

Liste des Figures

Figure. I. 1: Consommation mondiale annuelle d'énergie primaire[5].....	4
Figure. I. 2 Evolution du prix du pétrole de 1999 à 2014[6].....	4
Figure. I. 3 : Contribution à l'effet de serre[9].	5
Figure. I. 4:Impacts environnementaux liés aux changements climatiques (Source :Guide ADEME)[13].....	6
Figure. I. 5 : Développement des puissances installées d'éoliennes et photovoltaïques pour la période 1996-2009[16].	7
Figure. I. 6 : Principe d'hydroélectricité[21].....	8
Figure. I. 7 : Principe de photovoltaïque[26].	9
Figure. I. 8 : Les nouvelles installations photovoltaïques en 2014[24].....	9
Figure. I. 9 :principe de production de l'énergie géothermique[33].	10
Figure. I. 10 : Principe de biomasse énergie[36].....	11
Figure. I. 11: Principe d'énergie de la mer [37].	12
Figure. I. 12 :Energie éolienne[39].....	13
Figure. I. 13 : Tube de courant d'air autour d'un aérogénérateur[41].....	14
Figure. I. 14 : Eolienne à axe vertical[46].	15
Figure. I. 15 : Eolienne à axe horizontal[44].....	16
Figure. I. 16 : Constitution d'une éolienne[47].	17
Figure. I. 17 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage[45].	18
Figure. I. 18 : Eoliennes à vitesse variable[45].	19
Figure. I. 19 : Eolienne à vitesse variable basée sur MSAP[52].	21
Figure. I. 20 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA[45],[53].	22
Figure. I. 21 : Structure du rotor de la MADA[41].	23
Figure. I. 22 : Les différents modes de fonctionnement de la MADA[41].	24
Figure. I. 23: Système de stockage inertiel (volant d'inertie)[59].....	26
Figure. I. 24 : Principe de stockage par air comprimé[57].	27
Figure. I. 25 : Système complet du stockage d'énergie chimique par pile à combustible[56].	28
Figure. I. 26 :Schéma de principe du supercondensateur déchargé et chargé[64].	29
Figure. I. 27: Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion[8].....	31
Figure. I. 28:Evolution du coût moyen des batteries Li-ion entre 2010 et 2030[76].	33
Figure. II. 1:Schéma de principe du système éolien en mode connecté.....	35
Figure. II. 2 :Turbine éolienne[45]	36
Figure. II. 3 : Flux d'air sur un profil de pale(a). Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de(b)[47].	37
Figure. II. 4 :Schéma bloc du modèle de la turbine[53].....	38
Figure. II. 5:Passage du repère <i>abc</i> au repère <i>dq</i> [46].....	40
Figure. II. 6:Onduleur triphasé à deux niveaux	42
Figure. II. 7 : Interconnexion des deux convertisseurs statiques via un bus continu[45].....	43
Figure. II. 8 :Schéma fonctionnel du convertisseur côté réseau[91]	44
Figure. II. 9:Modèle générique d'une batterie[102]	46

