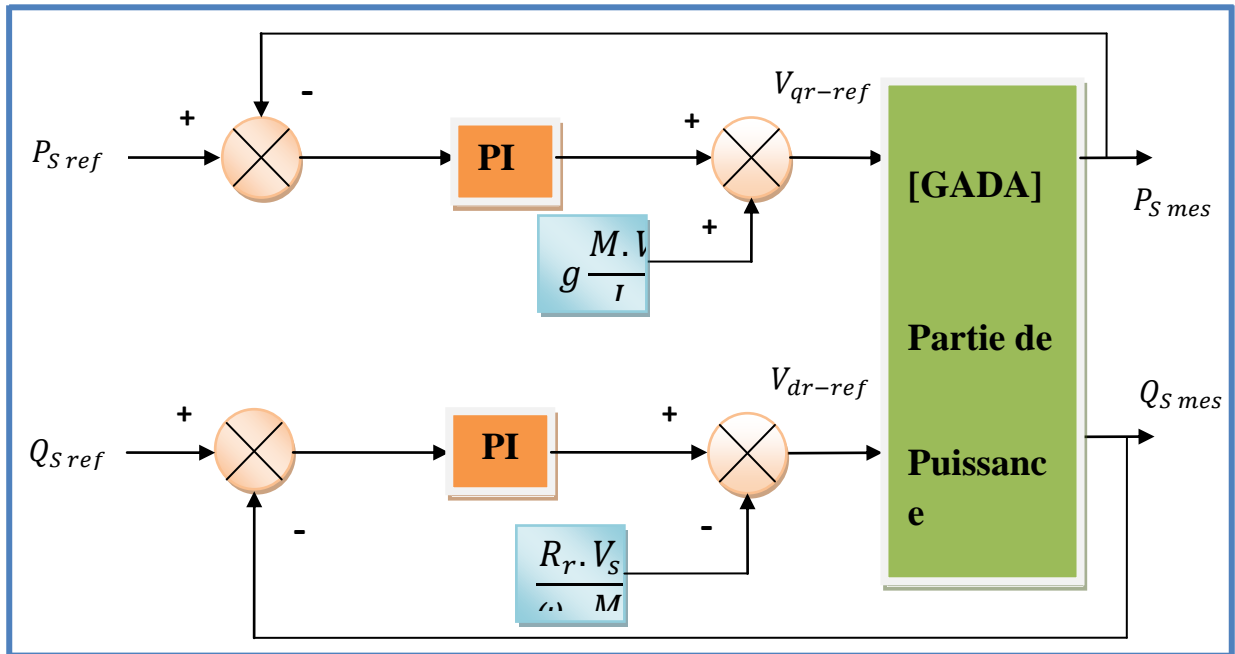


Figure III.30 Schéma de commande vectorielle direct.

### III.8.2. Résultats de la simulation

La simulation de la commande directe de la GADA à 4 KW sont résumés dans la figure (III.31) et (III.32) et qui montrent bien la convergence des variables mesurées ( $P_{Smes}, Q_{Smes}$ ) vers les variables références ( $P_{Sref}, Q_{Sref}$ ).

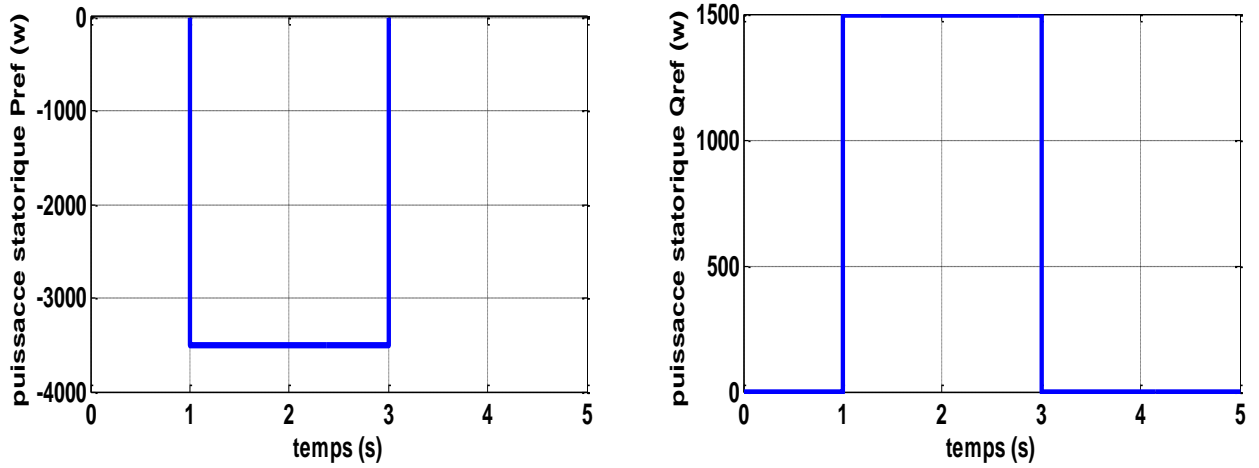


Figure III.31 La puissance de référence (P active ; Q réactive)

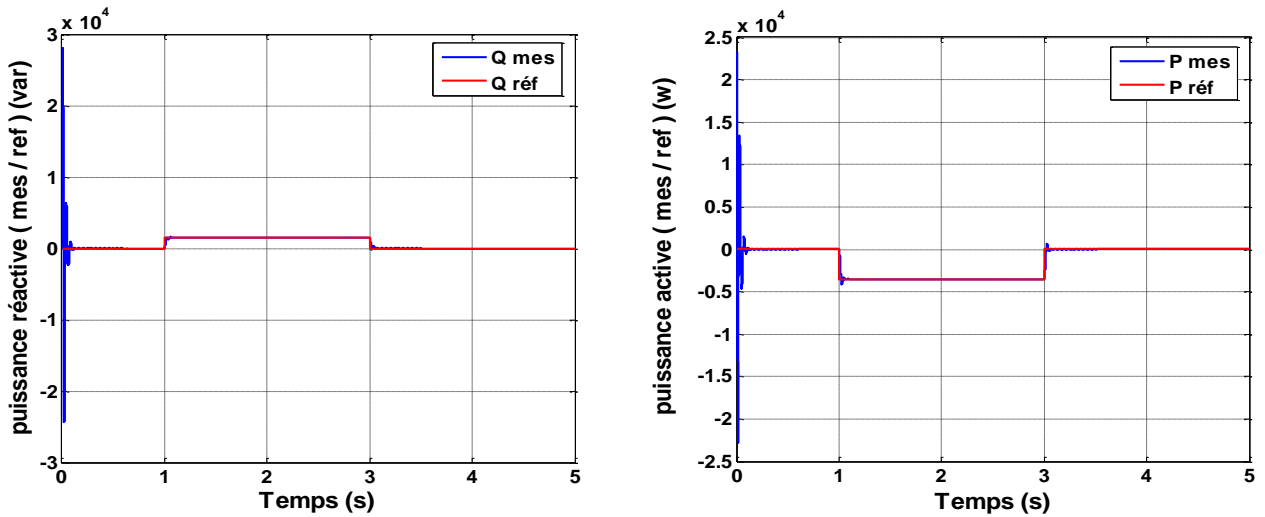


Figure III.32 Les puissance mesurées et référence (P active ; Q réactive)

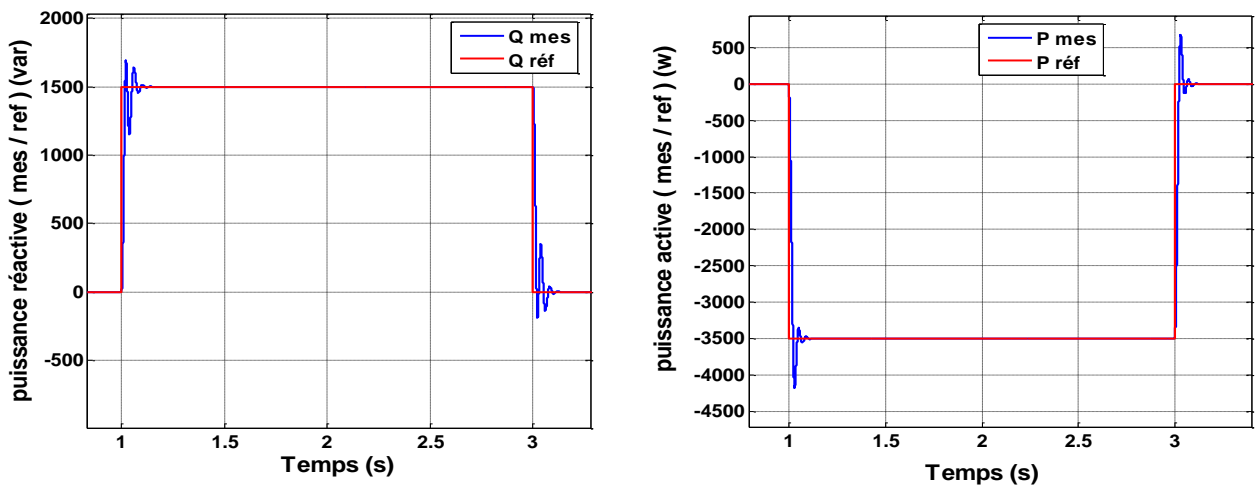


Figure III.33 Les puissances mesurées et référence avec zoom (P active ; Q réactive)

