

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DEPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE



Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : Électrotechnique

Présentée par :

Mr : BALI Habib

Thème

**Contribution à la Régulation d'une Chaîne
de Production Éolienne basée sur une
Génératrice Synchrone**

Soutenue le : 27/11/2025 devant le jury compose de :

Mr. SEBAA Morsli	Professeur, Univ, Ibn-Khaldoun, Tiaret	President
Mr. ALLAOUI Tayeb	Professeur, Univ, Ibn-Khaldoun, Tiaret	Encadreur
Mr. BOUDHIAF Mohamed	Professeur, Univ, Zian Achour, Djelfa	Co-Encadreur
Mr. BOUREGUIG Kada	M.C.A, Univ, Ibn-Khaldoun, Tiaret	Examineur
Mr. MAZOUZ Lakhdar	Professeur, Univ, Zian Achour, Djelfa	Examineur
Mr. GUETTAF Yacine	Professeur, Univ, Nour Bachir El-Bayadh	Examineur
Mr. NEGADI Karim	Professeur, Univ, Ibn-Khaldoun, Tiaret	Invité

Année universitaire 2025 /2026

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH qui nous amené jusqu'à la fin de notre travail.

Je remercie tout particulièrement mes encadrants, Monsieur **ALLAOUI Tayeb**, Professeur à l'université Ibn Khaldoun-Tiaret, et Monsieur **BOUDHIAF Mohamed**, Professeur à l'université Zian Achour-Djelfa, pour leurs appuis scientifiques et pour leurs disponibilités durant ces années de thèse. Je tiens à les remercier chaleureusement de l'aide précieuse et des conseils éclairés qu'ils m'ont apportés tout au long de ce travail.

Je remercie très sincèrement Monsieur **SEBAA Morsli**, Professeur à l'université Ibn Khaldoun-Tiaret, d'avoir accepté d'évaluer ce travail et qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur **MAZOUZ Lakhdar**, Professeur à l'université Zian Achour-Djelfa, à Monsieur **GUETTAF Yacine**, Professeur à l'université Nour Bachir El-Bayadh, et à Monsieur **BOUREGUIG Kada**, Maître de conférences à l'université Ibn Khaldoun-Tiaret, d'avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail et être membres du jury de soutenance.

J'exprime vivement ma gratitude et reconnaissance à Monsieur **NEGADI Karim**, Professeur à l'université Ibn Khaldoun-Tiaret, qui m'a aidé dans la préparation de cette thèse et pour l'intérêt qu'il a manifesté en participant en qualité de membre invité à ce jury.

Mes remerciements vont ensuite à l'endroit de Monsieur **ARARIA Rabah**, Maître de conférences à l'université Ibn Khaldoun-Tiaret, pour le soutien et les conseils inconditionnels lors de la préparation de ma thèse et le dévouement dont il a fait preuve.

Mes remerciements vont également à tous les membres de notre laboratoire **L2GEGI**, et à tous mes amis qui ont contribué de près ou de loin pour réaliser ce travail.

Enfin, Je remercie tous ma famille. Je retrouve ici tous les remerciements et appréciations pour leur soutien illimité.

ملخص :

يركز العمل الحالي في هذه الأطروحة بشكل أساسي على استقرار محطة طاقة الرياح القائمة على مولد متزامن ذي مغناطيس دائم متصل بالشبكة الكهربائية عبر محول ثنائي الاتجاه في وجود نظام FACTS. يتناول هذا العمل الجانب المتعلق بطاقة الرياح، ويشرح مبادئ تحويل الطاقة. ويركز بشكل خاص على تأثير STATCOM على جودة وكفاءة الجهد لتسهيل دمج توربينات الرياح في الشبكة الكهربائية الصغيرة.

كلمات مفتاحية: طاقة الرياح، GSAP، دمج الطاقة المتجددة، استقرار الجهد، STATCOM، الشبكة الكهربائية الصغيرة.

Résumé :

Le présent travail effectué dans cette thèse porte essentiellement sur la stabilité d'une centrale éolienne basée sur un générateur synchrone à aimants permanents connecté au réseau électrique via un convertisseur bidirectionnel en présence d'un système FACTS. Ce travail traite de l'aspect énergétique lié au vent et explique les principes de conversion de l'énergie. Il se concentre particulièrement sur l'impact de STATCOM sur la qualité et l'efficacité de la tension pour faciliter l'intégration des éoliennes dans le micro-réseau.

Mots-clés : Énergie éolienne, GSAP, Intégration des énergies renouvelables, Stabilité de la tension, STATCOM, Micro-réseau.

Abstract:

The present work carried out in this thesis mainly focuses on the stability of a wind power plant based on a permanent magnet synchronous generator connected to the electrical grid via a bidirectional converter in the presence of a FACTS system. This work deals with the aspect of wind energy and explains the principles of energy conversion. It particularly focuses on the impact of STATCOM on voltage quality and efficiency to facilitate the integration of wind turbines into the microgrid.

Keywords: Wind energy, PMSG, Renewable energy integration, Voltage stability, STATCOM, Microgrid.

Table de matière

Table de matière

Remerciements	
Résumé	
Liste des figures	I
Liste des tableaux	VI
Liste des symboles	VII
Liste des abréviations	X
Introduction générale	2

Chapitre I : Généralités sur les énergies éoliennes

I.1 – Introduction	7
I.2 – Énergies renouvelables	7
I.2.1 – Types des énergies renouvelables	7
I.2.1.1 – L'énergie hydraulique	8
I.2.1.2 – L'énergie solaire	10
I.2.1.3 – L'énergie biomasse	13
I.2.1.4 – L'énergie géothermique	14
I.2.1.5 – L'énergie éolienne	15
I.2.2 – Réalité des énergies renouvelables en Algérie	15
I.2.2.1 – Programme d'Algérie des énergies renouvelables	16
I.2.2.2 – Les projets réalisés d'ici fin 2023	16
I.3 – Conversion d'énergie éolienne	19
I.3.1 – Types des éoliennes	20
I.3.1.1 – Éoliennes à axe vertical	20
I.3.1.2 – Éoliennes à axe horizontal	21
I.3.2 – Structures des énergies éoliennes	21
I.3.3 – Architectures des éoliennes connectées au réseau électrique	23
I.3.3.1 – Éoliennes à vitesse fixe	23
I.3.3.2 – Éoliennes à vitesse variable	25
I.3.4 – Topologies de génératrices éoliennes à vitesse variable	25
I.3.4.1 – Éoliennes utilisant les machines asynchrones	25

I.3.4.1.1 – Générateur asynchrone à cage d’écureuil	25
I.3.4.1.2 – Générateur asynchrone à double alimentation	26
I.3.4.2 – Éoliennes utilisant les machines synchrones	29
I.3.4.2.1 – Générateur synchrone à rotor bobiné	30
I.3.4.2.2 – Générateur synchrone à aimant permanent	31
I.4 – Conclusion	34
 Chapitre II : Modélisation et réglage d’une centrale éolienne à base de GSAP	
II.1 – Introduction	37
II.2 – Structure de la chaine de conversion éolienne à base de GSAP	37
II.3 – Modélisation globale du système éolien à base de GSAP	38
II.3.1 – Modélisation de la partie mécanique de l’éolienne	38
II.3.1.1 – Hypothèses simplificatrices	38
II.3.1.2 – Modèle de la turbine	39
II.3.1.3 – Modèle du multiplicateur	42
II.3.1.4 – Equation dynamique de l’arbre	42
II.3.2 – Modélisation de la partie électrique de l’éolienne	43
II.3.2.1 – Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	43
II.3.2.1.1 – Principe des MSAP	43
II.3.2.1.2 – Hypothèses simplificatrices	44
II.3.2.1.3 – Équations électriques de la GSAP	44
II.3.2.1.4 – Équations électriques de la GSAP dans le repère (dq)	45
II.3.2.1.5 – Équations magnétiques	47
II.3.2.1.6 – Équations électromagnétique	47
II.3.2.1.7 – Équations mécanique	48
II.3.2.2 – Modélisation des convertisseurs	48
II.3.2.2.1 – Modélisation du convertisseur côté machine CCM	49
II.3.2.2.2 – Modélisation du bus continu DC	51
II.3.2.2.3 – Modèle de la liaison au réseau	52
II.4 – Commande du système éolien à base de GSAP	53
II.4.1 – Commande de la GSAP	53

II.4.1.1 – Extraction du maximum de la puissance du vent (MPPT)	54
II.4.1.1.1 – Technique d'extraction du maximum de puissance	55
II.4.1.1.1.1 – Contrôle sans asservissement de la Ω_{mec}	56
II.4.1.1.1.2 – Contrôle avec asservissement de la Ω_{mec}	57
II.4.1.2 – Commande vectorielle de la GSAP	58
II.4.1.2.1 – Conception des contrôleurs PI de courant et de vitesse	60
II.4.1.2.1.1 – Régulateur de courant i_d	61
II.4.1.2.1.2 – Régulateur de courant i_q	61
II.4.1.2.1.3 – Régulateur de la vitesse Ω_g	61
II.4.2 – Contrôle de la liaison au réseau	62
II.4.2.1 – Contrôle de la tension du bus continu	62
II.4.2.1 – Contrôle des courants circulant dans le filtre RL	64
II.5 – Résultats de Simulation	66
II.6 – Conclusion	70
 Chapitre III : Modélisation et réglage d'un compensateur statique STATCOM 	
III.1 – Introduction	73
III.2 – Typologie des dispositifs FACTS	74
III.2.1 – Dispositifs FACTS shunt	74
III.2.1.1 – Compensateur statique d'énergie réactive (SVC)	74
III.2.1.2 – Résistance de freinage contrôlée par thyristors (TCBR)	75
III.2.1.3 – Compensateur synchrone statique (STATCOM)	75
III.2.2 – Dispositifs FACTS série	76
III.2.2.1 – Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)	76
III.2.2.2 – Compensateur série commuté par thyristor (TSSC)	77
III.2.2.3 – Compensateur série contrôlée par thyristors (TCSR)	77
III.2.2.4 – Compensateur série commuté par thyristor (TSSR)	78
III.2.2.5 – Compensateur Synchrone Statique Série (SSSC)	78
III.2.2.6 – Condensateur série commandé par thyristors GTO (GCSC)	79
III.2.3 – Dispositifs FACTS hybride	79
III.2.3.1 – Transformateur déphaseur contrôlé par thyristors (TCPST)	79

III.2.3.2 – Régulateur de phase contrôlé par thyristors (TCPAR)	80
III.2.3.3 – Régulateur de tension contrôlé par thyristors (TCVR)	81
III.2.3.4 – Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)	81
III.2.3.5 – Contrôleur de flux de puissance entre lignes (IPFC)	82
III.3 – Compensation d'énergie réactive	83
III.4 – Modélisation et réglage d'un STATCOM	83
III.4.1 – Structure d'un STATCOM	83
III.4.2 – Fonctionnement d'un STATCOM	84
III.4.3 – Modélisation du STATCOM	85
III.4.3.1 – Modèle mathématique simplifié	86
III.4.3.2 – Modèle mathématique du circuit DC	87
III.4.4 – Réglage du compensateur statique STATCOM	87
III.4.4.1 – Boucle de régulation des courants	88
III.4.4.2 – Calcul de régulateur de courant (PI analogique)	90
III.4.4.3 – Calcul de régulateur de la tension continue V_{dc}	92
II.5 – Résultats de Simulation	93
II.6 – Conclusion	95
 Chapitre IV : Couplage d'une GSAP – STATCOM au réseau électrique perturbé	
IV.1 – Introduction	98
IV.2 – Micro-réseaux électriques	98
IV.2.1 – Les avantages des micro-réseaux	99
IV.3 – Présentation du micro-réseau de test	99
IV.4 – Résultats de simulations	100
IV.4.1 – Variation de la vitesse du vent	101
IV.4.2 – Variation de la charge	105
IV.4.3 – Apparition d'un défaut de court-circuit	109
IV.5 – Conclusion	113
Conclusion générale	115
Annexes	118
Références bibliographie	125

Liste des Figures

Figure I.1	Les cinq familles d'énergies renouvelables	8
Figure I.2	Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	9
Figure I.3	Hydrolienne	10
Figure I.4	Centrale thermique solaire	11
Figure I.5	Principe de fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque	12
Figure I.6	Principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse	13
Figure I.7	Principe de fonctionnement d'une centrale géothermie	14
Figure I.8	Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne	15
Figure I.9	Centrale hybride solaire-gaz de Hassi R'mel	17
Figure I.10	Ferme éolienne de 10 MW du site Kaberten	17
Figure I.11	Centrale photovoltaïque de 10 MW	18
Figure I.12	Principe de la conversion d'énergie éolienne	19
Figure I.13	Exemple d'éolienne à axe vertical	20
Figure I.14	Exemple d'éolienne à axe horizontal	21
Figure I.15	Composants d'une éolienne à axe horizontal	22
Figure I.16	Configuration de base d'un système éolien connecté au réseau	23
Figure I.17	Machine asynchrone à cage d'écureuil connectée directement au réseau	24
Figure I.18	Machine asynchrone à cage d'écureuil connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.	26
Figure I.19	Schéma d'une éolienne à vitesse variable à base de GADA	27
Figure I.20	GADA avec contrôle du glissement par L'énergie dissipée.	27
Figure I.21	GADA structure Kramer	28
Figure I.22	Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.	28

Listes des Figures et Tableaux

Figure I.23	Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau	29
Figure I.24	Système d'éolienne avec une génératrice synchrone à rotor bobiné	30
Figure I.25	Couplage unidirectionnel simple d'une GSAP au réseau	32
Figure I.26	Couplage unidirectionnel avec un convertisseur Boost d'une GSAP	32
Figure I.27	Couplage bidirectionnel d'une GSAP au réseau	33
Figure II.1	Système de conversion éolienne à base de GSAP	38
Figure II.2	Système mécanique de l'éolienne	39
Figure II.3	Schéma de la turbine éolienne	40
Figure II.4	Coefficient de puissance (C_P) en fonction de λ pour différents β	41
Figure II.5	Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	43
Figure II.6	Exemple d'une structure à rotor interne et à rotor externe	44
Figure II.7	Représentation d'une machine synchrone dans le repère abc	45
Figure II.8	GSAP dans le repère (d, q) de Park	46
Figure II.9	Convertisseur Back to Back à deux niveaux	49
Figure II.10	Schéma de l'association GSAP – Redresseur MLI	49
Figure II.11	Représentation du bus continu	51
Figure II.12	Schéma électrique du filtre	52
Figure II.13	Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents	53
Figure II.14	Zones de fonctionnement d'une turbine éolienne	54
Figure II.15	La puissance mécanique en fonction de la $\Omega_{méc}$ avec MPPT	55
Figure II.16	Schéma bloc de la MPPT sans asservissement de la vitesse	57
Figure II.17	Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse	58
Figure II.18	Schéma de principe de la commande vectorielle de GSAP	59
Figure II.19	Boucle de régulation du courant i_{sd}	61

Listes des Figures et Tableaux

Figure II.20	Boucle de régulation du courant i_{sq}	61
Figure II.21	Boucle de régulation de la vitesse	61
Figure II.22	Principe de la commande du CCR	62
Figure II.23	Boucle de régulation de la tension du bus continu	64
Figure II.24	Boucle de régulation des courants dans le filtre RL	65
Figure II.25	Schéma de principe de commande du CCR	65
Figure II.26	Schéma global de la commande du système éolienne à base de GSAP	66
Figure II.27	Profil du vent	67
Figure II.28	Vitesse mécanique de la turbine éolienne en fonction du temps	67
Figure II.29	Couple électromagnétique en fonction du temps	67
Figure II.30	Allure du courant coté machine i_{sq} et i_{sd}	68
Figure II.31	Allure du courant coté réseau i_{tq} et i_{td}	68
Figure II.32	Tension du bus continue v_{dc}	69
Figure II.33	Puissance active P_g et réactive Q_g d'une éolienne	69
Figure II.34	Puissance active P_g et réactive Q_g de trois éoliennes	69
Figure III.1	Structure de base d'un SVC	75
Figure III.2	Schéma d'un TCBR	75
Figure III.3	Schéma de base d'un STATCOM	76
Figure III.4	Schéma de base d'insertion d'un TCSC dans une ligne	77
Figure III.5	Schéma de principe de TSSC	77
Figure III.6	Schéma de principe du TCSR	78
Figure III.7	Schéma de principe du SSSC	78
Figure III.8	Schéma de principe du GCSC	79
Figure III.9	Schéma de principe du TCPST	80

Figure III.10	Schéma de principe du TCPAR	80
Figure III.11	Structure de base d'un TCVR	81
Figure III.12	Structure de base d'un UPFC connecté au réseau électrique	82
Figure III.13	Structure de base d'un IPFC connecté au réseau électrique	82
Figure III.14	Structure de base du STATCOM	84
Figure III.15	Diagramme vectoriel du STATCOM	85
Figure III.16	Caractéristique statique du STATCOM	85
Figure III.17	Circuit équivalent du STATCOM	86
Figure III.18	Schéma de principe de circuit de réglage complet du STATCOM	88
Figure III.19	Système en boucle ouverte	89
Figure III.20	Schéma de découplage	89
Figure III.21	Réglage du compensateur parallèle avec découplage	90
Figure III.22	Schéma bloc de régulation PI des courants du STATCOM	90
Figure III.23	Régulation de la tension continue	92
Figure III.24	Structure du modèle de simulation	93
Figure III.25	Variation de tension de réseau	94
Figure III.26	Variation des puissances active et réactive injectées	94
Figure III.27	Variation du courant i_{shq} injecté par STATCOM	94
Figure III.28	Variation du courant i_{shd} injecté par STATCOM	95
Figure III.29	Variation de tension du bus continu	95
<hr/>		
Figure IV.1	Exemple d'un micro-réseau	98
Figure IV.2	Configuration du micro-réseau étudié	100
Figure IV.3	Le chemin de l'énergie au niveau du nœud de la charge	101
Figure IV.4	Variation de la tension de charge	102

Listes des Figures et Tableaux

Figure IV.5	Puissance active et réactive générée par l'éolien	102
Figure IV.6	Puissance active et réactive générée par le réseau (avec STATCOM)	103
Figure IV.7	Puissance active et réactive injectée par le STATCOM	103
Figure IV.8	Puissance active et réactive de la charge (sans STATCOM)	103
Figure IV.9	Puissance active et réactive générée par le réseau (sans STATCOM)	104
Figure IV.10	Puissance active et réactive de la charge (avec STATCOM)	104
Figure IV.11	Tension continue du STATCOM	104
Figure IV.12	Tension continue de l'éolienne	105
Figure IV.13	Variation de la tension de charge	106
Figure IV.14	Puissance active et réactive générée par l'éolien	106
Figure IV.15	Puissance active et réactive générée par le réseau (avec STATCOM)	106
Figure IV.16	Puissance active et réactive injectée par STATCOM	107
Figure IV.17	Puissance active et réactive de la charge (avec STATCOM)	107
Figure IV.18	Puissance active et réactive générée par le réseau (sans STATCOM)	107
Figure IV.19	Puissance active et réactive de la charge (sans STATCOM)	108
Figure IV.20	Tension continue du STATCOM	108
Figure IV.21	Tension continue de l'éolienne	108
Figure IV.22	Variation de la tension de charge	109
Figure IV.23	Puissance active et réactive générée par l'éolien	110
Figure IV.24	Puissance active et réactive générée par le réseau (avec STATCOM)	110
Figure IV.25	Puissance active et réactive injectée par STATCOM	111
Figure IV.26	Puissance active et réactive de la charge (avec STATCOM)	111
Figure IV.27	Puissance active et réactive générée par le réseau (sans STATCOM)	111
Figure IV.28	Puissance active et réactive de la charge (sans STATCOM)	112
Figure IV.29	Tension continue du STATCOM	112

Figure IV.30 Tension continue de l'éolienne	113
--	-----

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale	19
---	----

Liste des Symboles

Symboles	Paramètre	Unité
C	Capacité du condensateur du bus continu	F
C_1, C_2, C_3	Signaux de commutation de convertisseur	
C_{aer}	Couple aérodynamique de la turbine	$N.m$
$C_{aer-est}$	Couple éolien estimé	$N.m$
C_{em}	Couple électromagnétique de la génératrice	$N.m$
C_{em-ref}	Couple électromagnétique de référence de la génératrice	$N.m$
C_f	Couple des frottements visqueux	$N.m$
C_g	Couple issu du multiplicateur	$N.m$
C_m	Couple moteur appliqué sur la génératrice	$N.m$
C_{mec}	Couple mécanique appliqué à l'arbre de la génératrice	$N.m$
C_p	Coefficient de puissance de la turbine éolienne	-
C_{p-max}	Coefficient de puissance maximal de la turbine éolienne	-
Db	Coefficient de frottement par rapport à l'air	-
Dg	Coefficient de frottement de l'arbre de la génératrice	-
Dh	Coefficient de l'arbre d'entraînement de la turbine éolienne	-
e_{sd}, e_{sq}	Grandeurs sont considérées comme des perturbations	-
F	Coefficient de frottements visqueux	-
f_{pale}	Coefficient de frottement par rapport au support des pales éolien	-
G	Gain du multiplicateur	-
i_c	Courant capacitif traversant le condensateur du bus continu	A
i_{mc}	Courant continu modulé par le convertisseur côté machine	A
i_{rc}	Courant continu modulé par le convertisseur côté réseau	A
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants statoriques	A
i_{sd}, i_{sq}	Composantes directes et en quadrature de courant	A
i_{sd-ref}, i_{sq-ref}	Référence de la composante directe et quadrature du courant	A
i_{ta}, i_{tb}, i_{tc}	Courants circulant dans le filtre et fournis au réseau	A
i_{td}, i_{tq}	Composante directe et quadratique des courants du filtre	A
J	Moment d'inertie totale ramenée au rotor de la génératrice	$Kg.m^2$
J_g	Moment d'inertie de l'arbre de la génératrice	$Kg.m^2$
J_h	Moment d'inertie de l'arbre d'entraînement de la turbine éolienne	$Kg.m^2$

Liste des Symboles et Abréviations

J_{pale}	Moment d'inertie de chaque pale de la turbine éolienne	$Kg.m^2$
J_{tur}	Moment d'inertie de la turbine	$Kg.m^2$
K_b	Coefficient d'élasticité des pales de la turbine éolienne	-
K_h	Élasticité d'arbre d'entraînement de la turbine éolienne	Pa
K_i	Gain intégral	-
K_p	Gain proportionnel	-
L	Inductances de la ligne électrique	H
L_{sh}	Inductances du transformateur de couplage	H
L_{sd}, L_{sq}	Inductances directes et en quadrature	H
P	Nombre de pair de pole	-
P	Puissance active	W
P_{em}	Puissance électromagnétique	W
P_j	Pertes par effet joule	W
P_{mag}	Variation de l'énergie magnétique emmagasinée.	W
P_{mec}	Puissance mécanique capturée à partir de la turbine	W
P_{nom}	Puissance nominale de la génératrice	W
P_{tur}	Puissance de turbine éolienne	W
P_v	Energie cinétique du vent	W
$P(\theta)$	Matrice de PARK	-
$P(\theta)^{-1}$	Matrice inverse de PARK	-
$P(\Omega)$	Fonction de la vitesse angulaire d'une turbine éolienne	-
Q	Puissance réactive	VAR
R	Longueur de la pale	m
R_f	Résistance de ligne électrique	Ω
R_s	Résistance d'une phase statorique	Ω
R_{sh}	Résistance du transformateur de couplage	Ω
R_Ω	Régulateur de vitesse (PI)	-
S	Surface circulaire balayée par la turbine	m^2
S_a, S_b, S_c	États des interrupteurs haut des trois bras de l'onduleur	-
T_e	Constante de temps électrique	-
T_t	Couple des pales d'éolienne	$N.m$
v_{dc}	Tension aux bornes du condensateur du bus continu	V
v_{ma}, v_{mb}, v_{mc}	Tensions simples modulées par le convertisseur MLI	V
v_{md}, v_{mq}	Tensions modulées par le convertisseur dans le référentiel de Park	V

Liste des Symboles et Abréviations

v_{rd}, v_{rq}	Tensions du réseau dans la référence de Park	V
v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}	Tensions simples appliquées aux bornes du transformateur	V
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tensions statoriques	V
v_{sd}, v_{sq}	Composantes directes et en quadrature de tension	V
v_{sd_ref}, v_{sq_ref}	Référence de la composante directe et quadrature de tension	V
V_{abc-sh}	Tension ajustable du STATCOM	V
V_{vent}	Vitesse de vent	m/s
X_T	Réactance de fuite du transformateur de couplage	Ω
A	Angle d'un jeu de barre	degré
B	Angle d'orientation des pales	degré
Bb	Vitesse d'orientation des pales de la turbine éolienne	N.m
Δ	Angle de transport de la ligne électrique	degré
Θ	Position absolue du rotor en degré électrique	N.m
λ	Ratio de vitesse	-
λ_{opt}	Ratio de vitesse optimale	-
ρ	Densité de l'air = 1,225	kg/m ³
$\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$	Flux totaux traversant les bobines statoriques	Wb
ψ_{sd}, ψ_{sq}	Composantes directes et en quadrature du flux	Wb
ψ_f	Flux des aimants permanents.	Wb
Ω_{mec}	Vitesse de rotation mécanique de la génératrice	rad/s
$\Omega_{mec-ref}$	Vitesse mécanique de référence de la génératrice	rad/s
Ω_{tur}	Vitesse de rotation mécanique de la turbine éolienne	rad/s
ω_r	Pulsation des tensions du réseau	rad/s

Liste des Abréviations

AC-DC-AC	Alternatif - Continu – Alternatif
CCM	Convertisseur Côté Machine
CCR	Convertisseur Côté Réseau
CERFE	Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
FMM	Forces Magnetometries
GACE	Génératrices à Cage d'Ecureuil
GADA	Générateurs Asynchrones à Double Alimentation
GCSC	GTO Thyristor-Cotrolled Series Capacitors
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent
GSRB	Génératrice Synchrone à Rotor Bobiné
GTO	Gate Turn-Off thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IPFC	Interline Power Flow Controller
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsion
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracker
MSAP	Moteurs Synchrones à Aimant Permanent
MTV	Multiplicateur de Vitesse
PCC	Point de Couplage Commun
PI	Proportional-Integral
PLL	Phase Locked Loop

RL	Filtre passif
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static Var Compensator
TCBR	Thyristor Control Breaking Resistor
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
TCPST	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor
TCVR	Thyristor Controlled Voltage Regulator
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TSSR	Thyristor Switched Series Reactor
UPFC	Unified Power Flow Controller

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie électrique est un défi important pour les années à venir, avec l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques. Cette évolution, laisse affirmer une augmentation considérable de la consommation en énergie [1]. La grande partie de la production mondiale de l'énergie est assurée à partir des ressources fossiles, A ce rythme, les réserves d'énergies fossiles ne pourront couvrir les besoins que pour quelques décennies seulement, car une consommation excessive des ressources naturelles réduit les réserves de façon préoccupante pour les générations futures [2]. Face à la crise énergétique qui laisse présager la fin des énergies fossiles, de nombreux pays dans le monde interviennent alors, par des investissements massifs, pour promouvoir les énergies renouvelables [3].

Le développement des énergies renouvelables est devenu indispensable non seulement pour arrêter le déclin de ses réserves en ressources fossiles mais aussi pour lutter contre les problèmes de pollution due aux émissions de gaz et de réchauffement climatique dû à l'effet de serre [4]. Les énergies nouvelles regroupent classiquement un ensemble d'énergies inépuisables à l'échelle humaine avec des sources d'énergies gratuites et naturelles. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité [5]. Parmi ces énergies, l'énergie éolienne apparait actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable [6].

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique de l'air en mouvement en énergie mécanique puis en électricité. Une grande partie du parc éolien actuel est constitué de systèmes raccordés au réseau électrique [7]. Jusqu'à présent, il existe deux catégories d'éoliennes : les éoliennes à vitesse fixe directement couplées au réseau par le stator et les éoliennes à vitesse variable connectées à travers des convertisseurs d'électronique de puissance [8]. La deuxième catégorie permet d'augmenter le rendement énergétique, de diminuer les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe [9].

En outre, le choix du type de la génératrice électrique utilisée dans une chaîne de conversion éolienne pour produire de l'énergie électrique avec un bon rendement et à moindre coût. Parmi les différents types de génératrices électriques on trouve deux principaux types : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) : elle présente de bonnes performances dynamiques et une forte robustesse. Cependant, la consommation de puissance réactive et la nécessité d'une boîte à vitesses représentent les principaux désavantages qui mènent à des dysfonctionnements dans la chaîne de conversion d'énergie éolienne [10].

Afin d'augmenter l'efficacité de la production électrique et d'améliorer le rendement énergétique, une alternative à base des Génératrices Synchrones à Aimants Permanents (GSAP) est apparue [11]. La GSAP permet de réduire le coût de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, d'accroître son efficacité et de garantir une meilleure fiabilité par rapport au système éolien basé sur la GADA. La GSAP présente d'autres avantages notamment l'auto-excitation des aimants permanents, un couple massique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances. En plus, ce type de génératrices permet de fonctionner sans multiplicateur de vitesse contrairement à la génératrice asynchrone à double alimentation [12].

L'intégration du parc éolien au réseau électrique met en question sa stabilité transitoire et dynamique. Pour leur raccordement au réseau, les éoliennes utilisent de plus en plus des FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) pour l'amélioration de la stabilité du réseau en compensant l'énergie réactive, d'une part, et contrôler le flux des puissances d'autre part [13].

Organisation du manuscrit

Le but de ce travail est d'étudier la stabilité d'une centrale éolienne à base de GSAP connectée à un réseau électrique en présence d'un système FACTS appelé STATCOM (Static Synchronous Compensator) et à son action sur un réseau électrique pour la compensation de la puissance réactive et l'amélioration de stabilité transitoire. Cette simulation oblige l'utilisation d'un certain nombre d'étapes. Ces étapes sont divisées en quatre chapitres organisés de la manière suivante :

Le premier chapitre, présente les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, il est aussi consacré à la description des différents types d'éoliennes, leurs caractéristiques technologiques, leurs systèmes de conversion électromécanique à travers les différents types de machines électriques utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et réglage d'une centrale éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel. Les résultats de simulations obtenus permettent d'évaluer la commande vectorielle à flux orienté avec la méthode d'extraction du maximum de la puissance du vent (MPPT).

Le troisième chapitre donne une présentation générale incluant la définition et la classification des différents types de dispositifs FACTS. Un traitement particulier sera réservé au compensateur statique STATCOM, où nous présenterons le principe de fonctionnement ainsi que la modélisation et le réglage de ce compensateur statique.

Le quatrième chapitre présente des simulations par Matlab/Simulink sur le système étudié, où trois scénarios de défauts sont simulés et discutés. Les résultats sont analysés afin d'évaluer l'impact du STATCOM sur la qualité de la tension et son efficacité pour faciliter l'intégration des éoliennes dans un micro-réseau.

Finalement, cette thèse sera clôturée par une conclusion générale et des perspectives pour les travaux de recherche dans le futur et quelques annexes sont insérées à la fin.

Chapitre I :

Généralités sur les énergies éoliennes

Sommaire

I.1 – Introduction	7
I.2 – Énergies renouvelables	7
I.2.1 – Types des énergies renouvelables	7
I.2.1.1 – L'énergie hydraulique	8
I.2.1.2 – L'énergie solaire	10
I.2.1.3 – L'énergie biomasse	13
I.2.1.4 – L'énergie géothermique	14
I.2.1.5 – L'énergie éolienne	15
I.2.2 – Réalité des énergies renouvelables en Algérie	15
I.2.2.1 – Programme d'Algérie des énergies renouvelables	16
I.2.2.2 – Les projets réalisés d'ici fin 2023	16
I.3 – Conversion d'énergie éolienne	19
I.3.1 – Types des éoliennes	20
I.3.1.1 – Éoliennes à axe vertical	20
I.3.1.2 – Éoliennes à axe horizontal	21
I.3.2 – Structures des énergies éoliennes	21
I.3.3 – Architectures des éoliennes connectées au réseau électrique	23
I.3.3.1 – Éoliennes à vitesse fixe	23
I.3.3.2 – Éoliennes à vitesse variable	25
I.3.4 – Topologies de génératrices éoliennes à vitesse variable	25
I.3.4.1 – Éoliennes utilisant les machines asynchrones	25
I.3.4.1.1 – Générateur asynchrone à cage d'écureuil	25
I.3.4.1.2 – Générateur asynchrone à double alimentation	26
I.3.4.2 – Éoliennes utilisant les machines synchrones	29
I.3.4.2.1 – Générateur synchrone à rotor bobiné	30
I.3.4.2.2 – Générateur synchrone à aimant permanent	31
I.4 – Conclusion	34

I.1 – Introduction

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le développement des activités industrielles. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution [14].

Les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures [15].

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, plusieurs pays se tournent vers une nouvelle forme d'énergie dite "renouvelable".

I.2 – Énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée, regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [16].

Une énergie est dite renouvelable lorsque la source d'énergie dont elle est extraite se renouvelle naturellement et en continu. L'énergie renouvelable est généralement propre, c'est à dire qu'elle ne produit pas ou très peu d'émissions polluantes et participe ainsi à la réduction des gaz à effet de serre dans l'atmosphère [17].

I.2.1 – Types des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont aujourd'hui la cote et font couler beaucoup d'encre, car elles représentent une option durable pour l'avenir. Deux grandes sources existent historiquement pour celles-ci, le soleil et la terre [18]. Les spécialistes ont cependant tendance à classer ces énergies en cinq familles, en fonction de leurs spécificités, que nous vous présenterons ci-dessous (figure I.1).

1. **L'énergie hydraulique** s'obtient par l'exploitation de l'eau via les courants marins et les barrages. Les mouvements de l'eau actionnent les turbines qui ainsi produisent de l'énergie électrique.
2. **L'énergie solaire** est obtenue à partir du rayonnement du soleil. En effet, la lumière du soleil est transformable en électricité ou en chaleur.
3. **L'énergie biomasse** est issue de la combustion du bois ou la méthanisation de matières organiques. Elle peut produire aussi bien de l'électricité que de la chaleur ou du carburant.
4. **L'énergie géothermie** est l'extraction de la chaleur contenue dans le sol. Elle peut produire de la chaleur comme de l'électricité.
5. **L'énergie éolienne** est obtenue à partir de l'énergie cinétique du vent captée par une éolienne. Elle permet de produire de l'électricité à partir du déplacement de la masse d'air.

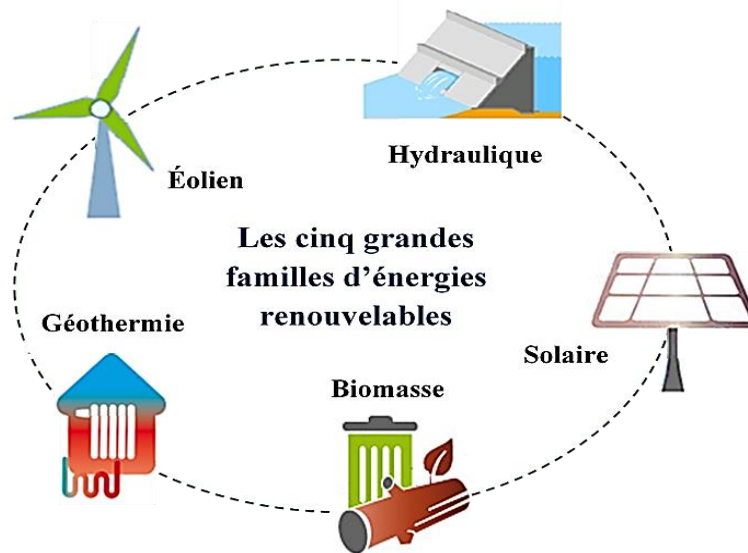


Figure I.1 : Les cinq familles d'énergies renouvelables [19]

I.2.1.1 – L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, vagues. Ce mouvement peut être

utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, en énergie électrique. Il existe principalement deux façons d'utiliser directement l'énergie hydraulique : l'hydroélectrique et l'hydrolienne [20].

a. Énergie hydroélectrique

L'hydroélectricité est l'une des énergies renouvelables les plus développées dans le monde. Elle met à profit l'énergie de l'eau qui se déplace d'un point haut vers un point bas, essentiellement pour produire de l'électricité. Les projets de production de cette énergie englobent des projets de barrages, de centrales d'éclusées ou au fil de l'eau. Les barrages, en particulier, offrent un avantage majeur, car ils permettent de stocker de très grandes quantités d'énergie potentielle qui seront éventuellement converties en énergie électrique (Figure I.2) [21].

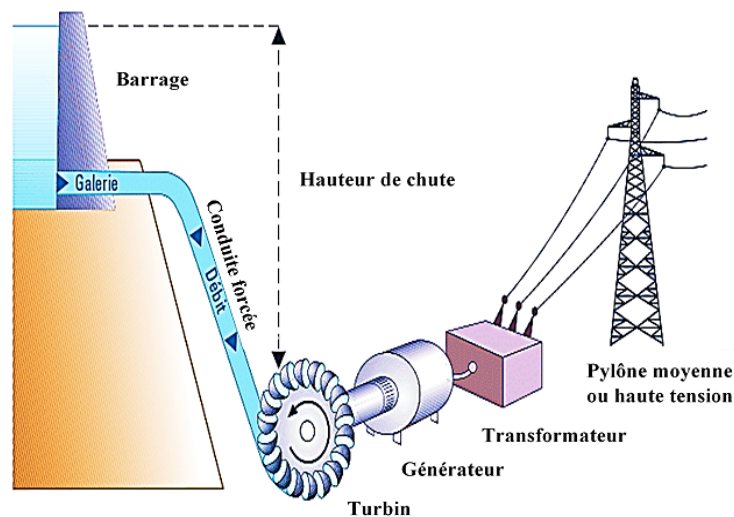


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique [22]

L'eau accumulée dans un barrage élevé contient de l'énergie potentielle qui se transforme en énergie mécanique lorsqu'elle descend dans le canal d'amenée ou conduite forcée et frappe les aubes d'une turbine. La rotation de la turbine fait tourner l'alternateur celui-ci transforme cette énergie mécanique en énergie électrique [23].

b. Énergie hydrolienne

L'énergie marine (hydrolienne) est une source d'énergie renouvelable qui dépend des ressources naturelles des eaux de la mer et des océans. Elle permet de fabriquer de

l'électricité, essentiellement grâce aux mouvements de ces eaux. L'eau recouvre en grande partie notre planète, principalement à travers les mers et les océans. Elle constitue donc une source d'énergie importante, aujourd'hui encore peu exploitée. Les énergies marines n'émettent aucun gaz à effet de serre et leur matière première est disponible dans de nombreux pays du monde [17].

L'hydrolienne c'est une turbine hydraulique, qui utilise l'énergie des courants marins comme une éolienne utilise l'énergie du vent. La turbine d'hydrolienne permet la transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur.