Figure. II. 10: Variation de la tension pour une décharge à $I_{bat}=16A$	46
Figure. II. 11: Schéma bloc de la MADA[107]	49
Figure. II. 12: schéma bloc de la commande directe[41]	49
Figure. II. 13 : Schéma bloc de la commande indirecte[41].....	50
Figure. II. 14 : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance[41]	51
Figure. II. 15 : Commande en courant dans le repère tournant dq du convertisseur coté réseau[113]	53
Figure. II. 16 : Boucle internes de régulation des courants du réseau avec compensation de tension[113].....	53
Figure. II. 17 : Schéma bloc du contrôle de hacheur <i>buck-boost</i> [68].....	54
Figure. II. 18 : Flux statorique selon l'axe d et q	55
Figure. II. 19: Couple électromagnétique et le flux statorique résultant	56
Figure. II. 20: Courant rotorique selon l'axe d et q.....	56
Figure. II. 21 : Puissance active et réactive statorique	56
Figure. II. 22 : Courant statorique selon l'axe d et q.....	57
Figure. II. 23: Courants et tension rotorique	57
Figure. II. 24: Courant (x10) et tension d'une phase statorique avec un zoom.....	58
Figure. II. 25 : Vitesse mécanique de la MADA (a) .Puissance active et réactive statorique (b,c).....	59
Figure. II. 26 : Puissance active (a) et réactive rotorique (b)	59
Figure. II. 27 : Courants du convertisseur coté réseau avec un zoom	60
Figure. II. 28 : Courant (x10) et tension d'une phase statorique (a).Tension du bus continue (b)	60
Figure. II. 29 : Vitesse mécanique de la MADA (a).Puissance éolienne (b).....	61
Figure. II. 30 : Puissance de la batterie (a).Tension de la batterie (b).....	62
Figure. II. 31 : Courants rotoriques de la MADA (a).Le courant (x10) et la tension d'une phase statorique (b).....	62
Figure III. 1 : Schéma de principe du système éolien en mode iloté[121].....	64
Figure III. 2: Modèle interne de la MADA dans le mode iloté[121]	66
Figure III. 3: Schéma bloc global de la commande de la MADA en mode iloté[121].	67
Figure III.4 : Boucle de régulation interne du courant de la MSAP[122]	69
Figure III. 5: Boucle de régulation externe de la tension continue[121].....	70
Figure III. 6 : Principe du fonctionnement à puissance lissée[19].	71
Figure III. 7 : Schéma bloc global du système et de sa commande[123].	72
Figure III. 8 : Vitesse mécanique d'entraînement (a). Tensions V_{sd} et V_{sq} (b)	73
Figure III. 9 : Tensions rotoriques	73
Figure III. 10 : Courants rotoriques	73
Figure III. 11 : Tension et courant ($i_{sa} \times 100$) statorique	74
Figure III. 12 : Puissances statoriques active et réactive (a).Tension du bus continu (b)	74
Figure III. 13 : Courant I_{sd} de la MSAP (a). Courant I_{sq} de la MSAP (b)	75
Figure III. 14: Vitesse mécanique d'entraînement (avec des batteries) (a). Tensions V_{sd} et V_{sq} (b)	76
Figure III. 15 : Tension et courant statorique (a).Puissance active d'éolienne et de charge(b).	76

Figure III. 16 : Puissance de batterie (a). Tension de batterie (b)	76
Figure III. 17 : Etat de charge de batterie (SOC) (a). Tension du bus continu (b).	77
Figure IV. 1 : Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park[138]	81
Figure IV. 2: Schéma de principe de filtrage actif par convertisseur côté réseau[85]	83
Figure IV. 3: Boucle de régulation des courants de réseau avec les références harmoniques[78].....	84
Figure IV. 4: Résultats de simulation du système hybride (éolien-filtre actif) basé sur le convertisseur côté réseau (a,b,c,d,e,f) sans compensation de la puissance réactive.....	87
Figure IV. 5: Résultats de simulation du système hybride (éolien-filtre actif) basé sur le convertisseur côté réseau (a,b,c,d,e,f) avec compensation de la puissance réactive.	89
Figure IV. 6: Déséquilibre de la charge	90
Figure IV. 7: Résultats de simulation de compensation de charge linéaire déséquilibrée par le système hybride (éolien-filtre actif) basé sur le convertisseur côté réseau (a,b,c,d)	91
Figure IV. 8: Schéma de principe de filtrage actif par le stator de la MADA[149].....	92
Figure IV. 9: Commande indirecte sans boucle de puissance avec les références harmoniques[149].....	94
Figure IV. 10 : Résultats de simulation du filtrage actif par le stator de la MADA (a,b,c,d,e).....	95
Figure IV. 11 : Schéma de principe de filtrage actif par le convertisseur coté réseau et le stator de la MADA	97
Figure IV. 12: Diagramme de Bode du filtre sélectif[149]	98
Figure IV. 13 : Schéma du filtre sélectif multi variable[150],[151]	99
Figure IV. 14 : Résultats de simulation du filtrage actif par le convertisseur coté réseau et le stator de la MADA (a,b,c,d,e,f,g) sans compensation de la puissance réactive.	101
Figure IV. 15 : Résultats de simulation du filtrage actif par le convertisseur coté réseau et le stator de la MADA (a,b,c,d,e,f,g) avec compensation de la puissance réactive.....	103