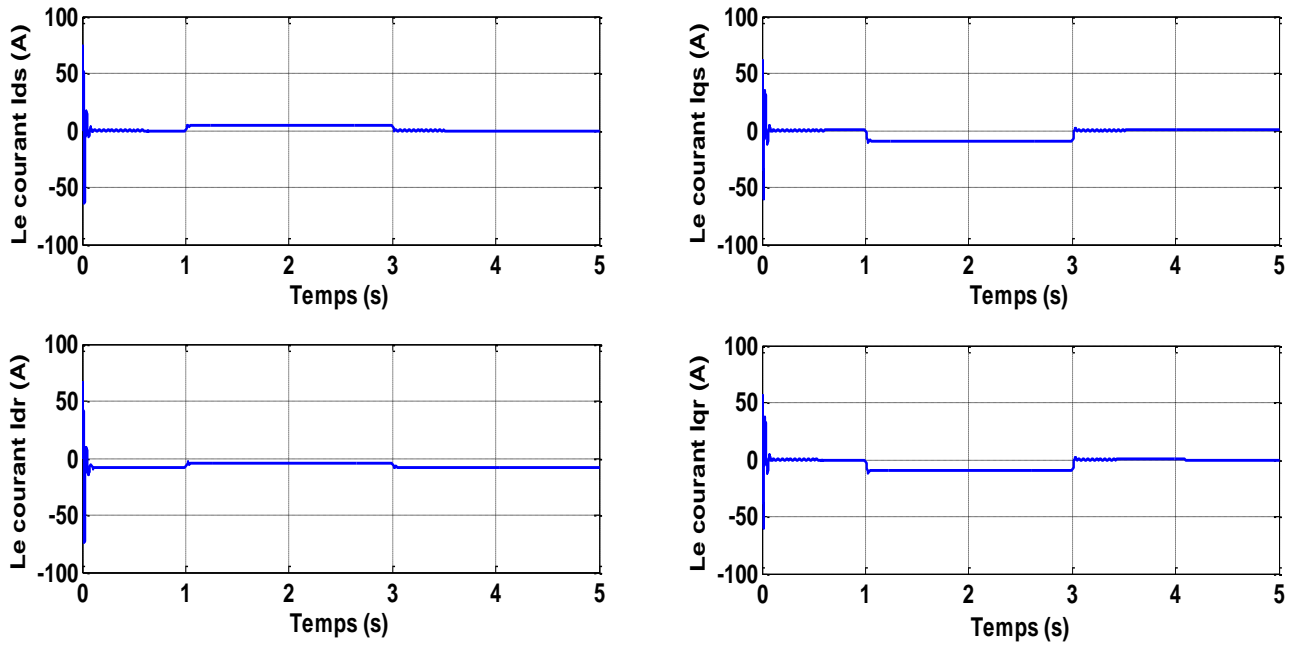


Figure III.34 Lescomposantesducourantstatoriquesetrotorique

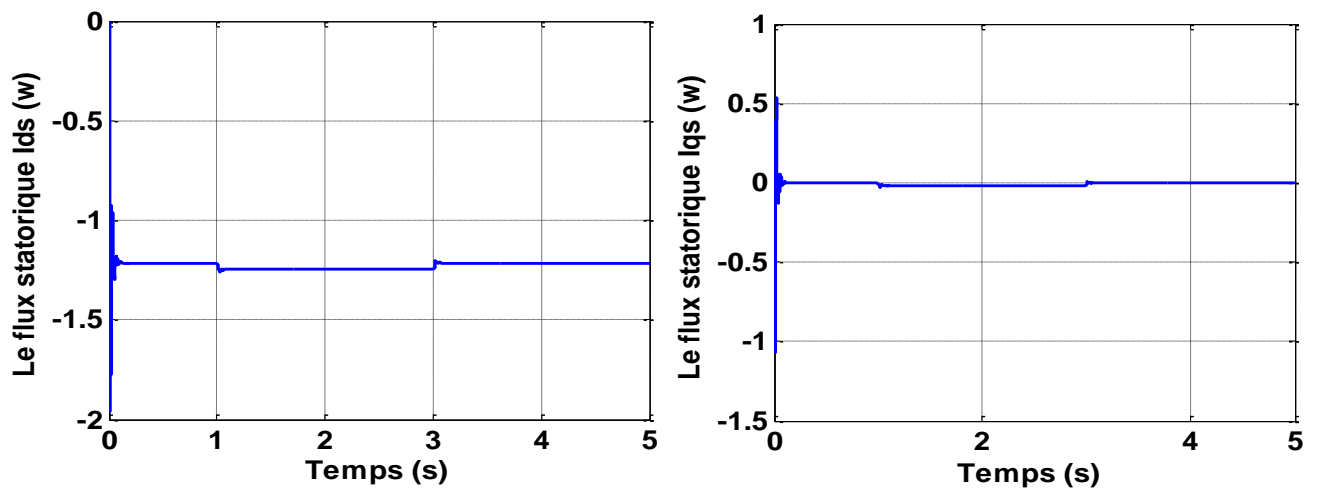


Figure III.35 Lescomposantesdufluxstatorique

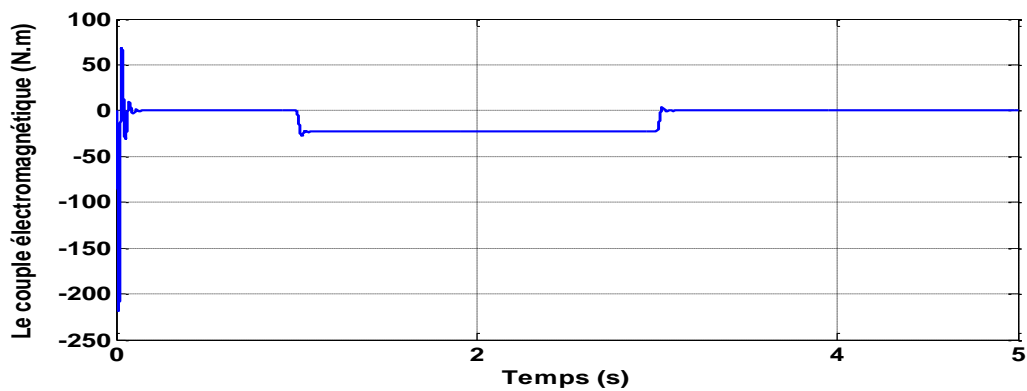


Figure III.36le couple électromagnétique.



Ce réseau de test contient:

- 6 générateurs.
- 30 jeux de barres.
- 20 charges statiques.

Injectée par les fermes éoliennes de :

- Éoliennes de puissance  $P = 0.06$  pu et  $Q = 0.1$  pu .
- Intégrée au jeux de barres N° 27.

### III.9.2.Simulation:

Les résultats de simulation effectués sous programme sont présentés dans le tableau suivant :

Le nombre d'itération = 191

Nœud de Jeu de barres	Les tensions sans l'intégration	Les tensions avec l'intégration	Nœud de Jeu de barres	Les tensions sans l'intégration	Les tensions avec l'intégration
1	1.0600	1.0600	16	1.0180	1.0279
2	1.0430	1.0430	17	1.0146	1.0254
3	1.0268	1.0316	18	1.0021	1.0128
4	1.0192	1.0192	19	0.9999	1.0109
5	1.0100	1.0100	20	1.0044	1.0154
6	1.0143	1.0218	21	1.0049	1.0170
7	1.0048	1.0092	22	1.0113	1.0255
8	1.0085	1.0167	23	1.0044	1.0168
9	1.0337	1.0436	24	0.9982	1.0165
10	1.0209	1.0321	25	0.9920	1.0245
11	1.0800	1.0894	26	0.9738	1.0069
12	1.0286	1.0375	27	0.9969	1.0379
13	1.0603	1.0690	28	1.0126	1.0241
14	1.0145	1.0241	<b>29</b>	<b>0.9765</b>	<b>1.0183</b>
15	1.0111	1.0215	<b>30</b>	<b>0.9647</b>	<b>1.0070</b>

**Tableau III.1 Simulation d'une l'intégration de puissance éolienne connectée au réseau de 6 générateurs 30 jeux de barres**

#### Interprétation des résultats obtenus :

On remarque après l'intégration l'énergie éolienne au niveau des jeux de barres de réseau électrique, La tension au niveau de jeux de barres (28 et 29) augmente à (1.0183 pu et 1.0070 pu). ce qui montre l'efficacité de l'éolienne pour l'amélioration de la tension.

### III.10. Conclusion:

Dans cette chapitre, on a présenté un état de l'art de éolien, et on a rappelé la structure de la GADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère (d,q), pour contourner cette difficulté, on a fait appel à la transformation de Park Le modèle dynamique de la machine écrit dans le repère de Park puis traduit sous forme d'équations d'état, a été simulé. Les résultats de simulation sont satisfaisants.

Aussi on a présenté le contrôle de puissance active et réactive dans la GADA par la commande vectorielle directe et l'intégration de puissance éolienne pour améliorer la tension de réseau électrique de 30 jeux de barres.

## Chapitre IV

# Les systèmes de transmission à courant alternatif flexibles FACTS

### IV.1. Introduction

La compagnie américaine EPRI (Electric power research institute) a lancé en 1988 un projet d'étude d'une nouvelle génération de dispositif de contrôle rangés sous l'appellation FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) qui met des nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande, et le contrôle du transport d'énergie électrique en courant alternatif afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques [9].

Les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes. et pour augmentent les marges de manœuvre des réseaux en exploitant les possibilités offertes par l'électronique de puissance en particulier les nouveaux composants contrôlables (GTO, IGBT...).[15][1]

Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Réduire des pertes actives totales.
- Compenser l'énergie réactive.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active. [7][18]

### IV.2. Classification des dispositifs FACTS

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

1. La première génération est basée sur les thyristors classiques, ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
2. La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteur de puissance commandables a la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO (GateTurn-

Off). Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

3. Une troisième génération de FACTS utilisant des compensateurs hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau [12].

### IV.3. Les différents types des systèmes FACTS

Les systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui 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 beaucoup plus que celle des systèmes électromécaniques classiques, l'intérêt de ces systèmes et non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant voir en améliorant la stabilité des réseaux électriques [1],[7].

Les systèmes "FACTS" peuvent être classés en trois catégories.

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

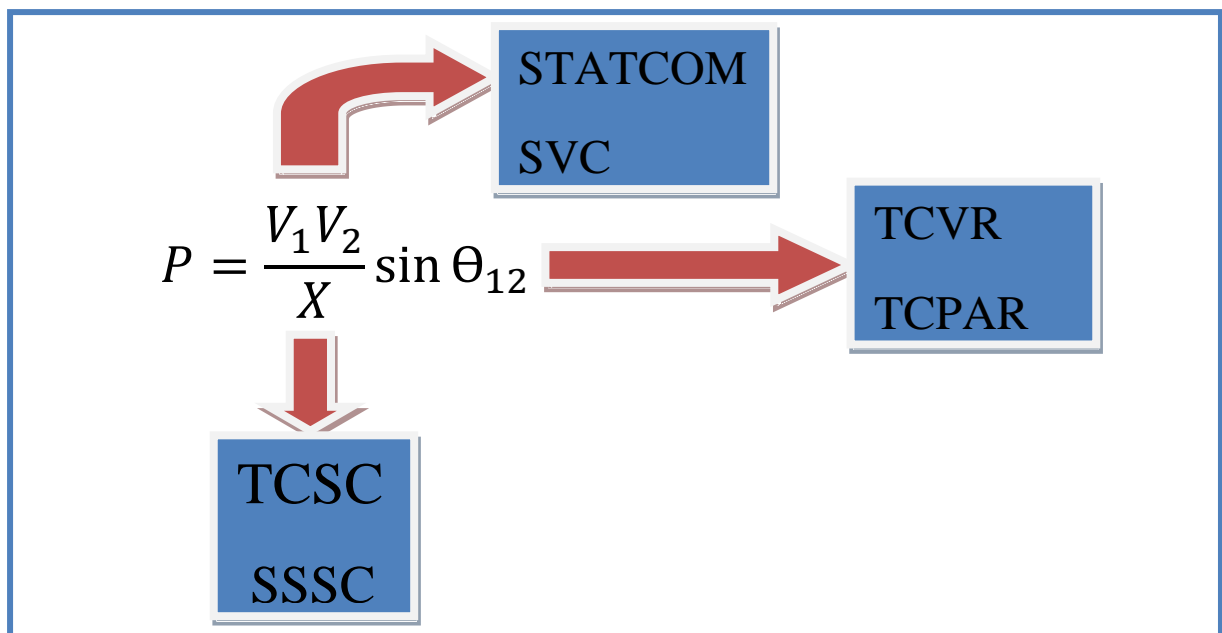


Figure IV.1 Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.

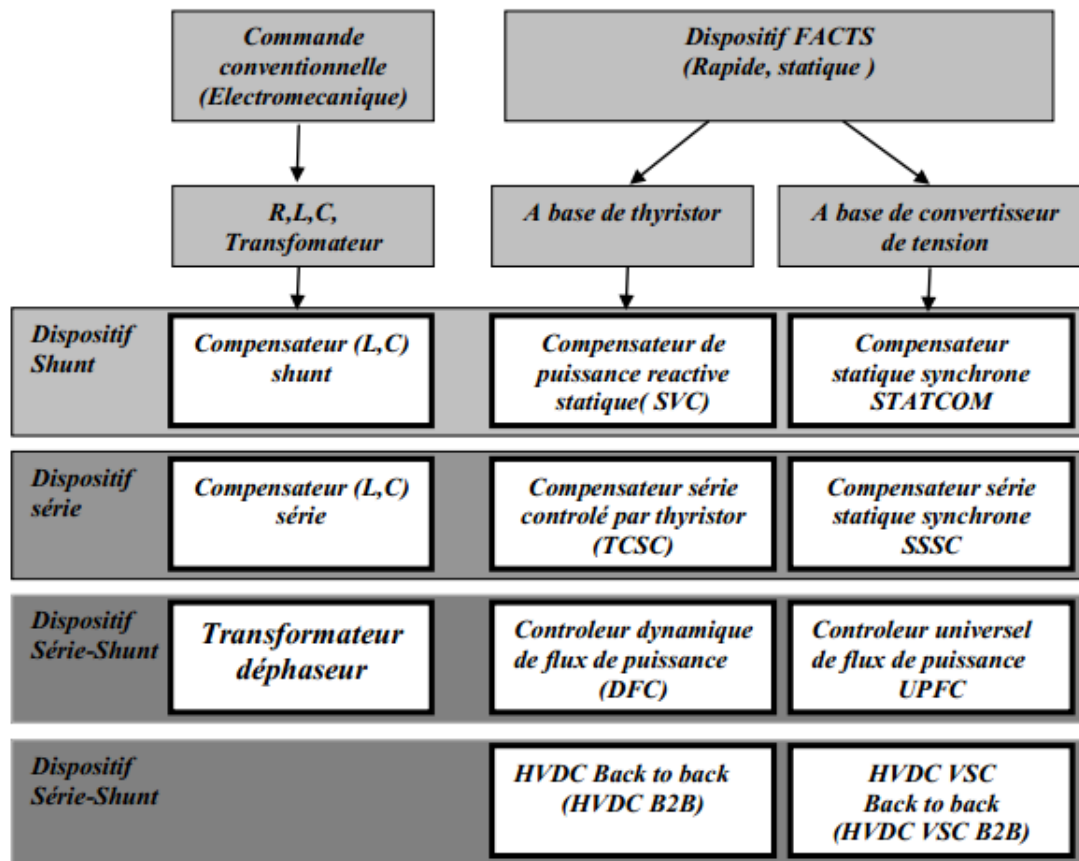


Tableau IV.1 Principaux Dispositifs FACTS .