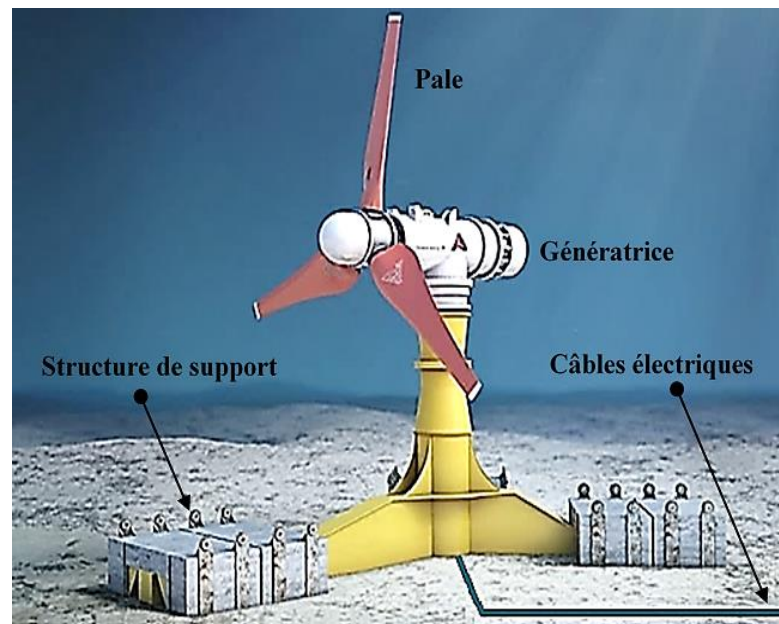


Figure I.3 : Hydrolienne [24]

I.2.1.2 – L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Il existe principalement deux façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermique et le photovoltaïque [25].

a. Énergie solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil. Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité [26].

Une autre technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par échange thermique pour ensuite produire de l'électricité à l'échelle industrielle au moyen d'une turbine couplée à un alternateur [27]. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante

Cette énergie solaire thermodynamique est semblable au principe d'une centrale électrique classique. La combustion du charbon, fioul ou gaz produit de la chaleur qui transforme l'eau de la chaudière en vapeur qui elle fait tourner une turbine reliée à un alternateur, celui-ci produit un courant électrique.

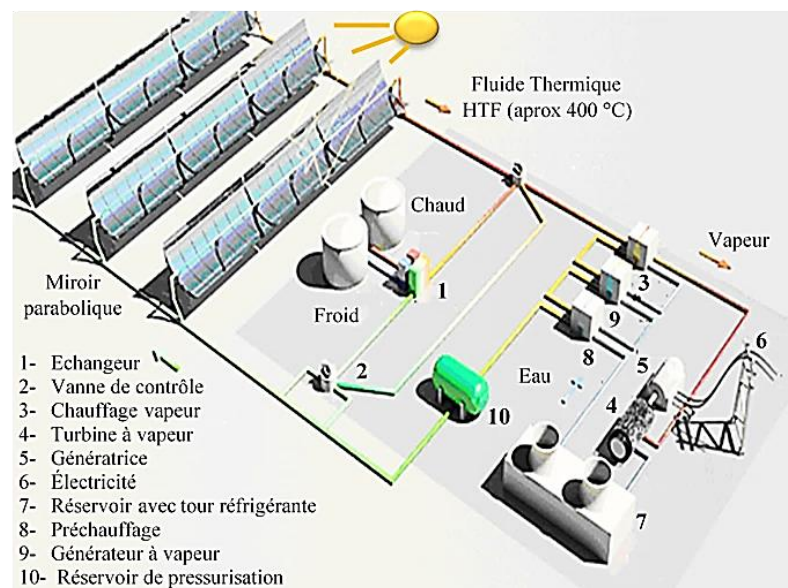


Figure I.4 : Centrale thermique solaire [16]

b. Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière, sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures ont tendance à être arrachés. Si l'électron revient à son état initial l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons arrachés créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique [26].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire [25].

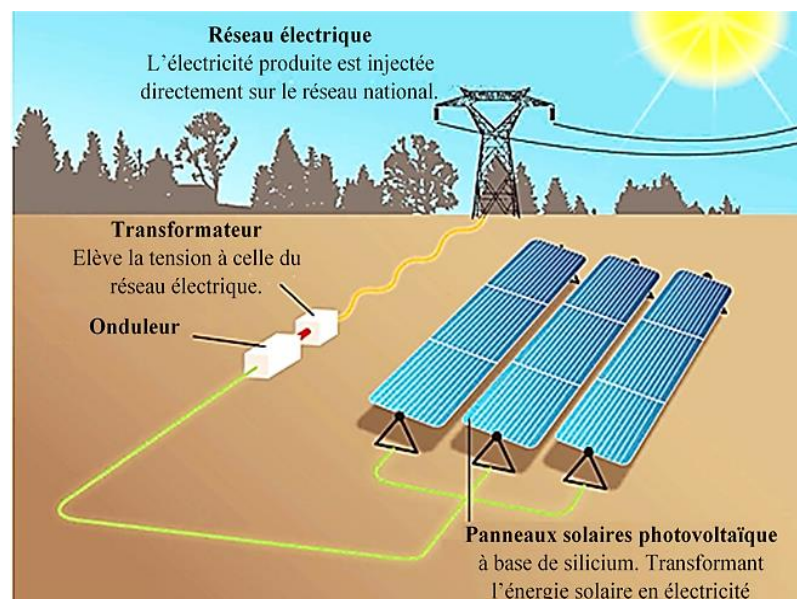


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque [28]

I.2.1.3 – L'énergie biomasse

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des bioénergies, le terme de biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques (agro carburant).

L'énergie tirée de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable et soutenable tant qu'il n'y a pas surexploitation de la ressource. De plus, bien que présentant de nombreux avantages écologiques et en termes de développement local, elle peut être polluante (CO, CO₂, fumées, goudrons) si elle est mal employée ou si la biomasse est contaminée ou polluée par des métaux lourds, radionucléides, etc. (sachant que les ressources fossiles sont également naturellement contaminées par des métaux, souvent plus que le bois) [17].

Le principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse est très simple, il est même en réalité similaire à celui d'une chaudière. Globalement, la chaleur produite par la combustion va chauffer un réservoir d'eau qui produira alors de la vapeur. Cette vapeur d'eau à haute pression entraîne une turbine reliée à un générateur qui produit de l'électricité.

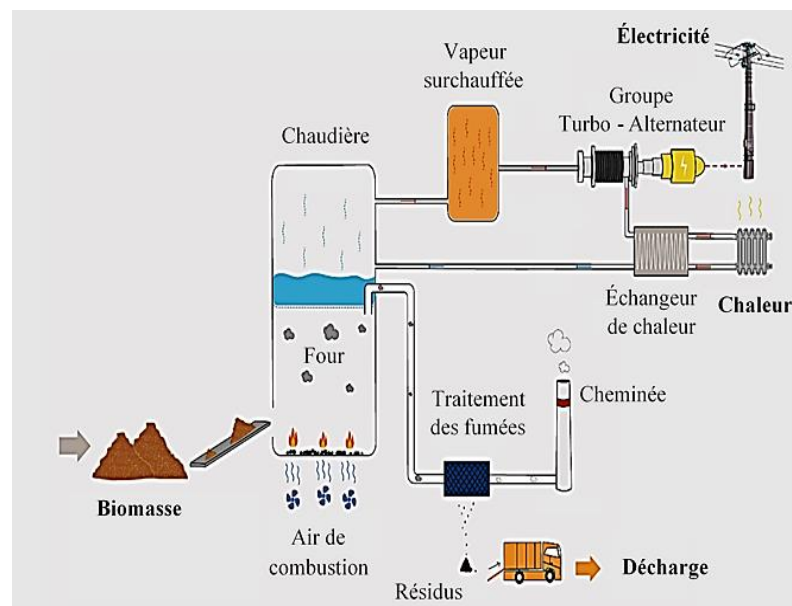


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'une centrale à biomasse [29]

I.2.1.4 – L'énergie géothermique

L'énergie géothermique est une source d'énergie renouvelable qui est obtenue à partir de la chaleur du sous-sol. C'est une forme d'énergie propre sans émission de dioxyde de carbone. La température dans les couches internes de la terre reste constante pendant les différentes saisons de l'année. Les couches internes de la croûte terrestre sont plus chaudes que la surface en hiver et plus fraîches en été. Parfois, cette énergie est liée à d'autres phénomènes géologiques tels que la présence de geysers, de volcans ou de sources chaudes. Ces phénomènes facilitent grandement la possibilité d'extraire de l'énergie thermique dans des installations proches de ces zones [30].

Le système de production d'énergie géothermique est basé sur la différence de température entre le sous-sol et la surface. L'énergie est échangée sous forme de chaleur au moyen de deux circuits d'eau fermés interconnectés. Une pompe à chaleur géothermique extrait de l'eau chaude de l'intérieur de la terre. Le liquide est chaud à cause de la chaleur stockée au sous-sol. Au fur et à mesure que le système utilise cette énergie le liquide se refroidit et est retourné au sous-sol [31].

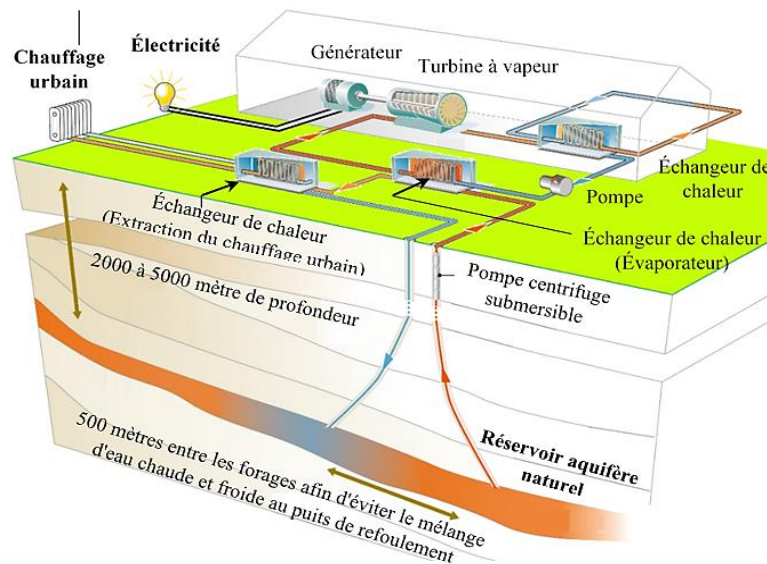


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une centrale géothermie [32]

Trois types de géothermie existent selon la température de gisement : la haute ($>180^{\circ}\text{C}$), moyenne ($>100^{\circ}\text{C}$), basse ($>30^{\circ}\text{C}$). Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. Le troisième type permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, utilisation de chaleur dans les processus industriels.

I.2.1.5 – L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui dépend du vent. La ressource éolienne vient du déplacement des masses d'air. Le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres créent une différence de pression et ainsi le déplacement des masses d'air. Le vent ainsi créé permet de faire tourner des pales d'une éolienne qui entraînent un générateur celui-ci produit de l'électricité [14].

Les technologies utilisées pour la production éolienne seront développées dans la suite de ce chapitre.

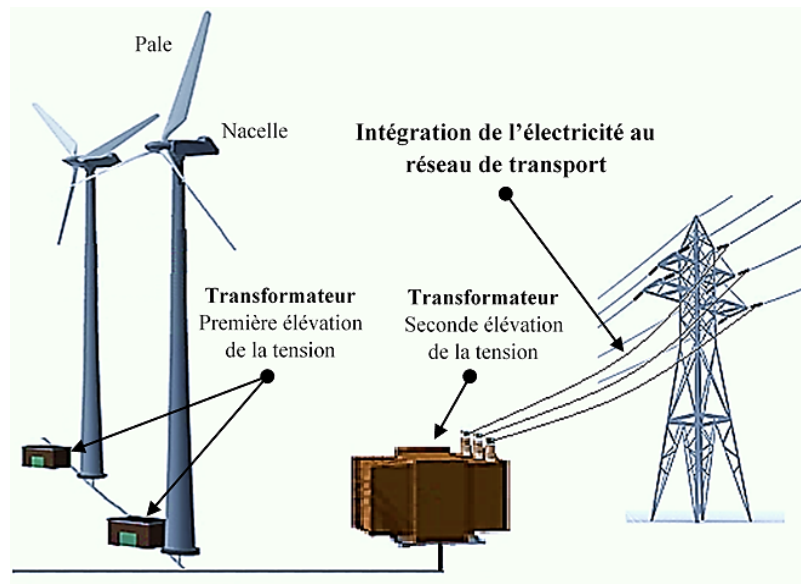


Figure I.8 : Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne [33]

I.2.2 – Réalité des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie est un pays où les énergies fossiles sont disponibles en abondance. Dixième réserve mondiale de gaz et troisième réserve africaine de pétrole. En effet, l'Algérie repose exclusivement sur les combustibles fossiles (98 %) pour répondre aux besoins croissants d'électricité de sa population. Cette croissance continue à la demande interne d'énergie (pétrole & gaz), les risques d'épuisement de ces ressources ainsi que le réchauffement climatique, font clairement apparaître la nécessité d'engager une transition énergétique vers un modèle plus durable. La transition énergétique peut se définir comme le passage d'une civilisation humaine construite sur une énergie essentiellement fossile, polluante et abondante à une civilisation où l'énergie est

renouvelable, rare et moins polluante ayant pour objectif le remplacement à terme des énergies de stock (pétrole, charbon, gaz ;...) par les énergies de flux (éolien, solaire, biomasse, ...) [34].

I.2.2.1 – Programme d’Algérie des énergies renouvelables

Pour ce faire, le gouvernement a adopté en 2011 un programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique. Ce programme consiste à installer une puissance d’origine renouvelable de près de 22 GW entre 2011 et 2030 dont 12 GW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 GW à l’exportation. A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politique énergétique et économique menées par l’Algérie : d’ici 2030, environ 40 % de la production d’électricité destinée à la consommation nationale. L’énergie solaire constitue l’axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle devrait atteindre plus de 37 % de la production nationale d’électricité, l’éolien constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3 % de la production d’électricité en 2030 [35].

Le programme des énergies renouvelables est défini ainsi pour différentes phases :

- A l’horizon 2015 : Une puissance totale de près de 650 MW serait installée ;
- 2016 - 2020 : La puissance installée devrait atteindre environ 2600 MW ;
- Une capacité supplémentaire d’environ 12 000 MW devrait être installée d’ici 2030 et une possibilité d’exportation jusqu’à 10 000 MW.

I.2.2.2 – Les projets réalisés d’ici fin 2023

Un bilan des réalisations effectives dans le domaine des énergies renouvelables, établi par le Commissariat aux énergies renouvelables et à l’efficacité énergétique (CEREFÉ), fait ressortir l’installation d’une capacité totale d’environ 600.9 MW dont 472 MW hors hydroélectricité. Selon le quatrième bilan des réalisations, l’Algérie a réalisé une capacité de 424,15 MW en mode raccordé au réseau et 47,85 MW en mode autonome (hors réseau) [36]. Voici la liste des installations de génération d’électricité à base de ressources renouvelables connectées au réseau :

1. Centrale Hybride Solaire-Gaz de 150 MW :

La première centrale hybride solaire-gaz a été inaugurée le 14 Juillet 2011. Située à Hassi R'mel (Figure I.9). Elle est implantée sur un terrain qui s'étend sur une superficie de 130 hectares. Elle produit 150 MW avec un apport solaire de 20% de la puissance nominale, soit 30 MW [37].



Figure I.9 : Centrale hybride solaire-gaz de Hassi R'mel [33]

2. Ferme Eolienne de 10 MW :

La première ferme éolienne de 10 MW a été installée et mise en service en juin 2014, dans la région de Kaberten dans la wilaya d'Adrar (Figure I.10) [38].



Figure I.10 : Ferme éolienne de 10 MW du site Kaberten

Cette centrale de production d'électricité, première du genre à l'échelle nationale, est constituée de 12 éoliennes Gamesa de 850 KW de puissance, implantées sur une superficie de 30 hectares. Les turbines utilisées dans cet édifice sont à rotor tripale de 52 m de diamètre de type « G52/850/50-60Hz », équipées par des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA).

3. Centrale photovoltaïque de 10 MW :

Cette centrale de 10 MW à Bir Rebaa Nord (Ouargla) sera opérationnelle en décembre 2017. Elle s'étendra sur une superficie de 20 hectares et utilisera près de 32000 panneaux solaires (Figure I.11), ce qui permettra d'économiser l'équivalent de 6 millions de m³ de gaz par an [36].



Figure I.11 : Centrale photovoltaïque de 10 MW

Par ailleurs, une capacité totale de 343 MW est fournie par une vingtaine de centrales solaires photovoltaïques, réalisées entre 2014 et 2017 dans les Hauts Plateaux et le sud de l'Algérie. Quant aux réalisations hors réseau, le CEREFE a recensé des installations solaires photovoltaïques de production autonome, d'un total de 21.374 KW réparties sur 12 secteurs publique [39].

Ces réalisations restent très minimes car l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde. Ainsi, la promotion des énergies renouvelables en Algérie représente plus qu'un simple challenge énergétique et environnemental. Les efforts consentis sont très faibles pour exploiter la totalité du potentiel disponible.

I.3 – Conversion d'énergie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le plus souvent cette énergie est elle-même transformée en énergie électrique (Figure I.12) [40]. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable". De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [41].

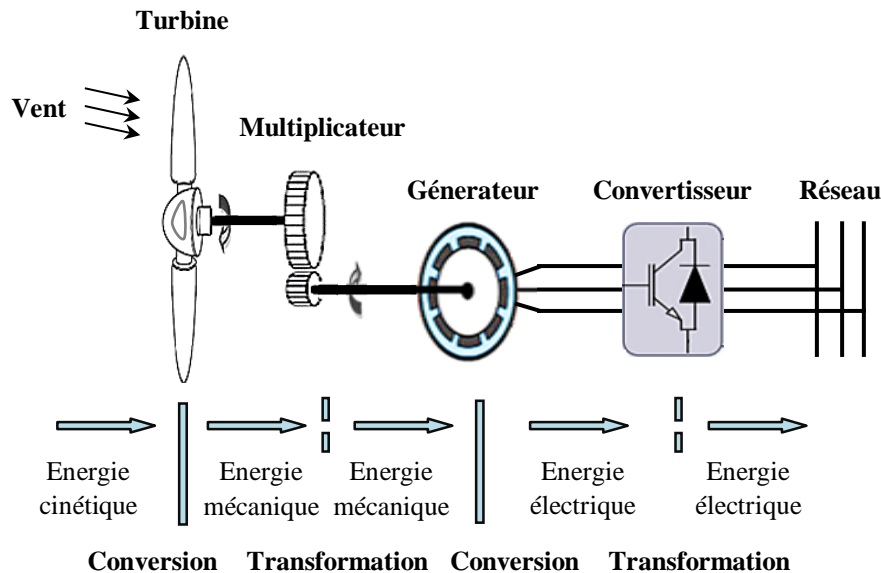


Figure I.12 : Principe de la conversion d'énergie éolienne

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [5] :

Eolienne	Diamètre des pales	Puissance
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 à 45 m	de 40 KW à 1 MW
Grande	46 et plus	1 MW et plus

Tableau I.1 : Classification des éoliennes selon leur puissance nominale

I.3.1 – Types des éoliennes

Depuis le début de la technologie de l'énergie éolienne, des machines de plusieurs types et les formes ont été conçues et développées autour de différentes parties du monde. Certains d'entre eux sont des conceptions innovantes qui ne sont pas commercialement acceptées. Bien qu'il y ait plusieurs façons de catégoriser les éoliennes, elles sont généralement classées en machines à axe horizontal et machines à axe vertical, en fonction de leur axe de rotation [42].

I.3.1.1 – Éoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de l'éolienne à axe vertical est vertical au sol et presque perpendiculaire à la direction du vent comme la montre là (Figure I.13) [43].

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il a l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et d'avoir 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 à cause des gabarits de leur mat qui 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 [15].

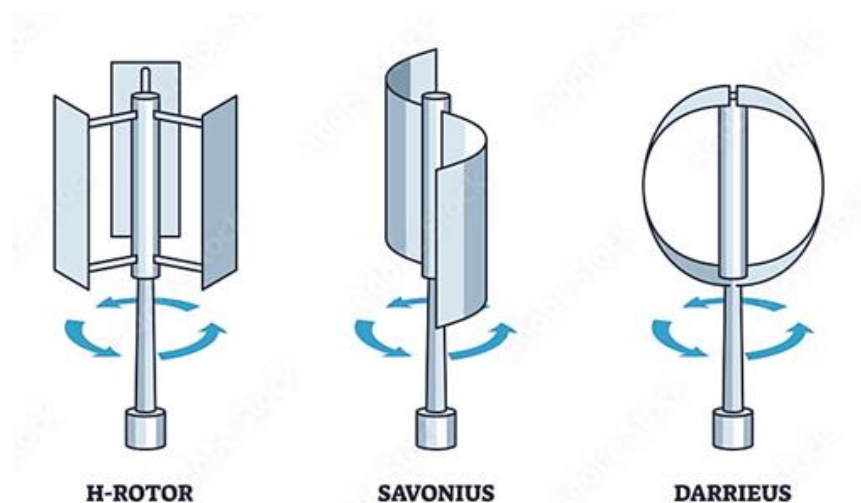


Figure I.13 : Exemple d'éolienne à axe vertical [44]

I.3.1.2 – Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol et presque parallèle au courant de vent (figure I.14) [40]. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est 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.

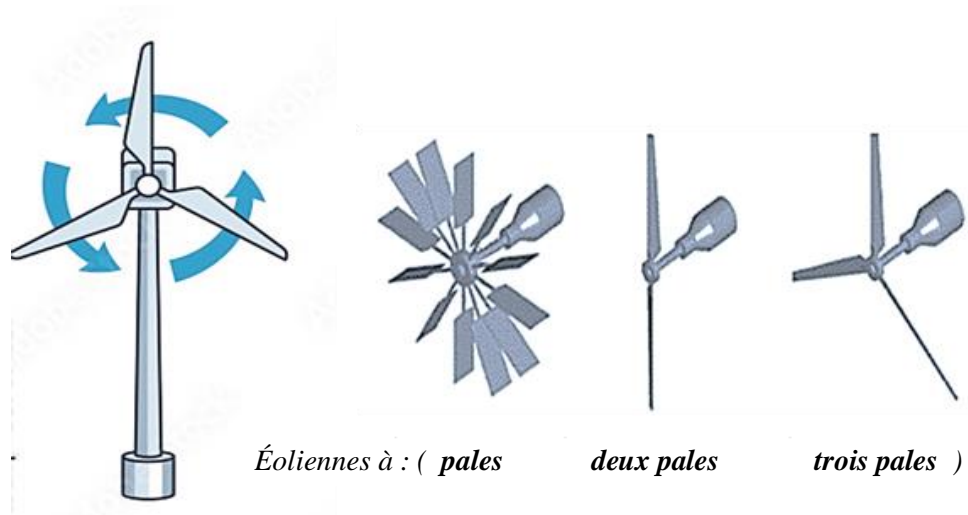


Figure I.14 : Exemple d'éolienne à axe horizontal [44]

I.3.2 – Structures des énergies éoliennes

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques (pales, moyeu, rotor, l'arbre, multiplicateur, génératrice, système de commande et d'orientation, tour...) qui sont illustrés sur la (figure I.15) [30].

- **Le mât ou la tour** : généralement en acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mât se trouve la nacelle. Cette dernière regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne [45].

- **Le multiplicateur** sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique. Le système de refroidissement se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **La génératrice électrique** est l'élément principal de la conversion mécano-électrique. Elle est composée généralement à une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier de quelques kW à 10 MW.

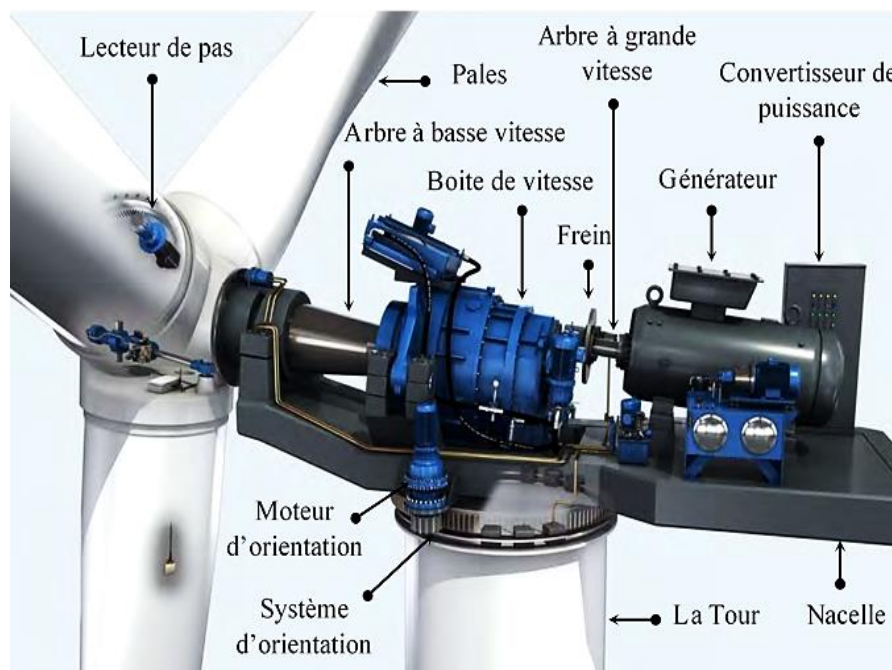


Figure I.15 : Composants d'une éolienne à axe horizontal [46]

- **Le rôle du système de commande**, est le control en permanence du bon fonctionnement de l'éolienne et intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **L'arbre relie le moyeu au multiplicateur**. Il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Le système d'orientation des pâles**, sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

I.3.3 – Architectures des éoliennes connectées au réseau électrique

La configuration de base d'un système éolien connecté au réseau est représentée sur la (figure I.16) [6], est composée de plusieurs composants qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique d'une manière contrôlée fiable et efficace. Le système de conversion des éoliennes comprend des composants mécaniques et électriques. Les composants électriques comprennent un générateur électrique, un convertisseur électronique de puissance, un filtre harmonique côté générateur, un filtre harmonique côté réseau un transformateur élévateur et un réseau triphasé.

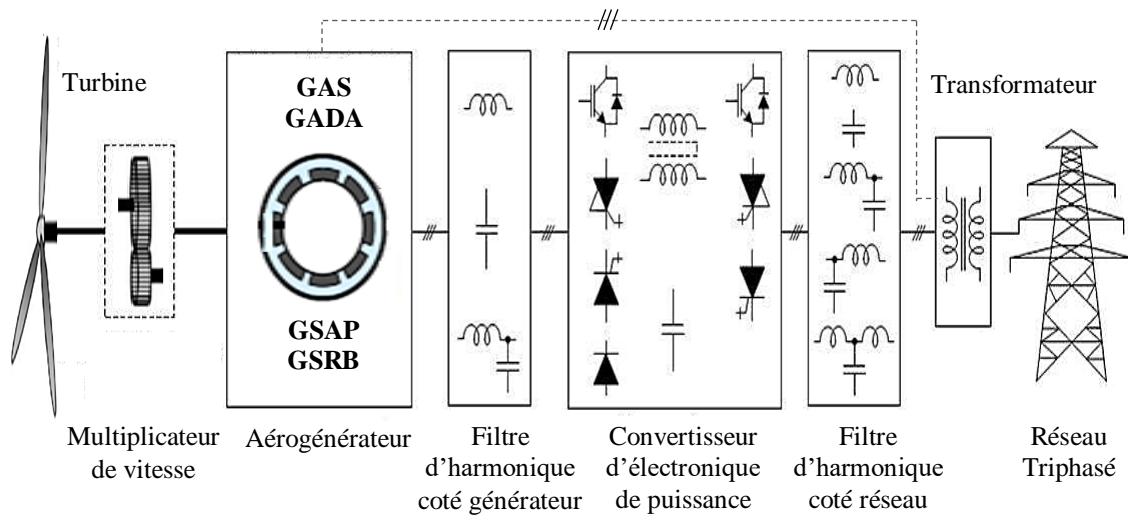


Figure I.16 : Configuration de base d'un système éolien connecté au réseau [47]

De nos jours, nous pouvons recenser deux types d'éoliennes raccordées aux réseaux électriques : Les éoliennes à vitesse fixes constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone ou d'une machine synchrone [48]. Ces machines sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

I.3.3.1 – Éoliennes à vitesse fixe

Ce type d'éolienne est considéré comme le plus ancien et le plus simple au niveau de sa conception, cependant il nécessite l'utilisation d'un multiplicateur afin de ramener la vitesse de la turbine à une vitesse constante suffisante pour l'entraînement de la

génératrice, cette vitesse est maintenue constante via un système d'orientation des pales (pitch control). En général, ce type d'éolienne utilise une génératrice asynchrone à cage, dont le stator est couplé directement au réseau, pour ce système, l'amplitude et la fréquence de la tension produite par cette génératrice sont imposées par le réseau et liées au nombre de pôles de la génératrice (figure I.17). Ce type a été utilisé pendant plusieurs années en raison de la robustesse et de la simplicité de sa conception, c'est-à-dire qu'il n'a pas besoin de convertisseurs statiques, ce qui minimise son coût et rend l'entretien plus facile [9].

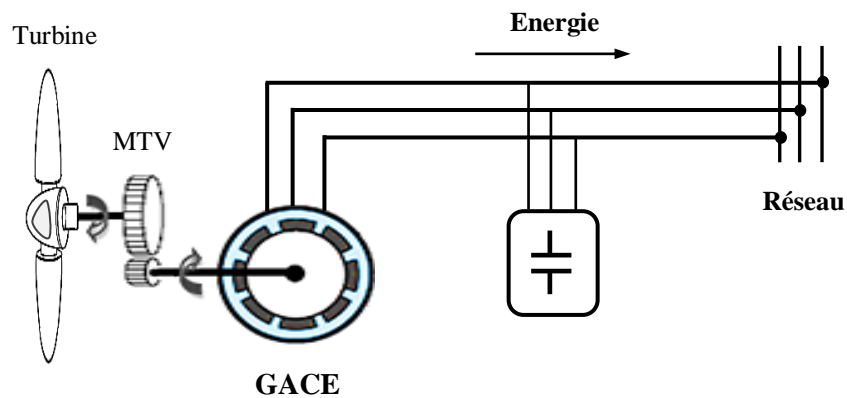


Figure I.17 : Machine asynchrone à cage d'écureuil connectée directement au réseau

Toutefois, les éoliennes à vitesse fixe présentent plusieurs inconvénients, ce qui rend l'utilisation de ce type très limitée, parmi ces inconvénients: les fluctuations de la vitesse du vent qu'ils convertissent en perturbations mécaniques et qui influent négativement sur la qualité de l'énergie produite, des dommages mécaniques, son contrôle de la qualité de l'énergie très limité, et aucun contrôle de l'énergie réactive ce qui impose l'utilisation d'un système de compensation indiquant la capacitance. Grâce au développement de l'électronique de puissance (précisément dans les convertisseurs statiques), le fonctionnement à vitesse variable est devenu possible [49].

Le concept est basé sur l'exploitation maximale de l'énergie du vent, pour cela il est nécessaire d'ajuster en permanence la vitesse de la génératrice avec la vitesse du vent afin d'extraire une puissance maximale pour chaque vitesse du vent [50].

I.3.3.2 – Éoliennes à vitesse variable

Actuellement, les éoliennes à vitesse variable sont devenues le type le plus utilisé dans le monde. Ces éoliennes sont conçues pour atteindre une efficacité maximale sur une large plage de vitesses de vent. Généralement, une éolienne à vitesse variable contient un générateur asynchrone ou synchrone qui est raccordé au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance. Celui-ci permet de contrôler et de mettre la vitesse du générateur, qui est couplée mécaniquement au rotor de la turbine éolienne, à une valeur optimale pour atteindre le maximum de puissance à des vitesses de vent différentes [51].

Dans la partie suivante, nous exposons brièvement quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement, connecté au réseau électrique.

I.3.4 – Topologies des génératrices éoliennes à vitesse variable

Plusieurs critères sont pris en compte dans la détermination de la topologie et du type de génératrice utilisé pour la production de l'énergie éolienne : comme le type par rapport à la vitesse, une éolienne à vitesse fixe ou variable, la puissance qui peut être une éolienne de petite taille ou de grande taille, ou l'éolienne connectée au réseau ou autonome [52]. En règle générale, il y a deux types de générateurs utilisés dans les éoliennes : asynchrones et synchrones.

I.3.4.1 – Éoliennes utilisant les machines asynchrones

Il existe plusieurs types de générateurs asynchrones utilisés dans les turbines éoliennes, mais dans la pratique on trouve généralement deux types de génératrices asynchrones qui sont les plus utilisées pour des raisons économiques et énergétiques : les génératrices à cage d'écureuil (GACE) et les génératrices asynchrones à double alimentation (GADA).

I.3.4.1.1 – Générateur asynchrone à cage d'écureuil

Ce dispositif peut être utilisé en fonctionnement à vitesse variable en introduisant une interface de puissance qui adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau. Autrement dit, cela permet de réaliser un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine (Figure I.18) [48].

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance [53]. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes

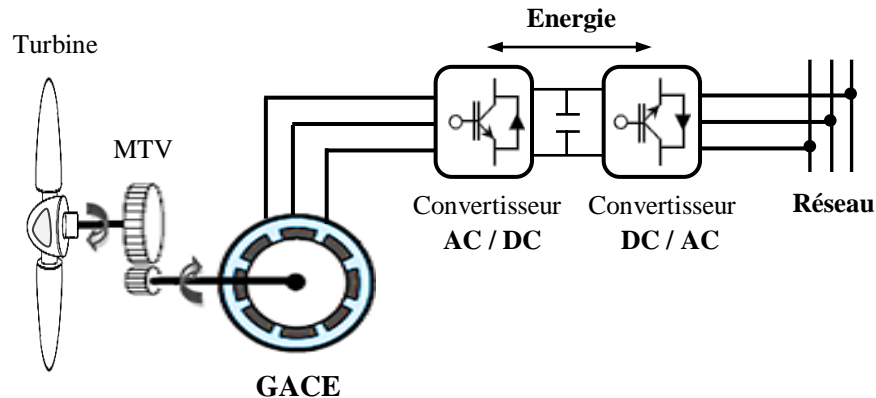


Figure I.18 : Machine asynchrone à cage d'écureuil connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.

I.3.4.1.2 – Générateur asynchrone à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement. Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance (Figure I.19) [54].

Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance [5]. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice.

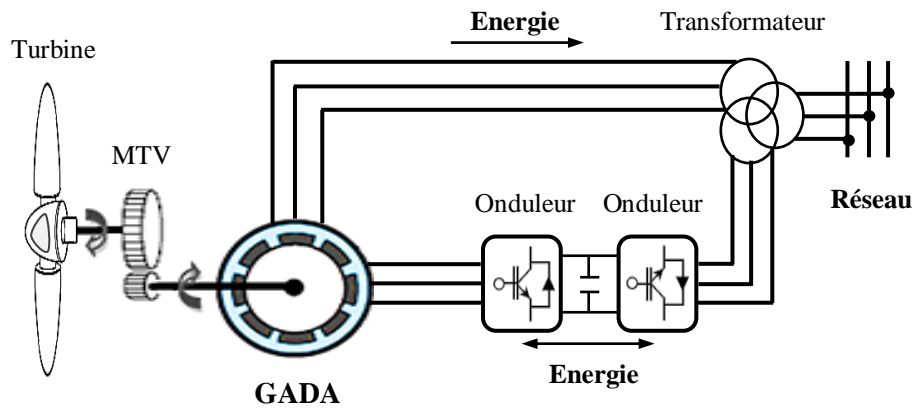


Figure I.19 : Schéma d'une éolienne à vitesse variable à base de GADA

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation tels que : GADA (à énergie rotorique dissipée, structure de Kramer, structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur et structure brushless) [9].

a. Générateur asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Dans cette conception (figure I.20), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur. Le contrôle de l'hacheur permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable (environ 10% autour de la vitesse de synchronisme) en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R [55].

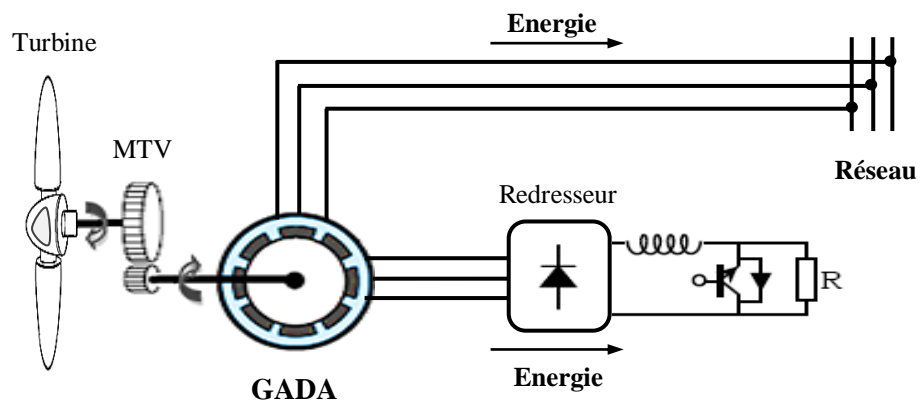


Figure I.20 : GADA avec contrôle du glissement par L'énergie dissipée

b. Générateur asynchrone à double alimentation type karmar

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, l'hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau. L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine [56].

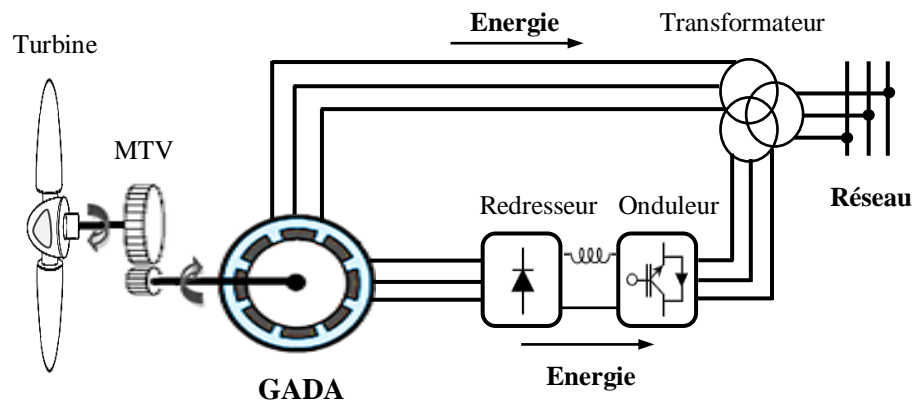


Figure I.21 : GADA structure Kramer

c. GADA – structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cyclo-convertisseur indiqué par la (figure I.22), l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius [5].