### IV.3.1. Compensateurs parallèles

Selon la demande des consommateurs, les lignes électriques doivent transporter des puissances actives et aussi des puissances réactives.

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait d'ajuster l'énergie réactive absorbée par le dispositif.[10]

Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d'interconnexion. L'avantage de ces dispositifs permet d'éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction assez lente, et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur, le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont : [10][7]

#### IV.3.1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors

##### • Réactance réglable (Thyristor - Controlled Reactor) TCR / TSR (Thyristor Switched Reactor)

L'inductance commandée par thyristors TCR possède une bobine d'inductance fixe, branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle. Les thyristors sont enclenchés avec un certain angle d'allumage  $\alpha$  et conduisent alternativement sur une demi-période, le courant à fréquence fondamentale et réglé la commande de phase de la valve à thyristors (figure VI.2).

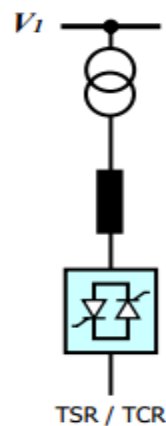


Figure IV.2 Schéma du TCR

##### • Système TSC

Le schéma du TSC consiste à introduire les condensateurs comme des sources de puissance réactive. Chaque source monophasée est formée d'un condensateur (C) en série avec deux interrupteurs statiques bidirectionnels (figure IV.3).

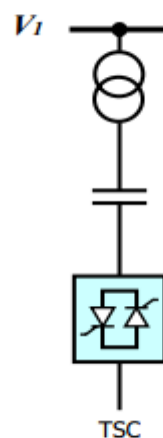


Figure IV.3 Schéma du TSC.

**•SVC (Static Var Compensator)**

Un compensateur statique d'énergie réactive, (en anglais SVC, Static VAR Compensator), est un dispositif de l'électronique de puissance destiné à compenser la circulation de la puissance réactive sur les réseaux électriques. Il fait partie du groupe des dispositifs FACTS shunts [2].

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est le premier dispositif FACTS qui apparaît dans les années 1970 pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles les laminoirs et les fours à arc. Les SVC sont des FACTS de première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage. [13]

Le SVC est une association des dispositifs TCR, TSC, banc de capacités fixes et des filtres d'harmoniques. Ces dispositifs constituent le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) [2]. Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge.[2][10]

**•Domaine d'application**

Les compensateurs statiques d'énergie réactive SVC permettent de remplir plusieurs fonctions dans un réseau électrique :

**•Contrôle de la tension**

La principale application des SVC est le réglage de la tension dans les réseaux électriques par la compensation des chutes de tension. Le principe consiste à fournir ou absorber de la puissance réactive de façon à modifier les caractéristiques naturelles des lignes pour les rendre plus compatibles avec la charge ; C'est-à-dire, ils ont pour fonction de réduire la tension des réseaux peu chargés en absorbant de la puissance réactive, d'augmenter la tension des réseaux fortement chargés en fournissant la puissance réactive .En autre , ils sont souvent utilisés pour régler la tension en un nœud présentant de fortes variations de charge [2][8].

**•Structure des SVC**

Il existe plusieurs configurations de SVC toutefois, la plupart d'entre eux sont construits à partir des mêmes éléments de bases permettant de fournir ou d'absorber de la puissance réactive. Le rôle du SVC est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, Le SVC est couplé au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur de couplage.

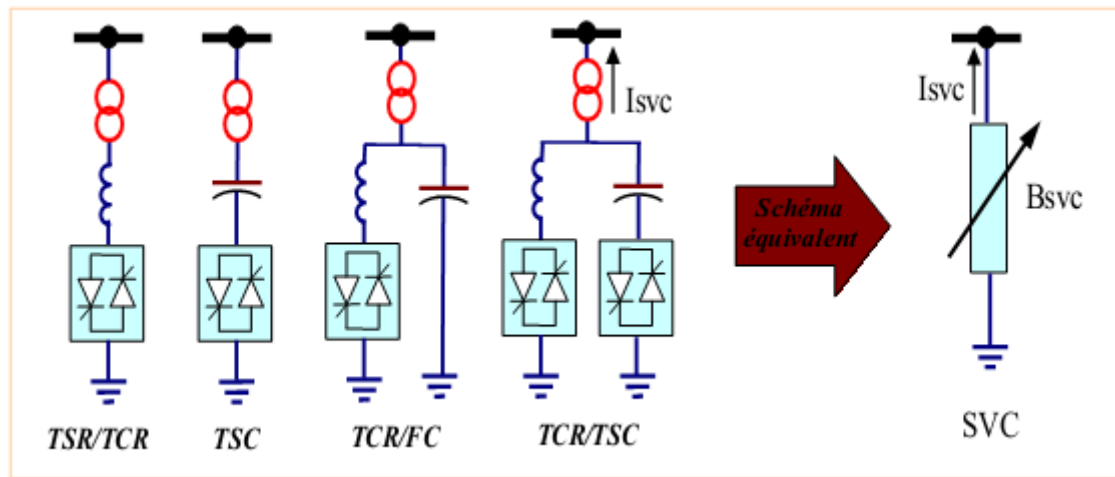


Figure IV.4 structure d'un SVC, schéma équivalent.[13]

#### •TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Le TCBR est composé d'une résistance en série avec une valve à thyristor bidirectionnelle. Ce type de compensateur connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [14].

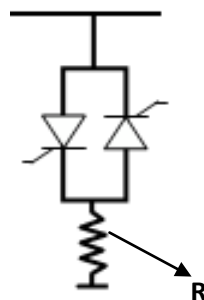


Figure IV.5 Schéma du TCBR

#### IV.3.1.2. Compensateurs parallèles à base de thyristors GTO

Le STATCOM (STATICSynchronousCOMPensator) fut le premier FACTS utilisant le VSC (onduleur à source de tension) à être introduit dans les réseaux électriques [2].

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance [10].

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

**1. bonne réponse à faible tension** : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.

**2. bonne réponse dynamique** : Le système répond instantanément.

La figure (IV.6) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [2][10].

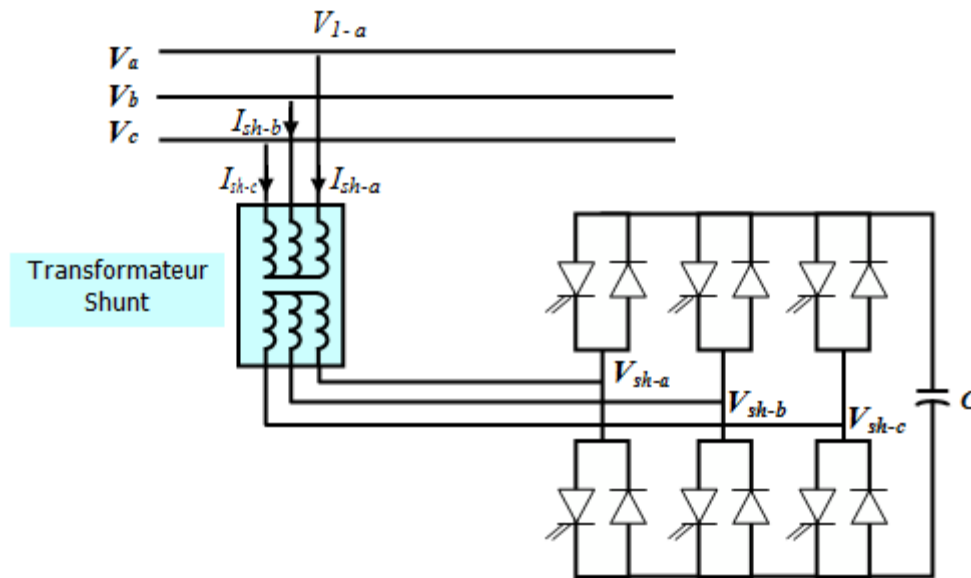


Figure IV.6 Schéma de base d'un STATCOM

### IV.3.2. Compensateurs série

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.

#### IV.3.2.1. Compensateurs série à base de thyristors

##### •TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur. [16] [10]

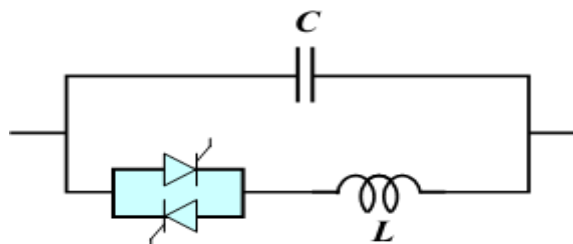


Figure IV.7 Structure d'un TCSC [2].

- TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de  $90^\circ$  soit de  $180^\circ$  [16].

- TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable.

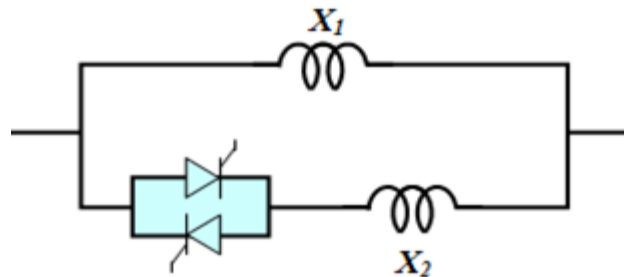


Figure IV.8 Structure d'un TCSR

- TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage peut être soit de  $90$  degrés soit de  $180$  degrés. [2] [10]

#### IV.3.2.2. Compensateurs série à base de thyristors GTO

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

- SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

C'est un convertisseur à source tension placé en série avec la ligne de transport d'énergie électrique à travers un transformateur, ce type de compensateur est le dispositif plus important de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne [2]. La figure (IV.9) montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport.