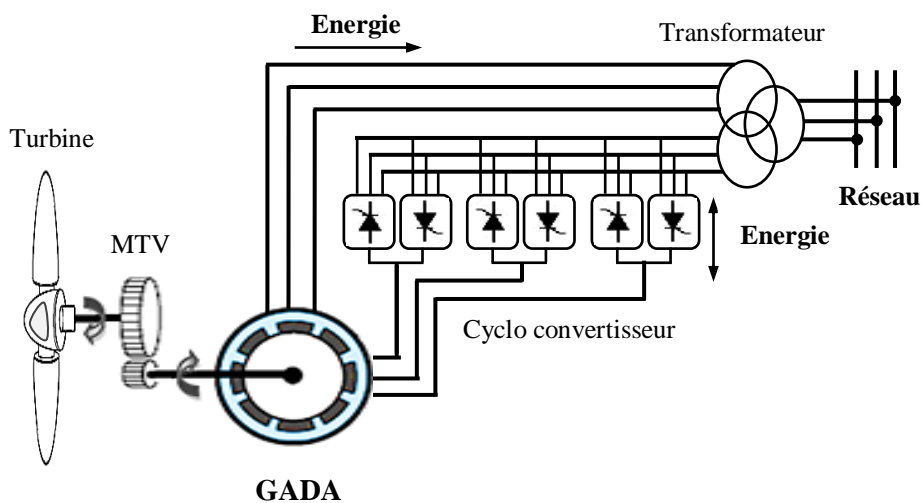


Figure I.22 : Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.

d. Générateur asynchrone à double alimentation avec convertisseurs MLI

Cette configuration consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur (Figure I.23). En général, le dimensionnement de la chaîne rotor se limite entre un quart et un tiers de la puissance nominale du stator de la machine électrique. Ce qui suffit à assurer une variation jusqu'à 30% de la plage de vitesse. C'est son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau. Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable [31].

Cette structure de conversion offre un contrôle de quatre grandeurs, à savoir le flux magnétique, la vitesse de la génératrice et les puissances active et réactive transitées au réseau électrique. Cette configuration permet une variation de 100% de la vitesse du vent en utilisant des pales orientables [55].

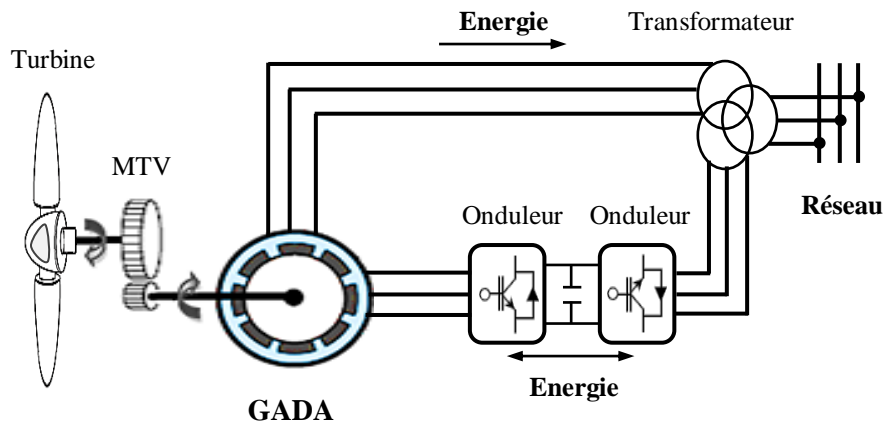


Figure I.23 : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau

I.3.4.2 – Éoliennes utilisant les machines synchrones

Différentes topologies sont disponibles dans ce type de système éolien, et chaque topologie présente des avantages et des inconvénients. Cependant il y a deux topologies qui sont les plus répandues et qui sont devenues très compétitives par rapport aux systèmes utilisant les machines asynchrones : la génératrice synchrone à rotor bobiné (GSRB) et la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) [52].

I.3.4.2.1 – Générateur synchrone à rotor bobiné

Dans ce type, la connexion directe des enroulements statoriques au réseau est impossible à cause de la variation de la fréquence de la tension générée, cette dernière dépendant de la vitesse de rotation du rotor et par conséquent de la vitesse du vent. Pour cela le stator doit être connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur back-to-back séparé par un bus continu (Figure I.24), le convertisseur côté générateur convertit la tension générée par la génératrice en tension continue et permet également le contrôle de la vitesse de rotation. Le bus continu joue le rôle de régulateur de tension continue, il réagit généralement comme une source de tension, le convertisseur côté réseau permet de convertir la tension continue en tension alternative, avec une amplitude et une fréquence similaire à celles du réseau, il assure aussi la récupération d'un maximum de puissance et l'injecte au réseau avec la compensation de la puissance réactive [57].

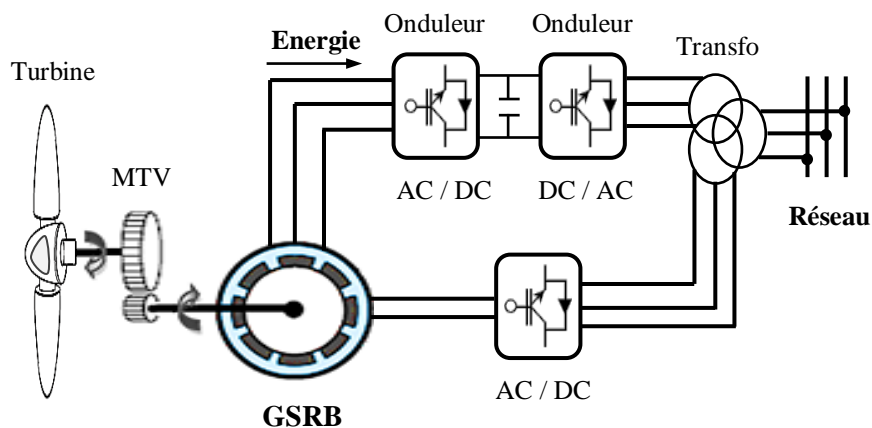


Figure I.24 : Système d'éolienne avec une génératrice synchrone à rotor bobiné

Le courant continu de la bobine d'excitation est engendré par un redresseur. Le GSRB utilise pour la production d'énergie du vent à plusieurs avantages [58] :

- ✓ Rendement élevé par rapport au générateur à induction ;
- ✓ Pas de glissement car son rotor est excité par une source externe de tension continue. Cela lui permet de fonctionner avec une large gamme de vitesse ;
- ✓ Le courant d'excitation peut être choisi pour créer un champ magnétique correspondant à des pertes électriques minimales dans le stator.

Inconvénient de l'utilisation du GSRB : l'énergie électrique fournie à la bobine du rotor ne peut pas être consommée au rotor. Elle doit être renvoyée au réseau électrique à travers le stator. Dans ce cas le stator reçoit un supplément d'énergie provenant du rotor en plus de l'énergie produite par l'éolienne. Cela implique de dimensionner le redresseur pour passer une puissance supérieure à celle produite par l'éolienne.

I.3.4.2.2 – Générateur synchrone à aimant permanent

Le rotor de ce type est construit à partir d'un aimant permanent, ce qui donne plusieurs avantages par rapport à d'autres types de génératrices, tel que le faible coût d'entretien, la possibilité d'éliminer le multiplicateur, et par conséquent d'éliminer les perturbations, le bruit et les pertes d'énergie causées par ce dernier avec l'utilisation d'un nombre important de paires de pôles. Selon le système de conversion utilisé pour l'injection de l'énergie produite au réseau, on peut citer deux types [59] :

Le système de conversion bidirectionnel permet de transmettre la puissance dans les deux sens, de l'éolienne vers le réseau (l'éolienne joue le rôle de producteur d'énergie) ou du réseau vers l'éolienne (l'éolienne joue le rôle de consommateur d'énergie).

Le système de conversion unidirectionnel permet de faire circuler la puissance dans un seul sens, de l'éolienne vers le réseau électrique.

a. Système de conversion unidirectionnel simple

La configuration de convertisseur de puissance pour un système éolien à base d'une GSAP avec un redresseur à diode et un convertisseur de source de tension à deux niveaux est représentée sur la (Figure I.25). La tension de sortie du générateur est convertie en courant continu par le redresseur à diodes qui est ensuite reconverti en courant alternatif par un convertisseur de source de tension à deux niveaux [53].

Au cours de faibles vitesses de vent, la tension de sortie du redresseur à diode devient nettement plus faible, pour transférer l'énergie produite au réseau, la tension du circuit intermédiaire doit être supérieure à la valeur crête de la tension composée du réseau [6]. Pour assurer cette condition, le générateur devrait être sur une tension maximale.

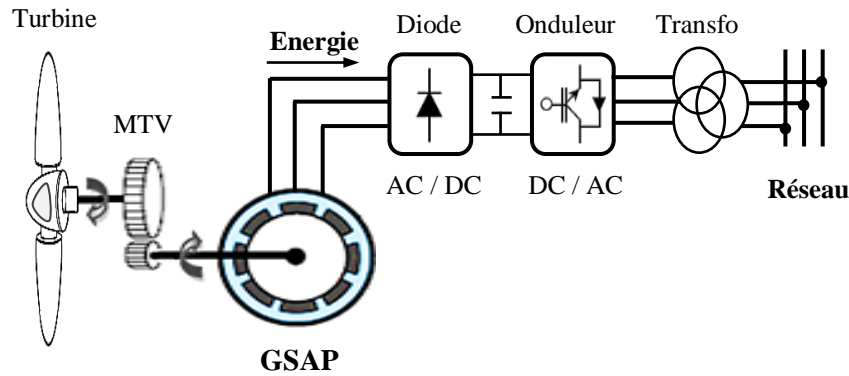


Figure I.25 : Couplage unidirectionnel simple d'une GSAP au réseau

b. Système de conversion unidirectionnel avec un convertisseur boost

La (Figure I.26), montre un système éolien à base d'une GSAP connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur unidirectionnel qui se compose d'un redresseur à base de diodes contrôlant le couple électromagnétique, suivi par un hacheur élévateur permettant l'augmentation de la tension continue et qui alimente un onduleur MLI, ce dernier assurant le contrôle de la tension continue et permettant d'injecter un maximum de puissance au réseau [58].

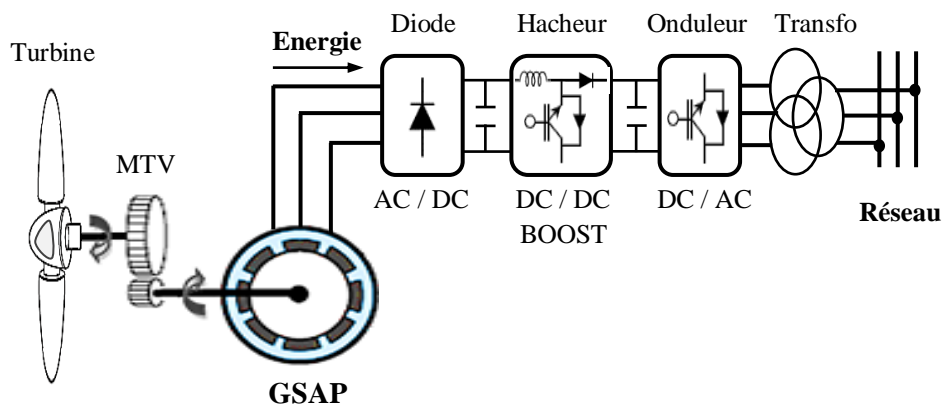


Figure I.26 : Couplage unidirectionnel avec un convertisseur Boost d'une GSAP

Le GSAP utilisé pour la production de l'énergie du vent a plusieurs avantages [52] :

- ✓ Rendement élevé par rapport au générateur à induction ;
- ✓ Couplage avec l'éolienne sans le besoin d'un multiplicateur de vitesse ;
- ✓ Fonctionnement avec un bon rendement sur une grande plage de vitesse ;
- ✓ Grâce à ses aimants permanents, il n'a pas besoin d'une source d'excitation pour alimenter le rotor.

L'inconvénient de ce type réside dans la déformation de la forme d'onde du courant statorique, due à l'utilisation d'un redresseur à diodes, ce qui entraîne la génération d'harmoniques, des ondulations de couple et une augmentation des pertes d'énergie.

c. Système de conversion bidirectionnel

Dans ce type, l'énergie circule dans les deux sens, de la génératrice vers le réseau ou bien du réseau vers la turbine éolienne qui agit comme une charge consommatrice dans ce cas, la connexion des enroulements statoriques au réseau est assurée par un convertisseur back-to-back avec un bus continu au milieu, comme illustré à la (Figure I.27), dans cette configuration, les deux convertisseurs sont réalisés à base d'IGBT, ce qui donne l'avantage à cette configuration par rapport à la précédente en termes de commande optimale de la GSAP, tout en minimisant les pertes dans le stator [57].

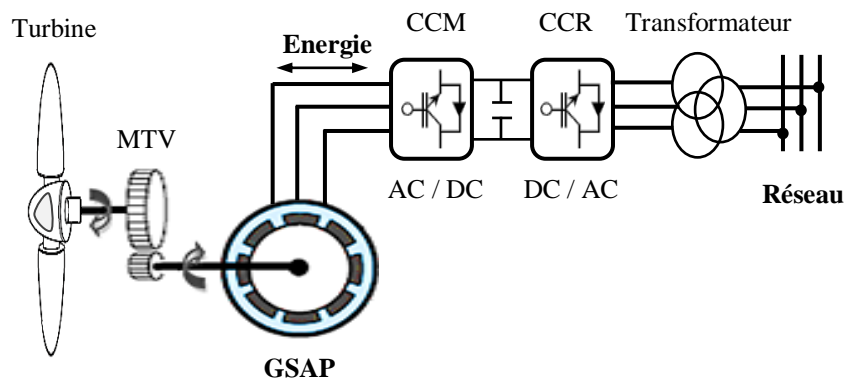


Figure I.27 : Couplage bidirectionnel d'une GSAP au réseau

Finalement, Les machines électriques qui sont couramment utilisées pour les systèmes éoliens commandés par le stator, directement couplées au réseau, sont les machines asynchrones à cage et synchrone à aimant permanent. La machine asynchrone à cage est généralement couplée à la turbine via un multiplicateur de vitesse, tandis que la machine synchrone à aimant permanent peut être couplée aussi à la turbine à travers un multiplicateur ou couplée directement à la turbine [60]. Cela dépend du nombre de paires de pôles de la machine. Les machines synchrones avec un nombre élevé de pôles, le rotor de la machine est directement couplé au rotor de la turbine [20].

I.4 – Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales relatives à la technologie éolienne ont été présentées, telles que les étapes de développement des éoliennes et leurs différents types, selon leur axe de rotation et leur mode de fonctionnement, à vitesse fixe ou variable. Nous avons également décrit les différentes parties d'une éolienne à axe horizontal.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée au principe de la conversion mécanique et électrique, ainsi qu'aux différents types et topologies de génératrices utilisées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique. Une comparaison a été effectuée entre les systèmes basés sur des machines asynchrones et ceux utilisant des génératrices synchrones.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et au réglage d'une centrale éolienne reposant sur une génératrice synchrone à aimant permanent connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel.

Chapitre II :

Modélisation et réglage d'une
centrale éolienne à base de GSAP

Sommaire

II.1 – Introduction	37
II.2 – Structure de la chaîne de conversion éolienne à base de GSAP	37
II.3 – Modélisation globale du système éolien à base de GSAP	38
II.3.1 – Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne	38
II.3.1.1 – Hypothèses simplificatrices	38
II.3.1.2 – Modèle de la turbine	39
II.3.1.3 – Modèle du multiplicateur	42
II.3.1.4 – Equation dynamique de l'arbre	42
II.3.2 – Modélisation de la partie électrique de l'éolienne	43
II.3.2.1 – Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	43
II.3.2.1.1 – Principe des machines synchrones à aimant permanent	43
II.3.2.1.2 – Hypothèses simplificatrices	44
II.3.2.1.3 – Équations électriques de la GSAP	44
II.3.2.1.4 – Équations électriques de la GSAP dans le repère de Park	45
II.3.2.1.5 – Équations magnétiques	47
II.3.2.1.6 – Équations électromagnétique	47
II.3.2.1.7 – Équations mécanique	48
II.3.2.2 – Modélisation des convertisseurs	48
II.3.2.2.1 – Modélisation du convertisseur côté machine CCM	49
II.3.2.2.2 – Modélisation du bus continu DC	51
II.3.2.2.3 – Modèle de la liaison au réseau	52
II.4 – Commande du système éolien à base de GSAP	53
II.4.1 – Commande de la GSAP	53
II.4.1.1 – Extraction du maximum de la puissance du vent (MPPT)	54
II.4.1.1.1 – Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT)	55
II.4.1.1.1.1 – Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique	56
II.4.1.1.1.2 – Contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique	57
II.4.1.2 – Commande vectorielle de la GSAP	58
II.4.1.2.1 – Conception des contrôleurs PI de courant et de vitesse	60
II.4.1.2.1.1 – Régulateur de courant id	61
II.4.1.2.1.2 – Régulateur de courant iq	61
II.4.1.2.1.3 – Régulateur de la vitesse Ω_g	61
II.4.2 – Contrôle de la liaison au réseau	62
II.4.2.1 – Contrôle de la tension du bus continu	62
II.4.2.1 – Contrôle des courants circulant dans le filtre RL	64
II.5 – Résultats de Simulation	66
II.6 – Conclusion	70

II.1 – Introduction

Comme il est noté précédemment, les éoliennes sont des dispositifs de conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique, une très grande variété de systèmes éoliens est utilisée dans l'industrie. Les éoliennes disponibles sur le marché peuvent être classées donc selon plusieurs critères à savoir la puissance (petite puissance, moyenne puissance ou forte puissance), le type (axe verticale ou horizontale), la vitesse (constante ou variable), le type de la génératrice (synchrone ou asynchrone), la topologie (connectées au réseau ou autonome) [61].

Aujourd'hui, la plupart des éoliennes utilisées dans l'industrie sont des éoliennes à vitesse variable. Parmi les différents types des éoliennes à vitesse variable on trouve la génératrice synchrone à aimant permanent GSAP [14]. Avec l'application des convertisseurs de puissance à pleine capacité, les générateurs sont entièrement découplés du réseau et peuvent fonctionner dans toute la gamme de vitesse. Comme les éoliennes à grande échelle (jusqu'à 10 MW) attirent de plus en plus d'attention de nos jours, les éoliens à vitesse variable à base de GSAP, qui conviennent parfaitement aux grandes éoliennes, sont devenues un sujet d'actualité [4].

Dans ce chapitre le système étudié est composé d'une centrale éolienne à vitesse variable, constituée de plusieurs éoliennes (3 éoliennes) à axe horizontal basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent connectée au réseau, chaque éolienne a une puissance de 3 MW.

II.2 – Structure de la chaine de conversion éolienne à base de GSAP

Dans l'architecture ci-dessous (figure II.1), la turbine éolienne à vitesse variable est couplée à la GSAP à travers un multiplicateur de vitesse (MTV), puis la GSAP est connectée au réseau électrique triphasé équilibré par l'intermédiaire de deux convertisseurs back-to-back à base d'IGBT, le convertisseur côté machine jouant le rôle de redresseur (CCM), une liaison de bus continu est utilisée entre les deux convertisseurs afin d'assurer le réglage de la tension continue. La tension alternative injectée par le convertisseur côté réseau (CCR) est passée à travers un filtre passif de type RL, pour la compensation des harmoniques générés par les différentes composantes du système, et le réseau dans lequel est injectée l'énergie produite [50].

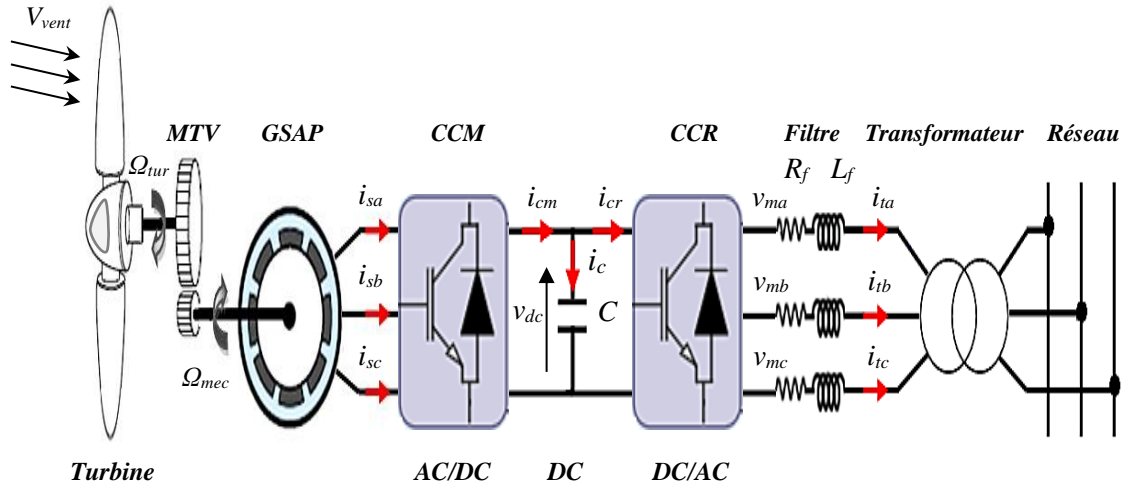


Figure II.1 : Système de conversion éolienne à base de GSAP

II.3 – Modélisation globale du système éolien à base de GSAP

Dans cette partie nous présentons la modélisation et le réglage classique des différentes composantes du système de conversion éolienne et le fonctionnement de chaque élément indépendamment de l'autre, pour le préparer à la simulation de la chaîne éolienne complète.

II.3.1 – Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne

En raison de la complexité du système, il est impossible de décrire un modèle complet qui prend en compte tous les paramètres influençant sur le fonctionnement de la turbine éolienne, pour y remédier, certaines hypothèses simplificatrices doivent être posées, afin d'obtenir un modèle simplifié de la turbine basé sur les éléments essentiels qui interagissent dans le comportement de l'éolienne.

II.3.1.1 – Hypothèses simplificatrices

Notre système dans cette étude est basé sur une turbine éolienne tripale, soumise à un vent d'une vitesse v , sous la force du vent les pales tournent et créent un couple T_t qui fait tourner un arbre d'entraînement sur lequel elles sont fixées, la vitesse de rotation de l'ensemble est nommée vitesse angulaire de la turbine Ω_t , cette vitesse est relativement faible, et pour cela l'arbre d'entraînement est relié à un multiplicateur qui est caractérisé par son rapport de transmission G et qui vise à ramener la vitesse de l'éolienne à une valeur suffisante pour faire tourner la génératrice électrique [52].

La (figure II.2) présente un schéma simplifié du système mécanique de l'éolienne qui comporte trois pales de conceptions identiques, chaque pale est caractérisée par son inertie J_{pale} , son coefficient d'élasticité Kb , ses coefficients de frottement (par rapport à l'air db et par rapport au support f_{pale}), ainsi par son angle d'orientation βb .

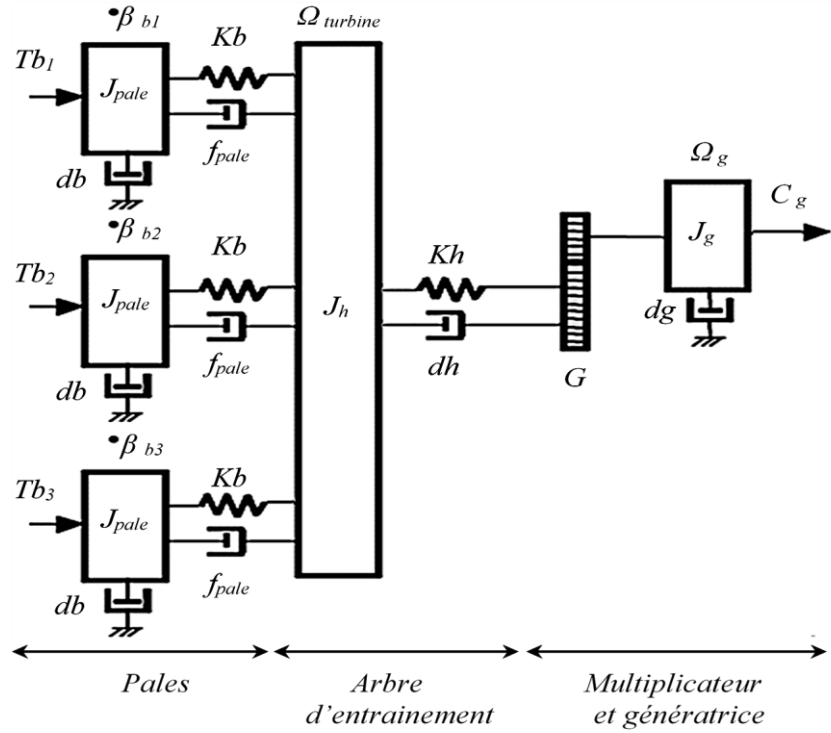


Figure II.2 : Système mécanique de l'éolienne [10]

La répartition de la vitesse du vent est supposée identique et uniforme sur les trois pales, le coefficient de frottement par rapport à l'air db et le coefficient de frottement par rapport au support sont négligeables [59].

Les trois pales sont fixées à un arbre d'entraînement qui est caractérisé par son inertie J_h , son élasticité Kh et son coefficient de frottement dh , cet arbre transmet un mouvement mécanique rotatif par l'intermédiaire d'un multiplicateur de gain G à l'arbre de la génératrice qui se caractérise par son inertie J_g et un coefficient de frottement dg .

II.3.1.2 – Modèle de la turbine

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. La (figure II.3) présente une turbine éolienne à trois pales, de

longueur R , tourne sous l'action de la force du vent v pour entraîner une génératrice synchrone à une vitesse mécanique Ω_{mec} par l'intermédiaire d'un multiplicateur de gain G .

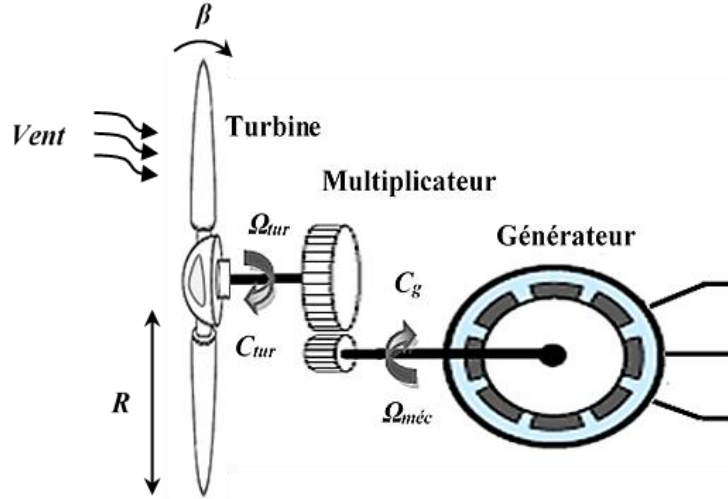


Figure II.3 : Schéma de la turbine éolienne

La quantité d'énergie qui traverse une section donnée, est définie par la puissance P_v , qui se traduit par la formule [62] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II-1})$$

Où ρ : la densité de l'air (généralement $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ pour les conditions atmosphériques), S : la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale (R), et v : la vitesse du vent.

Cette puissance va transmettre à l'arbre de la génératrice en puissance aérodynamique ou en puissance de turbine, elle est donnée par [58] :

$$P_{tur} = P_v \cdot C_p = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II-2})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. D'après Betz, ce coefficient possède une limite théorique appelée limite de Betz égale à $16/27$ [63]. Ce coefficient, dépend de l'angle d'orientation des pales (β) et du ratio de vitesse (λ).

Le ratio de vitesse (λ) est le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent. Il est défini par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{tur}}{v} \quad (\text{II-3})$$

Ω_{tur} : La vitesse de rotation mécanique de la turbine.

Le coefficient de puissance de la turbine est souvent déterminé après des essais empiriques, il dépend essentiellement de la vitesse du vent et des caractéristiques de la turbine éolienne elle-même. Plusieurs littératures ont présenté la variation du coefficient de puissance C_p par la formule [10], [51], [64] :

$$C_p = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II-4})$$

La (figure II.4) représente le coefficient de puissance obtenu par cette équation en fonction du ratio de vitesse λ , et de l'angle de l'orientation de la pale β .

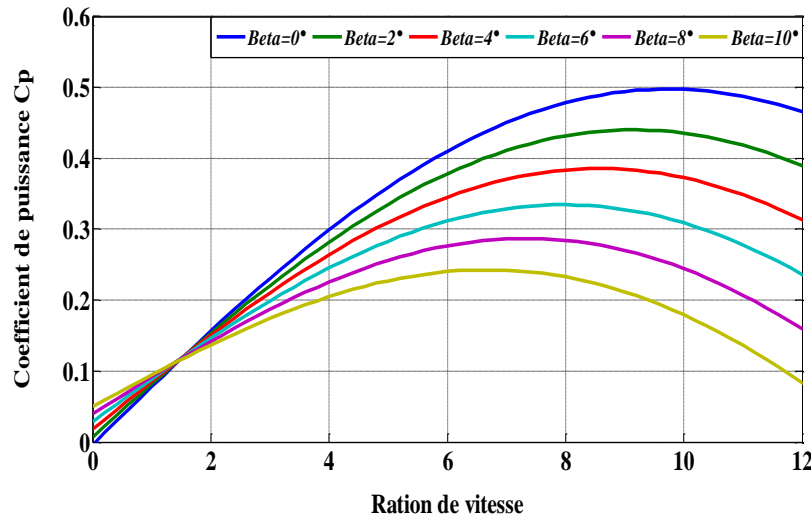


Figure II.4 : Coefficient de puissance (C_p) en fonction de λ pour différents β

La première remarque qui peut être apportée est la diminution du coefficient de puissance C_p avec l'augmentation de l'angle de calage. La valeur maximale de C_p ($C_{pmax} = 0.5$) est atteinte pour $\beta = 0^\circ$ et $\lambda = 9,6$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur optimale λ_{opt} .

II.3.1.3 – Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est un convertisseur mécanique qui augmente la vitesse de l'arbre lent de la turbine éolienne à une vitesse plus rapide, ce qui permet l'entraînement de la génératrice électrique, il est caractérisé par son gain G et par l'inertie qui est considérée comme négligeable par rapport à l'inertie totale de la turbine de sorte que le modèle mathématique de multiplicateur peut être écrit comme suit [65] :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} , \quad \Omega_{tur} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II-5})$$

II.3.1.4 – Equation dynamique de l'arbre

L'équation fondamentale de la dynamique du système peut être écrite à partir de la (figure II.3), elle représente l'évolution de la vitesse mécanique Ω_{mec} à partir d'un couple mécanique C_{mec} appliqué à l'arbre de la génératrice.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II-6})$$

Où J est l'inertie totale ramenée au rotor de la génératrice, elle est donnée par [Af 20] :

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_g \quad (\text{II-7})$$

Avec : J_{tur} est l'inertie de la turbine, J_g est l'inertie de la génératrice.

Le couple de ce système est la somme des couples appliqués au rotor, il est écrit comme suit :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{II-8})$$

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II-9})$$

C_{em} , C_f , C_g , f : Le couple électromagnétique de la génératrice, le couple des frottements visqueux, le couple issu du multiplicateur et le coefficient de frottements visqueux .

L'utilisation de ce modèle mathématique nous permettra de développer un schéma de contrôle de la turbine éolienne, la (figure II.5) présente un schéma de commande basé sur le modèle mathématique de différentes parties du système éolien, comme la sortie du

système est la vitesse mécanique de la génératrice, qui dépend de certains paramètres d'entrée comme la vitesse de vent et l'angle de calage, le couple électromagnétique considéré comme un élément de perturbation.

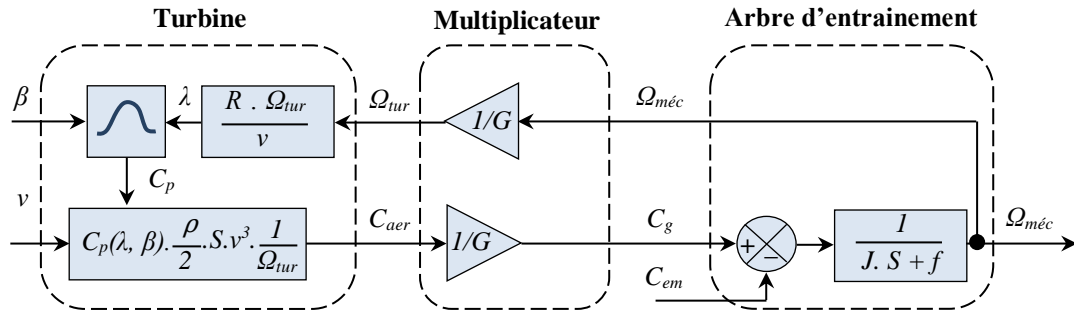


Figure II.5 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

II.3.2 – Modélisation de la partie électrique de l'éolienne

II.3.2.1 – Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La modélisation des machines est essentielle. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatif sont en général modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Une transformation triphasée – biphasé est nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations) [66].

II.3.2.1.1 – Principe des machines synchrones à aimant permanent (MSAP)

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant du stator. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose le synchronisme entre le champ tournant statorique et le rotor [67]. La conversion de l'énergie dans les MSAP se fait dans les deux sens : par conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique (mode moteur), et on les appelle alors "moteurs synchrones à aimant permanent (MSAP)", et par conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique (mode génératrice) et on les appelle dans ce cas "génératrices synchrones à aimant permanent (GSAP)" [52].

Ces machines peuvent être conçues, avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (figure II.6).

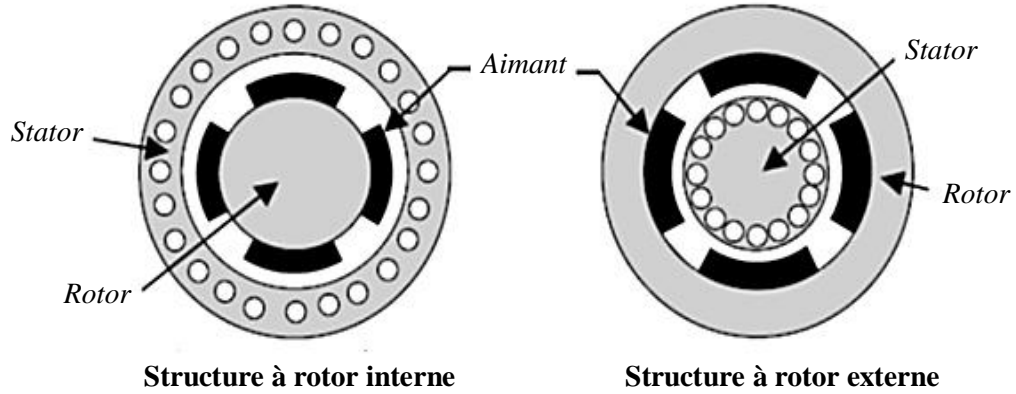


Figure II.6 : Exemple d'une structure à rotor interne et à rotor externe [68]

La génératrice synchrone à aimant permanent est caractérisée par plusieurs paramètres qui influent sur son fonctionnement, parmi lesquels certains paramètres non linéaires, ce qui complique le modèle mathématique de la machine, pour cela la majeure partie de la littérature propose quelques hypothèses simplificatrices qui servent à simplifier ce modèle mathématique et à le rendre utilisable dans l'étude du comportement de la génératrice [69].

II.3.2.1.2 – Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) obéit à certaines hypothèses simplificatrices [4] :

- ✓ Des enroulements statoriques connectés en étoiles (neutre isolé) ;
- ✓ Un circuit magnétique non saturé (saturation négligée) ;
- ✓ Une répartition sinusoïdale de la FMM ;
- ✓ Les pertes par courants Foucault et par hystérésis négligeables ;
- ✓ L'effet de peau et l'influence de la température sont négligés.

II.3.2.1.3 – Équations électriques de la GSAP

La génératrice synchrone à aimant permanent est constituée d'un stator avec des enroulements triphasés représentés par les trois axes (a, b, c) déphasés, l'un par rapport à l'autre de 120° électrique, et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

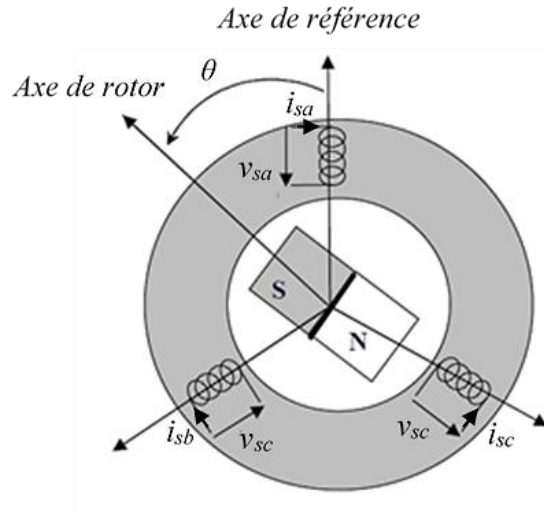


Figure II.7 : Représentation schématisée d'une machine synchrone dans le repère abc [68]

Les équations électriques dans le plan (a, b, c) peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Avec

$[v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]$: le vecteur des tensions statoriques,

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]$: le vecteur des courants statoriques,

$[\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{sc}]$: le vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques,

R_s : Résistance d'une phase statorique,

θ : Position absolue du rotor en degré électrique.

II.3.2.1.4 – Équations électriques de la GSAP dans le repère de Park

Afin de simplifier le modèle mathématique de la GSAP, la transformation de Park est utilisée, cette dernière est un outil mathématique qui nous permet de transformer les trois axes de la machine dans le repère (a, b, c) en deux axes orthogonaux (d, q) c'est à dire la transformation des trois bobines statoriques déphasées de $2\pi/3$, en deux bobines diphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor comme indiqué dans la (figure II.8) [70].

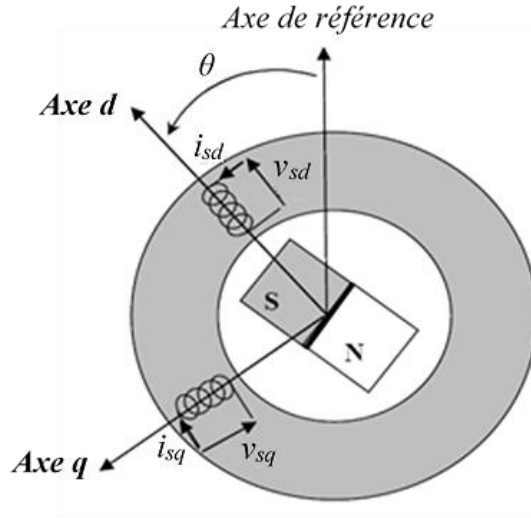


Figure II.8 : GSAP dans le repère (d, q) de Park [68]

La transformation de Park est donnée par la matrice :

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

$P(\theta)$: Matrice de PARK, définie le passage du repère (a, b, c) vers (d, q).

Pour revenir aux repères triphasés (a, b, c), on utilise la transformation inverse de Park qui est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

Les équations des tensions, courants et flux seront données par :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

Appliquant la transformation de Park sur l'équation (II-10), l'équation électrique de la GSAP devient :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \end{bmatrix} + \theta P\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

Nous pouvons écrire les équations électriques de la GSAP dans le repère de Park sous la forme :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_d}{dt} - \omega L_{sq} i_{sq} \quad (\text{II-15})$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_q}{dt} - \omega L_{sd} i_{sd} + \omega \psi_f \quad (\text{II-16})$$

$v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$: les composantes directes et en quadrature de tension et de courant,
 ψ_{sd}, ψ_{sq} : les composantes directes et en quadrature du flux,
 L_{sd} et L_{sq} : les inductances directes et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ , et le flux des aimants permanents ψ_f .

II.3.2.1.5 – Équations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct (ψ_{sd}) et de quadrature (ψ_{sq}) sont fonction linéaire des courants (i_{sd}, i_{sq}) respectivement d'axe direct et de quadrature [4].

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

II.3.2.1.6 – Équations électromagnétique

Dans un système triphasé équilibré (a, b, c), l'équation de la puissance absorbée peut être écrite comme suit :

$$P(t) = \frac{3}{2} (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \quad (\text{II-18})$$

Remplaçant la tension directe et en quadrature par ces expressions, la formule (II-18) devient :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[(R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_{sq} i_{sq}) i_{sd} + (R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L_{sd} i_{sd} + \omega \psi_f) i_{sq} \right] \quad (\text{II-19})$$

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[\omega ((L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} + \psi_f i_{sq}) + R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + (L_{sd} i_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} + L_{sq} i_{sq} \frac{di_{sq}}{dt}) i_{sd} \right] \quad (\text{II-20})$$

On peut écrire cette formule sous la forme :

$$P(t) = P_{em} + P_j + P_{mag} \quad (\text{II-21})$$

Avec

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega ((L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} + \psi_f i_{sq}) : \text{La puissance électromagnétique,}$$

$$P_j = \frac{3}{2} \left(L_{sd} i_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} + L_{sq} i_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} \right) i_{sd} : \text{Les pertes par effet joule,}$$

$$P_{mag} = \frac{3}{2} \omega ((L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} + \psi_f i_{sq}) : \text{La variation de l'énergie magnétique emmagasinée.}$$

À partir de la puissance électromagnétique, on peut déduire l'expression du couple électromagnétique avec $C_{em} = P_{em} / \Omega$ et $\Omega = \omega / P$.

$$C_{em} = \frac{3}{2} P ((L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} + \psi_f i_{sq}) \quad (\text{II-22})$$

II.3.2.1.7 – Équations mécanique

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$C_m - C_{em} - f \cdot \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II-23})$$

P , C_{em} , C_m , $f \cdot \Omega$, J , f sont le nombre de pair de pole, le couple électromagnétique, le couple moteur appliqué sur la génératrice, le couple de frottement, le moment d'inertie total de la machine et le coefficient de frottement visqueux.

II.3.2.2 – Modélisation des convertisseurs

Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de puissance. Dans l'architecture ci-dessous (figure II.9), les deux convertisseurs sont identiques, composées

de six interrupteurs commandés, ils permettent d'assurer à la fois la régulation et la mise en forme des courants de ligne ainsi que la régulation de la tension du bus DC. Cette topologie étant la seule qui permette un sens bidirectionnel à l'écoulement de la puissance active, ainsi que le réglage du déphasage entre le courant et la tension qu'on peut imposer à une valeur quelconque. Ceci se fait par l'utilisation d'un convertisseur AC-DC-AC, généralement construit en topologie Back-to-Back [71], [72].

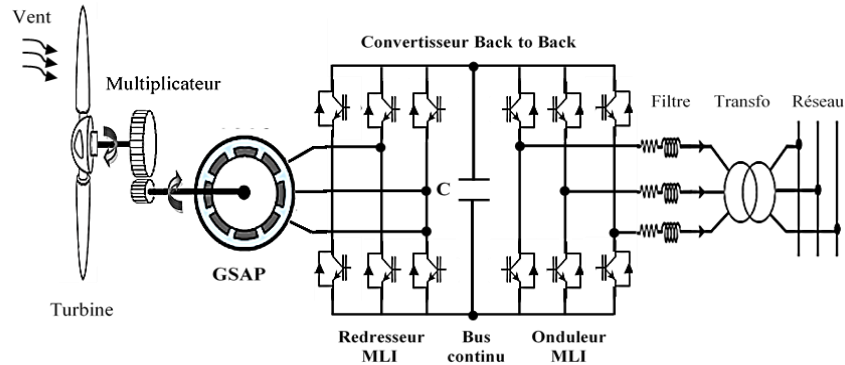


Figure II.9 : Convertisseur Back to Back à deux niveaux

Etant donné que les deux convertisseurs utilisés dans la réalisation de la chaîne de conversion éolienne ont même structure et même technique de commande, il suffit de modéliser un seul. Le convertisseur choisi dans cette partie est celui relié à la machine.

II.3.2.2.1 – Modélisation du convertisseur côté machine CCM

Les redresseurs MLI sont des convertisseurs commandés à l'ouverture et à la fermeture afin de maintenir la tension de bus continu à une valeur de référence requise pour l'alimentation de l'onduleur qui dans ce cas peut générer une tension alternative de bonne qualité, la (figure II.10) présente un redresseur MLI connecté à une source de tension triphasée [73].

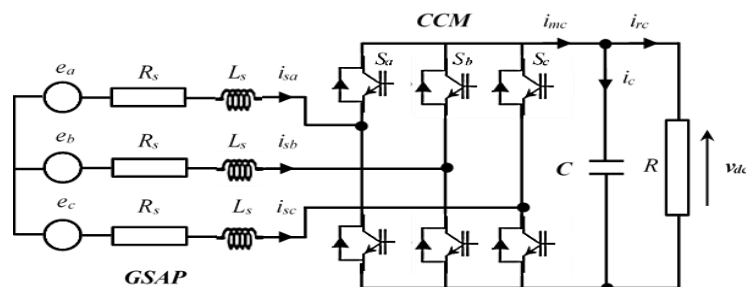


Figure II.10 : Schéma de l'association GSAP – Redresseur MLI [74]

Pour simplifier la modélisation, nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et complémentaires, c'est-à-dire que la commutation des interrupteurs est instantanée, et la résistance est nulle dans l'état passant et infinie dans l'état bloqué, l'état de ces interrupteurs est donné par la fonction [47] :

$$S = \begin{cases} +1, & \bar{S} = -1 \\ -1, & \bar{S} = +1 \end{cases} \quad \text{Pour } S = a, b, c \quad (\text{II-24})$$

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de : S_j , v_{dc} et les courants d'entrée i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , Nous avons aussi :

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (\text{II-25})$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} u_{ab} = (S_a - S_b)v_{dc} \\ u_{bc} = (S_b - S_c)v_{dc} \\ u_{ca} = (S_c - S_a)v_{dc} \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

Les équations de tension pour le système équilibré peuvent être écrites ainsi :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

$$\begin{cases} u_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} v_{dc} \\ u_{sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} v_{dc} \\ u_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} v_{dc} \end{cases} \quad (\text{II-28})$$

Finalement on déduit l'équation de couplage des côtés alternatif et continu :

$$C \frac{d}{dt} = (S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc}) - i_{rc} \quad (\text{II-29})$$

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones (d, q) sont :

$$\begin{cases} v_{sd} = R.i_{sd} + L.\frac{di_{sd}}{dt} - \omega.L.i_{sq} + u_{sd} \\ v_{sq} = R.i_{sq} + L.\frac{di_{sq}}{dt} + \omega.L.i_{sd} + u_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_d.i_{sd} + S_q.i_{sq} - i_{rc} \quad (\text{II-31})$$

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}}.(2.S_a - S_b - S_c)\cos(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{2}}.(S_b - S_c)\sin(\omega t) \quad (\text{II-32})$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}}.(S_b - S_c)\cos(\omega t) - \frac{1}{6}.(2.S_a - S_b - S_c)\sin(\omega t) \quad (\text{II-33})$$

II.3.2.2.2 – Modélisation du bus continu DC

Le bus continu est un élément de stockage d'énergie, représenté par une capacité qui sert de source tampon d'énergie entre le convertisseur côté machine et le convertisseur côté réseau (figure II.11). Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit [6].

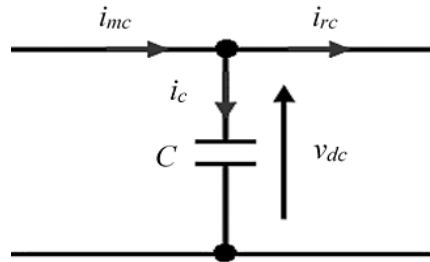


Figure II.11 : Représentation du bus continu

Chaque convertisseur exerce son influence sur ce circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur. L'évolution temporelle de la tension à ses bornes est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$v_{dc} = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt \quad (\text{II-34})$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent deux courants modulés par le CCM et le CCR :

$$i_c = i_{mc} - i_{rc} \quad (\text{II-35})$$

II.3.2.2.3 – Modèle de la liaison au réseau

Les courants qui circulent entre le convertisseur et le réseau sont imposés par les bobines constituant le filtre passe-bas.

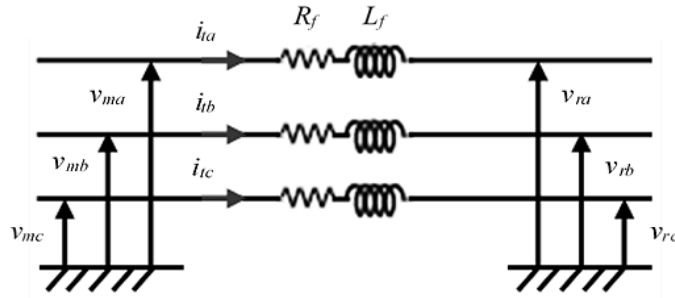


Figure II.12 : Schéma électrique du filtre

v_{ma}, v_{mb}, v_{mc} : Sont les tensions simples modulées par le convertisseur MLI,

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : Sont les tensions simples appliquées aux bornes du transformateur,

i_{ta}, i_{tb}, i_{tc} : Sont les courants circulant dans le filtre et fournis au réseau.

$$\begin{bmatrix} v_{ma} \\ v_{mb} \\ v_{mc} \end{bmatrix} = R_f \cdot \begin{bmatrix} i_{ta} \\ i_{tb} \\ i_{tc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ta} \\ i_{tb} \\ i_{tc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-36})$$

En appliquant la transformation de Park vers la référence synchrone, l'équation précédente devient [75] :

$$\begin{cases} v_{md} = R_f \cdot i_{td} + L_f \cdot \frac{di_{td}}{dt} - \omega \cdot L_f \cdot i_{tq} + v_{rd} \\ v_{mq} = R_f \cdot i_{tq} + L_f \cdot \frac{di_{tq}}{dt} + \omega \cdot L_f \cdot i_{td} + v_{rq} \end{cases} \quad (\text{II-37})$$

v_{md}, v_{mq} : Les tensions modulées par le convertisseur dans le référentiel de Park,

v_{rd}, v_{rq} : Les tensions du réseau dans la référence de Park,

i_{td}, i_{tq} : Les composante directe et quadratique des courants du filtre.

II.4 – Commande du système éolien à base de GSAP

La chaîne de conversion éolienne étudiée, comprend, outre la génératrice synchrone, le CCM, le bus continu, le CCR, et la liaison au réseau via un filtre puis un transformateur. Le CCM permet de contrôler le flux et la vitesse de la génératrice. Le CCR permet de contrôler la tension du bus continu et les puissances actives et réactives échangées avec le réseau [72].

Le dispositif de commande peut se décomposer en deux parties [76] :

- a. La commande de la génératrice synchrone,
- b. Le contrôle de la liaison au réseau.

II.4.1 – Commande de la GSAP

La (figure II.13), illustre les trois fonctions de la commande de la GSAP qui sont :

1. L'algorithme d'extraction du maximum de puissance.
2. La commande vectorielle de la GSAP.
3. Le contrôle du convertisseur côté machine CCM.

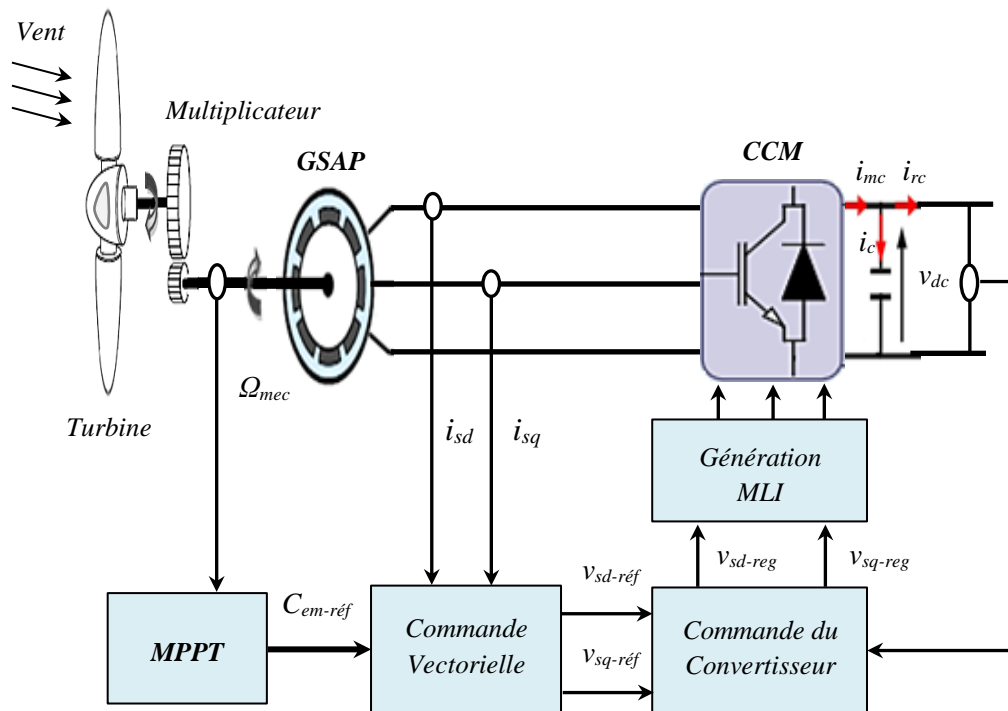


Figure II.13 : Commande de la génératrice synchrone à aimants permanents

II.4.1.1 – Extraction du maximum de la puissance du vent (MPPT)

L'abréviation « MPPT » renvoie à la description anglaise de cette stratégie Maximum Power Point Tracker. La stratégie de MPPT permet de contrôler la vitesse de rotation du générateur pour capter un maximum de puissance par l'éolienne. L'idée de cette stratégie est basée sur des caractéristiques techniques de l'éolienne [57]. La courbe de puissance permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent, comme illustré en (figure II.14) [77].

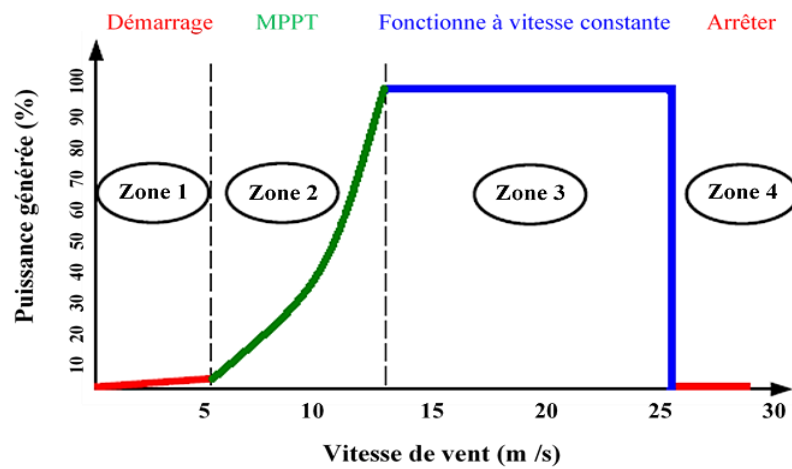


Figure II.14 : Zones de fonctionnement d'une turbine éolienne [76]

Les quatre zones peuvent être définies comme suit :

- **Zone 1** : Elle représente la zone de démarrage où la vitesse du vent est très faible et inférieure au seuil de vitesse requis pour l'entraînement de la génératrice.
- **Zone 2** : Pour une certaine valeur minimale de la vitesse du vent, la génératrice démarre et peut fonctionner entre des vitesses Ω_{min} et Ω_{nom} l'angle de calage est maintenu constant et un algorithme de commande est appliqué afin de capter le maximum de puissance pour chaque vitesse de vent (principe de MPPT) [10].
- **Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone 4** : Dans cette zone, lorsque la vitesse de vent devient trop élevée, un dispositif d'urgence permet d'arrêter l'éolienne (production d'énergie électrique nulle) et de la mettre en sécurité pour éviter tout dégât [78].

II.4.1.1.1 – Technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT)

L'objectif principal de cette technique est de maximiser la puissance capturée de la turbine éolienne pour différentes vitesses du vent. La (figure II.15) montre la courbe de la puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse angulaire $P(\Omega)$ d'une turbine éolienne. Nous pouvons constater que pour chaque valeur de la vitesse du vent, il y a un point de puissance maximale (MPP) où le ratio de vitesse est optimal λ_{opt} . Pour cela il faut contrôler et régler la vitesse de la turbine de façon à garder le rapport $(R \cdot \Omega_{mec})/v_{vent} = \lambda_{opt}$ et pour s'assurer que la turbine fonctionne toujours dans le point MPP.

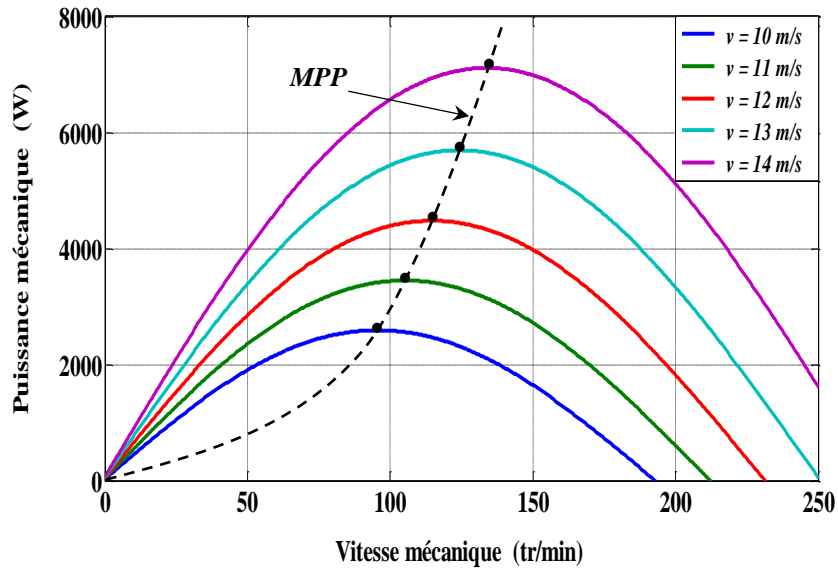


Figure II.15 : La puissance mécanique en fonction de la vitesse mécanique avec MPPT

La puissance mécanique capturée à partir de la turbine P_{mec} est exprimée en fonction du couple mécanique par la relation :

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II-38})$$

Afin de réaliser un contrôle MPPT de la turbine éolienne. Il existe deux types de MPPT [15] :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

II.4.1.1.1.1 – Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique Ω_{mec}

Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine [6] :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} = 0 \quad (\text{II-39})$$

Dans ce cas le couple de frottement visqueux C_f est considéré comme négligeable par rapport au couple de la génératrice C_g . Alors :

$$C_{em} = C_g \quad (\text{II-40})$$

La vitesse du vent dans ce cas n'est pas contrôlée par un capteur de vitesse (anémomètre), mais elle est estimée en fonction du rapport de vitesse λ_{opt} , qui correspond à la puissance maximale capturée de l'éolienne, à partir de l'équation (II-3), on peut déduire l'expression de la vitesse estimée du vent [10] :

$$v_{est} = \frac{\Omega_{tur} \cdot R}{\lambda_{opt}} \quad (\text{II-41})$$

Afin de contrôler la vitesse mécanique Ω_{mec} , il faut calculer un couple électromagnétique de référence C_{em-ref} qui peut être donné par :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad (\text{II-42})$$

Où, $C_{aer-est}$: est le couple éolien estimé, ce dernier peut être calculé selon l'équation :

$$C_{aer-est} = \frac{P_{aer-est}}{\Omega_{tur-est}} = \frac{1}{2} \cdot C_{p-max} \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{v_{est}^3}{\Omega_{tur-est}} \quad (\text{II-43})$$

$$\Omega_{tur-est} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II-44})$$

A partir de ces équations, nous pouvons définir un schéma fonctionnel de la (figure II.16) qui présente la structure de contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse du vent.

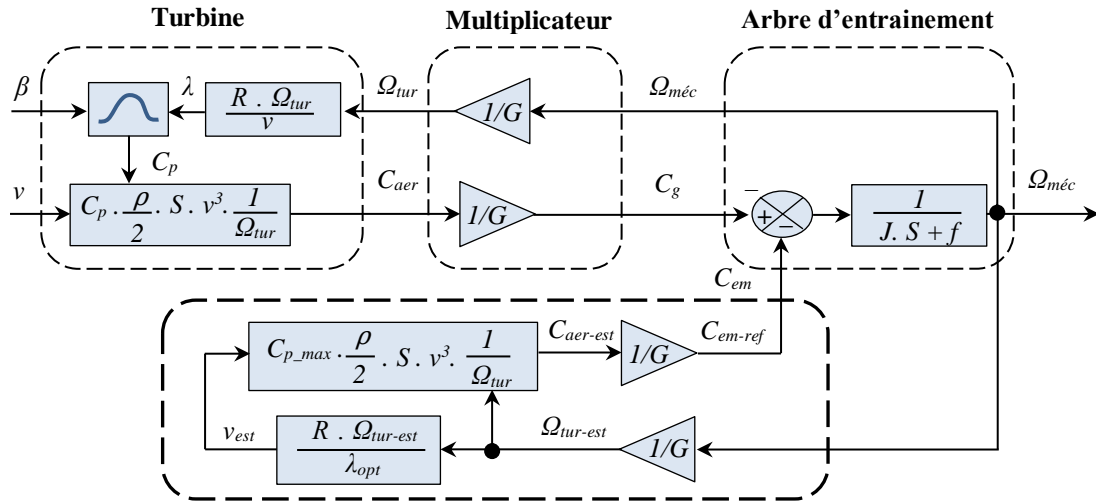


Figure II.16 : Schéma bloc de la MPPT sans asservissement de la vitesse

II.4.1.1.1.2 – Contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique Ω_{mec}

Le principe de cette méthode est de rechercher le point de puissance maximale, en fonction de la vitesse du vent en temps réel, comme nous l'avons vu dans le modèle du vent, la vitesse du vent est très variable et fluctuante, cette variation affecte directement la puissance de la turbine éolienne. Le principe de cette configuration est de générer une puissance de référence à chaque valeur de la vitesse, cette valeur présente la puissance maximale extraite pour une vitesse du vent donnée. Cette puissance de référence sera comparée à la puissance de la turbine pour produire un signal de commande de la puissance [52]. La génératrice électrique et les convertisseurs de puissance sont considérés comme idéaux, par conséquent, le couple électromagnétique développé par la génératrice est considéré égal au couple de référence [10].

$$C_{em} = C_{em_ref} \quad \text{(II-45)}$$

À partir de ce couple électromagnétique de référence C_{em-ref} , la vitesse mécanique du générateur peut être contrôlée en générant une vitesse de référence $\Omega_{mec-ref}$. La méthode la plus connue pour cette commande est l'utilisation d'un contrôleur de type Proportionnel Intégral (PI), la relation qui réunit le couple de référence et la vitesse de consigne avec le contrôleur PI peut être donnée par la relation :

$$C_{em_ref} = R_{\Omega} \cdot (\Omega_{mec_ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{II-46})$$

R_{Ω} : Régulateur de vitesse (PI).

Selon la relation (II-3) on peut définir la vitesse mécanique de référence comme suit :

$$\Omega_{tur-ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{R} \quad (II-47)$$

La (figure II.17) présente le schéma de commande de la turbine avec l'extraction d'un maximum de puissance (MPPT), avec l'utilisation d'un contrôleur PI pour la génération d'une vitesse de référence $\Omega_{mec-ref}$ avec l'asservissement de la vitesse.

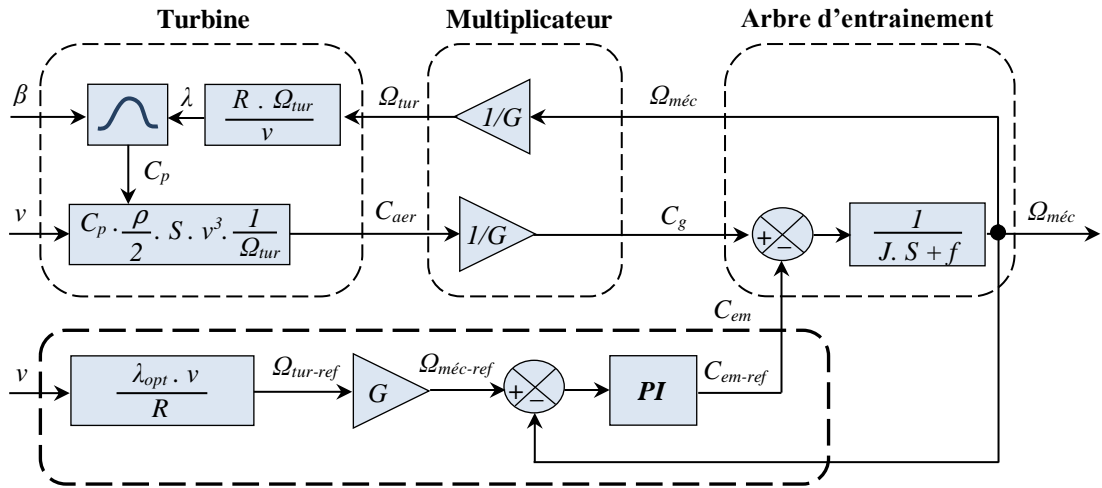


Figure II.17 : Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse

Dans (l'annexe A.1), nous détaillons deux types de régulateurs : le régulateur PI à avance de phase et le régulateur avec anticipation.

II.4.1.2 – Commande vectorielle de la GSAP

Nous avons constaté à partir de la modélisation de la GSAP que son modèle mathématique est non linéaire, et qu'il y a un couplage entre les différents paramètres de l'inducteur avec celles de l'induit dont le couple électromagnétique est lié aux deux composantes du courant dans le repère du Park. Par conséquent la régulation du couple à travers cette relation reste très compliquée. La commande vectorielle à flux orienté est utilisée pour éliminer ce couplage de manière à obtenir un système linéaire similaire à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, où la commande du flux est assurée par une composante de courant et le couple par l'autre [70]. La stratégie la plus utilisée est l'orientation du vecteur de flux sur l'axe du rotor, cela nous permettra d'imposer un courant direct $i_d = 0$, nous pouvons dire que le flux de réaction de l'induit est en quadrature avec le flux du rotor [52].

L'expression du couple électromagnétique peut être donnée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [\psi_f i_{sq}] \quad (\text{II-48})$$

Tant que le flux ψ_f de l'aimant est considéré comme constant, il suffit de contrôler le courant i_{sq} pour le réglage du couple, cette relation peut être sous la forme :

$$C_{em} = K i_{sq} \quad (\text{II-49})$$

Avec ces propositions, le modèle électrique de la génératrice synchrone à aimant permanent dans le repère de Park devient :

$$v_{sd} = -\omega L_{sq} i_{sq} \quad (\text{II-50})$$

$$v_{sq} = R i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega \psi_f \quad (\text{II-51})$$

Le schéma de principe de la commande vectorielle est illustré dans la (figure II.18).

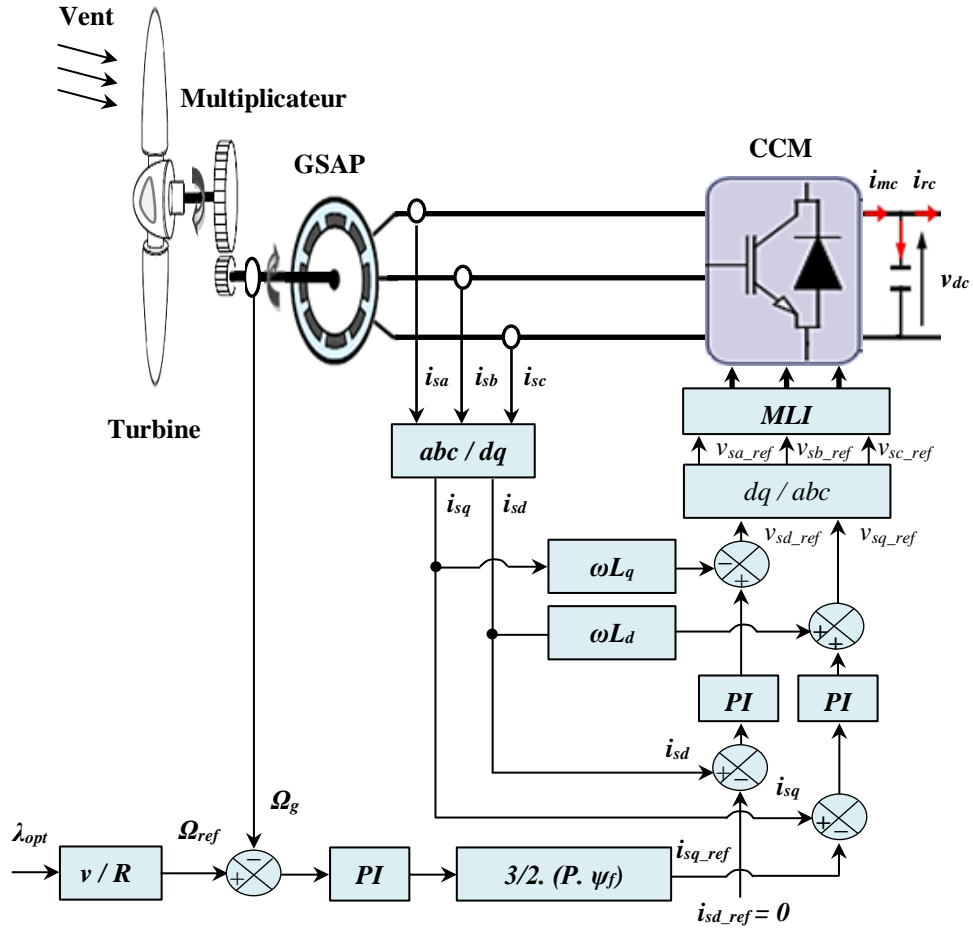


Figure II.18 : Schéma de principe de la commande vectorielle de GSAP

À partir de ce schéma, nous pouvons dire que la commande vectorielle est basée sur trois points essentiels qui sont :

- Imposer une référence du courant direct $i_{sd_ref} = 0$,
- Déterminer la position du rotor et par conséquent la vitesse Ω_{tur} , à partir de laquelle nous allons calculer la référence du couple électromagnétique qui est :

$$C_{em_ref} = K\Omega_{tur}^2 \quad (\text{II-52})$$

- Déterminer la référence de la composante quadrature du courant i_{sq_ref} , ou :

$$i_{sq_ref} = \frac{C_{em_ref}}{\frac{-3}{2}P[\psi_f]} \quad (\text{II-53})$$

II.4.1.2.1 – Conception des contrôleurs PI de courant et de vitesse

Les régulateurs PI sont les plus utilisés, la régulation du courant i_d est réalisée par une seule boucle, alors que la régulation du courant i_{sq} est faite avec deux boucles en cascade. À partir du modèle mathématique de la GSAP dans le repère de Park nous pouvons écrire [79] :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_{sd} \cdot \frac{di_d}{dt} - e_{sd} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_{sq} \cdot \frac{di_q}{dt} + e_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-54})$$

$$\begin{cases} e_{sd} = -p\omega_r \cdot L_{sq} \cdot i_{sq} \\ e_{sq} = -p\omega_r \cdot L_{sd} \cdot i_{sd} + p\omega_r \psi_f \end{cases} \quad (\text{II-55})$$

Les grandeurs e_{sd} et e_{sq} sont considérées comme des perturbations qui peuvent être mesurées, à partir de cette supposition, la fonction de transfert est donnée par :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s \cdot p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e} \quad (\text{II-56})$$

Tenant compte des perturbations e_{sd} et e_{sq} , la fonction de transfert peut être écrite sous la forme [70] :

$$G_s(p) = \frac{i_{sd,q}(p)}{v_{sd,q}(p) + e_{sd,q}(p)} \quad (\text{II-57})$$

II.4.1.2.1.1 – Régulateur de courant i_{sd}

La boucle de régulation est semblable à celle du courant i_{sq} , cependant la référence i_{sd-ref} est imposée à une valeur nulle.

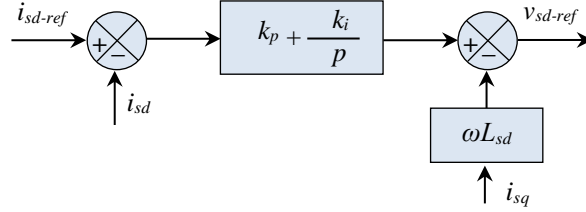


Figure II.19 : Boucle de régulation du courant i_{sd}

II.4.1.2.1.2 – Régulateur de courant i_{sq}

La commande du courant i_{sq} , est effectuée par deux boucles en cascade, la première pour avoir le couple de référence C_{em-ref} généré par la régulation de l'erreur entre la vitesse de référence et la vitesse mesurée directement du rotor, et la deuxième étant la régulation du courant i_{sq-ref} , pour avoir une tension v_{sd-ref} [80].

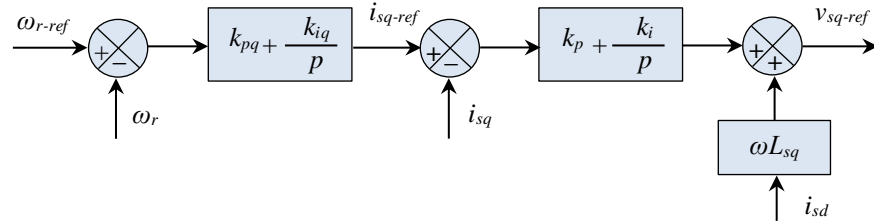


Figure II.20 : Boucle de régulation du courant i_{sq}

II.4.1.2.1.3 – Régulateur de la vitesse Ω_g

Le contrôle de la vitesse est assuré par un régulateur de type PI dont les gains sont respectivement k_{pn} et k_{in} . La (figure II.21) présente la boucle de régulation de vitesse.

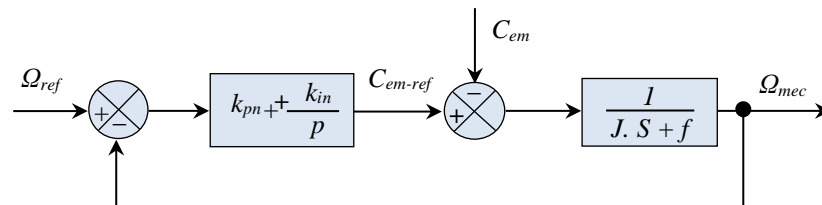


Figure II.21 : Boucle de régulation de la vitesse

Le calcul des régulateurs de courant et de la vitesse, s'est fait avec la méthode classique détaillée dans (l'annexe A.2 et A.3).

II.4.2 – Contrôle de la liaison au réseau électrique

Le CCM est lié au CCR à travers un bus continu. La stabilité de la tension aux bornes de ce condensateur est nécessaire pour le bon fonctionnement du système. Le CCR est connecté au réseau à travers un filtre RL [7]. Ce convertisseur a pour objectif de maintenir la tension constante aux bornes du bus continu ainsi que régler le facteur de puissance au point de connexion avec le réseau. La (figure II.22) décrit la commande du CCR.

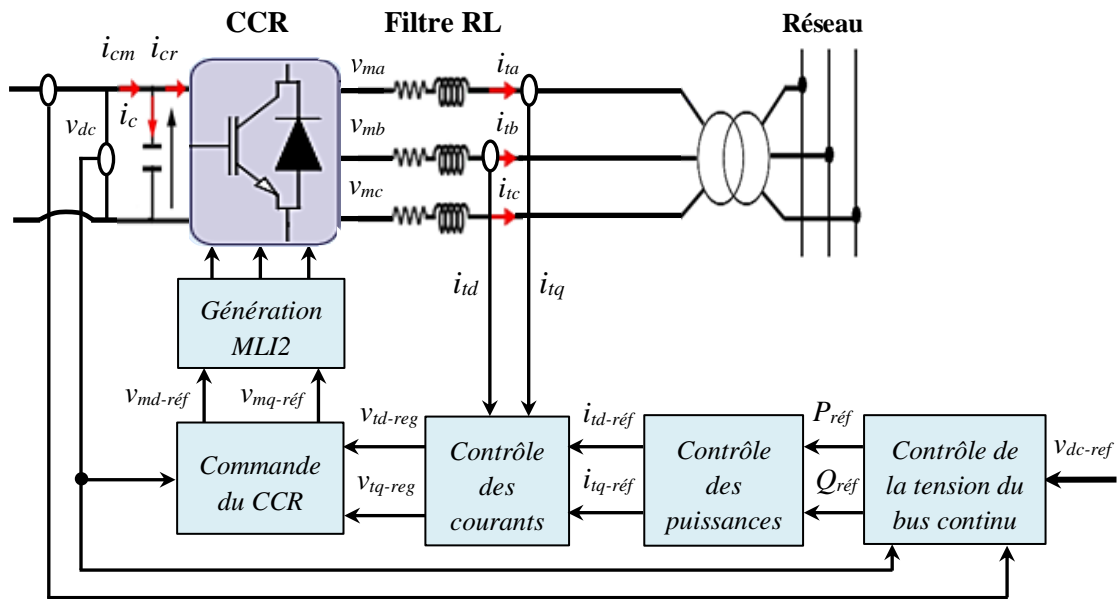


Figure II.22 : Principe de la commande du CCR

Généralement, la commande de la puissance active et réactive côté réseau est réalisée par la commande de courant direct et quadrature de réseau. Dans cette méthode, deux boucles de commande sont utilisées, une boucle externe de régulation de tension v_{dc} est utilisée pour définir la référence de courant d'axe q pour le contrôle de la puissance active, une boucle de régulation interne est utilisée pour commander le courant direct et quadrature de réseau afin de générer des tensions de référence au convertisseur [76].

II.4.2.1 – Contrôle de la tension du bus continu

Afin d'assurer le bon fonctionnement du système, la tension du circuit intermédiaire doit être constante quel que soit la grandeur et la direction de la puissance du rotor. La loi de commande qui nous garantit cet objectif est tirée à partir des expressions de la puissance active et réactive et du courant passant dans le filtre (coté réseau) [1].