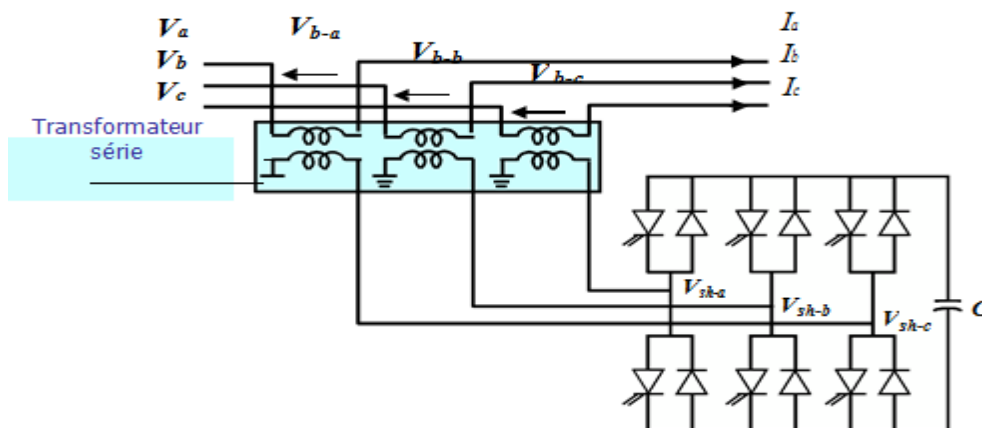


Figure IV.9 Schéma de base du SSSC

### IV.3.3. Compensateurs hybrides (série – parallèle)

#### IV.3.3.1. Compensateurs hybrides à base de thyristors

##### •TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs ou régulateurs en charge (LTC; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, seule une étude est actuellement menée afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nord-ouest du Minnesota et du nord de l'Ontario. [16] [10]

#### IV.3.3.2. Compensateurs hybrides à base de thyristors GTO

##### •IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC. Il peut être utilisé afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau. [8][10]

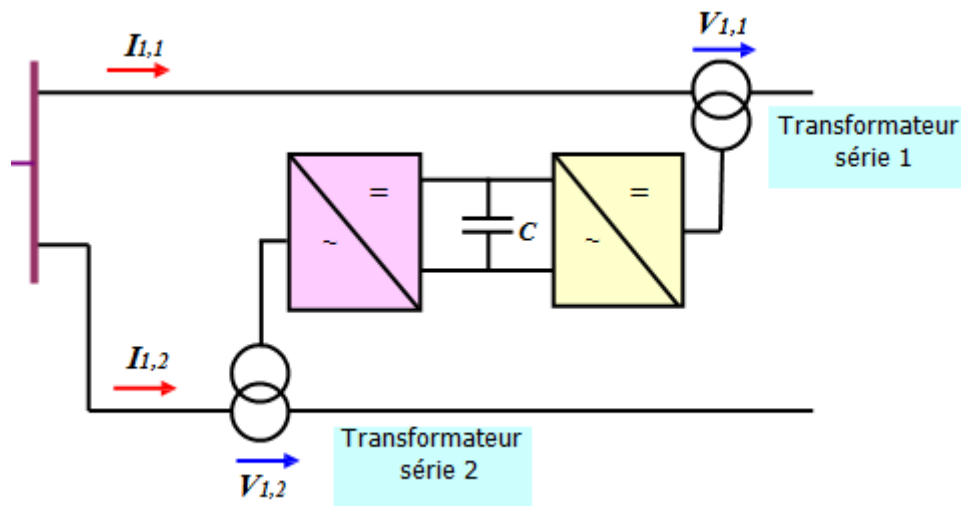


Figure IV.10 Schéma de base d'un IPFC

##### •UPFC (UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER)

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Unified Power Flow Controller) est constitué de deux convertisseurs connectés à la même ligne de transmission à travers

deux transformateurs de couplage: l'un connecté en dérivation et l'autre en série. Le premier convertisseur redresse une puissance soutirée par une dérivation sur la ligne de transport. Cette puissance est transportée par une liaison DC au deuxième convertisseur pour la reconvertir en alternative et la réinjecter au réseau avec une amplitude et un déphasage bien appropriés [14].

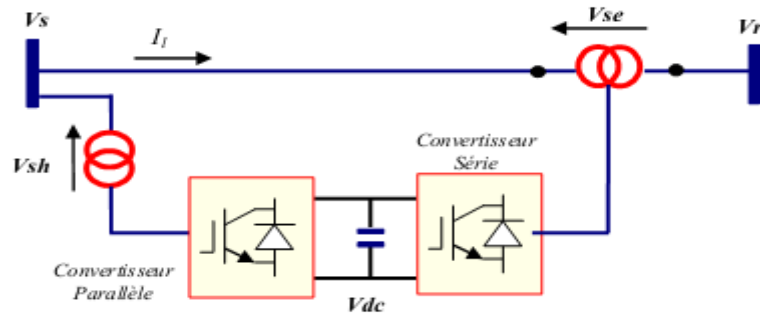


Figure IV.11 Schéma de base d'un UPFC [1].

L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne, il est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

#### IV.4. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilitétransitoire, amortissement des oscillations ...).
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique. [8]

## **IV.5. Amélioration des performances des réseaux électriques par les dispositifs FACTS**

Dans cette partie nous exposons l'amélioration des performances des réseaux électriques par le système FACTS, pour ce la nous avons utilisé deux dispositifs sont présentées:

- Contrôle de transit par SVC.
- Contrôle de transit par TCSC.

### **IV.5.1. Introduction**

Comme déjà mentionné précédemment, notre travail consiste à optimiser la marge de la stabilité statique de tension ainsi que la réduction des pertes actives.

De ce fait, il faut choisir, parmi les équipements FACTS, ceux qui ont des applications spécifiques tel le maintien de la tension et le contrôle de l'écoulement de puissance : le SVC étant le plus efficace dans la compensation de l'énergie réactive ainsi que le maintien de la tension et le TCSC est le meilleur choix pour un contrôle approprié du transit de puissance et par suite la réduction des pertes actives dans le réseau.

de ce fait, nous avons opté, dans la suite de notre travail, pour L'utilisation combinée du SVC et du TCSC en vue d'assurer de meilleures performances dynamiques du système avec plus de rentabilité et d'efficacité.

### **IV.5.2. La variation de la tension et la puissance sur les réseaux de transport d'énergie électriques**

La régulation de la tension et la puissance maximale qu'une ligne peut transporter sont deux de ses plus importantes caractéristiques. En effet, la tension d'une ligne doit demeurer assez constante à mesure que la puissance active consommée par la charge varie. Ordinairement, la variation de la tension de zéro à pleine charge ne doit pas dépasser 5 % de la tension nominale, bien qu'on puisse tolérer parfois une régulation allant jusqu'à 10 % .Afin de connaître la variation de la tension et établir la puissance maximale transportable par une ligne, nous étudierons successivement le comportement de trois type de lignes : [30]

1. une ligne résistive
2. une ligne inductive
3. une ligne inductive relie à deux grands réseaux

## IV.5.2.1. Une ligne résistive

Une ligne possédant une résistance  $R$ , par phase, alimente une charge résistive consommant une puissance variable  $P_C$ , la tension  $E_S$  de la source est constante, on suppose une charge résistive, on à :

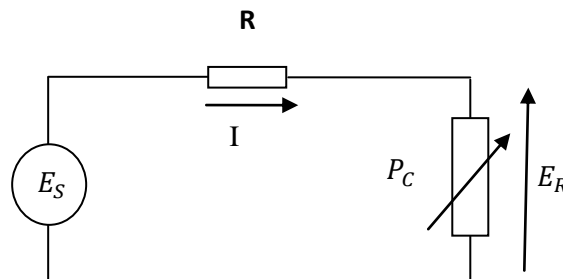


Figure IV.12 Charge résistive alimentée par une ligne résistive.

La puissance transmise à la charge

$$P_C = E_R * I \quad (\text{IV.1})$$

$$I = \frac{E_S - E_R}{R} \quad (\text{IV.2})$$

$$P_C = \frac{E_R(E_S - E_R)}{R} \quad (\text{IV.3})$$

La puissance maximale :

$$P_{CM} = \frac{E_S^2}{4R} \quad (\text{IV.4})$$

Le résultat de simulation de la ligne résistive est donné par la figure suivante :

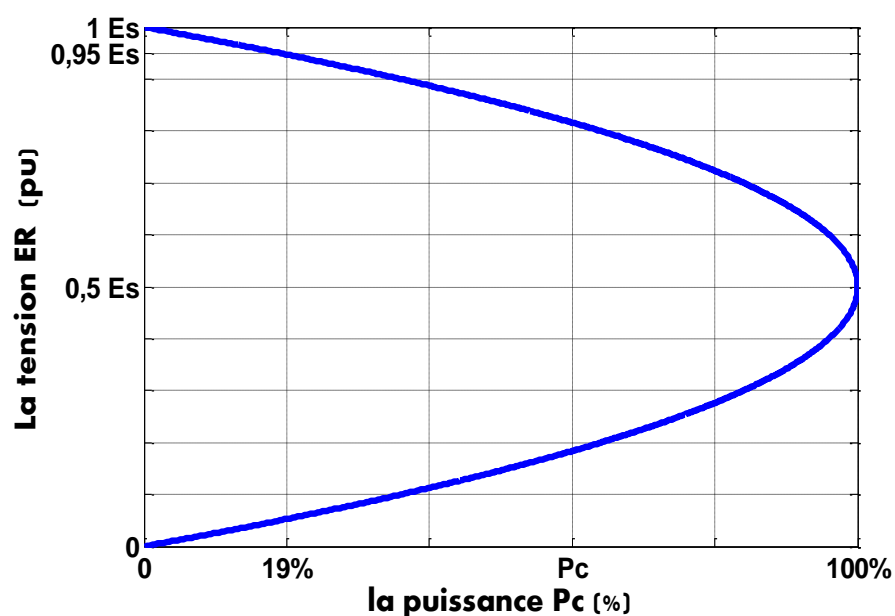


Figure IV.13 Courbe caractéristique d'une ligne résistive.

La puissance active que la ligne peut transporter .on atteint ce maximum lorsque la résistance de la charge est égale à celle de la ligne .Il s'ensuit que  $E_R = 0.5 E_S$  la puissance égale 100% (puissance maximale).

Si l'on permet une régulation maximale de 5% ( $E_R = 0.95E_S$ ), la ligne peut transporter une puissance  $P_C$  qui représenté seulement 19% de la puissance maximale. La ligne pourrait transporter une puissance plus grande que  $P_C$  mais la tension correspondant serait alors trop basse.

#### IV.5.2.2.Une ligne inductive

Considérons maintenant une ligne dont la résistance est négligeable, mais qui possède une réactance inductive  $X_L$  donc on à la figure suivant :

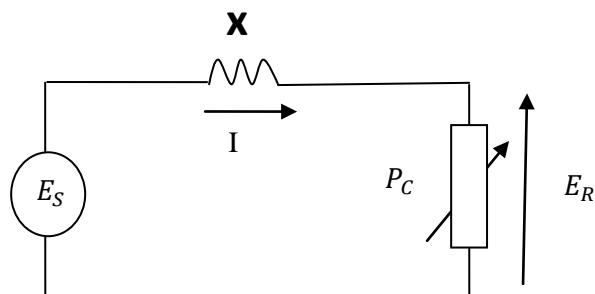


Figure IV.14 Charge résistive alimentée par une ligne inductive.[30]

La puissance transmise à la charge

$$P_C = E_R * I \quad (\text{IV.5})$$

$$P = E_S * I * \cos\varphi \quad (\text{IV.6})$$

$$E_S^2 = E_R^2 + X^2 I^2 \quad (\text{IV.7})$$

$$I = \frac{\sqrt{E_S^2 - E_R^2}}{X} \quad (\text{IV.8})$$

$$P_C = \frac{E_R \sqrt{E_S^2 - E_R^2}}{X} \quad (\text{IV.9})$$

La puissance maximale :

$$P_C = \frac{E_S^2}{2X} \quad (\text{IV.10})$$

Le résultat de simulation de la ligne inductive est donné par la figure suivante :

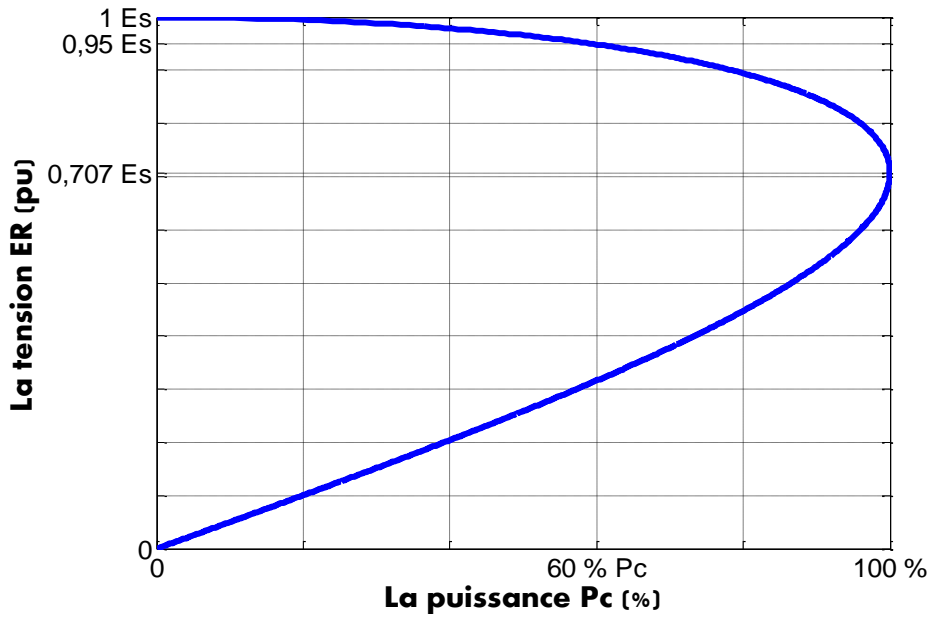


Figure IV.15 Courbe caractéristique d'une ligne inductive.