L'expression de la puissance active et réactive est comme suit [44] :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_{rd}i_{td} + v_{rq}i_{tq}) \\ Q = \frac{3}{2}(v_{rq}i_{td} - v_{rd}i_{tq}) \end{cases} \quad (\text{II-58})$$

En alignant le vecteur de tension de référence sur l'axe d :

$$\begin{cases} v_{rd} = u \\ v_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II-59})$$

Avec u : l'amplitude de la tension de phase du réseau. L'équation (II.58) devient alors :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}v_{rd}i_{td} \\ Q = -\frac{3}{2}v_{rd}i_{tq} \end{cases} \quad (\text{II-60})$$

En remplaçant (II.59) dans (II .60), on obtient :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}ui_{td} \\ Q = -\frac{3}{2}ui_{tq} \end{cases} \quad (\text{II-61})$$

Le courant dans le condensateur est exprimé par l'équation suivante :

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \quad (\text{II-62})$$

La loi des nœuds nous donne la relation suivante :

$$i_c = i_{mc} - i_{rc} \quad (\text{II-63})$$

À partir de l'équation (II.63), on obtient l'expression des puissances suivante :

$$P_c = P_{mc} - P_{rc} ; \quad P_{mc} = P_c + P_{rc} \quad (\text{II-64})$$

En négligeant les pertes dans le convertisseur, le filtre et le condensateur on peut écrire :

$$P \approx P_{mc} = P_c + P_{rc} \quad (\text{II-65})$$

Avec :

$$\begin{cases} P_{mc} = v_{dc}i_{mc} \\ P_c = v_{dc}i_c \\ P_{rc} = v_{dc}i_{rc} \end{cases} \quad (\text{II-66})$$

II.4.2.1 – Contrôle des courants circulant dans le filtre RL

$$\begin{cases} v_{rd} = R_f \cdot i_{td} + L_f \cdot \frac{di_{td}}{dt} - \omega L_f \cdot i_{tq} + v_{md} \\ v_{rq} = R_f \cdot i_{tq} + L_f \cdot \frac{di_{tq}}{dt} + \omega L_f \cdot i_{td} + v_{mq} \end{cases} \quad (\text{II-67})$$
$$\begin{cases} v_{td} = R_f \cdot i_{td} + L_f \cdot \frac{di_{td}}{dt} \\ v_{tq} = R_f \cdot i_{tq} + L_f \cdot \frac{di_{tq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-68})$$
$$\begin{cases} v_{md} = v_{rd} + L_f \omega_r i_{tq} - v_{td} \\ v_{mq} = v_{rq} + L_f \omega_r i_{td} - v_{tq} \end{cases} \quad (\text{II-69})$$

54



Figure II.25 : Schéma de principe de commande du CCR

La (figure II.26) récapitule le schéma global de la commande de toute la chaîne éolienne. On distingue deux parties principales, coté redresseur qui assure la commande vectorielle, et coté onduleur qui fait la régulation de bus continu et assure l'injection de la puissance active.

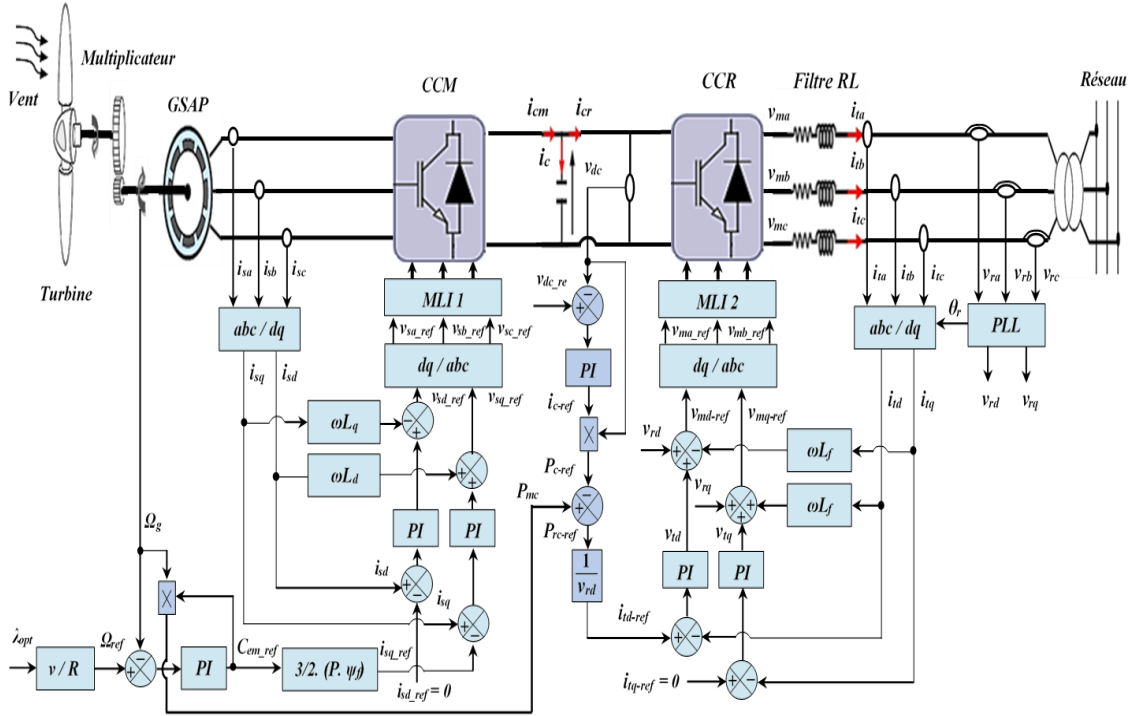


Figure II.26 : Schéma global de la commande du système éolienne à base de GSAP

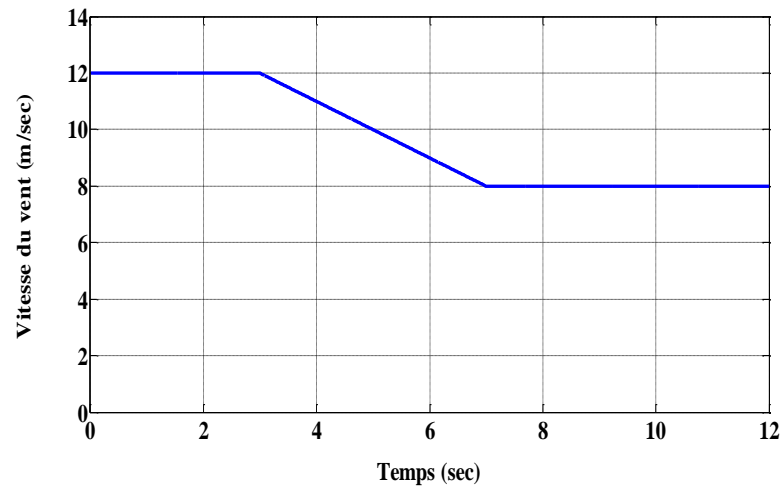
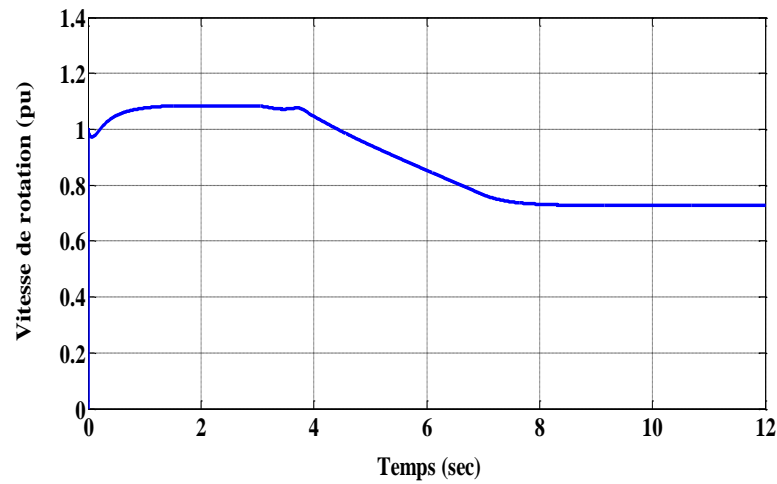
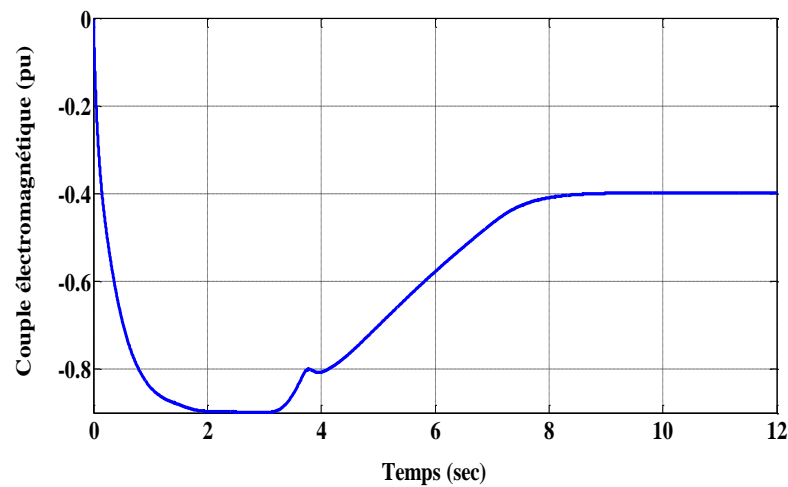
II.5 – Résultats de Simulation

Dans cette partie, La simulation d'une centrale éolienne composée de trois turbines éoliennes, basée sur la génératrice synchrone à aimant permanent (dont les paramètres sont donnés en annexe B) a été réalisée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, avec une vitesse du vent variable autour de 12 m/s comme le montre la (figure II.27).

Les résultats inhérents à cette simulation sont présentés dans les figures ci-dessous :

La (figure II.28) représente l'allure de la vitesse mécanique de rotation de la turbine éolienne, on peut remarquer que celle-ci est variable selon le profil du vent imposé.

Le couple électromagnétique est négatif parce que la MSAP fonctionne en mode génératrice c'est ce qui apparaît clairement dans la (figure II.29).

**Figure II.27 :** Profil du vent**Figure II.28 :** Vitesse mécanique de la turbine éolienne en fonction du temps**Figure II.29 :** Couple électromagnétique en fonction du temps

Les deux composantes du courant statorique de la génératrice électrique selon les deux axes direct et quadratique sont données par la (figure II.30). La composante du courant statorique quadratique (i_{sq}) poursuit sa référence, et la composante du courant statorique directe (i_{sd}) est nulle, cela est dû au contrôle par orientation du flux rotorique réalisée. Le courant direct (i_{td}) injecté au réseau prend un signe négatif puisqu'il est injecté au réseau par le générateur, (figure II.31). Le courant en quadrature (i_{tq}) qui traduit la puissance réactive est bien ajusté à sa valeur de référence zéro. La (figure II.32) illustre l'évolution de la tension du bus continu. On remarque que la tension v_{dc} est maintenue constante et poursuit sa référence. La (figure II.33) représente la variation de la puissance active et réactive d'une éolienne, nous constatons que la puissance active varie avec la variation du profil du vent. L'évolution de la puissance active est multipliée par trois (figure II.34), tandis que la puissance réactive est nulle.

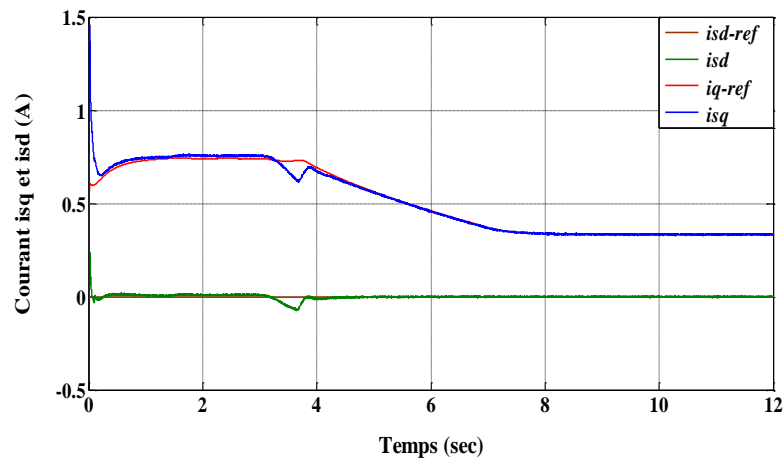


Figure II.30 : Allure du courant coté machine i_{sq} et i_{sd}

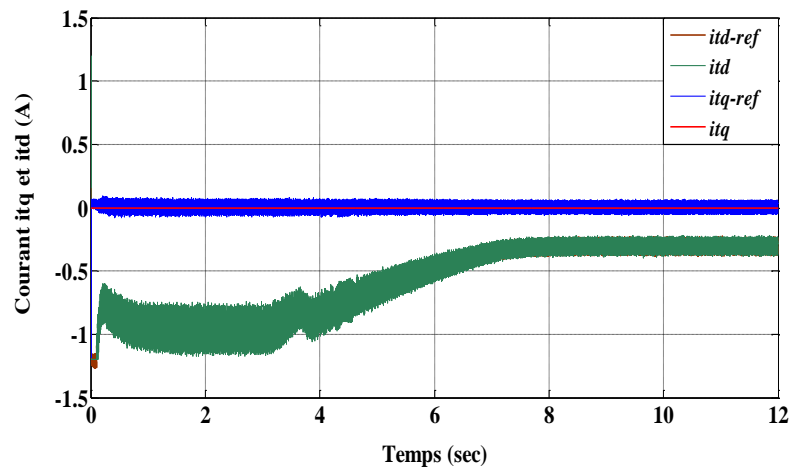


Figure II.31 : Allure du courant coté réseau i_{tq} et i_{td}

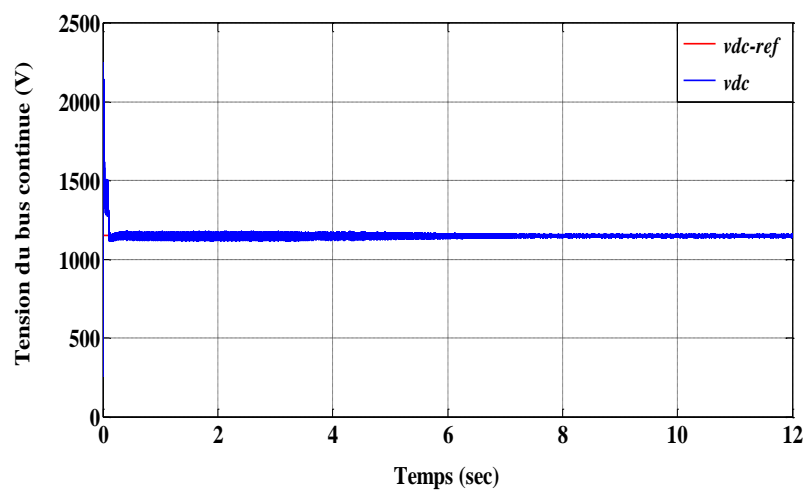


Figure II.32 : Tension du bus continue v_{dc}

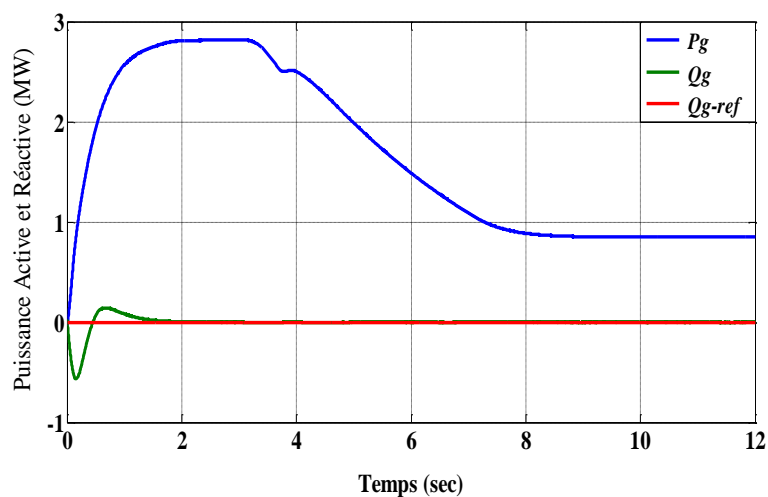


Figure II.33 : Puissance active P_g et réactive Q_g d'une éolienne

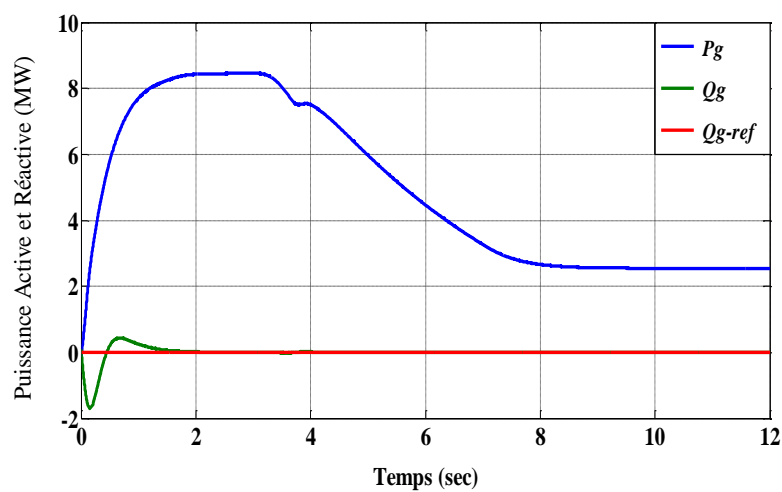


Figure II.34 : Puissance active P_g et réactive Q_g de trois éoliennes

II.6 – Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation ainsi que le réglage classique des principales composantes du système de conversion éolienne à vitesse variable basé sur une GSAP. Les équations de la machine ont été établies dans le référentiel naturel abc , puis transposées dans le référentiel de Park, dans le but de développer les modèles d'état électriques et mécaniques de la génératrice. La stratégie de commande vectorielle orientée flux, associée à la méthode MPPT appliquée au convertisseur côté machine, a été étudiée et exposée. Le contrôle de la liaison au réseau, assuré par la régulation du bus continu, a été mis en œuvre à l'aide de régulateurs PI. Enfin, afin de valider la modélisation et la stratégie de commande globale du système éolien, des simulations ont été réalisées.

Les résultats obtenus démontrent que le système de contrôle est performant et capable d'extraire la puissance maximale sous des conditions de vent variables.

Le chapitre suivant sera consacré à l'intégration des contrôleurs FACTS dans les réseaux électriques, en mettant en évidence leur contribution à l'amélioration de la stabilité et de la qualité de service.

Chapitre III :

Modélisation et réglage d'un
compensateur statique STATCOM

Sommaire

III.1 – Introduction	73
III.2 – Typologie des dispositifs FACTS	74
III.2.1 – Dispositifs FACTS shunt	74
III.2.1.1 – Compensateur statique d'énergie réactive (SVC)	74
III.2.1.2 – Résistance de freinage contrôlée par thyristors (TCBR)	75
III.2.1.3 – Compensateur synchrone statique (STATCOM)	75
III.2.2 – Dispositifs FACTS série	76
III.2.2.1 – Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)	76
III.2.2.2 – Compensateur série commuté par thyristor (TSSC)	77
III.2.2.3 – Compensateur série contrôlée par thyristors (TCSR)	77
III.2.2.4 – Compensateur série commuté par thyristor (TSSR)	78
III.2.2.5 – Compensateur Synchrone Statique Série (SSSC)	78
III.2.2.6 – Condensateur série commandé par thyristors GTO (GCSC)	79
III.2.3 – Dispositifs FACTS hybride	79
III.2.3.1 – Transformateur déphaseur contrôlé par thyristors (TCPST)	79
III.2.3.2 – Régulateur de phase contrôlé par thyristors (TCPAR)	80
III.2.3.3 – Régulateur de tension contrôlé par thyristors (TCVR)	81
III.2.3.4 – Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)	81
III.2.3.5 – Contrôleur de flux de puissance entre lignes (IPFC)	82
III.3 – Compensation d'énergie réactive	83
III.4 – Modélisation et réglage d'un STATCOM	83
III.4.1 – Structure d'un STATCOM	83
III.4.2 – Fonctionnement d'un STATCOM	84
III.4.3 – Modélisation du STATCOM	85
III.4.3.1 – Modèle mathématique simplifié	86
III.4.3.2 – Modèle mathématique du circuit DC	87
III.4.4 – Réglage du compensateur statique STATCOM	87
III.4.4.1 – Boucle de régulation des courants	88
III.4.4.2 – Calcul de régulateur de courant (PI analogique)	90
III.4.4.3 – Calcul de régulateur de la tension continue V_{dc}	92
II.5 – Résultats de Simulation	93
II.6 – Conclusion	95

III.1 – Introduction

Le développement a contribué à une augmentation de la consommation d'énergie électrique, entraînant un accroissement de sa production et de son transport. Par conséquent, les réseaux électriques deviennent plus en plus larges et complexes. L'intérêt de la recherche est de trouver des moyens d'exploitation efficace et économique pour assurer la sécurité et le fonctionnement de réseaux électriques, la solution de ces problèmes est d'améliorer le contrôle des systèmes électriques [82]. Les exploitants de réseaux recourent à de nouvelles solutions innovantes orientées vers l'utilisation de la technologie FACTS [83].

Les systèmes d'électronique de puissance connectés aux réseaux de transport d'électricité sont connus sous le nom de dispositifs FACTS (systèmes de transmission flexible en courant alternatif) terme traduit de l'anglais **Flexible Alternating Current Transmission Systems**. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base de l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer la conduite et le contrôle des réseaux électriques [3]. Ces dispositifs peuvent contribuer à faire face aux différents problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Ils ont la capacité de modifier les paramètres des lignes électriques (phase, réactance de la ligne et la tension entre deux nœuds). Ils peuvent assurer également la sécurité du réseau par l'augmentation des marges de stabilité dynamique et transitoire [13].

Les systèmes FACTS jouent un rôle très important dans les différents réseaux électriques et ils offrent un tas de bénéfices parmi lesquelles [84] :

- Contrôle du flux de puissance ;
- Amélioration de la stabilité ;
- Contrôle de la tension ;
- Accroître la sécurité du système ;
- Augmentation de la capacité de transmission ;
- Contrôle de la puissance réactive ;
- Amélioration de la qualité de l'énergie ;
- Limitation du courant de défaut ;
- Réduction des fluctuations de tension.

III.2 – Typologie des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories selon le mode de couplage [85] :

- Les dispositifs shunts connectés en parallèles avec le système d'alimentation ;
- Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport ;
- Les dispositifs hybrides (série – parallèle) ou (série – série).

III.2.1 – Dispositifs FACTS shunt

L'objectif principal de la compensation shunt est l'accroissement de la puissance transmissible dans le réseau. 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. En régime permanent, la compensation réactive est utilisée pour le maintien de la tension aux nœuds. En régime transitoire, les dispositifs shunts permettent un contrôle dynamique de la tension pour l'amélioration de la stabilité transitoire et l'amortissement des oscillations de puissance. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont les suivants [86], [87], [88] :

a. À base de thyristors :

- TCR (Thyristor Controlled Reactor);
- TSC (Thyristor Switched Capacitor);
- SVC (Static Var Compensator);
- TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor).

b. À base de thyristors GTO :

- STATCOM (Static Synchronous Compensator).

III.2.1.1 – Compensateur statique d'énergie réactive (SVC)

Le SVC est un équipement de compensation parallèle constitué d'un ou plusieurs bancs de condensateurs TSC, de réactances TCR et d'un filtre comme le montre la (figure III.1). Le principe de fonctionnement consiste à ajuster l'énergie réactive générée ou absorbée par une commande bien appropriée des TSC et TCR. Le SVC peut fournir en permanence la puissance réactive nécessaire pour contrôler le transit des puissances et amortir les oscillations de tension [89].

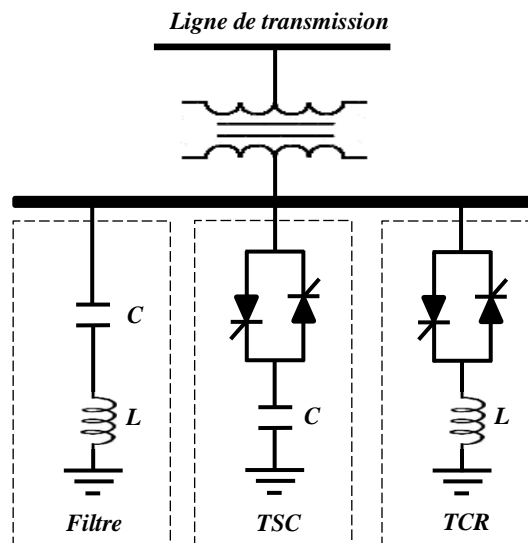


Figure III.1 : Structure de base d'un SVC

III.2.1.2 – Résistance de freinage contrôlée par thyristors (TCBR)

Le TCBR est composé d'une résistance en série avec une valve à thyristor bidirectionnelle (figure III.2). Ce type de compensateur connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [90].

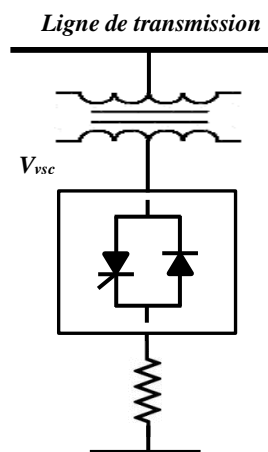


Figure III.2: Schéma d'un TCBR

III.2.1.3 – Compensateur synchrone statique (STATCOM)

Le STATCOM est la version avancée des SVC, constituée d'un convertisseur de tension à base des thyristors GTO ou IGBT associé à des batteries de condensateurs comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau à travers un transformateur de couplage [91]. Il est principalement utilisé pour la compensation

dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue en tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance. La (figure III.3) donne le schéma de principe de STATCOM.

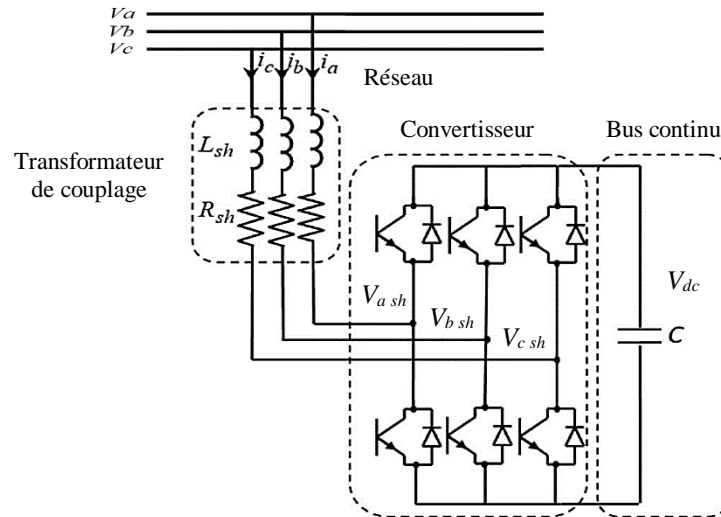


Figure III.3: Schéma de base d'un STATCOM [92]

III.2.2 – Dispositifs FACTS 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. Les plus connus sont [90], [93], [94] :

a. À base de thyristors :

- TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor);
- TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor);
- TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor);
- TSSR (Thyristor Switched Series Reactor).

b. À base de thyristors GTO :

- SSSC (Static Synchronous Series Compensator);
- GCSC (GTO Thyristor-Cotrolled Series Capacitors).

III.2.2.1 – Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)

Le TCSC fait partie des condensateurs séries qui ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années pour améliorer la stabilité et les capacités de charge des réseaux

de transport haute tension. La (figure III.4) donne sa configuration. Il fonctionne par l'insertion de la tension capacitive pour compenser la chute de tension inductive sur les lignes de transport [95].

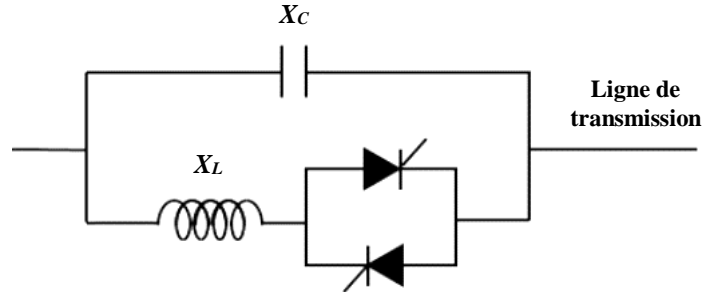


Figure III.4: Schéma de base d'insertion d'un TCSC dans une ligne [83]

III.2.2.2 – Compensateur série commuté par thyristor (TSSC)

Le TSSC est un compensateur capacitif qui se compose de plusieurs condensateurs en série. Chaque condensateur commandé par un commutateur de thyristor qui assure une compensation par palier. Le compensateur série commuté par thyristor TSSC, est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série [13]. Il est constitué de plusieurs capacités montées en série, chacun étant shunté par une valve à thyristors montée en dérivation. Ce compensateur est illustré par la figure suivante :

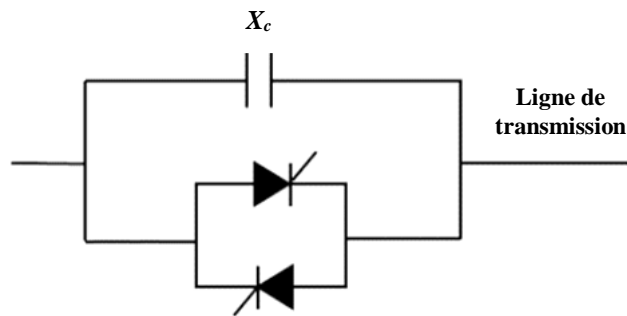


Figure III.5: Schéma de principe de TSSC

III.2.2.3 – Compensateur série contrôlée par thyristors (TCSR)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable comme le montre la (figure III.6). Lorsque l'angle d'amorçage de réactance commandée par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlée X_L agit comme un limiteur de courant de défaut [88].

Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison des deux réactances en parallèle.

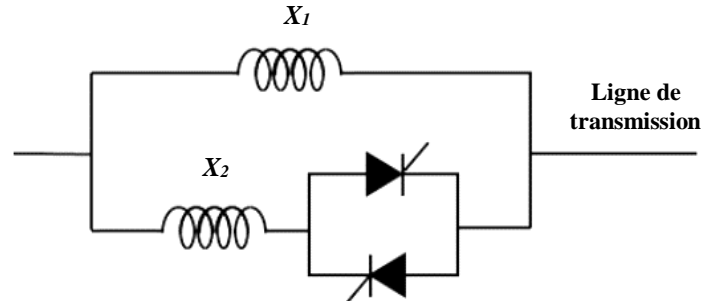


Figure III.6: Schéma de principe du TCSR

III.2.2.4 – Compensateur série commuté par thyristor (TSSR)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés [96].

III.2.2.5 – Compensateur Synchrone Statique Série (SSSC)

Ce type de compensateur série est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (figure III.7). Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne [97].

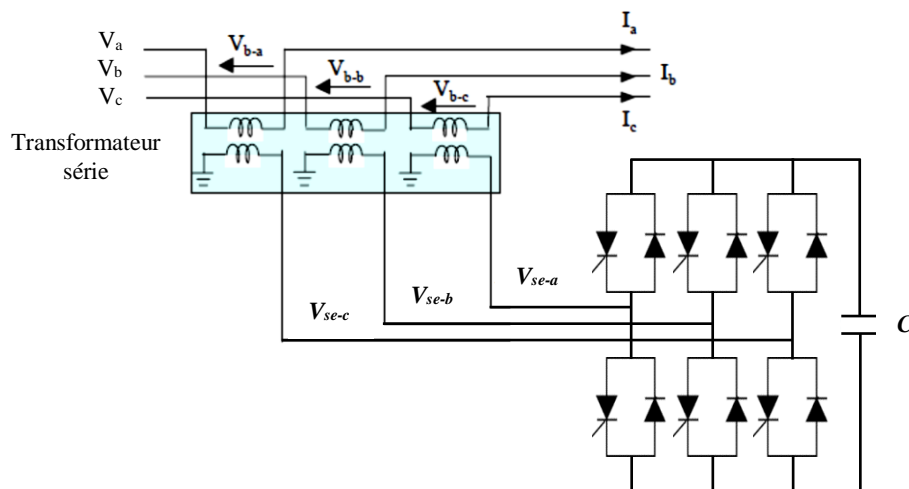


Figure III.7: Schéma de principe du SSSC

III.2.2.6 – Condensateur série commandé par thyristors GTO (GCSC)

Le GCSC a été proposé par Karady et d'autres en 1992. Il est constitué d'un condensateur fixe en parallèle avec une valve à thyristors GTO antiparallèle comme montré dans la (figure III.8) suivante [98] :

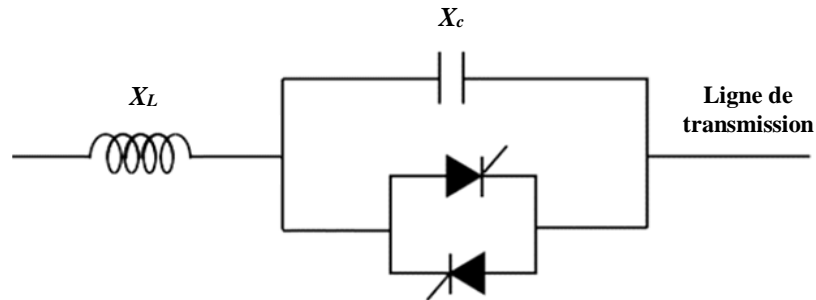


Figure III.8: Schéma de principe du GCSC

III.2.3 – Dispositifs FACTS hybride

Ce type de compensation est une structure hybride entre la compensation parallèle et série. Les compensateurs hybride permettent de remplir toutes les fonctions des dispositifs FACTS séries et parallèles. Ils permettent de contrôler le niveau de la tension, l'angle de transport de l'énergie et le flux des puissances active et réactive. Il existe plusieurs compensateurs hybrides à base de thyristor et à base de thyristor GTO. On peut citer [82], [91], [92] :

a. À base de thyristors :

- TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer);
- TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator);
- TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator).

b. À base de thyristors GTO :

- UPFC (Unified Power Flow Controller);
- IPFC (Interline Power Flow Controller).

III.2.3.1 – Transformateur déphaseur contrôlé par thyristors (TCPST)

Le dispositif TCPST est généralement utilisé pour le contrôle de l'écoulement de puissance active dans les réseaux électriques par l'insertion d'une tension en quadrature avec la tension nodale. De ce fait, ce dispositif a l'aptitude d'augmenter la capacité de

transit des puissances sans créer de nouvelles lignes de transport ou de la production d'énergie car celles-ci demandent beaucoup d'argent et de temps [99]. La structure de base de ce dispositif est illustrée dans la (figure III.9) ci-dessous.

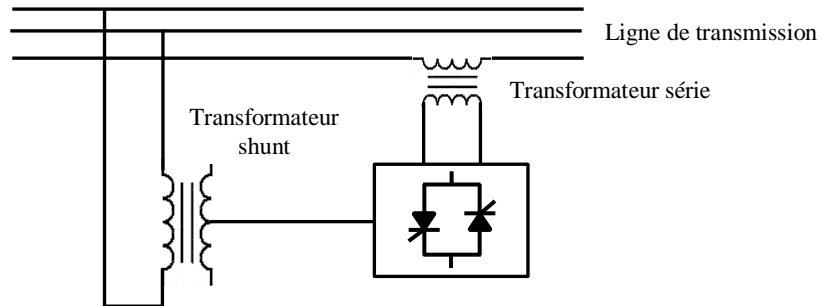


Figure III.9: Schéma de principe du TCPST

III.2.3.2 – Régulateur de phase contrôlé par thyristors (TCPAR)

Le régulateur TCPAR est considéré comme un transformateur déphaseur à base de thyristors, créé afin de remplacer les déphaseurs à transformateurs à régleur en charge LTC (Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Ce dispositif contient deux transformateurs : l'un en série avec la ligne électrique et l'autre en parallèle comme le montre la figure suivante [100].

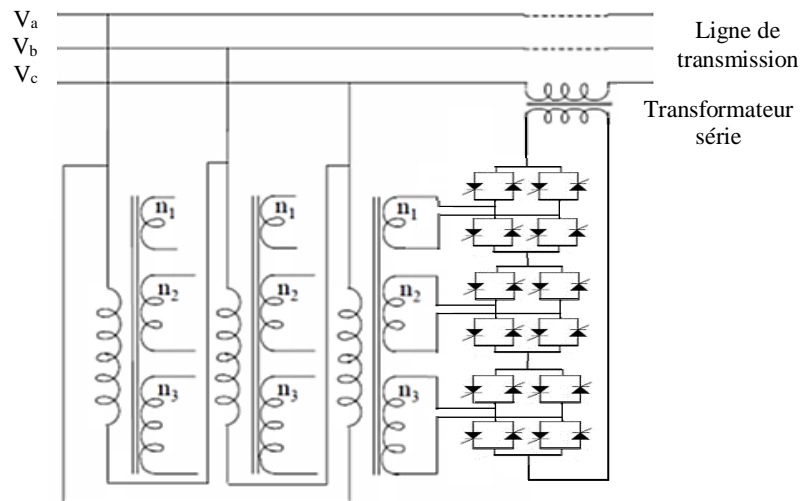


Figure III.10: Schéma de principe du TCPAR [101]

Le principe de fonctionnement de ce régulateur est qu'il modifie la phase de la tension nodale d'un jeu de barre d'un angle α , ce qui influe directement sur l'angle de

transport δ de la ligne électrique qui prendre une nouvelle valeur ($\delta \pm \alpha$). L'amplitude de tension insérée par ce régulateur est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle avec les rapports de transformations : n_1 , n_2 et n_3 . Ce dispositif a l'avantage de ne pas produire les harmoniques en raison de ses thyristors qui sont commandés en pleine conduction [93].

III.2.3.3 – Régulateur de tension contrôlé par thyristors (TCVR)

Le régulateur de tension TCVR insère en série une tension en phase avec la tension nodale d'un jeu de barre pour modifier son amplitude et ce qui permet par conséquence de modifier le transit de la puissance réactive dans les lignes électriques. La structure de base d'un TCVR est illustrée dans la (figure III.11) ci-dessous, dont les interrupteurs à thyristor sont utilisés pour contrôler la tension injectée [102].

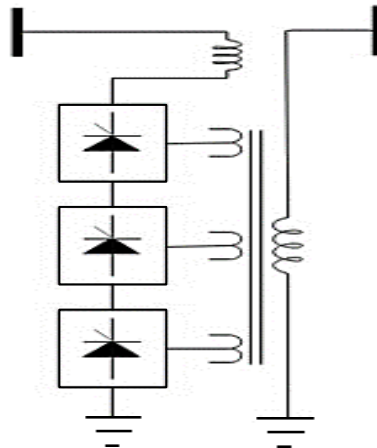


Figure III.11: Structure de base d'un TCVR

III.2.3.4 – Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)

L'UPFC est le plus polyvalent qui a émergé pour le contrôle et l'optimisation des flux d'énergie dans les systèmes de transmission de puissance électrique. Son concept a été proposé par Gyugyi en 1991 [103]. Il offre des avantages majeurs potentiels pour le fonctionnement statique et dynamique des lignes de transmission car il combine les fonctionnalités de STATCOM et SSSC.

L'UPFC est capable de contrôler les trois paramètres de la ligne de transmission (tension, impédance, déphasage) et d'intervenir dans le contrôle du transit de puissance active. En fait, il réunit les fonctions des deux précédents types de dispositifs FACTS

(compensateur shunt et compensateur série) en un seul système employant deux onduleurs de tension. La (figure III.12) donne le schéma de principe de l'UPFC [104].

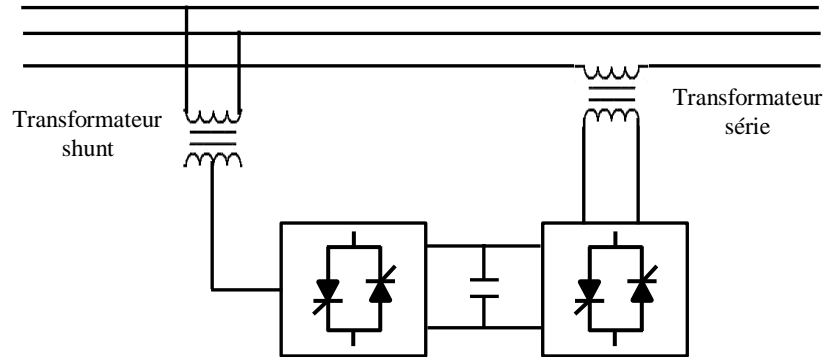


Figure III.12: Structure de base d'un UPFC connecté au réseau électrique

III.2.3.5 – Contrôleur de transit de puissance universel (IPFC)

Le IPFC est un dispositif FACTS combiné d'un certain nombre de compensateur série synchrone statique SSSC dont leurs condensateurs DC sont couplés dans une liaison à courant continu commune, comme illustré dans la (figure III.13). Ce dispositif est utilisé dans les systèmes de puissance en lignes multiples, tel que chaque SSSC fournit sa compensation en série à une ligne différente. Le rôle principal de l'IPFC est de transférer de la puissance active entre les lignes électriques compensés afin d'égaliser le transit des puissances dans les lignes électrique ou bien pour le déchargement d'une ligne surchargée vers une autre moins ou non surchargée [105].

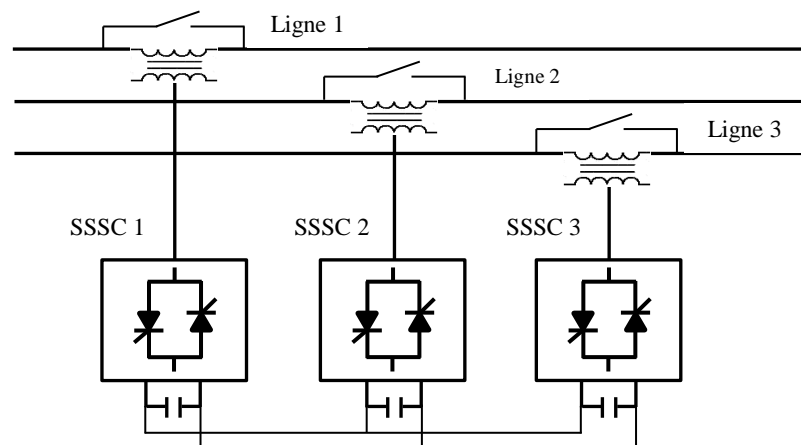


Figure III.13: Structure de base d'un IPFC connecté au réseau électrique

III.3 – Compensation d'énergie réactive

La compensation d'énergie réactive est l'une des plus importantes actions pour le contrôle des systèmes de puissance de transmission et de distribution, la compensation d'énergie réactive qui était à l'époque résolue à base de solution traditionnelle dans ces dernières décennies elle est devenue plus sophistiquée avec l'apparition des dispositifs FACTS et plus exactement les compensateurs de types avancés qui utilisent des convertisseurs statiques pour la compensation de l'énergie réactive [106].

Les réseaux électriques ont pour objectif de transmettre de la puissance depuis la source jusqu'aux centres de consommation dans un réseau à courant alternatif. La puissance apparente a deux composantes la puissance active et la puissance réactive en général, l'écart de tension entre deux extrémités d'une ligne est lié au transit de la puissance réactive consommée par la charge [96]. Pour avoir une tension identique aux deux bouts de la ligne, il faut donc pouvoir produire localement de la puissance réactive. Il existe plusieurs catégories de dispositifs de production de puissance réactive : compensateurs synchrones, les bancs de condensateurs et les compensateurs statiques. En fournissant l'énergie réactive à la demande, par conséquent [4] :

- ✓ L'augmentation de la puissance disponible au niveau des transformateurs de distribution.
- ✓ La limitation des pertes d'énergie dans les câbles par effet Joule (limitation des chutes de tensions) compte-tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- ✓ Des économies d'énergie quel que soit le type de contrat fournisseur d'électricité.

A la section suivante nous allons décrire la topologie de réglage classique ainsi que brièvement le principe de fonctionnement et la description d'un tel compensateur statique synchrone (STATCOM).

III.4 – Modélisation et réglage d'un STATCOM

III.4.1 – Structure d'un STATCOM

Le STATCOM est une deuxième génération de dispositif de FACTS. Selon l'IEEE, Ce dispositif est un moyen de compensation dynamique connecté en parallèle au

système électrique, il est basé sur l'injection d'un courant AC contrôlé à travers un transformateur de couplage. La (figure III.14) représente le schéma de base d'un STATCOM. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de GTO et de diode en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce 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 [107].

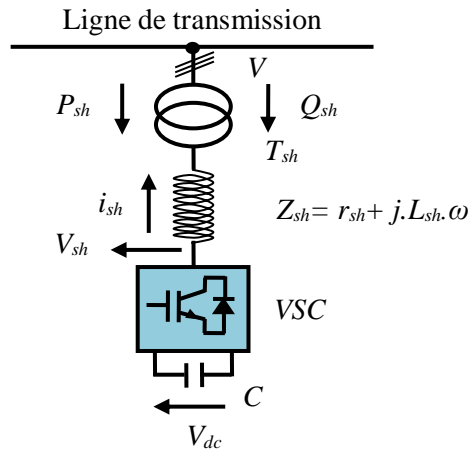


Figure III.14: Structure de base du STATCOM [108]

III.4.2 – Fonctionnement d'un STATCOM

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir d'être créées par un groupe tournant [109]. Le STATCOM est un circuit avec un seul port monté en parallèle avec le réseau, il utilise la commutation forcée, la fréquence de commutation des interrupteurs est élevée, son élément de stockage d'énergie est un condensateur et ceci implique un port DC [110].

Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante [111] :

1. Si $V_{sh} < V$, le courant réactif circule depuis le réseau vers le STATCOM et donc, le STATCOM absorbe de la puissance réactive (figure III.15, a).
2. Si $V_{sh} > V$, le courant circule à travers la réactance en provenance du STATCOM vers le réseau et le STATCOM produit de la puissance réactive (figure III.15, b).
3. Si $V_{sh} = V$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie (figure III.15, c).

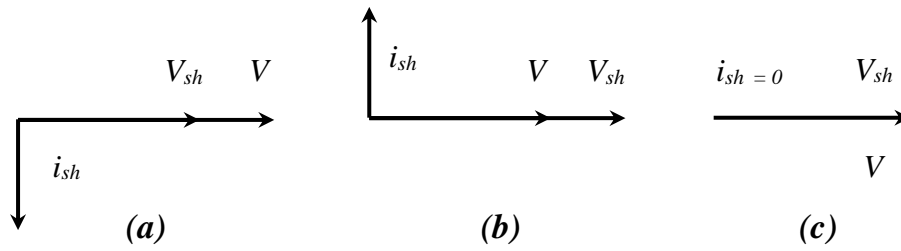


Figure III.15: Diagramme vectoriel du STATCOM

Le courant injecté par le STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V , (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM V_{sh} , est donné par :

$$I = \frac{V_{sh} - V}{X_T} \quad (\text{III-1})$$

Avec, X_T : la réactance de fuite du transformateur de couplage.

La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la (figure III.16). Ce dispositif a l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque tension du réseau diminue.

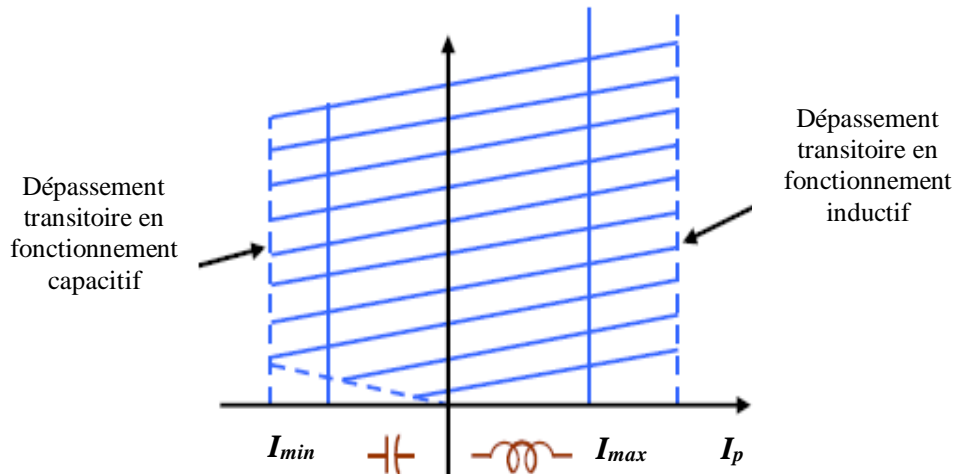


Figure III.16: Caractéristique statique du STATCOM [112]

III.4.3 – Modélisation du STATCOM

Le STATCOM est modélisé comme une source de courant qui injecte un courant alternatif dans un réseau de distribution. Le circuit simplifié du système de contrôle et de compensation de STATCOM est représenté par la (figure III.17).

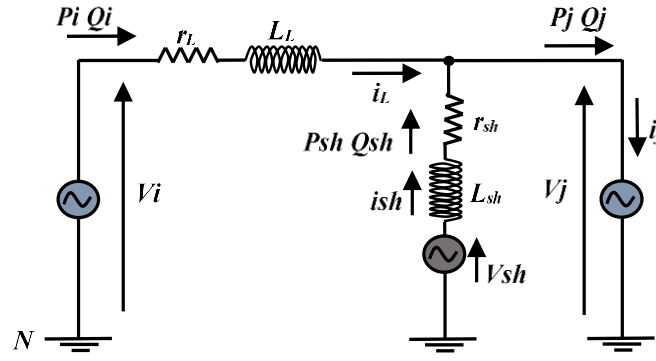


Figure III.17: Circuit équivalent du STATCOM [113]

La modélisation de ce circuit est basée sur les hypothèses suivantes [114] :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Toutes les chutes de tensions dans le compensateur sont représentées par les résistances.
- Les harmoniques causés par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont supposés négligeables.

III.4.3.1 – Modèle Mathématique Simplifié

En appliquant les lois de Kirchhoff sur le circuit de la (figure III.17), on aura les équations suivantes :

$$L_{sh} \frac{di_{sh,abc}}{dt} = -R_{sh} i_{sh,abc} + (V_{abc} - V_{sh,abc}) \quad (\text{III-2})$$

En utilisant la représentation matricielle de l'équation présidente, le modèle mathématique du STATCOM est donné par le système d'équations suivant [115] :

$$\frac{di}{dt} \begin{bmatrix} i_{sha} \\ i_{shb} \\ i_{shc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sha} \\ i_{shb} \\ i_{shc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \left(\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{III-3})$$

Dans le repère de Park (d - q) mentionné au chapitre II. Les équations dynamiques du courant sont les suivantes :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ \omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \left(\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{shd} \\ V_{shq} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{III-4})$$

Les équations des puissances active et réactive en fonction des composants de tension et de courant dans le repère de Park sont données par les équations suivantes [96] :

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} i_{shd} + V_{shq} i_{shq}) \quad (\text{III-5})$$

$$Q_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} i_{shq} - V_{shq} i_{shd}) \quad (\text{III-6})$$

III.4.3.2 – Modèle mathématique du circuit DC

Dans le circuit à courant continue on aura les équations suivantes :

- a) L'équation de courant continue redresser en fonction des courants absorbés et les signaux de commutation de convertisseur :

$$I_{dc} = C_1 i_{sha} + C_2 i_{shb} + C_3 i_{shc} \quad (\text{III-7})$$

- b) L'équation dynamique de tension continué redressée aux bornes de condensateur :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{dc} \quad (\text{III-8})$$

III.4.4 – Réglage du compensateur statique STATCOM

Le STATCOM est un contrôleur utilisé pour la compensation de la puissance réactive dans le but de maintenir la tension dans des niveaux nominaux au point de son raccordement au réseau. Pour cet objectif, ce dispositif injecte ou absorbe un courant de référence I_{ref} , qui est l'image de la puissance à compensée [116].

Ces courants (I_{d-ref} , I_{q-ref}) sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées [117]. La (figure III.18) représente le circuit de réglage du STATCOM.

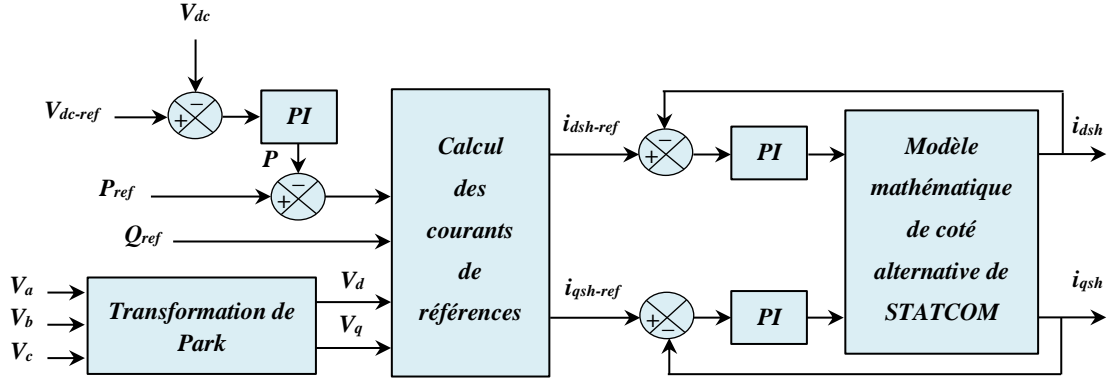


Figure III.18: Schéma de principe de circuit de réglage complet du STATCOM

Le circuit de réglage du compensateur est constitué de deux boucles internes et une boucle externe :

L'objectif des boucles internes est de réguler les courants du réseau afin de minimiser leur contenu harmonique et d'échanger de puissance entre le STATCOM et le réseau, tandis que la boucle externe a pour objectif de régler la tension de sortie du compensateur [118].

III.4.4.1 – Boucle de régulation des courants

Pour régler les courants de réseau nous découplons les équations sur les deux axes (d) et (q). L'équation (III-4) s'écrit sous la forme [85] :

$$\begin{cases} \frac{di_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{shd} + \omega i_{shq} + X_d \\ \frac{di_{shq}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} i_{shq} - \omega i_{shd} + X_q \end{cases} \quad (\text{III-9})$$

Tels que :

$$\begin{cases} X_d = -\frac{1}{L_{sh}} i_{shq} (V_d - V_{shd}) \\ X_q = -\frac{1}{L_{sh}} i_{shd} (V_q - V_{shq}) \end{cases} \quad (\text{III-10})$$

La (figure **III.19**) suivante représente le schéma bloc équivalent de système en boucle ouverte montrant qu'il y a un couplage entre les deux courants i_{shd} et i_{shq} par l'interaction des signaux X_d et X_q [101].

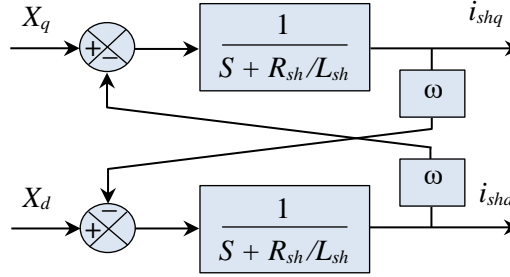


Figure III.19: Système en boucle ouverte

L'injection des termes de couplage avec des signes opposés permet de rendre les deux axes (d, q) complètement indépendants. La méthode de découplage utilisée est dite découplage par compensation. La (figure **III.20**) ci-dessous montre ce type de découplage [1].

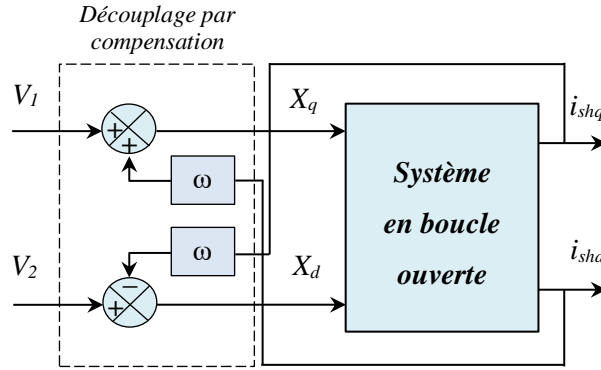


Figure III.20: Schéma de découplage

V_1 et V_2 sont les sorties des régulateurs type PI analogique. Les courants de référence en fonction des puissances et des tensions sont tels que :

$$\begin{cases} i_{shd-ref} = \frac{2}{3} \frac{(P_{sh-ref} \cdot V_d - Q_{sh-ref} \cdot V_q)}{V_d^2 + V_q^2} \\ i_{shq-ref} = \frac{2}{3} \frac{(P_{sh-ref} \cdot V_q + Q_{sh-ref} \cdot V_d)}{V_d^2 + V_q^2} \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

On peut donc sur cette base construire le schéma de commande indiquée par la (figure III.21) :

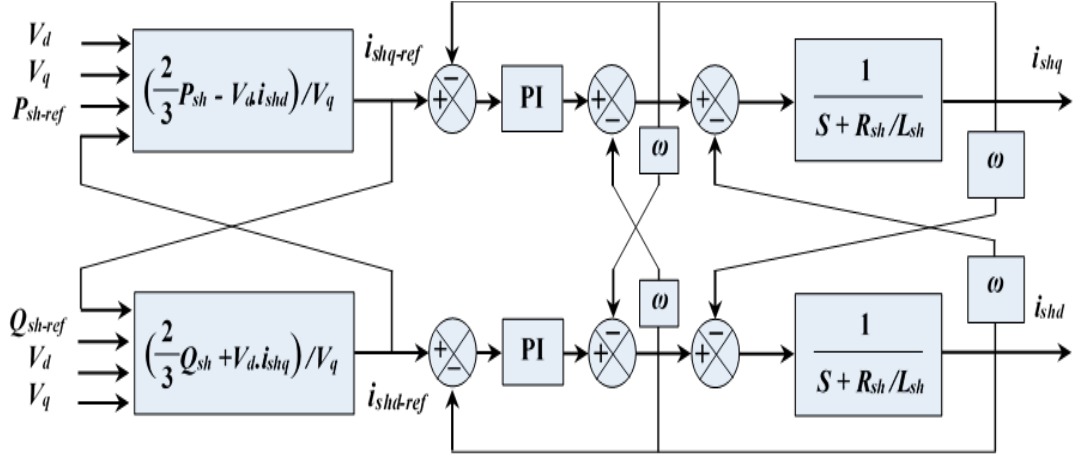


Figure III.21: Réglage du compensateur parallèle avec découplage

Pour dimensionner les régulateurs de courant on utilise la méthode de placement des pôles. Nous allons maintenant nous intéresser au choix et au dimensionnement des régulateurs.

III.4.4.2 – Calcul de régulateur de courant (PI analogique)

La boucle de régulation de courant est représentée par le schéma bloc suivant :

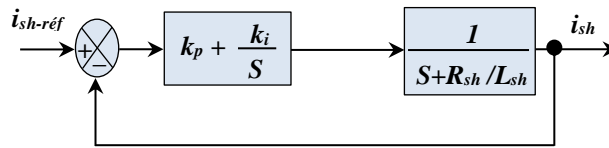


Figure III.22: Schéma bloc de la régulation PI des courants du STATCOM

Les fonctions de transferts du système bouclé régulé sont données par les expressions suivantes :

$$i_{sh} = \varepsilon \cdot \frac{k_p \cdot S + k_i}{S} \cdot \frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (\text{III-12})$$

$$i_{sh} = \frac{\varepsilon}{S} \cdot \frac{k_p \cdot S + k_i}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} = \varepsilon \cdot G(S) \quad (\text{III-13})$$

$$\varepsilon = i_{sh-ref} - i_{sh} \quad (\text{III-14})$$

$$i_{sh}(1 + G(S)) = G(S) \cdot i_{sh-ref} \quad (\text{III-15})$$

$$\frac{i_{sh}}{i_{sh-ref}} = \frac{(k_p \cdot S + k_i)}{S^2 + \left(\frac{R_{sh}}{L_{sh}} + k_p\right) \cdot S + k_i} \quad (\text{III-16})$$

L'équation caractéristique du système en boucle fermé :

$$G(S) = S^2 + \left(\frac{R_{sh}}{L_{sh}} + k_p\right) \cdot S + k_i \quad (\text{III-17})$$

Pour avoir de bonnes performances du système de réglage, on fixe le dépassement d et le temps de montée t_m à : $d = 0.001$ et $t_m = 0.1$ s

L'équation caractéristique du modèle de référence est de la forme [118] :

$$G(S) = S^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot S + \omega_n^2 \quad (\text{III-18})$$

ξ et ω_n sont respectivement le coefficient d'amortissement et la pulsation propre du système. Ils s'expriment par les relations ci-dessous :

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\ln^2(d)}}} \quad (\text{III-19})$$

$$\omega_n = \frac{3}{t_m} \quad (\text{III-20})$$

Alors :

$$k_p = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n - \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad \text{et} \quad k_i = \omega_n^2 \quad (\text{III-21})$$

III.4.4.3 – Calcul de régulateur de la tension continue V_{dc}

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les pertes de commutation du compensateur et la perturbation du réseau électrique sont les causes qui peuvent la modifier. La régulation de cette tension s'effectue en absorbant ou en fournissant de la puissance active au réseau. La correction de cette tension se fait par l'adjonction des composantes fondamentales de courant actif aux courants de référence de la partie parallèle [1].

En négligeant les pertes de commutation dans l'onduleur, la relation entre la puissance absorbée par le convertisseur parallèle et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{sh} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) \quad (\text{III-22})$$

La (figure III.23) montre la chaîne de régulation permettant le réglage de tension continue V_{dc} , $V_{dc\text{-réf}}$ et P_{sh} la puissance absorbée par le compensateur nécessaire au réglage.

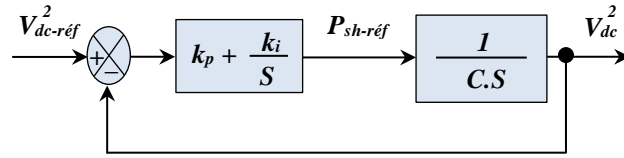


Figure III.23: Régulation de la tension continue

La fonction de transfert de la boucle fermée est :

$$\frac{V_{dc}^2}{V_{dc\text{-ref}}^2} = \frac{\frac{2k_p}{C} S + \frac{2k_i}{C}}{S^2 + \frac{2k_p}{C} S + \frac{2k_i}{C}} \quad (\text{III-23})$$

$$\omega_n^2 = \frac{2K_i}{C} \quad \text{et} \quad \xi = K_p \sqrt{\frac{1}{2.C.K_i}} \quad (\text{III-24})$$

$\zeta = 0.707$ et $\omega_n = 40 \text{ rd/s}$ permettent d'avoir un bon amortissement du système en boucle fermée.

III.5 – Résultats de Simulation

La (figure III.24) suivante montre la structure du modèle de test de STATCOM installé sur un réseau électrique unidirectionnel (à 30 KV de source, longueur 25 km de ligne et une charge de 3 MW, 1,5 MVAR). On applique la variation de consigne de tension à 0,5 sec et la variation de la charge dans les instants 1 sec et 1,5 sec.

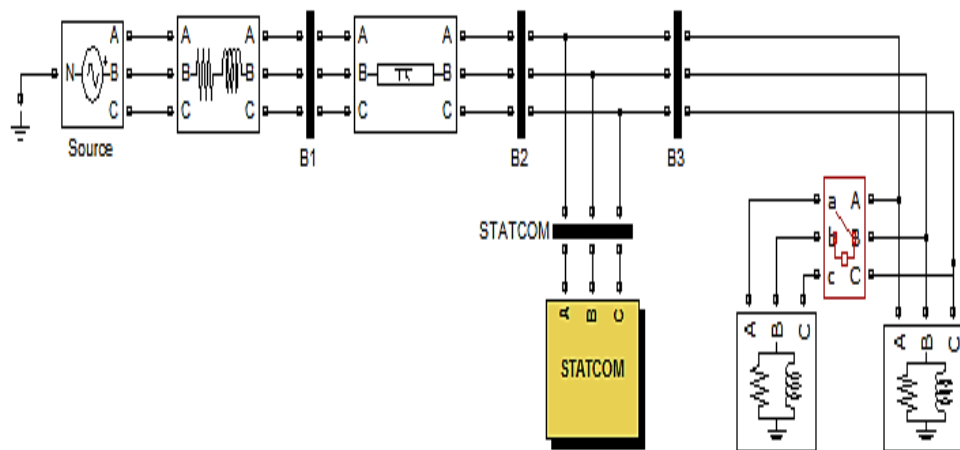


Figure III.24: Structure du modèle de simulation

La (figure III.25) représente le comportement de réglage de la tension du réseau, la réponse suit la consigne avec des petites perturbations transitoires dans l'instant de changement de consigne et dans les instants de variation de charge.

Dans la (figure III.26), on observe la variation de la puissance réactive en mode (inductif - capacitif) pour compenser la chute de tension avec des petites variations transitoires sur la puissance active pour charger le condensateur du bus continu.

Les (figures III.27 et III.28) décrivent les composantes des courants injectés par le STATCOM, chaque réponse suit l'ordre de la commande, le courant quadratique i_{shq} représente l'image de la puissance réactive et le courant direct i_{shd} représente l'image de la puissance active.

La tension continue V_{dc} aux bornes du condensateur (figure III.29) poursuit la consigne avec des faibles perturbations dans les instants de changement de consigne et de variation de charge.

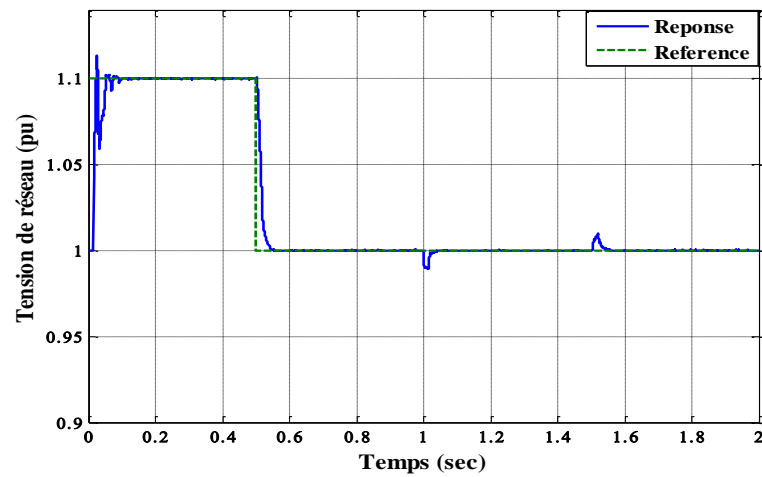


Figure III.25: Variation de tension de réseau

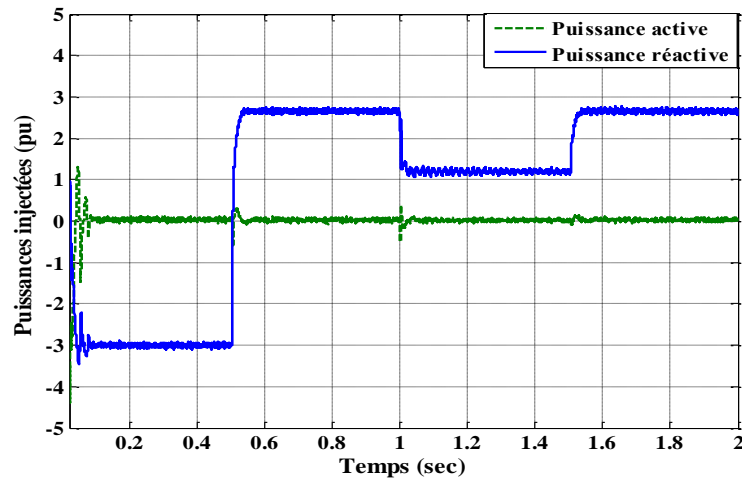
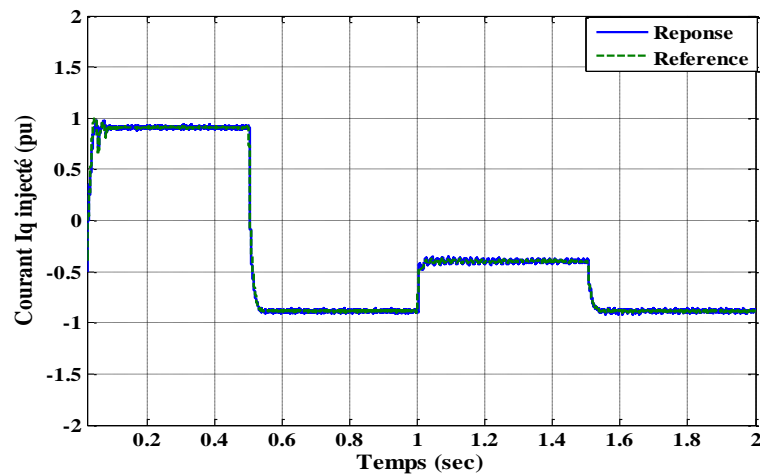


Figure III.26: Variation des puissances active et réactive injectées

Figure III.27: Variation du courant i_{shq} injecté par STATCOM

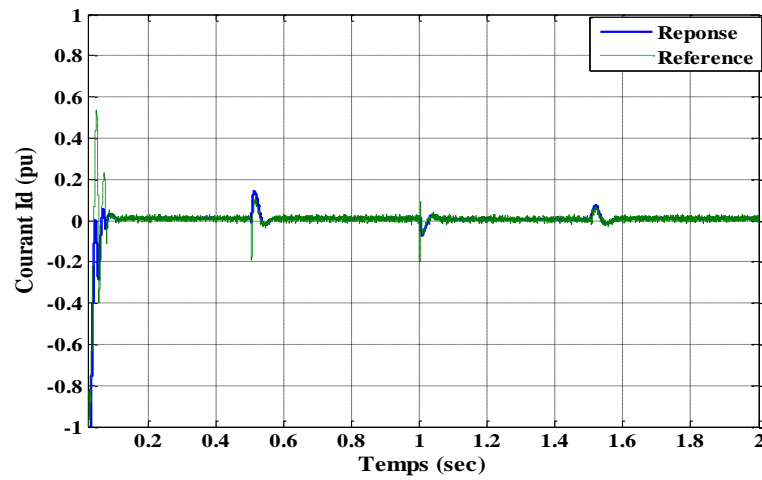


Figure III.28: Variation du courant i_{shd} injecté par STATCOM

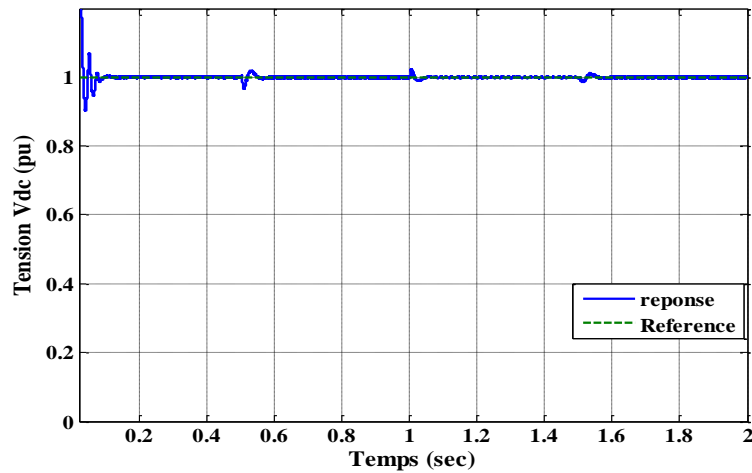


Figure III.29: Variation de tension du bus continu

III.6 – Conclusion

Le STATCOM est un système FACTS très puissant, similaire au principe du compensateur synchrone, caractérisé par : une grande flexibilité de la commande, des pertes faibles et des réponses très rapides sous ordre de la commande ou en cas de perturbation de la charge. Ce système capable de stabiliser et de compenser la chute de tension du réseau électrique.

Le chapitre suivant présente des simulations par Matlab/Simulink sur le système étudié, où trois scénarios de défauts sont simulés et discutés.

Chapitre IV :

Couplage d'une GSAP - STATCOM au réseau électrique perturbé

Sommaire

IV.1 – Introduction	98
IV.2 – Micro-réseaux électriques	98
IV.2.1 – Les avantages des micro-réseaux	99
IV.3 – Présentation du micro-réseau de test	99
IV.4 – Résultats de simulations	100
IV.4.1 – Variation de la vitesse du vent	101
IV.4.2 – Variation de la charge	105
IV.4.3 – Apparition d'un défaut de court-circuit	109
II.5 – Conclusion	113

IV.1 – Introduction

Comme mentionné dans le chapitre précédent, Les systèmes FACTS viennent pour garantir le bon fonctionnement d'un réseau électrique complet avec une bonne qualité de l'alimentation pour le coté de distribution et un bon flux énergétique sur la transmission de l'énergie électrique. Alors, l'utilisation des compensateurs statiques comme le STATCOM permet de réguler la tension du réseau, de maintenir des flux de puissance réactive contrôlables entre les unités de production et le réseau de services publics et de maintenir les éoliennes connectées au réseau même sous certaines conditions de perturbation [109].

Dans ce chapitre, nous allons étudier l'impact de STATCOM sur la qualité de la tension et son efficacité pour faciliter l'intégration des éoliennes dans un micro-réseau.

IV.2 – Micro-réseaux électriques

Un micro-réseau est un système énergétique autonome qui peut produire, distribuer et contrôler l'électricité localement. Contrairement aux réseaux électriques centralisés traditionnels, les micro-réseaux sont à plus petite échelle et peuvent fonctionner indépendamment ou en conjonction avec le réseau principal. Ils consistent en une combinaison de sources d'énergie, telles que des panneaux solaires, des éoliennes et des générateurs de combustibles fossiles, ainsi que des systèmes de stockage d'énergie comme le montre la (figure IV.1) [119].

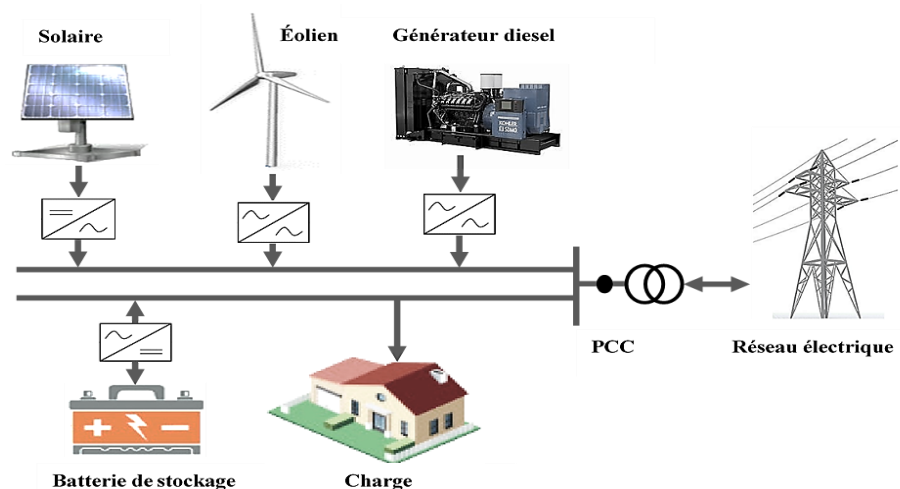


Figure IV.1 : Exemple d'un micro-réseau

Les micro-réseaux fonctionnent en utilisant un mélange diversifié de sources de production d'énergie et de technologies de stockage pour répondre à la demande énergétique locale. Ils peuvent fonctionner de manière autonome, déconnectés du réseau principal ou se synchroniser avec le réseau pour échanger de l'énergie selon les besoins. Les contrôleurs de micro-réseau gèrent le flux et la distribution d'énergie, optimisant le fonctionnement du système pour plus de fiabilité, de rentabilité et de durabilité [120].

IV.2.1 – Les avantages des micro-réseaux

Les micro-réseaux offrent une multitude d'avantages qui les rendent essentiels dans la transition énergétique actuelle [30], [121] :

- 1. Résilience accrue** : En cas de panne du réseau principal, les micro-réseaux garantissent la continuité de l'alimentation électrique, renforçant ainsi la sécurité énergétique des communautés. Cette autonomie est cruciale, notamment pour les zones vulnérables.
- 2. Intégration des énergies renouvelables** : Grâce à leur structure décentralisée, les micro-réseaux facilitent l'intégration des énergies renouvelables, permettant de mieux gérer les variations de production issues du solaire ou de l'éolien.
- 3. Réduction des pertes** : En limitant les distances de transport de l'électricité, ces systèmes diminuent les pertes d'énergie, rendant l'approvisionnement plus efficace.
- 4. Flexibilité** : Les micro-réseaux s'adaptent aisément aux évolutions des besoins énergétiques et aux nouvelles technologies, garantissant ainsi une gestion optimale.
- 5. Autonomie** : Leur capacité à fonctionner de manière autonome est particulièrement avantageuse pour les zones isolées, permettant à ces communautés de bénéficier d'une source d'énergie fiable et durable.

IV.3 – Présentation du micro-réseau test

Le micro-réseau analysé dans cette étude comprend une centrale électrique à combustible fossile de 220 kV connectée au réseau de distribution via un transformateur abaisseur de tension de 220/30 kV. De plus, le système comprend une centrale éolienne équipée d'un générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) fonctionnant à 575 V,

qui est relié au réseau de distribution via un transformateur élévateur de tension de 575 V/30 kV. Au niveau du réseau de distribution, une charge électrique est connectée à côté d'un STATCOM, comme illustré dans la (figure IV.2).