Ligne inductive donne donc une meilleure régulation qu'une ligne résistive.

La source  $E_S$  doit fournir non seulement la puissance active  $P_S$  consommée par la charge, mais aussi la puissance réactive  $X_L I^2$  absorbée par la ligne. [33][34]

**IV.5.2.3. Une ligne inductive reliée à deux grands réseaux :**

La figure (IV.16) donnée le circuit équivalent d'une ligne inductive relie deux régions S et R dont les tensions  $E_S$  et  $E_R$  aux deux extrémités sont constantes. En ce qui concerne l'échange de puissance active, donc on aura la figure suivant:[1]

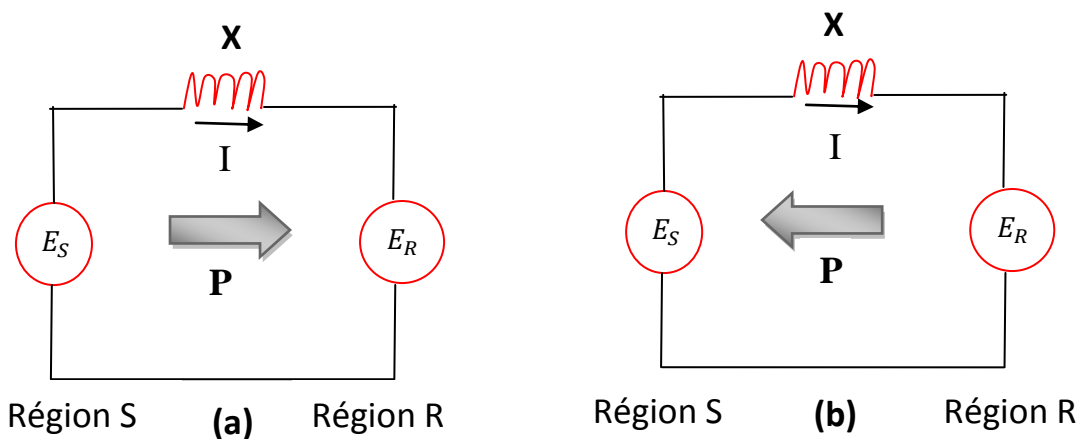


Figure IV.16 Une ligne inductive reliée à deux grands réseaux

(a).  $E_S$  en avance sur  $E_R$  (b).  $E_S$  en retard sur  $E_R$

La puissance transmise entre deux sources de tension

$$P = \frac{E_S E_R}{X} \sin \Theta \quad (\text{IV.11})$$

Le résultat de simulation de la ligne inductive est donné par la figure suivant :

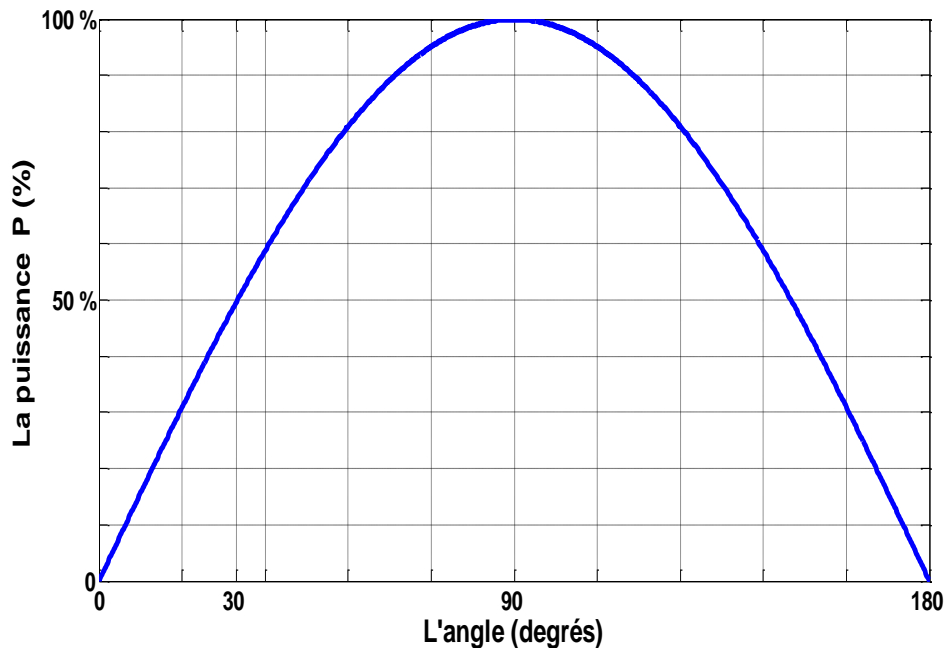


Figure IV.17 Caractéristique de puissance active en fonction de l'angle de déphasage

La figure (IV.17) montre la courbe de la puissance active en fonction de l'angle de déphasage. On remarque que la puissance transporter augmente progressivement pour atteindre une valeur maximale  $P = \frac{E^2}{X_L}$  lorsque le déphasage entre les deux réseaux est de  $90^\circ$ .

#### IV.6. Exploitation d'un réseau électrique:

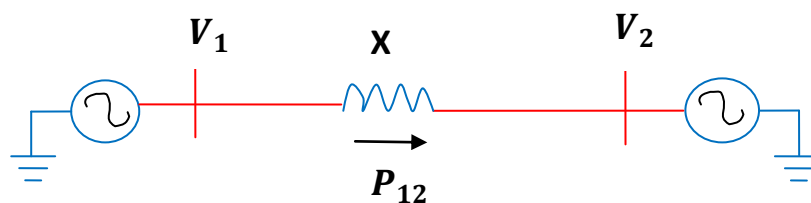


Figure IV.18 Puissance transité entre deux réseaux

La puissance active  $P$  transitée entre deux réseaux de tensions  $V_1$  et  $V_2$  présentant un angle de transport  $\theta$  (déphasage entre  $V_1$  et  $V_2$ ) et connectés par une liaison d'impédance  $X$  est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \\ Q_{12} = \frac{V_1 V_2}{X} (1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (\text{IV.12})$$

Cette équation montre qu'il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison.

En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements.[7]

## IV.7. Caractéristique d'un compensateur statique TCSC:

### IV.7.1. Etude d'un TCSC :

Le TCSC est le premier contrôleur série développé dans les systèmes FACTS. Ce type de dispositifs a été installé pour la première fois dans la sous-station de Kayenta par (Western Area Power Administration (WAPA)) au début de l'année 1992. [11]

L'organe essentiel de commande du TCSC est le TCR qui est un contrôleur statique utilisant une interface d'électronique de puissance pour fournir un contrôle rapide de l'énergie réactive. Le principal composant contrôlable est une réactance inductive connectée en série avec un thyristor bipolaire de commande. [31]

La variation de l'angle d'amorçage des thyristors, permet de varier la valeur de la réactance inductive, qui cause un échange rapide de l'énergie réactive entre le TCR et le système.

### IV.7.2. Définition de TCSC:

La capacité série commande par thyristor(TCSC) est un dispositif de compensation série, elle utilise l'électronique de puissance comme élément de base .il est connecté en série avec le

réseau pour contrôler le transit de puissance, l'amortissement de résonance subsynchrone et des oscillations de puissance.[34]

Le TCSC est un compensateur série, utilisé principalement pour varier la réactance de la ligne du réseau, afin de contrôler le transit de la puissance entre deux nœuds.

Voire équation (IV.13) : [33]

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \theta \quad (\text{IV.13})$$

Après on ajoute la réactance de la compensateur série TCSC on a :

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_L + X_{TCSC(\alpha)}} \sin \theta \quad (\text{IV.14})$$

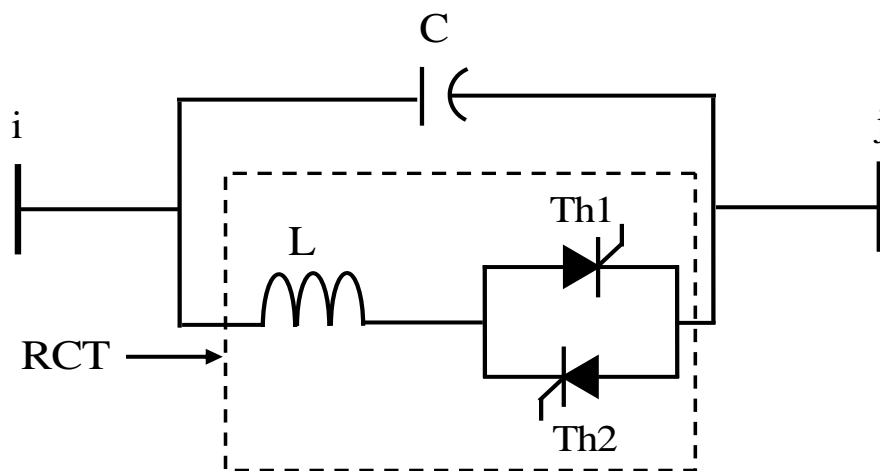


Figure IV-19 Schéma du TCSC.[34]

### IV.7.3. La structure d'un TCSC:

La structure d'un TCSC est ainsi équivalente à un SVC de type FC-TCR, la différence étant que le TCSC est connecté en série avec la ligne de transmission, alors que le SVC est connecté en shunt à un nœud préalablement sélectionné. Une autre différence, est que le TCSC est connecté directement à la ligne alors que le SVC exige un transformateur de liaison.

Le principe de base du TCSC est l'ajustement optimal et rapide de l'impédance de la ligne à laquelle il est connecté. En contrôlant la réactance du TCSC, l'impédance de la ligne est compensée, et donc l'écoulement de puissance à travers la ligne est augmenté.[8]

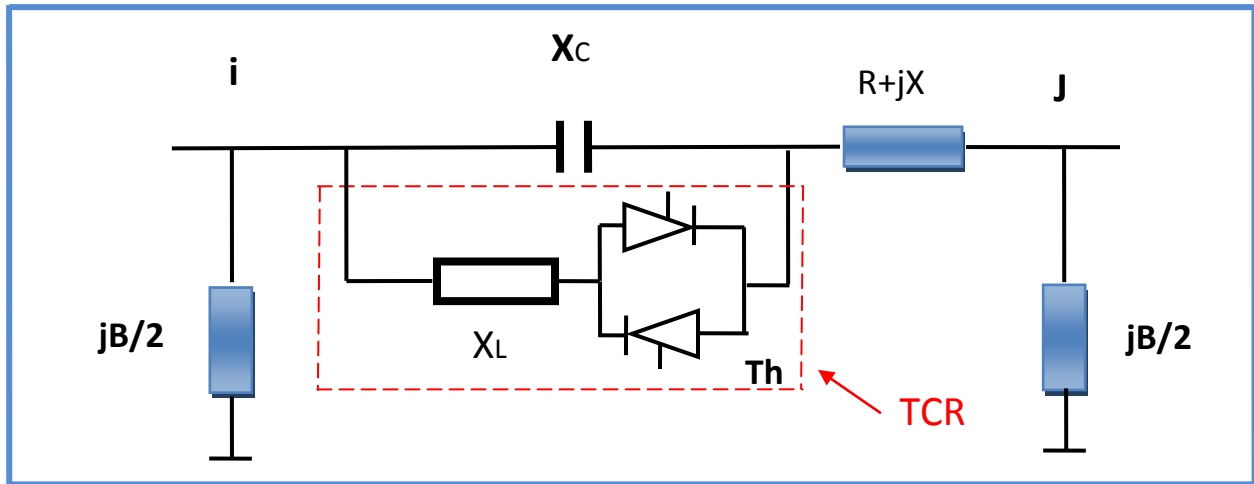


Figure IV.20 Insertion d'un TCSC sur une ligne

La figure (IV.20) présente l'implantation d'un TCSC dans une ligne électrique. La réactance totale Est la somme algébrique de la réactance du TCSC et la réactance réelle de la ligne. Voir l'équation [34] :

$$X_{ij} = X_{ligne} + X_{TCSC} \tag{IV.15}$$

Pour éviter toutes surcompensation, le rang de fonctionnement du TCSC doit être limité entre : [34]

$$-0.7 X_{ligne} \leq X_{TCSC} \leq 0.2 X_{ligne} \tag{IV.16}$$

La figure suivante représentée le modèle de la réactance  $X_{TCSC}$  de l'implantation d'un TCSC :

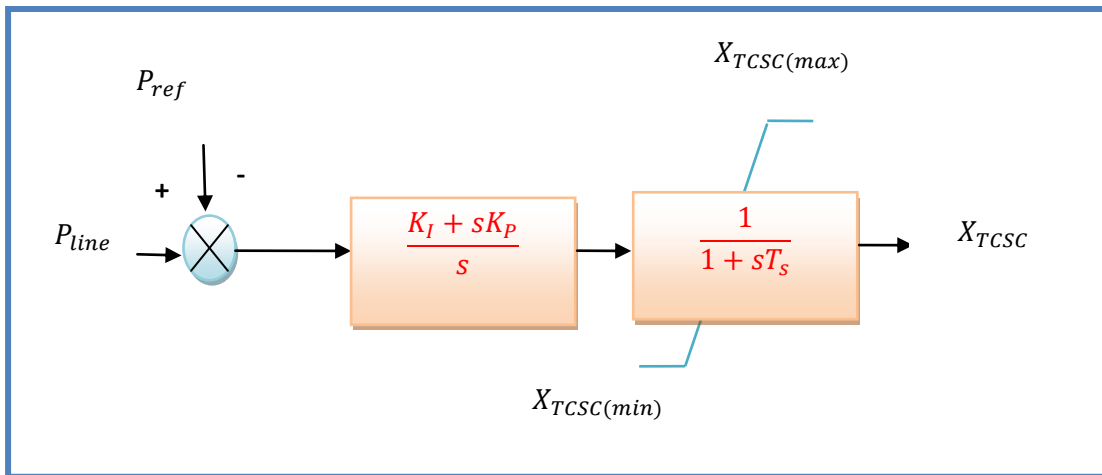


Figure IV.21 modèle de réactance  $X_{TCSC}$

**IV.7.4. Schéma block globale de TCSC:**

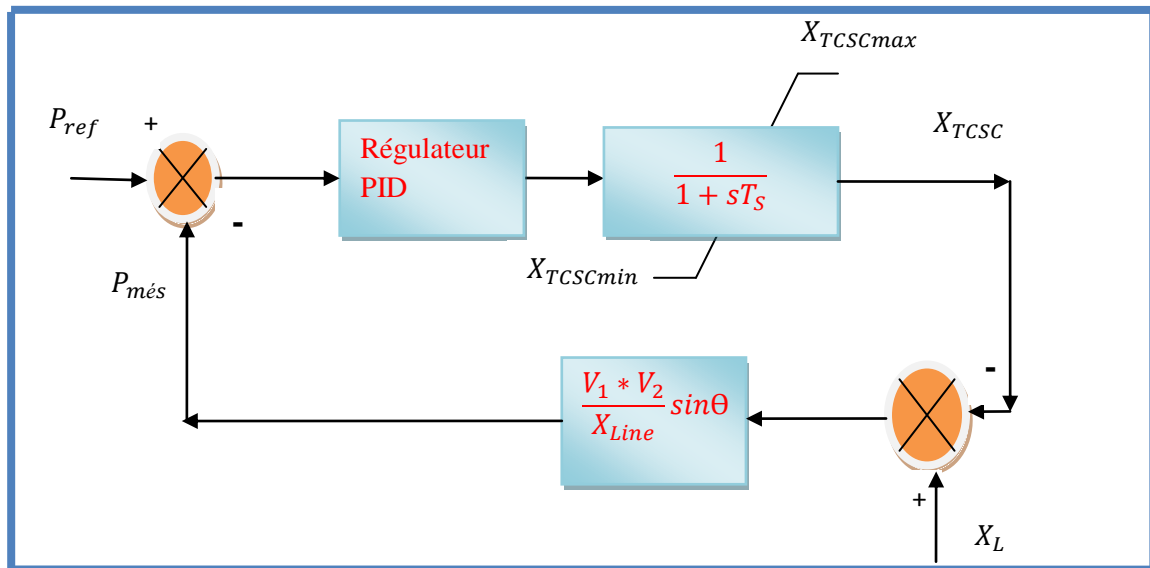


Figure IV.22 Schéma représenté le Modèle de contrôle du TCSC

#### IV.7.5. Les avantages de TCSC:

Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont :

- ❖ Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- ❖ Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.
- ❖ Réduction des risques de résonance hypo synchrone.
- ❖ Interconnexion des réseaux.[33]

#### IV.7.6. Résultat de simulation du TCSC:

Le résultat de simulation suivant la figure (IV.23.24) montre l'influence du TCSC sur la puissance de ligne. Comme déjà mentionné précédemment, le TCSC est un équipement FACTS série qui contrôle la puissance transmise dans une ligne par la variation de la réactance de cette dernière.

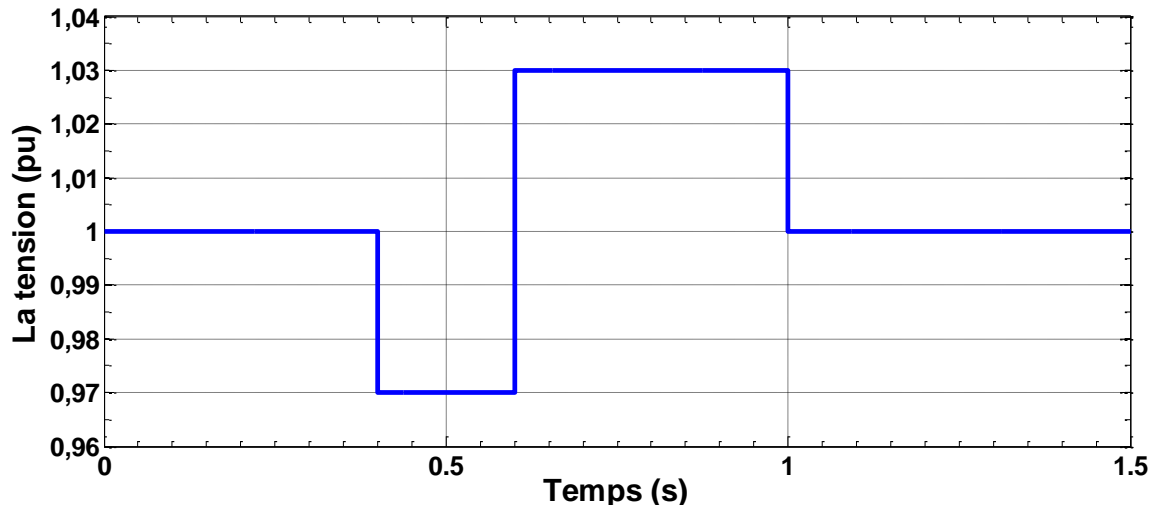


Figure IV.23 La variation de tension de réseau

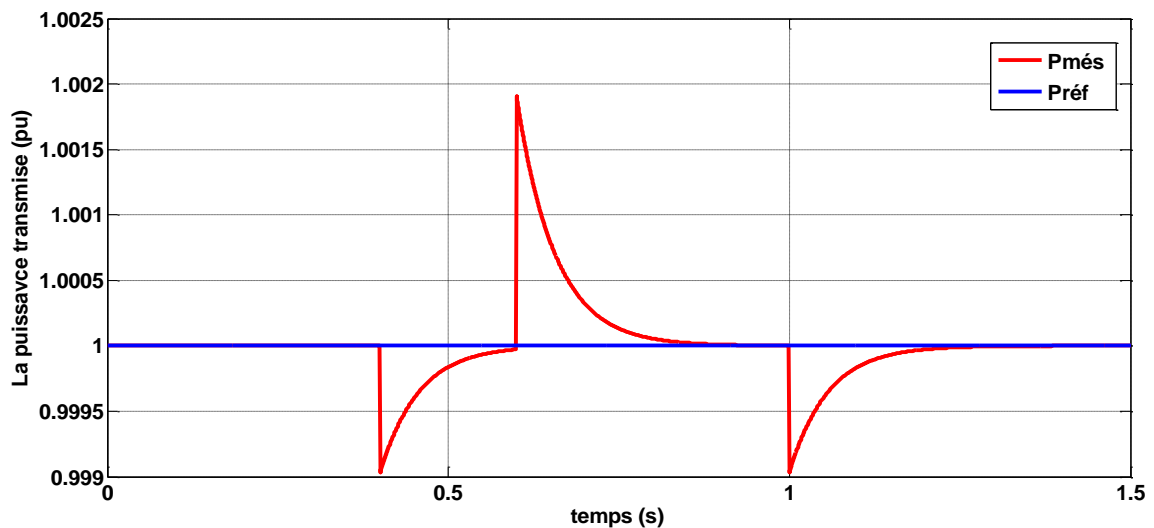


Figure IV.24 la caractéristique de la puissance par variation de la réactance d'un TCSC

#### IV.7.7. Interprétation- Résultats du dispositif série TCSC:

D'après les résultats obtenus on peut conclure que les TCSC permettent de contrôler des puissances actives dans un réseau. Le choix optimal de ces dispositifs est un élément très important pour le contrôle de puissance.

## IV.8. Compensateur statique shunt de puissance réactive (SVC):

### IV.8.1. Définition du SVC:

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est le premier dispositif FACTS qui apparaît dans les années 1970 pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles les laminoirs et les fours à arc. Les SVC sont des FACTS de première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage. [33]

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur de limites désirées. Le SVC injecte de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge. [8]

### IV.8.2. Différents schémas de SVC:

La figure (IV.25), présente différentes configurations possibles de SVC. Lorsque le dispositif comporte une anche de type TCR et une anche de type TSC, un filtre permettant réduire les harmoniques est rajouté.