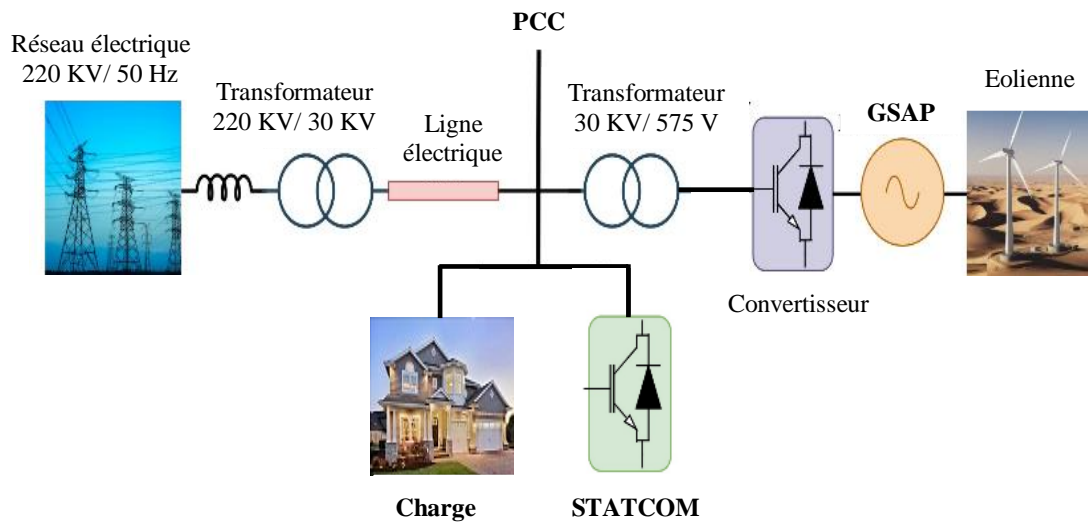


Figure IV.2 : Configuration du micro-réseau étudié

IV.4 – Résultats de simulations

Le modèle mathématique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne ainsi que le STATCOM développés dans les parties précédentes sont implantés sur le logiciel Matlab/Simulink. Les paramètres utilisés pour la simulation sont présentés dans les tableaux de (l'Annexe B). Ces tableaux fournissent des valeurs détaillées pour les différents composants du système et les paramètres de contrôle, qui sont déterminants pour l'analyse et l'évaluation des performances du système modélisé.

La figure suivante montre le chemin énergétique au niveau du nœud de la charge ($P_{ch} = 8,2$ MW et $Q_{ch} = 2$ MVAR).

Les performances élevées de cette modeste reconduction seront justifiées par l'application des trois scénarios de tests suivants :

1. Variation de la vitesse du vent,
2. Variation de la charge,
3. Apparition d'un défaut de court-circuit.

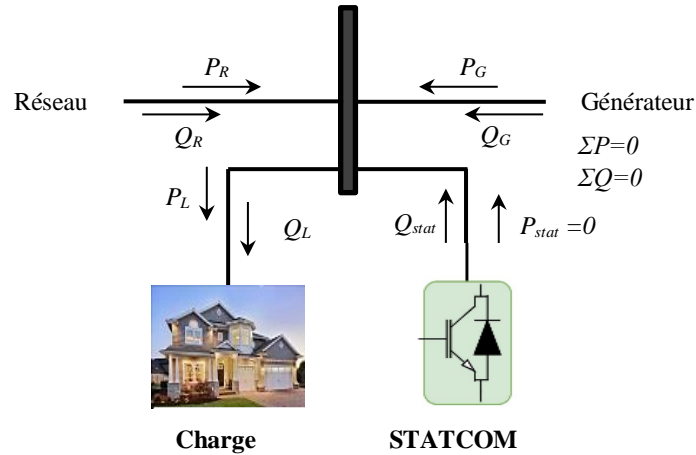


Figure IV.3 : Le chemin de l'énergie au niveau du nœud de la charge

IV.4.1 – Variation de la vitesse du vent

La perturbation aérodynamique est mise en œuvre par la variation de la vitesse du vent de 12 m/sec à 8 m/sec pendant 5 secondes.

La (figure IV.4) représente la diminution de la chute de tension en l'absence du compensateur STATCOM, mais par contre en présence du STATCOM l'amplitude de tension revient toujours à la valeur de référence quelle que soit la variation du vent.

Comme le montre la (figure IV.5) la puissance active générée diminue en raison de la diminution de la vitesse du vent (en utilisant de la commande MPPT), et la puissance réactive générée reste nulle sous l'ordre de la commande, ce qui diminue par conséquent l'amplitude du courant généré.

La (figure IV.6) décrit l'évolution énergétique engendré par le réseau électrique vers la charge en présence du STATCOM. Le STATCOM permet de forcer le réseau électrique pour injecter l'énergie électrique nécessaire pour compenser l'insuffisance énergétique au niveau de la charge. Comme la montre la (figure IV.7), le STATCOM injecte l'énergie réactive vers la charge pour assurer le réglage de tension au niveau du nœud de charge et également l'injection nulle de puissance active.

La (figure IV.8), met en évidence l'avantage du STATCOM pour maintenir une alimentation électrique stable à la charge, même en cas de fluctuations de la vitesse du vent, en cas de diminution ou d'augmentation de la production d'énergie éolienne. Cela permet au système de s'adapter aux conditions changeantes et de continuer à fournir

l'énergie nécessaire à la charge. En l'absence de STATCOM sur le système de test, la puissance (active et réactive) générée par le réseau électrique varie de manière aléatoire, comme le montre la (figure IV.9).

Cette instabilité entraîne un déficit énergétique au niveau de la charge. Comme le montre la (figure IV.10) causé par un effondrement de tension, qui est illustré plus en détail dans la (figure IV.5). Sans la compensation de STATCOM le réseau peine à maintenir une alimentation électrique constante, ce qui entraîne une fourniture d'énergie inadéquate à la charge.

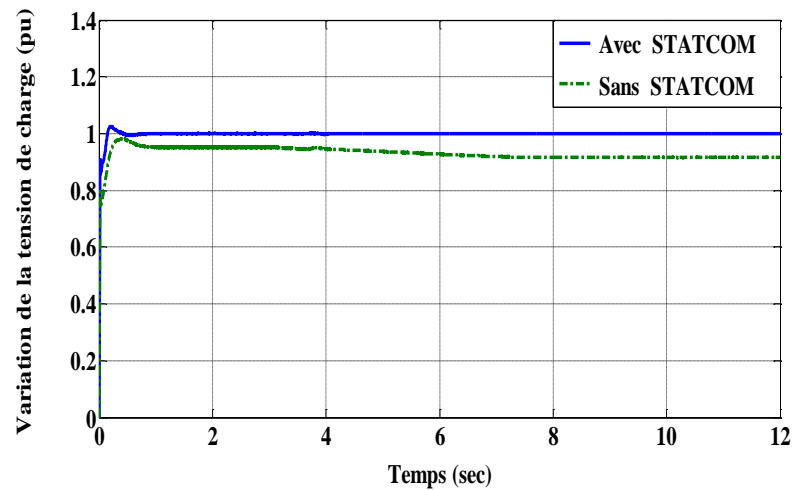


Figure IV.4 : Variation de la tension de charge

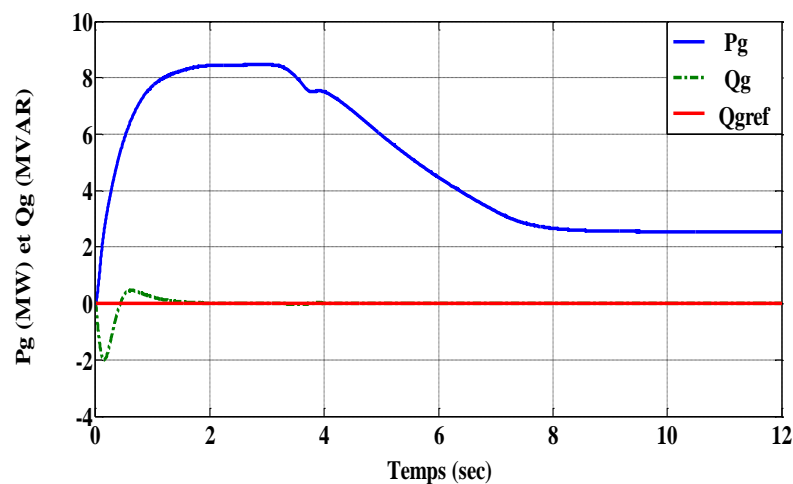


Figure IV.5 : Puissance active et réactive générée par l'éolien

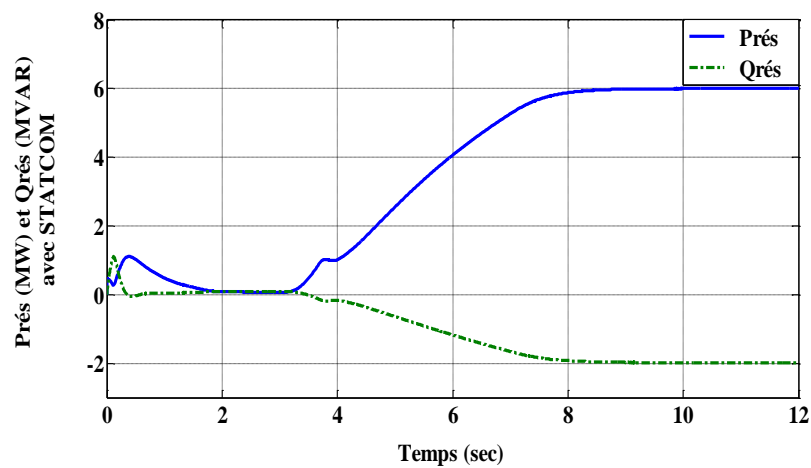


Figure IV.6 : Puissance active et réactive générée par le réseau (avec STATCOM)

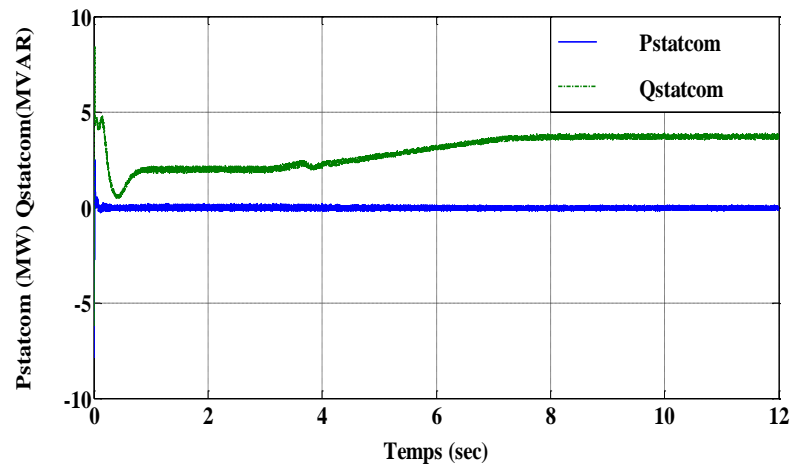


Figure IV.7 : Puissance active et réactive injectée par le STATCOM

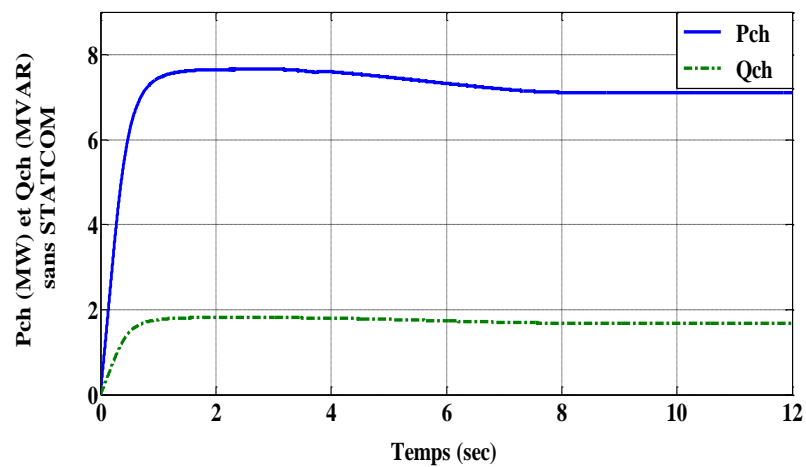


Figure IV.8 : Puissance active et réactive de la charge (sans STATCOM)

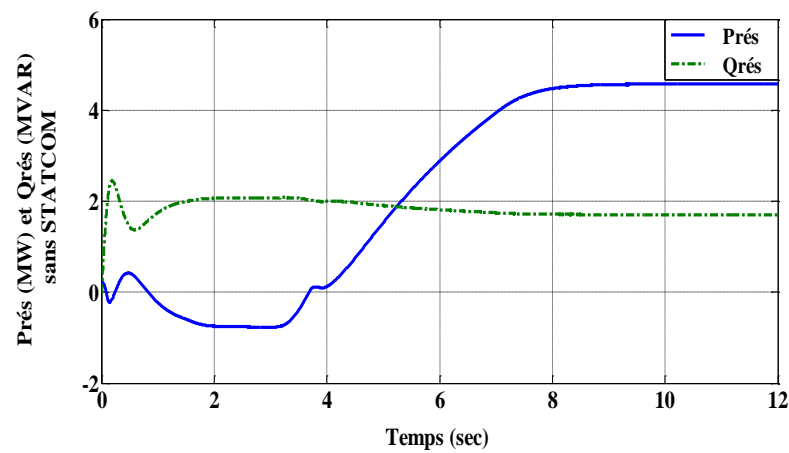


Figure IV.9 : Puissance active et réactive générée par le réseau (sans STATCOM)

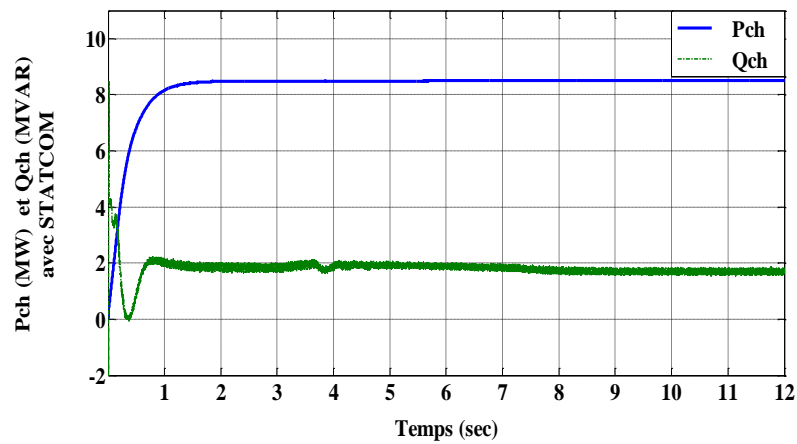


Figure IV.10 : Puissance active et réactive de la charge (avec STATCOM)

Les (figures IV.11 et IV.12) représentent successivement le maintien de la tension continue sur le bus continu du STATCOM et sur le bus continu de l'éolienne.

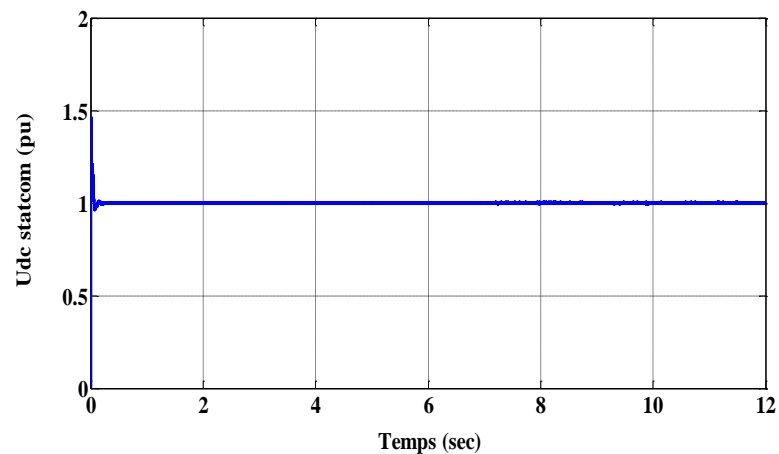


Figure IV.11 : Tension continue du STATCOM

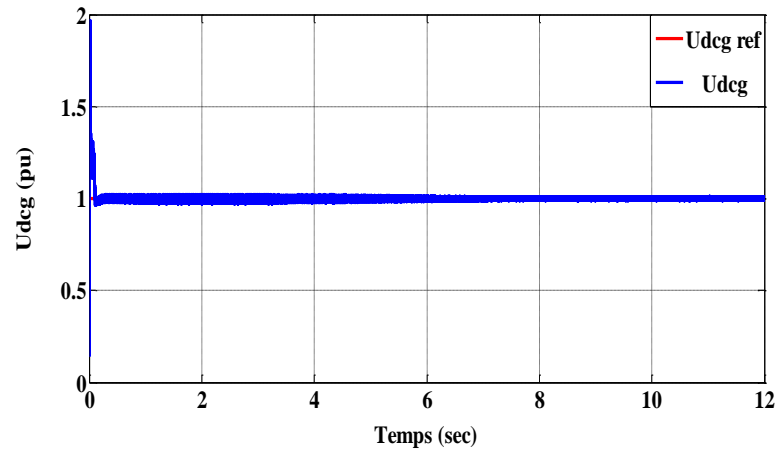


Figure IV.12 : Tension continue de l'éolienne

IV.4.2 – Variation de la charge

Maintenant la charge est ajustée jusqu'à 12 MW et 4 MVAR pendant de 3 à 5 secondes, il ya 03 intervalles du temps (t) :

- Intervalle 1 : $P_{ch} = 8,2$ MW et $Q_{ch} = 2$ MVAR pour $t < 3$ sec.
- Intervalle 2 : $P_{ch} = 12$ MW et $Q_{ch} = 4$ MVAR pour $3 \text{ sec} < t < 5 \text{ sec}$.
- Intervalle 3 : $P_{ch} = 8,2$ MW et $Q_{ch} = 2$ MVAR pour $t > 5$ sec (retour à l'état initial).

Comme le montre la (figure IV.13), la présence de STATCOM assure le maintien de la tension de charge pendant les trois intervalles de temps, même avec des faibles perturbations aux moments de perturbation. En revanche, en l'absence de STATCOM, il y a des chutes de tension importantes pendant ces trois intervalles, en particulier dans le deuxième intervalle lorsque la charge augmente, ce qui entraîne des niveaux de tension inacceptables.

La (figure IV.14) montre que la puissance active et réactive de la charge reste constante, contrôlée par l'algorithme MPPT, quelles que soient les variations de charge. Cette stabilité est maintenue avec et sans la présence du STATCOM.

Le STATCOM intervient toujours pour forcer le réseau électrique à injecter des puissances nécessaires selon les besoins de la charge, soit en augmentation ou en diminution (figure IV.15). La (figure IV.16) illustre la variation de la puissance réactive injectée par le compensateur statique en réponse aux variations de la charge. En présence du compensateur STATCOM, la charge reste stable sur les trois intervalles de temps,

comme le montre la (figure IV.17). En revanche, sans compensateur, la charge subit une dégradation complète, comme illustré dans la (figure IV.18).

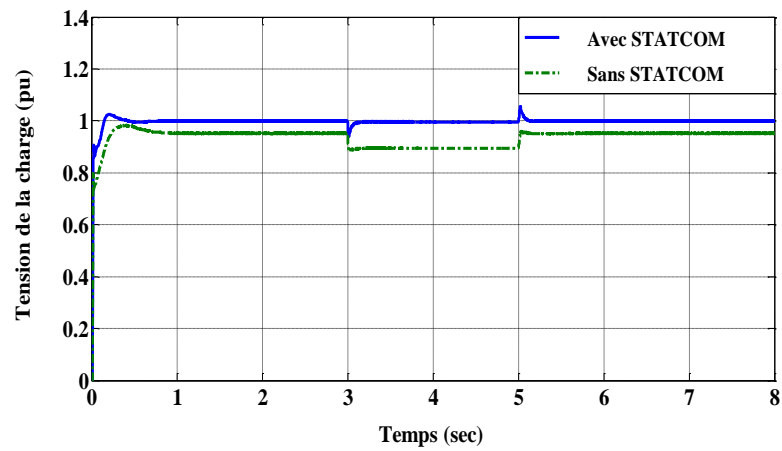


Figure IV.13 : Variation de la tension de charge

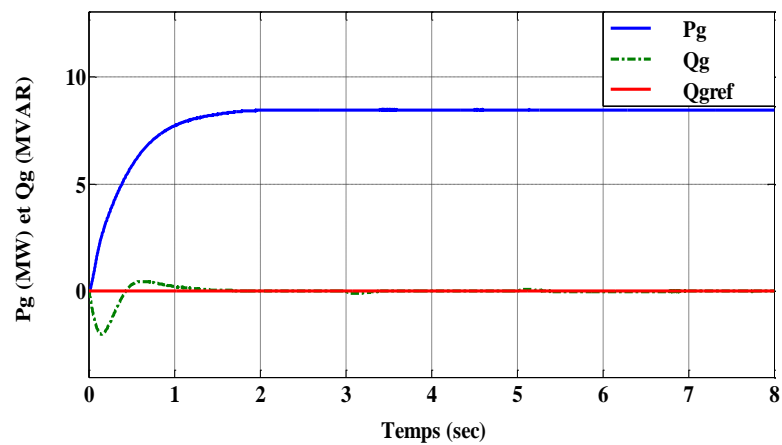


Figure IV.14 : Puissance active et réactive générée par l'éolien

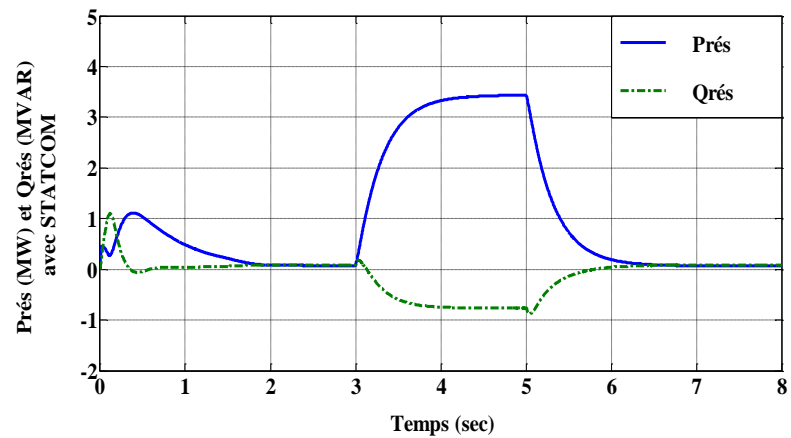


Figure IV.15 : Puissance active et réactive générée par le réseau (avec STATCOM)

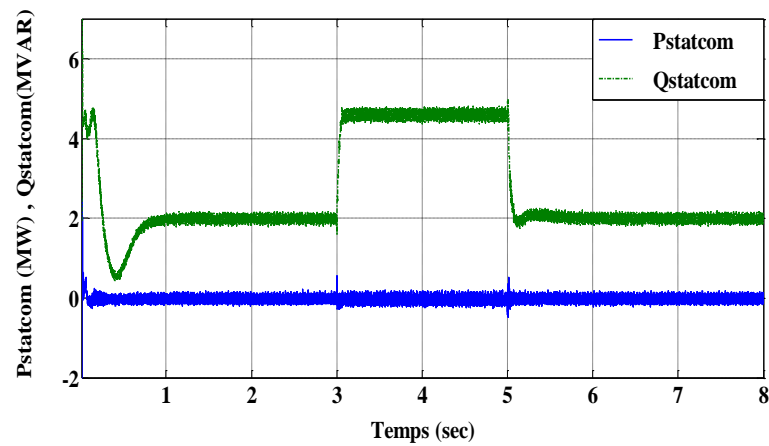


Figure IV.16 : Puissance active et réactive injectée par STATCOM

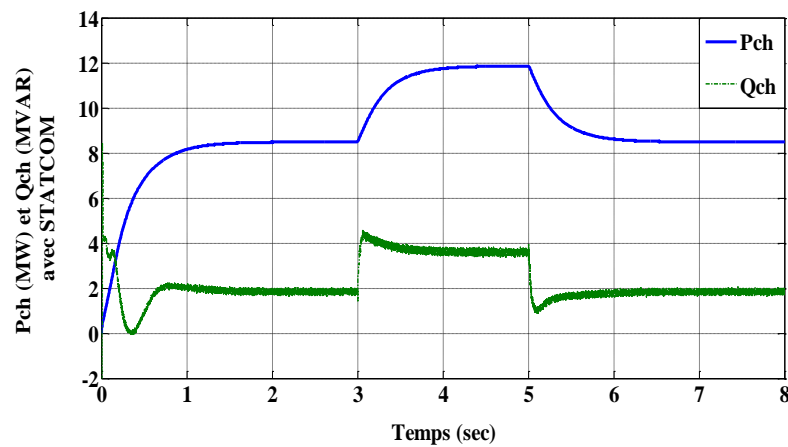


Figure IV.17 : Puissance active et réactive de la charge (avec STATCOM)

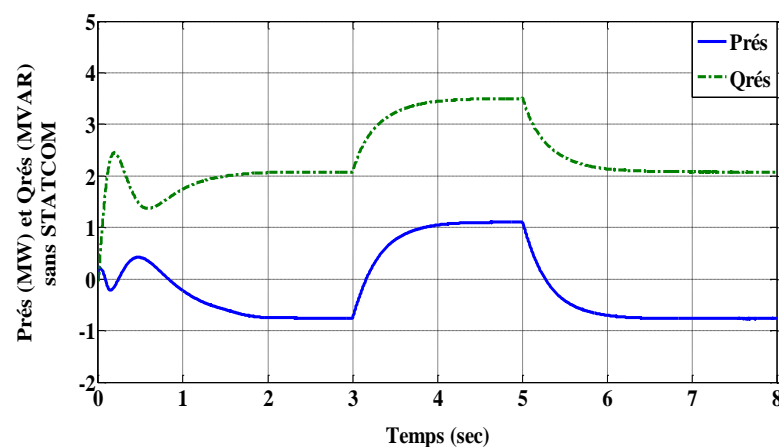


Figure IV.18 : Puissance active et réactive générée par le réseau (sans STATCOM)

La (figure IV.19) démontre la variation d'énergie insuffisante et aléatoire lorsque le compensateur est absent. Pour maintenir la stabilité, les circuits de réglage classiques

sont utilisés pour assurer une régulation adéquate de la tension continue vers le point de consigne du compensateur STATCOM, ainsi qu'au niveau de l'éolienne, comme le montrent les (figures IV.20 et IV.21).

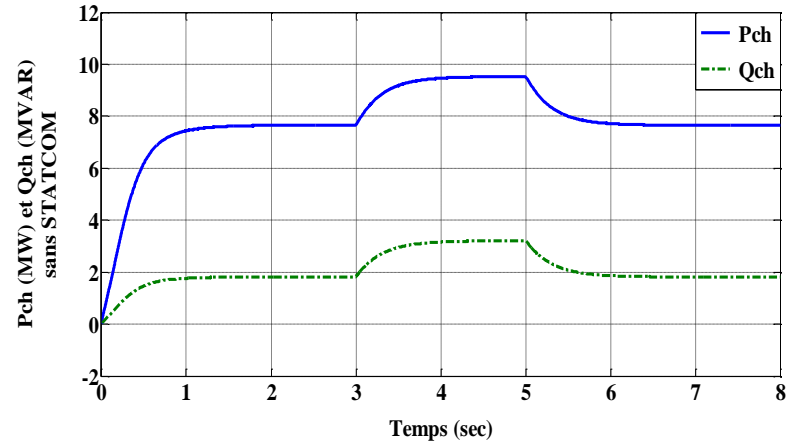


Figure IV.19 : Puissance active et réactive de la charge (sans STATCOM)

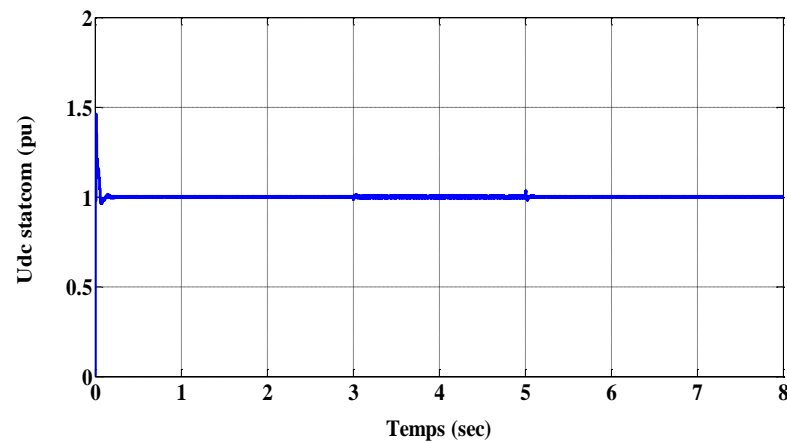


Figure IV.20 : Tension continue du STATCOM

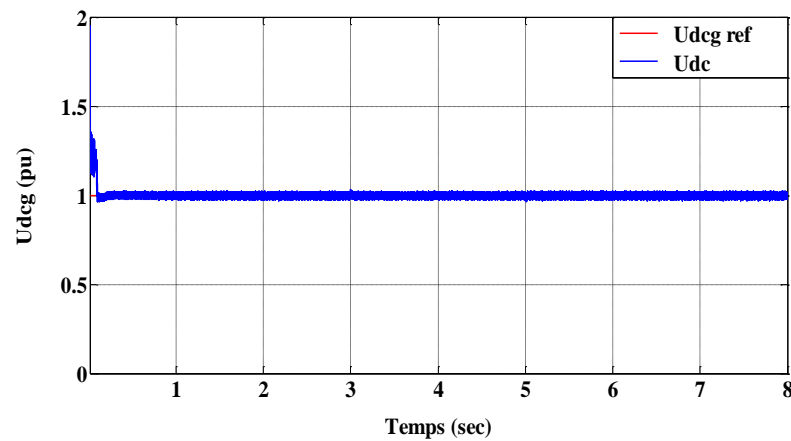


Figure IV.21 : Tension continue de l'éolienne

IV.4.3 – Apparition d'un défaut de court-circuit

En cas de défaut de court-circuit triphasé sur la ligne électrique à l'instant 3 secondes, le défaut sera éliminé par l'ouverture de ligne à l'instant 3.2 secondes (avec une durée de défaut de 200 millisecondes) pour isoler le réseau électrique. A ce temps, la seule source disponible pour alimenter la charge c'est la génératrice éolienne. Comme le montre la (figure IV.22), en présence de compensation statique, la tension revient rapidement à son état d'équilibre initial malgré la perturbation transitoire. En revanche, sans compensation, une chute de tension importante se produit pendant la période transitoire.

L'éolienne fournit de la puissance active à la charge, tandis que le STATCOM fournit de la puissance réactive, comme illustré dans la (figure IV.23(a)). En l'absence de STATCOM, le système énergétique force la chaîne de conversion éolienne à générer de la puissance réactive pour la charge, ce qui entraîne une dégradation du contrôle et une perte de régulation de la puissance réactive, comme illustré dans la (figure IV.23(b)).

Avec le STATCOM en place, la puissance active générée par le réseau électrique reste nulle, avant et après l'élimination du défaut, comme le montre la (figure IV.24). Ceci est dû à la disponibilité énergétique de l'éolienne et à la tension stable au niveau de la charge. Le STATCOM continue de générer de la puissance réactive pour la charge (figure IV.25) et assure la stabilité et la disponibilité de l'énergie tout au long du processus d'élimination des défauts, comme le montre la (figure IV.26).

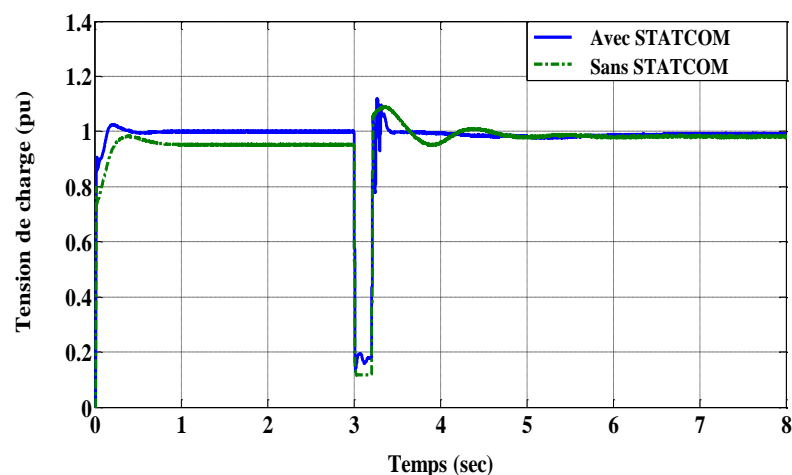
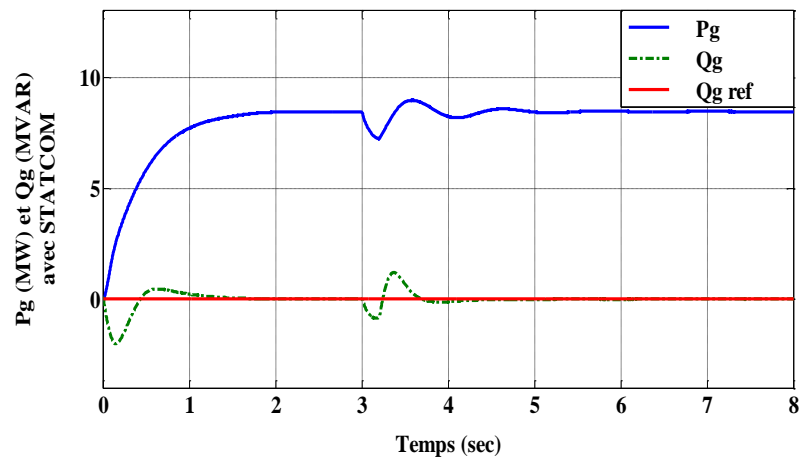
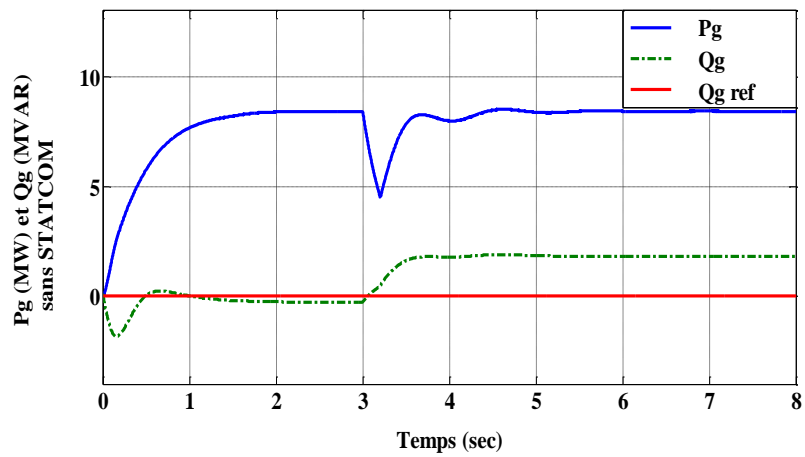


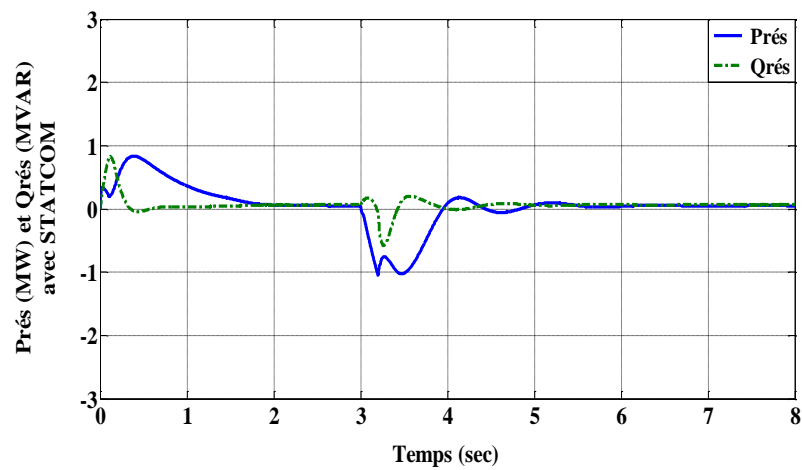
Figure IV.22 : Variation de la tension de charge



(a) Avec STATCOM



(b) Sans STATCOM

Figure IV.23 : Puissance active et réactive générée par l'éolien**Figure IV.24 :** Puissance active et réactive générée par le réseau (avec STATCOM)

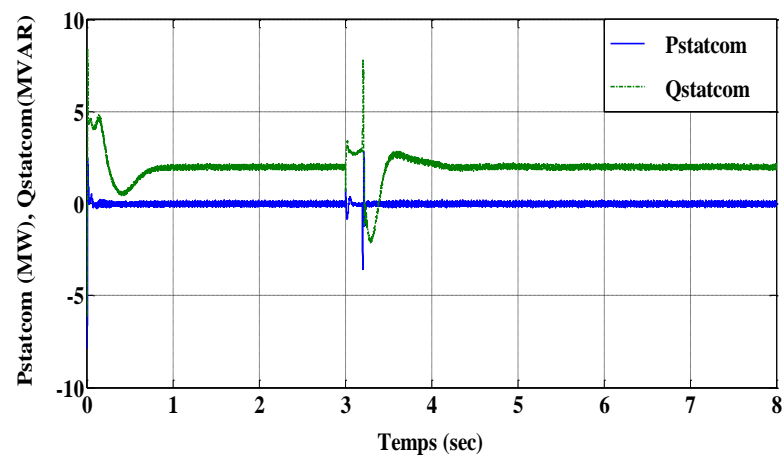


Figure IV.25 : Puissance active et réactive injectée par STATCOM

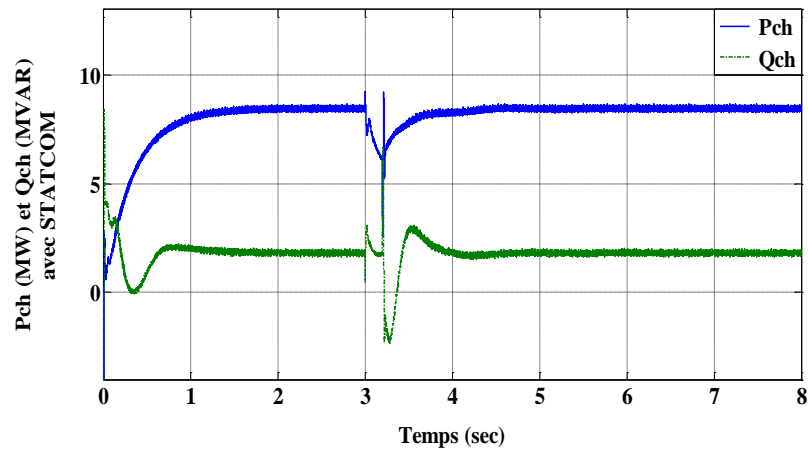


Figure IV.26 : Puissance active et réactive de la charge (avec STATCOM)

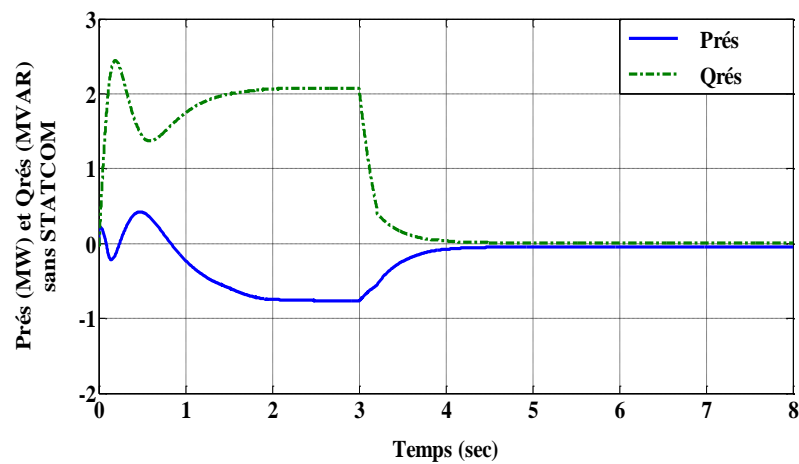


Figure IV.27 : Puissance active et réactive générée par le réseau (sans STATCOM)

La figure précédente (figure IV.27) et la suivante (figure IV.28) illustrent de manière séquentielle le comportement énergétique du réseau et de la charge, mettant en évidence le déséquilibre entre la production et la consommation résultant de l'effondrement de la tension.