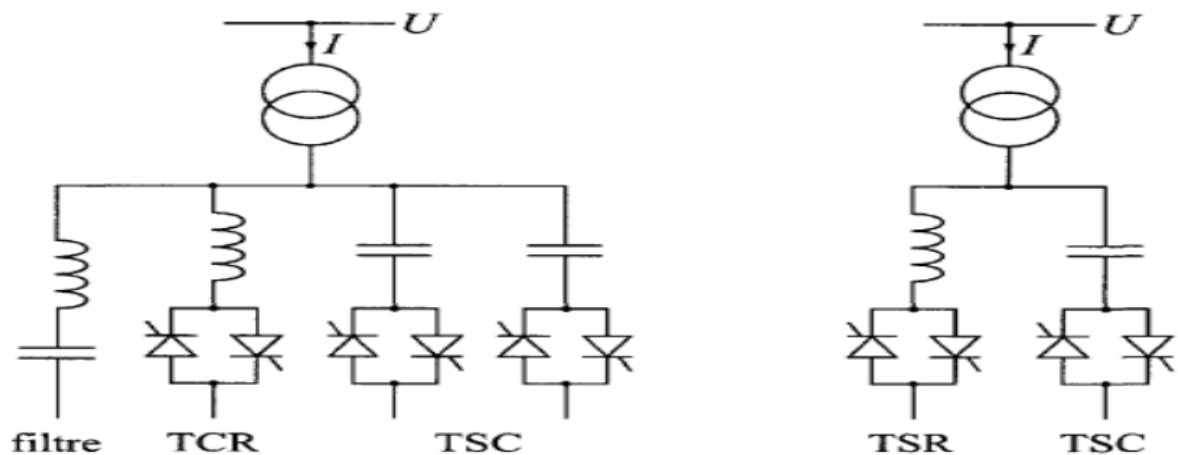


Figure IV.25 Compensateur statique de puissance réactive SVC. [12]

### IV.8.3. Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC :

Le dispositif SVC est modélisé par une admittance shunt  $Y_{SVC}$  variable figure (IV.26.a). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire:

$$Y_{SVC} = j * B_{SVC} \quad (IV.17)$$

La susceptance  $B_{SVC}$  peut être de nature capacitive ou inductive afin respectivement de fournir ou d'absorber, de la puissance réactive  $Q_{SVC}$  (figure IV.26.b).

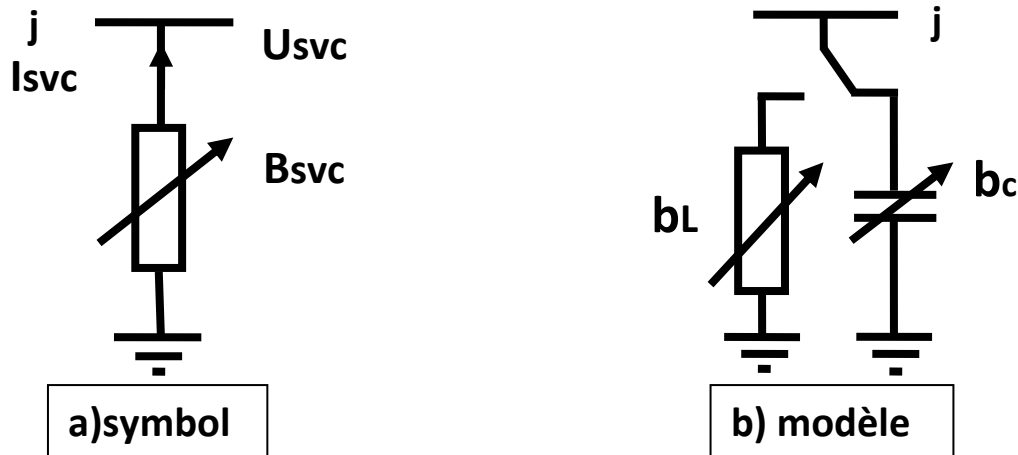


Figure IV.26 Modélisation du SVC

Les valeurs des SVC sont exprimées sous forme de puissance réactive  $Q_{SVC}$  absorbée à la tension nominale  $U_n$ . La correspondance avec la susceptance  $B_{SVC}$  est donnée par la relation On définit  $B_{SVC}$  la susceptance de SVC :

$$B_{SVC} = \frac{1}{X_{SVC}} \tag{IV.18}$$

$$B_{SVC} = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \tag{IV.19}$$

$$X_{SVC}(\alpha) = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})} \tag{IV.20}$$

La puissance réactive réellement absorbée par le SVC est donnée par:

$$Q_{SVC} = -V_j^2 * B_{SVC} \tag{IV.21}$$

Alors :

$$Q_{SVC}(\alpha) = -V_j^2 * \left( \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \right) \tag{IV.22}$$

$V_j$ : La tension du réseau où est connecté le SVC.

$I_{SVC}$  : Le courant dans le SVC.

$Q_{SVC}$  : Est la puissance réactive de SVC

$\alpha$ : L'angle d'amorçage des thyristors

$B_{SVC}$  : La susceptance de SVC

Les installations FACTS sont généralement situées à des postes déjà existants. Toutefois, les deux cas sont en considérations ; à savoir lorsque le SVC est placé en un nœud et lorsqu'il est situé au milieu de la ligne.

#### IV.8.4. Les avantages de SVC:

Le SVC présente plusieurs avantages :

- ✓ Stabiliser la tension dans les systèmes faibles.
- ✓ Réduire des pertes de transmission.
- ✓ Augmenter la capacité de transmission, de ce fait retardant le besoin de nouvelles lignes.
- ✓ Augmenter la limite passagère de stabilité.
- ✓ Améliorer la commande et la stabilité de tension.[32]

#### IV.8.5. Contrôle de la tension par compensateur SVC

Ces essais au simulateur consistaient à produire des perturbations à la barre où il est installé le compensateur statique SVC, afin de vérifier s'il était en mesure de contrôler rapidement les variations de tension à la suite de ces perturbations.

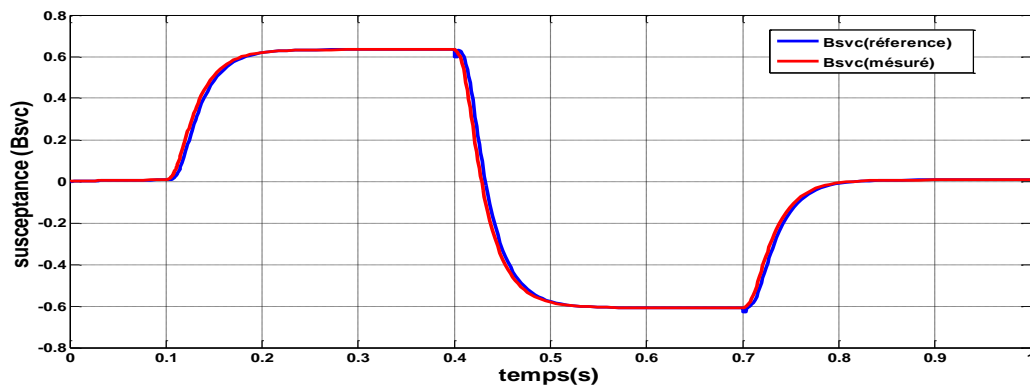


Figure IV.27 Susceptance Primaire réel et susceptance primaire mesurée contrôlée par le SVC

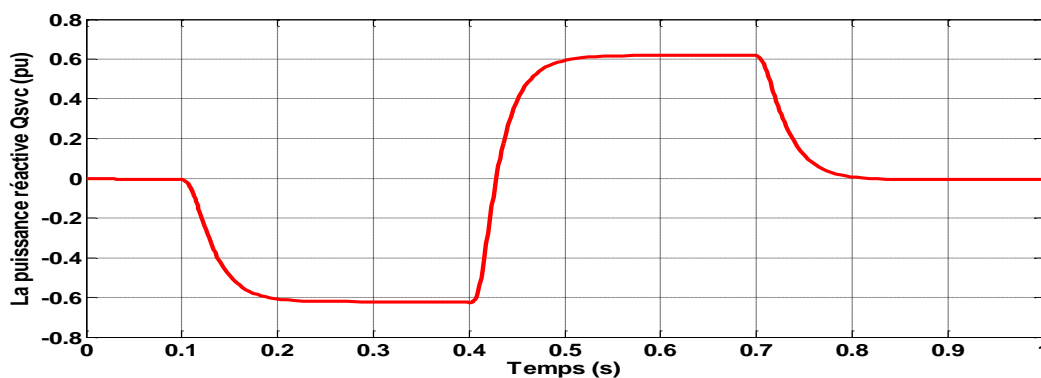
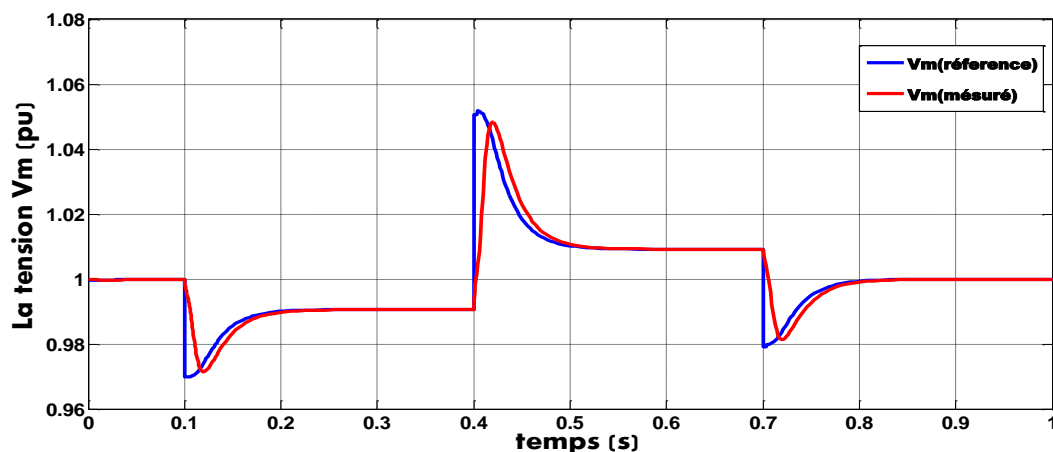


Figure IV.28 caractéristique de puissance réactive contrôlée par le SVC



**Figure IV.29 Tension primaire réel et tension primaire mesuré contrôlé par le SVC**

Figure (IV.27) illustre la susceptance primaire réel et la susceptance primaire mesuré (contrôlée) par le compensateur statique SVC. Cette susceptance est une image de la puissance réactive du compensateur.

Figure (IV.28) illustre la puissance réactive  $Q_{svc}$  (contrôlée) par le compensateur statique SVC. Cette puissance est variée par variation de la tension (contrôlée) par le SVC.

Figure (V.29) représente la tension réelle vue de primaire du transformateur et la tension primaire mesuré. Initialement, la tension est stable (tension nominale 500 KV). Lorsque la tension du réseau diminue  $V_m = 0,97$  p.u à temps de  $t = 0.1$  s (chute de tension), à cette instant le compensateur statique intervient pour régler la tension du nœud où il est connecté au réseau, le régulateur intégral contrôle la susceptance  $B_{SVC}$  du compensateur de tel sorte qu'elle devienne purement capacitif, le courant du SVC devient plus capacitif (en avance par rapport à la tension), le compensateur SVC génère la puissance réactive au réseau, ce qui tend à réduire la chute de tension.

Puis la tension du réseau est brusquement augmenté à  $t = 0,4$  la tension  $V_m = 1,03$  pu, le régulateur contrôle la susceptance  $B_{ref}$  du compensateur de façon à ce que la susceptance devienne purement inductif, le courant du SVC devient plus inductif (en retard par rapport à la tension), dans ce moment le compensateur statique absorbe la puissance réactive ce qui contribue à maintenir la tension à la référence.

Comme nous pouvons le constater, la tension contrôlée par le régulateur du compensateur statique varie dans des limites tout à fait acceptables avant de revenir à une valeur proche de la valeur de consigne  $V_m = V_{ref} = 1$  pu à temps de  $t = 0.7$  s.

## **IV.9. Conclusion**

Les dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définies.les gestionnaires de réseau sont entrain d'exploiter le système de transport aux près de ses limites thermiques et dynamiques, alors que les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et à la continuité de service. Les équipements à base d'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème.

### Conclusion générale

L'industrie de l'énergie électrique a subi des changements profonds, suite aux différents bouleversements politiques et économiques de plusieurs pays dans le monde. Ce nouvel environnement du marché de l'électricité, a mis en évidence une clientèle plus importante et plus exigeante vis-à-vis du fonctionnement des réseaux à travers la flexibilité de leur contrôle, la fiabilité et la qualité de l'énergie offerte sur le marché.

Ce mémoire présente et explique calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques lors de l'intégration des fermes éoliennes et des dispositifs FACTS, la technique de Calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux électriques étudiée dans ce travail nécessite en premier lieu l'étude des méthodes itératives classiques (Gauss, Gauss-Seidel).

Aussi représenté la modélisation et la commande de puissance d'un système éolien à base de génératrice asynchrone à double alimentation alimentée par la commande vectorielle directe, pour contrôler la puissance transitée au réseau.

Nous avons traité le problème de calcul de l'écoulement de puissances et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs SVC. Une étude sur les dispositifs FACTS à été réalisé et en plus une étude détaillée sur les dispositifs SVC et TCSC (définition, modélisation, simulation).

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par les étapes suivantes :

**Dans le premier chapitre** nous avons présenté en bref un aperçu sur le fonctionnement des réseaux électriques, on a montré les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans une ligne de transport et la chute tension provoquée par le transit de puissance.

**La deuxième chapitre** représenté le problème de calcul d'écoulement de puissance dans un réseau électrique. Pour résoudre ce problème dont nous avons choisi la méthode de GAUSS et GAUSS-SEIDEL.

**Le troisième chapitre** nous avons présenté généralité sur l'énergie éolienne. Et les différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques et les techniques de stockage associées, en suite la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation MADA. Et la simulation du fonctionnement de la machine en mode génératrice GADA. Ensuite la modélisation la turbine d'éolienne et l'optimisation du fonctionnement de la partie mécanique de l'éolienne et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible, et contrôle de puissance active et réactive puis les résultats de simulation.

**Le quatrième chapitre** a été consacré à la description des différents systèmes permettant d'assurer le transport d'énergie électrique dans les meilleures conditions par utilisé les systèmes

## Conclusion générale

---

FACTS. Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories : les compensateurs parallèles, les compensateurs séries et les compensateurs hybrides (parallèle-série), et aussi modélisation de compensateur statique SVC et la capacité série commande par thyristor(TCSC). Dans ce chapitre, on étudie le fonctionnement du SVC et TCSC et on présente les éléments qui constituent ce dispositif. Différentes configurations du SVC et TCSC sont présentées ainsi que sa modélisation. et représenté les résultats de simulation de ce dispositif.

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble des chaînes de conversion d'éolienne, dans le but est intégrer une énergie éolienne au réseau électrique, parmi les perspectives envisageables :

- Insertion des systèmes FACT pour améliorer la transit de puissance des systèmes électrique.
- L'intégration éventuelle d'un système de stockage d'énergie éolienne pour le lissage de la puissance fournie au réseau.
- Introduire des techniques intelligentes comme les réseaux de neurone, les algorithmes génétiques.
- Utilisation des autres équipements FACTS dans l'amélioration de la stabilité statique de la tension et la transit de puissance des réseaux électriques à savoir : UPFC, SSSC, STATCOM,...etc.

## Annexe A

**Les paramètres de la génératrice asynchrone double alimentée:**

**La valeur nominale**

Puissance nominale	$P_n = 4KW$
Tension nominale	$v/U = 220/380 V - 50Hz$
La vitessenominale	$\Omega_n = 1440 tr/min$
Nombre de paires de pôles	$P = 2$

**Paramètre de la machine**

Resistance statorique	$R_S = 1.2 \Omega$
Resistance rotorique	$R_r = 1.8 \Omega$
Inductance statorique	$L_S = 1554 H$
Inductance rotorique	$L_r = 1568 H$
Inductance mutuelle	$M = 0.15 H$
Vitesse synchronisme	$\omega_s = 2\pi f = 314 rad/s$

**Constantes mécanique :**

Moment Inertie	$J = 0.2 Kg.m^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.001 N.m.S/rd$

**Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :**

Puissance nominal	$P_T = 4KW$
Number de pale	$N_p = 3$
Diameter d'une pale	$R = 3m$
Gain de multiplication	$G = 5.4$
Moment Inertie	$J = 315 Kg.m^2$
Coefficient de frottement	$f = 0.0024 N.m.S/rd$

## Annexe B

### Modèle de phase d'un compensateur statique de puissance réactive SVC

**Paramètres du réseau et du contrôleur SVC sont donnés comme suit:**

- Source de tension : 500 KV, 60 Hz.
- Puissance du court circuit de système : 3000 MVA.
- Puissance de la charge : **Pch**= 10 MW (**Qch** = 0 Mvar).

#### **Coefficients des Régulateurs (Chapitre 3)**

•pour la commande vectorielle directe

$K_p = 0.001$  boucle de Puissance

$K_i = 0.5$  boucle de Puissance

#### **Coefficients des Régulateurs (Chapitre 4)**

•pour le compensateur TCSC

$K_p = 30$

$K_i = 100$

### Références bibliographiques

- [1] Abdelaali Alibi, «Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)»Mémoire Magister, Université de Batna, 2009.
- [2] Delendi Louardi, «Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS », Thèse de Magister, Université de Batna, Décembre 2009.
- [3] A. Abdelbaki & D. Belkhiri & Y. Lahouassa, «Calcul de courant de court-circuit dans les réseaux électriques », Mémoire d'ingénieur de l'université de M'sila, Département d'Electronique, 2012.
- [4] T. Siabdellah & O. Aouidji & Z. Doghmane, «Protections des réseaux électriques MT et HT »Thèse de d'ingénieur, Université de M'sila, 2012.
- [5] Mr. Zellagui Mohamed «étude des protections des réseaux électrique MT (30 & 10 kV)» mémoire magistère, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [6] Slimane Ramdane, «Programmation en MATLAB de la Stabilité Transitoire d'une Modélisation Interactive d'un Réseau Electrique par Intégration Numérique», Mémoire Magister, Université Amar Telidji –Laghouat, Juin 2008.
- [7] Haimour Rachida « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique », Mémoire Magister, université d'Oran, 2008/2009.
- [8] Oussama Mammeri « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive Dans un nœud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie», Mémoire Magister, l'université de Batna, 2012.
- [9] K. Belacheheb, "Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport ", Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré Nancy I, 21 Juin 2001.
- [10] Eskandar Gholipour Shahraki «Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques» Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré Nancy I, 13 Octobre 2003.
- [11] Boussadia Fethi « Amélioration de la stabilité D'un réseau électrique par facts application au réseau algérien» Mémoire magister l'université de Sétif, 2008.
- [12] Boudjella Houari "Contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) " Mémoire de magistère, Université de sidi bel abbés 23/01/2008.

## Bibliographie

---

- [13] S.Khoudour&G.Traikia mabrouk «Evaluation de la stabilité de la tension d'un réseau électrique à l'aide d'une nouvelle technique d'indice de stabilité », Thèse de l'ingénieur, Université M'sila, 2008,
- [14] messalti Sabir «Analyse De La Stabilité Transitoire Des Réseaux De Transport A Courant Continu En Haute Tension (HVDC-FACTS)» Thèse de doctorat de l'université de Ferhat Abbas – Sétif UFAS (Algérie), 23 /06 /2011.
- [15] beki Brahim, «Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d'un Réseau Electrique Haute Tension», Mémoire Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2006.
- [16] Kartobi Lamia, «Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essais Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques», Mémoire Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 04 Décembre 2006.
- [17] AbdErrahmaneFegriche &RedouaneSadouni«Etude des postes de distribution MT/BT», Thèse de d'ingénieur, Université de M'sila, 2007/2008.
- [18] Mezaach Mohamed, «Analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositif de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de la stabilité la tension», Thèse de Magister, Université de Batna, Décembre 2011.
- [19]AzeddineChaiba «Commande de la machine asynchrone à double alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle», Thèse de doctorat, Université de Batna, Décembre 2010.
- [20]DehoumFawzi&Djeddou Lakhdar,Cheriat El hachemi«Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «GADA» pour l'utilisation de l'énergieéolienne», Thèse de d'ingénieur, Université M'sila, 2011.
- [21]Moussa sidouAbdoulaziz&SoumanaIbrahim«Etude du générateur asynchronepour l'utilisationdans la production de l'énergie éolienne», Thèse de d'ingénieur,Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [22] F. Kendouli&K. Nabti,& K. Abed et H. Benalla«Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation»,Revue des Energies Renouvelables,Vol. 14 N°1, pp.109 – 120,2011.
- [23] Saki Ali&Belaidi Mourad «Etude d'un Générateur Asynchrone dans La Production d'Energie Electrique par Eolienne», Thèse de d'ingénieur,Ecole Nationale Polytechnique, 2006.
- [24]Metatla Samir «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA», Thèse de Magister, Université Ecole nationale supérieure Polytechnique d'Alger, Décembre 2009.

## Bibliographie

---

- [25] Frédéric POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, Université de Nantes, Décembre 2003.
- [26] Khaled Ferkous «ETUDE d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne», Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, Décembre 2009.
- [27] Griche Issam «Etude De La Stabilité Transitoire Des Systèmes Electriques En Présence Des Fermes Eoliennes», Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas Sétif, 2008.
- [28] Armand Boyette «Contrôle –commande d'un génératrice asynchrone double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne» Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré Nancy I, Décembre 2006.
- [29] Slimani Linda «Contribution à l'application de l'optimisation par des méthodes métaheuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité dérégulée», Thèse Doctorat, Université El Hadj Lakhdar - Batna, 2008/2009.
- [30] H. BUYSE «Transport d'énergie électrique», Cours dans Université catholique de Louvain, ELEC2753, pp.1-27, 2004.
- [31] Ben Alia Khaled, Zahnite Hakim «Etude des compensateurs statiques de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique», Thèse d'Ingénieur d'Etat, Université Biskra, 2005.
- [32] Koriche A. Ghani «Compensation de l'énergie Réactive par les Dispositifs «FACTS » dans le Réseau Electrique», Thèse d'Ingénieur d'Etat, Université El Hadj Lakhdar - Batna, 2011/2012.
- [33] Rabah Benabid «Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essai pour le Contrôle de la Stabilité de Tension Des Réseaux Electriques», Thèse de Magister, Université Amar Telidji, Laghouat, 2007.
- [34] Ali H. Abdul-Jabbar & Mohammed K. Edan & Jamal Mohammed «Design and Simulation of Control Circuit for TCSC Based MATLAB Simulink», Journal of Engineering and Development, Vol. 15, No.4, ISSN, pp.106-122, Des 2011.
- [35] B. Boussahoua «Chapitre de l'écoulement de puissance» cours, vol mat 203, p.p.1-26, 2010.
- [36] [www.GWEC.COM](http://www.GWEC.COM)

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA**  
**RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**OPTION : *INGENIERIE DES SYSTEMES ELECTROMECHANIQUE***

**Proposé et dirigé par :**

**Dr. MESSALTI Sabir**

**Présenté par :**

**FERAHTIA Saàd**

**Thème :**

**"Calcul d'écoulement de puissance dans les réseaux  
électriques lors de l'intégration des fermes éoliennes et des  
dispositifs FACTS"**

**Résumé**

Ce travail présenté l'étude de l'amélioration des réseaux électriques, dont nous avons étudié la faisabilité d'intégration de l'énergie éolienne ainsi que les dispositifs FACTS dans les réseaux électriques. Pour ce la nous avons utilisé des techniques d'écoulement de puissance pour la stabilité de tension d'un réseau électrique par la méthode itérative de GAUSS-SEIDEL.

Aussi dans ce mémoire présente l'étude et l'utilisation de la génératrice asynchrone GADA et un modèle de la turbine éolienne a été établi, pour la production l'énergie éolienne contrôlé par la commande directe pour utilisées dans le système d'intégration de réseau électrique. A retenir aussi notre intérêt dans ce mémoire. L'utilisation optimale des dispositifs FACTS par compensateur statique d'énergie réactive (SVC) et du Compensateur série commandé par thyristor (TCSC) dans l'amélioration de la marge de stabilité statique de tension et amélioration la transit de puissance dans les réseaux électriques.

**Mots clés:**

FACTS, Le réseau électrique, GAUSS-SEIDEL, L'écoulement de puissance, GADA, l'énergie éolienne, SVC.

2012/2013

N° d'ordre : 055