Les (figures IV.29 et IV.30) décrivent le rétablissement de la régulation de tension sur les bus continu du STATCOM et la chaîne de conversion éolienne après l'élimination du défaut, montrant la récupération et la stabilisation du système après la perturbation.

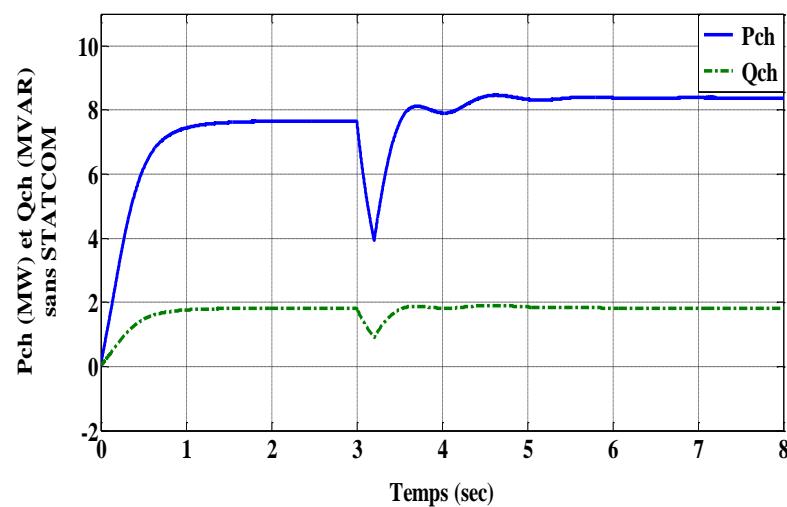


Figure IV.28 : Puissance active et réactive de la charge (sans STATCOM)

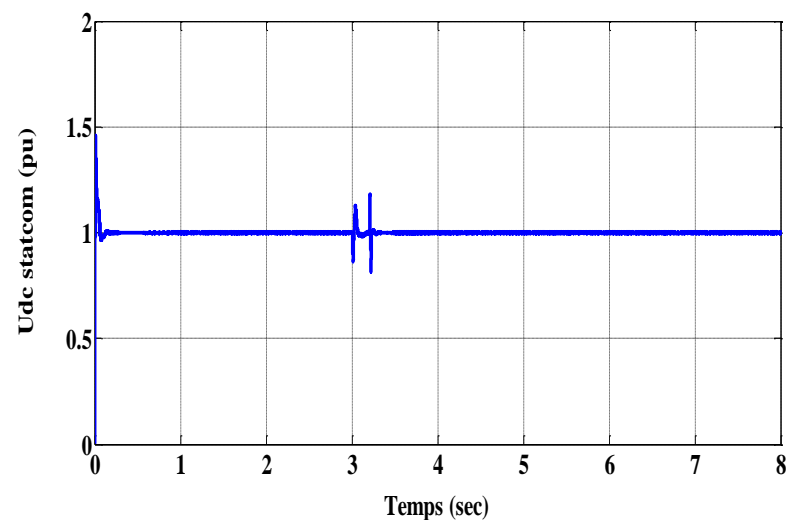


Figure IV.29 : Tension continue du STATCOM

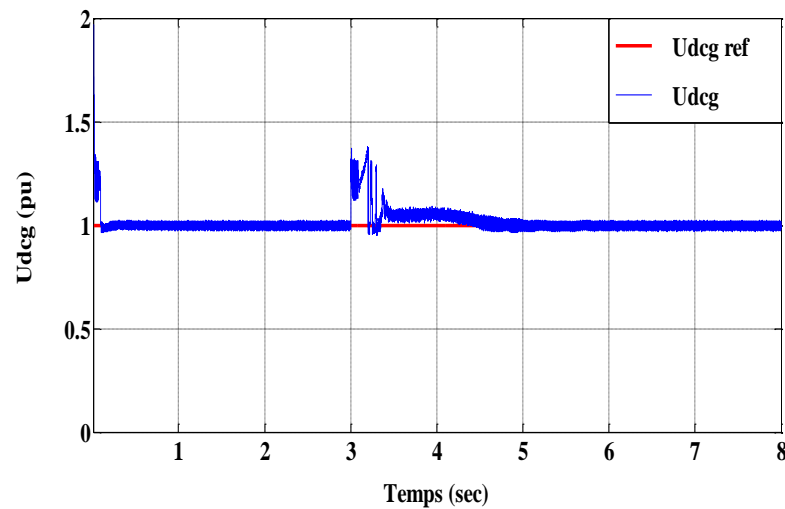


Figure IV.30 : Tension continue de l'éolienne

IV.5 – Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'améliorer la qualité de la tension en intégrant une source éolienne dans un micro-réseau à l'aide d'un STATCOM. Pour atteindre cet objectif, trois scénarios de simulation ont été réalisés. Le premier scénario a examiné le système dans des conditions de vitesse de vent variable, le deuxième a analysé l'impact d'une charge variable et le troisième a étudié le comportement du système en cas de défaut de court-circuit.

Les résultats ont montré que la présence du STATCOM garantit que l'amplitude de la tension revient systématiquement à sa valeur de référence, quelles que soient les variations de la vitesse du vent. De plus, le STATCOM ajuste rapidement la puissance injectée dans le système pour répondre aux besoins de la charge, que ceux-ci impliquent une augmentation ou une diminution de puissance. Enfin, le STATCOM génère la puissance réactive nécessaire à la charge et joue un rôle essentiel dans le maintien de la stabilité et de la disponibilité énergétique du système, avant comme après l'élimination du défaut.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'intégration des éoliennes dans un réseau électrique soulève d'importants défis en matière de stabilité et d'écoulement des puissances. En effet, leur production est fortement influencée par les variations rapides de la vitesse du vent et se caractérise par un comportement aléatoire et difficilement prévisible.

Le présent travail de thèse s'est essentiellement concentré sur l'étude de la stabilité d'une centrale éolienne à base de génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) connectée à un réseau électrique, en présence d'un système FACTS.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté de manière synthétique les différentes sources d'énergies renouvelables ainsi que des notions générales sur l'énergie éolienne. Nous avons également décrit les technologies d'éoliennes, avec leurs différentes structures : éoliennes à axe vertical et à axe horizontal, à vitesse fixe et à vitesse variable. Les différents types de machines électriques utilisées et les convertisseurs associés pour la conversion de l'énergie éolienne ont également été abordés.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation et au réglage d'une centrale éolienne à vitesse variable, basée sur une GSAP connectée au réseau via un convertisseur bidirectionnel. Après avoir établi le modèle équivalent de la chaîne énergétique, nous avons conçu une stratégie de commande permettant d'exploiter l'éolienne de façon optimale afin d'extraire le maximum d'énergie du vent. Les résultats de simulation ont confirmé l'efficacité du système de contrôle, démontrant sa capacité à maximiser la puissance récupérée sous différentes conditions de vent.

Au début du troisième chapitre, nous avons détaillé les différents dispositifs FACTS reconnus dans la littérature. Dans la seconde partie, nous avons développé la modélisation et le réglage du compensateur statique de puissance réactive (STATCOM).

Le quatrième chapitre a été consacré aux simulations réalisées sous MATLAB/Simulink sur le système étudié, en présence du STATCOM. Trois scénarios ont été considérés :

- Le premier a examiné le comportement du système sous des vitesses de vent variables;
- Le deuxième a analysé l'impact d'une charge variable;
- Le troisième a étudié la réponse du système lors d'un défaut de court-circuit.

Les résultats obtenus ont démontré que le STATCOM permet à l'amplitude de la tension de revenir systématiquement à sa valeur de référence, quelles que soient les variations de la vitesse du vent. Par ailleurs, il ajuste rapidement la puissance active injectée pour répondre aux fluctuations de la charge, soit en l'augmentant, soit en la réduisant selon les besoins. De plus, le STATCOM fournit la puissance réactive nécessaire, contribuant ainsi au maintien de la stabilité du système et à la continuité de l'alimentation, aussi bien avant qu'après l'élimination du défaut.

Finalement, l'apport du STATCOM s'est révélé très pertinent et efficace pour l'amélioration de la qualité de l'énergie lors du raccordement d'éoliennes au réseau électrique.

À la lumière de ce travail de recherche et des résultats obtenus, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées, parmi lesquelles:

- L'étude de la stabilité des réseaux électriques lors du raccordement d'éoliennes en présence de dispositifs FACTS;
- L'optimisation et l'amélioration de la qualité de l'énergie des systèmes éoliens connectés au réseau;
- L'analyse de l'impact d'autres dispositifs FACTS sur les performances des réseaux électriques;
- L'étude de l'insertion de différents dispositifs FACTS en divers points du réseau.

Annexes

Annexe A

A.1 – Conception du régulateur de vitesse

Les deux types de correcteurs les plus utilisés dans la régulation de la vitesse de la turbine éolienne sont le correcteur PI à avance de phase et le correcteur PI avec anticipation.

- **Régulateur PI à avance de phase**

La relation du correcteur proportionnel intégral PI est donnée par :

$$C_{em-ref} = \left(\frac{k_{pv}.s + k_{iv}}{\tau.s + 1} \right) . (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{A-1})$$

k_{pv} : gain proportionnel, k_{iv} : gain intégral et τ : La constante de temps sont les paramètres du correcteur à déterminer et s est la grandeur de Laplace.

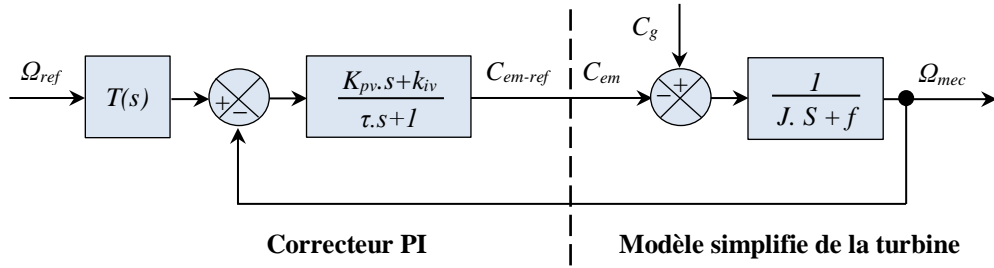


Figure A.1 : Régulateur PI à avance de phase

En boucle fermée la fonction du transfert peut s'écrire comme suit :

$$\Omega_{mec} = F(s). \Omega_{ref} + P(s). C_g \quad (\text{A-2})$$

Où $F(s)$ est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(s) = \frac{k_{pv}.s + k_{iv}}{J.\tau.s^2 + (f.\tau + J + k_{pv}).s + k_{iv} + f} \quad (\text{A-3})$$

et $P(s)$ est la fonction de transfert de la perturbation C_g :

$$P(s) = \frac{\tau.s + 1}{J.\tau.s^2 + (f.\tau + J + k_{pv}).s + k_{iv} + f} \quad (\text{A-4})$$

La pulsation naturelle w_n et le coefficient d'amortissement ζ sont déterminés par :

$$w_n = \sqrt{\frac{k_{iv} + f}{J \cdot \tau}} \quad \text{et} \quad \zeta = \frac{\tau + J + k_{pv} + 1}{k_{iv} + f} \cdot \frac{w_n}{2} \quad (\text{A-5})$$

La constante de temps τ permet de régler la pulsation naturelle et donc le temps de réponse de l'asservissement de vitesse (l'amortissement étant unitaire $\zeta=1$) [15] :

$$k_{iv} = w_n^2 \cdot J \cdot \tau \quad \text{et} \quad k_{pv} = \frac{2 \cdot \zeta}{w_n} \cdot (k_{iv} + f) - \tau - J \quad (\text{A-6})$$

Le temps de réponse et 0.1s en boucle fermée est obtenu, en considérant la fonction de transfert anticipatrice (Figure A.1), pour limiter la génération de puissance au démarrage.

$$T(s) = \frac{J \cdot \tau \cdot s^2 + (f \cdot \tau + J + k_{pv}) \cdot s + k_{iv} + f}{(k_{pv} \cdot s + k_{iv}) \cdot \left(\frac{0.05}{3} \cdot s + 1\right)} \quad (\text{A-7})$$

• Régulateur PI avec anticipation

On considère un correcteur proportionnel intégral (PI), La référence du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em-ref} = (k_{pv1} + \frac{k_{pv2}}{s}) \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{A-8})$$

k_{pv1} , k_{iv2} et τ sont les paramètres du correcteur

La fonction de transfert sur la référence de la vitesse en boucle fermée $F(s)$ est donnée par :

$$F(s) = \frac{k_{pv1} \cdot s + k_{iv1}}{J \cdot s^2 + (f + k_{pv1}) \cdot s + k_{iv1}} \quad (\text{A-9})$$

$$P(s) = \frac{s}{J \cdot s^2 + (f + k_{pv1}) \cdot s + k_{iv1}} \quad (\text{A-10})$$

Les facteurs de correcteur avec anticipation k_{pv1} et k_{iv2} peuvent être déterminés par :

$$k_{iv1} = w_n^2 \cdot J \quad \text{et} \quad k_{pv1} = \frac{2 \cdot k_{iv1} \cdot \zeta}{w_n} - \tau - J \quad (\text{A-11})$$

Le paramètre k_{pv1} est calculé de manière à obtenir un coefficient d'amortissement unitaire. Un temps de réponse en boucle fermée de 0.1 s avec la fonction de transfert anticipatrice (figure A.2), donnée selon cette expression :

$$T(s) = \frac{J \cdot s^2 + (f + k_{pv1}) \cdot s + k_{iv1}}{(k_{pv1} \cdot s + k_{iv1}) \cdot \left(\frac{0.05}{3} \cdot s + 1\right)} \quad (\text{A-12})$$

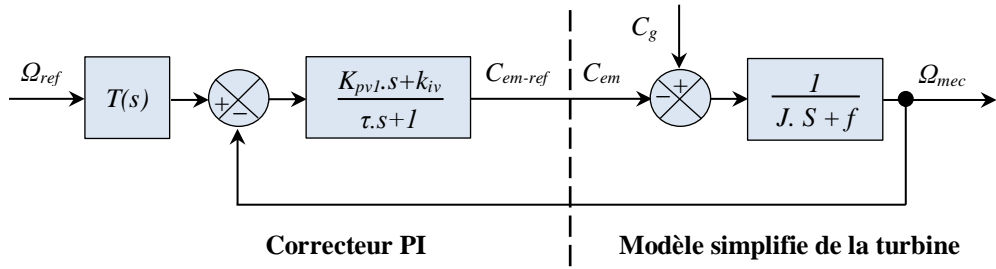


Figure A.2 : Régulateur PI avec anticipation

A.2 – Calcul de régulateur de courant i_d et i_q

- Calcul des paramètres du régulateur PI du courant i_d

Fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$G_o(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s + L_d \cdot p} \quad (\text{A-13})$$

$$G_o(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \cdot \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + T_e \cdot p} \quad (\text{A-14})$$

Avec $T_e = \frac{L_d}{R_s}$

La fonction de transfert en boucle fermée peut être écrite comme suit :

$$G_f(p) = \frac{G_o(p)}{G_o(p) + 1} \quad (\text{A-15})$$

Utilisant la méthode de compensation des pôles en boucle ouverte, nous pouvons écrire [52], [70] :

$$\frac{k_p}{k_i} = \frac{L_d}{R_s} = T_e \quad (\text{A-16})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$G_o(p) = \frac{k_i}{p.R_s} \quad (\text{A-17})$$

La fonction de transfert en boucle fermée sera :

$$G_f(p) = \frac{1}{\frac{R_s}{p.k_i} + 1} \quad (\text{A-18})$$

Les coefficients K_{id} et k_{pd} du régulateur PI peuvent être écrits en fonction les paramètres de la GSAP et du temps de réponse t_r du système qui nous permette d'atteindre 95 % de la référence :

$$\begin{cases} k_{id} = \frac{3.R_s}{t_r} \\ k_{pq} = \frac{3.L_d}{t_r} \end{cases} \quad \text{Avec} \quad t_r = \frac{3.R_s}{k_{id}} \quad (\text{A-19})$$

- **Calcul des paramètres du régulateur PI du courant i_q**

Selon la même méthode de calcul des paramètres du régulateur du courant i_d nous pouvons déterminer les paramètres K_{iq} et K_{pq} comme suit :

$$\begin{cases} k_{id} = \frac{3.R_s}{t_r} \\ k_{pq} = \frac{3.L_q}{t_r} \end{cases} \quad \text{Avec} \quad t_r = \frac{3.R_s}{k_{iq}} \quad (\text{A-20})$$

A.3 – Calcul de régulateur de vitesse Ω_g

- **Calcul des paramètres du régulateur PI**

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$G_{on}(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \cdot \frac{1}{J.s + f} \quad (\text{A-21})$$

$$G_{On}(p) = \frac{k_{in}}{p} \left(\frac{k_{pn} \cdot p}{k_{in}} \right) \left(\frac{1/f}{1 + (J/f) \cdot p} \right) \quad (\text{A-22})$$

$$G_{On}(p) = \frac{k_{in}}{p} \left(\frac{k_{pn} \cdot p}{k_{in}} \right) \left(\frac{1/f}{1 + T_n \cdot p} \right) \quad (\text{A-23})$$

Avec $T_n = J/f$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$G_{fn}(p) = \frac{G_{on}(p)}{G_{on}(p) + 1} \quad (\text{A-24})$$

Avec l'utilisation de la méthode de compensation des pôles nous avons $k_{pn}/k_{in} = J/f$ alors les fonctions de transfert en boucle ouverte et en boucle fermée seront [31] :

$$G_{On}(p) = \frac{k_{in}}{f \cdot p} \quad (\text{A-25})$$

$$G_{fn}(p) = \frac{1}{\frac{f}{k_{in}} p + 1} \quad (\text{A-26})$$

Les gains du régulateur PI de vitesse seront calculés en fonction des paramètres de la GSAP et le temps de réponse du système t_r :

$$t_r = 3 \cdot \tau_n \text{ Avec } \tau_n = \frac{f}{k_{in}}$$

Donc les gains K_{in} et K_{pn} seront donnés par :

$$\begin{cases} k_{in} = \frac{3 \cdot f}{t_r} \\ k_{pn} = \frac{3 \cdot J}{t_r} \end{cases} \quad (\text{A-27})$$

Annexe B

B.1 – Les paramètres du modèle utilisée en Matlab/Simulink

Tableau B.1 : Paramètres de l'éolienne

Paramètre	Valeurs
Puissance nominale	3*3 MW
Tension nominale	575 V
Capacité DC	10000*10 ⁻⁶ F
Tension de base DC	1150 V
X	0.003 pu
R	0.3 pu
L_d	0.3*10 ⁻³ H
L_q	0.3*10 ⁻³ H
J_g	35000 kg.m ²
F	0.01 N.m.s
P	48

Tableau B.2 : Paramètre du STATCOM

Paramètre	Valeurs
Résistance	$R_{sh} = 1 \Omega$
Capacité	$C_{sh} = 0.002 \text{ F}$
Inductance	$L_{sh} = 0.001 \text{ H}$
Tension DC	2400 Volts
Régulation du tension DC	$K_p = 0.001, K_i = 0.15$
Régulation de courant	$K_p = 0.8, K_i = 200$
Régulation du tension AC	$K_p = 0.55, K_i = 250$

Références bibliographies

Références bibliographies

- [1] : **K. Belhacel.**, « Contribution d'un BtB-STATCOM et D'un SSSC à la Stabilisation des Réseaux Electriques Intelligents », Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2024.
- [2] : **Z. Gadouche.**, « Contrôle de puissances active et réactive d'un réseau électrique de source mixte photovoltaïque et éolienne », Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2022.
- [3] : **Z. Seddiki.**, « Optimisation de l'emplacement des Sources d'énergies Renouvelables et des FACTS pour assurer le bon fonctionnement et la sûreté des Réseaux Electriques » Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2024.
- [4] : **H. Chaib.**, « Contribution à l'intégration d'une interface FACTS pour une ferme éolienne basée sur des machines synchrones à aimant permanent », Thèse de doctorat, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2018.
- [5] : **F. Mansouri.**, « Commande de la génératrice asynchrone double alimentation pour la production de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université des Science et de la Technologie d'Oran, 2020.
- [6] : **K. Tahir.**, « Commande d'une machine synchrone destinée à l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2016.
- [7] : **B. Meghni.**, « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [8] : **S. Bellarbi.**, « Estimation technico-économique de la production d'électricité par voie éolienne, intégrée aux réseaux interconnectés de transport électrique », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2015.
- [9] : **M. Mahgoun.**, « Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanant (MSAP) dédiée à la conversion éolienne », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas de Setif 1, 2022.
- [10] : **S. El Aimani.**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [11] : **H. Jeong., K. Lee., S. Choi., and W. Choi.**, « Performance improvement of LCL-filter-based grid-connected inverters using PQR power transformation », IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 5, pp. 1320-1330, 2010.
- [12] : **T. Chan, L. Lai.**, « Permanent-magnet machines for distributed power generation: a review », IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385575>, 2007.
- [13] : **I. Boucetta.**, « Contribution à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques par les nouvelles techniques d'optimisation », Thèse de doctorat, Université Echahid Hamma Lakhdar D'el Oued, 2023.

- [14] : **M. Huynh Quang.**, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de doctorat, Spécialité : Automatique, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2013.
- [15] : **C. Naim.**, « Etude d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne », Mémoire de magister, Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018.
- [16] : <https://www.lemoniteur.fr/article/saint-gobain-accélère-son-développement-sur-le-marché-des-miroirs-solaires.1913869>. Consulté en 2020.
- [17] : **A. Benabda.**, « Contribution à l'étude d'une alimentation à base de panneaux photovoltaïques avec stockage », Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2018.
- [18] : **N. Djemai.**, « Optimisation de l'intégration des ressources énergétiques décentralisées (RED) aux réseaux de distribution dans un marché de l'électricité dérégulé », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [19] : <https://www.abcclim.net/types-energies-renouvelables.html>. Consulté en 2019.
- [20] : **A. Bourzami.**, « Contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2021.
- [21] : **I. Laouini.**, « La gestion des centrales hydroélectriques en série par balancement des réservoirs », Thèse de doctorat, Université de Montréal, 2011.
- [22] : **A. Boudali.**, « Contribution à la commande avancée et à l'amélioration de la stabilité et le fonctionnement d'une microcentrale hydroélectrique », Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2021.
- [23] : **M. Tedjani.**, « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite par un système de conversion éolien », Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015.
- [24] : <https://www.energiesdelamer.eu/2019/05/15/atlantis-et-ge-uk-main-dans-la-main-our-la-plus-grande-hydrolienne-du-futur-marche/>. Consulté en 2019.
- [25] : **A. Mirecki.**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [26] : **A. Azizi.**, « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride », Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2019.
- [27] : **J. Miguel Navarro.**, « Cellules photovoltaïques organiques transparentes dans le visible », Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [28] : <https://www.marcoussis.fr/-La-ferme-solaire>. Consulté en 2019.
- [29] : <https://www.pinterest.fr/pin/54395107976936272/>. Consulté en 2019.

- [30] : **B. O. Chaker.**, « Modélisation, optimisation et gestion d'énergie d'une centrale hybride à énergie renouvelable », Thèse de doctorat, Université de Caen Normandie, France, 2023.
- [31] : **M. Mayouf.**, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », Mémoire de magister, Université d'Al Hadj Lakhdar Batna, 2008.
- [32] : <https://vdocuments.site/nutzungsmoeglichkeiten-der-tiefen-geothermie-ydrothermale-und-petrothermale-systeme-florian-hosak-16092010.html>. Consulté en 2019.
- [33] : <https://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/energies/energie-eolienne/eoliennes-et-production-electricite/production-electricite-par-energie-eolienne>. Consulté en 2020.
- [34] : **H. Atmania.**, « La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie Cas de la photovoltaïque », Mémoire de magister en management, Université d'Oran -2- Mohamed ben Ahmed, 2015.
- [35] : **C. Benaouag.**, « Les barrières au développement des énergies renouvelables en Algérie », Revue stratégie et développement, Université Ferhat Abbass Sétif, Vol. 09 / N° : 03, p 261-273, 2019,
- [36] : <https://portail.cder.dz/2020/12/01/energies-renouvelables-le-cerefe-analyse-les-raisons-d-echec-des-programmes-precedents/>. Consulté en 2020.
- [37] : **N. Elgharbi.**, « La centrale hybride de Hassi R'mel », Division Énergie Solaire Thermique et Géothermie, Bulletin des Energies Renouvelables, N° 021, 2011.
- [38] : **D. Nedjari.**, « L'énergie éolienne en Algérie », Division Energie Eolienne - CDER, Bulletin des Energies Renouvelables, N°46, 2018.
- [39] : <https://www.energy.gov.dz/>. Consulté en 2020.
- [40] : **M. Sibrahimi.**, « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2015.
- [41] : **N. Laverdure.**, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [42] : **A. Boyette.**, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2006.
- [43] : **S. Hamecha.**, « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone a aimants permanents », Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [44] : **A. Chemidi.**, « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme », Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, 2015.
- [45] : **A. Lebsir.**, « Performances comparées de machines synchrones à aimants permanents et à reluctance variable associées à une chaîne de conversion d'énergie renouvelable », Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine, 2016.

- [46] : https://www.robot24.fr/wp-content/4eme/source-nrj-conv/nrj-conv-v4/2_comprendre_le_fonctionnement_de_lolienne.html. Consulté en 2020.
- [47] : **M. Koumba.**, « Contribution à l'étude et à la commande des éoliennes à génératrices synchrones dédiées aux réseaux électriques autonomes », Thèse de doctorat, Université du Québec A Trois-Rivieres, 2019.
- [48] : **A. Davigny.**, « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2007.
- [49] : **F. Bensmaine., S. Tnani., G. Champenois., O. Bachelier., E. Mouni.**, « Amélioration de la qualité de l'énergie d'une _éolienne _à vitesse _fixe en utilisant un STATCOM associe _a des supercondensateurs », Symposium de Génie _Electrique, Juil 2014, Cachan, France. <Hal-01065290>
- [50] : **H. Gallas.**, « Contribution à la Commande d'un Générateur de type Synchrone à Double Excitation dans le cas d'une Application Éolienne et Comparaison avec d'autres Architectures », Thèse de doctorat, Ecole nationale d'ingénieurs de Sfax-Tunisie, 2021.
- [51] : **A. Boumassata.**, « Modélisation et simulation d'une chaine de conversion éolienne », Thèse de doctorat, Université des frères Mentouri de Constantine, 2016.
- [52] : **A. Berhail.**, « Commande d'une éolienne à base de GSAP connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux », Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2020.
- [53] : **B. Toual.**, « Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Energie Electrique », Thèse de doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2018.
- [54] : **B. Robyns., A. Davigny., C. Saudemont., and V. Courtecuisse.**, « Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », J3eA - Vol. 5 - Hors-Série 1 (2006). DOI: 10.1051/j3ea:20060028.
- [55] : **O. Belounis.**, « Gestion optimale d'une MADA associée à une éolienne », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba. 2017.
- [56] : **F. Poitiers.**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [57] : **H. A. Aldwaihi.**, « Commande non linéaire fondée sur la platitude d'un système de production éolien », Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, 2013.
- [58] : **A. Mseddi.**, « Modélisation et commande d'un générateur éolien à double excitation isolé en vue de l'amélioration de son rendement et de la diminution de la fatigue mécanique », Thèse de doctorat, Université de Cergy-pontoise-France, 2019.
- [59] : **B. Hacene.**, « Contribution à la commande d'un aérogénérateur basé sur un GSAP », Thèse de doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2020.
- [60] : **T. Ghennam.**, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des

éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2011.

- [61] : **C. Ridha.**, « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone a aimants permanents et d'une machine asynchrone a doublé alimentation », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider - Biskra, 2018.
- [62] : **H.J. Wagner.**, « Introduction to Wind Energy Systems », EPJ Web of Conferences, Ruhr-University Bochum, Energy Systems and Energy Economics, Germany, 2017.
- [63] : **L. Moreau.**, « Modélisation, conception et commande de génératrices à réluctance variable basse vitesse », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2005.
- [64] : **O. Belounis., H. Labar.**, « Fuzzy sliding mode controller of DFIG for wind energy conversion », International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.10, N°: 2, 2017.
- [65] : **M. Latreche.**, « Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », Mémoire de magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.
- [66] : **R. Redjem.**, « Etude d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne », Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [67] : **M. Ezzat.**, « Commande non linéaire sans capteur de la machine synchrone a aimants permanents », Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 2011.
- [68] : **M. Bardadi.**, « Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel », Mémoire de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2015.
- [69] : **B. Vaseghi.**, « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre-spires : Modélisation Réduction du courant de défaut », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Français, 2009.
- [70] : **M. Mayouf.**, « Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents », Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, 2014.
- [71] : **Y.L. Bin Wu.**, « Power conversion and control of wind energy systems », Google Livres files, Canada, New Jersey: John Wiley, 2011.
- [72] : **T. Zidelmal.**, « Modèle de prédiction et de commande de la machine synchrone à aimants permanents : application dans les aérogénérateurs », Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec, 2015.
- [73] : **M. Malinowski.**, « Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers », Thesis, Warsaw University of Technology, Poland, 2001.
- [74] : **S. Belakehal., A. Bentounsi., H. Benalla.**, « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne », Revue des énergies renouvelables, vol. 13, 2010.

- [75] : **M. Loucif**, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen, 2016.
- [76] : **M. Frikh**, « Contribution à l'étude d'un système de production d'énergie éolienne », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2022.
- [77] : **A. Gaillard**, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [78] : **L. M. R. Gomez**, « Intégration de la production éolienne aux réseaux électriques : approches techniques et économiques », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Français, 2012.
- [79] : **P.N. Guillaume**, « Modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimants permanents », Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2018.
- [80] : **A. Khlaief**, « Contribution à la commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimant permanent (MSAP) », Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, 2012.
- [81] : **D. Ikni**, « Production d'énergie marine : Intégration de la production éolienne offshore dans un bouquet énergétique décentralisé », Thèse de doctorat, l'U.F.R. des Sciences Techniques de l'Université du Havre, 2014.
- [82] : **M. Zobeidi**, « Amélioration de la sécurité des systèmes électriques à travers l'approche de sensibilité pour l'emplacement optimal des dispositifs FACTS », Thèse de doctorat, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2021.
- [83] : **A. Oloulade**, « Contribution à l'optimisation multicritère du fonctionnement d'un réseau électrique de distribution par le placement optimal de dispositifs FACTS et la reconfiguration de sa topologie », Thèse de doctorat, Université d'Abomey - Calavi (UAC), 2019.
- [84] : **H. Sekhane**, « Amélioration de l'Ecoulement des Puissances à Travers les Systèmes FACTS Pour les Réseaux Electriques » Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri de Constantine 1, 2019.
- [85] : **B. Mohamed**, « Impact d'une combinaison SMES-IPFC sur le comportement d'un réseau électrique multi-machines », Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2018.
- [86] : **B. Hadji**, « Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité des Réseaux Electriques par l'Intégration et le Contrôle Flexible de l'Energie Eolienne et des Systèmes FACTS », Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.
- [87] : **B. Fateh**, « Répartition optimale des flux énergétiques et impact sur la performance d'un système électrique HT », Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.

- [88] : **O. Reffas.**, « Amélioration de l'efficacité d'une installation de compensation d'énergie réactive », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2020.
- [89] : **A. Mekkaoui., M. Laouer., et M. Younes.**, « Etude comparative des performances d'un STATCOM et d'un SVC sur la stabilité d'un parc éolien connecté au réseau électrique », *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 17 N°1 (2014) 149 – 157.
- [90] : **F. Boussadia.**, « Optimisation de la sécurité des réseaux électriques de puissance par des systèmes de transmission flexible en courant alternatif FACTS », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2019.
- [91] : **S. Messalti.**, « Analyse de la stabilité transitoire des réseaux de transport à courant continu en haute tension (hvdc-facts) », Thèse de doctorat Université Ferhat Abbas de Sétif, 2011.
- [92] : **A. Benali., M. Khiat., and T. Allaoui.**, « Modélisation et simulation d'une ferme éolienne raccordée à un réseau électrique en intégrant un dispositif FACTS », 2th International conférence on electronics, Electrical and Automatic November 26-27, 2013, ENP, Oran, Algeria.
- [93] : **M. Mokhnache.**, « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS », Mémoire de magister en électrotechnique, Université FERHAT Abbas — Sétif, 2012.
- [94] : **M. Yahiaoui.**, « Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2014.
- [95] : **N. Mancor.**, « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) », Mémoire de magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [96] : **A. Amiar.**, « Apport du STATCOM et du SSSC (Static Synchronous Series Compensator) à l'amélioration du comportement des réseaux électriques », Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'ingénierie, Université Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [97] : **A. Abderrahmani., A. Chaker., and A. Laoufi.**, « The Study of Fuzzy-Logic Controller for SSSC », (IJEECS) International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems. Vol: 15 Issue: 02, August 2013.
- [98] : **M. Mezaache.**, « Contribution à l'Etude du Choix Optimal de l'Emplacement du Dispositif UPFC dans les Réseaux Electriques en Utilisant une des Méthodes Artificielles », Thèse de doctorat, université de Batna2, 2016.
- [99] : **P. Purwoharjono., O. Penangsang., M. Abdillah., and A. Soeprijanto.**, « Optimal Design of TCPST Using Gravitational Search Algorithm », 2012 Sixth UKSim/AMSS European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Malta, Malta, pp. 323-328, doi: 10.1109/EMS.2012.68, 2012.
- [100] : **H. Belguidoum.**, « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandés », Mémoire de magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbass Sétif, 2012.

- [101] : **M. Boudiaf.**, « Contribution de l'IPFC à la stabilisation des réseaux électriques », Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2014.
- [102] : **M. Zellagui., H.A. Hassan., and A. Chaghi.**, « Effect of TCVR Controlled Voltage on Short-Circuit Calculations in Case of Ground Fault in the Algerian Network », International Journal of Control and Automation Vol. 8, No. 1, pp. 125-138, 2015.
- [103] : **B. Lazhar.**, « Effets des Systèmes de Compensation FACTS sur la Protection à Maximum de Courant dans les Réseaux Électriques », Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2016.
- [104] : **M. Sebaa.**, « Commande Robuste d'un UPFC dans un Réseau d'Énergie Électrique Multi Machines » Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, 2012.
- [105] : **Y. Zhang., C. Chen., and Y. Zhang.**, « A Novel Power Injection Model of IPFC for Power Flow Analysis Inclusive of Practical Constraints », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1550 – 1556, Nov. 2006.
- [106] : **O. Herbadji.**, « Contribution à l'optimisation des réseaux électriques en présence des Multi-FACTS par des méthodes métaheuristiques hybrides », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2019.
- [107] : **C. Kalagotla., V. Kumar., R. Sreejyothi., and P. Tejaswi.**, « A Review on D-STATCOM Control Techniques for Power Quality Improvement in Distribution », Proceedings of the Fifth International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA 2021).
- [108] : **A.P. Murdan., I. Jahmeerbacus., and S.Z. Sayed.**, « Modeling and Simulation of a STATCOM for reactive power control », IEEE Conference Paper. November 2022 DOI: 10.1109/ELECOM54934.2022.9965258.
- [109] : **A. Touhami., Z. Sid Ahmed., S. Hadjeri., and M. Tandjaoui.**, « Apport des éoliennes dans les réseaux électriques - Utilisation d'un STATCOM - », First International Conference on Smart Grids, CIREI'2019 March 17-18, 2019 at ENP- Oran – Algeria, N° paper: CIREI'2019_C104.
- [110] : **E. Gholipour.**, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.
- [111] : **P. Petitclair.**, « Modélisation et Commande de structures FACTS Application au STATCOM », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, France, 1997.
- [112] : **Y. M. Devalkumar., S. R. Vyas.**, « Voltage Stability Improvement by using STATCOM », International Journal of Research in Engineering, Science and Management Volume-3, Issue-3, March-2020.

- [113] : **K.D. Kerrouche., E. Lodhi., M.B. Kerrouche., and L. Wang.,** « Modeling and design of the improved D-STATCOM control for power distribution grid », SN Appl. Sci. 2, 1519 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03315-8>
- [114] : **A. Amari.,** « Étude de l'impact d'un dispositif STATCOM sur la performance d'une liaison HVDC alimentant un faible réseau alternatif », Thèse de doctorat, Faculté de Génie électrique, Université de Sidi Bel-Abbes, 2019.
- [115] : **C. Gombert.,** « Simulation temps-réel des dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, Français, 2005.
- [116] : **K. Shradha., and K.D. Joshi.,** « STATCOM: Theoretical Aspects & Experimental Study », International Journal of Electrical Engineering. ISSN 0974-2158 Volume 4, Number 4 (2011), pp. 439-448.
- [117] : **A. Hinda., A. Bourouina.,** « Control D'un Réseaux D'énergie Électrique Par Un Dispositif Facts (Statcom) », International Workshop on Advanced Control IWAC2014 Novembre, 2014, Guelma, Algeria.
- [118] : **B. Khoukha.,** « Application d'un onduleur multi-niveaux à la compensation de l a puissance réactive », Thèse de doctorat, Université de Batna -2-, 2018.
- [119] : **B. Anis.,** « Gestion Optimale des Flux d'Énergie dans un Micro Réseau Hybride », Thèse de doctorat, Institut National Des Sciences Appliquées Rennes, France, 2023.
- [120] : **M. Gaetani-Liseo., H. Helbling.,** « Modélisation de micro-réseaux pour l'optimisation technico-économique et environnementale de la gestion de l'énergie », Symposium De Génie Electrique (SGE 2023), 5 - 7 Juillet 2023, Lille, France.
- [121] : **A. Bouzid.,** « Elaboration d'une méthode de contrôle pour améliorer la robustesse d'un micro réseau électrique », Thèse présenté à l'Université du Québec à Trois-Rivières, Comme exigence partielle de doctorat en génie électrique, 2017.