Liste des Symboles et Notations

Symboles

E_c	Energie cinétique du vent
$v_1; v_2$	Vitesses du vent en amont et en aval
m	Masse du volume d'air
ρ	Masse volumique du vent
S	Surface balayée par l'hélice
P_{mt}	Puissance mécanique théorique
P	Puissance active de réseau
R	Rayon de voilure
H	Hauteur de voilure
λ	Rapport de la vitesse linéaire en bout de pales
C_p	Coefficient de puissance
β	Angle de calage
C_{aer}	Couple aérodynamique
$\Omega_{turbine}$	Vitesse mécanique de turbine
C_{mec}	Couple issu du multiplicateur
G	Multiplicateur mécanique
$J_t; J_m$	Inerties de turbine et de la machine
$v_{s1}; v_{s2}; v_{s3}$	Tensions du réseau
$i_{res1}; i_{res2}; i_{res3}$	Courants du réseau
r	Résistance totale de la ligne
l	Inductance totale de la ligne
$v_{c1}; v_{c2}; v_{c3}$	Tensions à l'entrée du convertisseur.
$i_\alpha; i_\beta$	Composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β)
$i_d; i_q$	Composantes du vecteur courant de ligne dans le repère tournante (d, q)
$i_{d_ref}; i_{q_ref}$	Courant de référence de ligne dans le repère tournante (d, q)
$v_{s\alpha}; v_{s\beta}$	Composantes du vecteur tension de ligne dans le repère stationnaire (α, β)
$v_d; v_q$	Composantes du vecteur tension de ligne dans le repère tournante (d, q)
$v_{c\alpha}; v_{c\beta}$	Composantes du vecteur tension convertisseur dans le repère stationnaire (α, β)
$v_{cd}; v_{cq}$	Composantes du vecteur tension convertisseur dans le repère tournante (d, q)
v_{dc}	Tension de bus continue
v_{dc_ref}	Tension bus continue de référence
i_{ch}	Courant de charge
C	Capacité côté continue
R_{ch}	Résistance de la charge
f_c	Fréquence de commutation

F_{11} F_{21} F_{31}	Etats de commutation du redresseur
P_{ref}	Puissance active de référence
Q	Puissance réactive de réseau
Q_{ref}	Puissance réactive de référence
$\hat{p}$	Puissance active instantanée.
$\hat{q}$	Puissance réactive instantanée.
φ	Déphasage entre le courant fondamental et la tension.
g	Glissement
ω_m	Vitesse mécanique de rotation du rotor
ω_s	Pulsation des courants et des tensions statoriques
ω_r	Pulsation des courants et des tensions rotoriques
ω	Pulsation électrique de rotation du rotor
θ_s	Angle électrique entre le repère de Park et la phase a du stator
θ_r	Angle électrique entre le repère de Park et la phase a du rotor
θ_m	Angle de rotation du rotor
p	Nombre de paires de pôles
$[v_s]; [v_r]$	Vecteurs tensions, respectivement, statorique et rotorique
$[i_s]; [i_r]$	Vecteurs courants, respectivement, statorique et rotorique
$[\varphi_s]; [\varphi_r]$	Vecteurs flux, respectivement, statorique et rotorique
$v_{ds}; v_{qs}$	Composantes, respectivement, directe et en quadrature de vecteur tension statorique
$v_{dr}; v_{qr}$	Composantes, respectivement, directe et en quadrature de vecteur tension rotorique
$i_{ds}; i_{qs}$	Composantes respectivement, directe et en quadrature du vecteur courant statorique
$i_{dr}; i_{qr}$	Composantes, respectivement, directe et en quadrature du vecteur courant rotorique
$\varphi_{ds}; \varphi_{qs}$	Composantes, respectivement, directe et en quadrature du vecteur flux statorique
$\varphi_{dr}; \varphi_{qr}$	Composantes, respectivement, directe et en quadrature du vecteur flux rotorique
R_s	Résistance d'une phase statorique
R_r	Résistance d'une phase rotorique
$L_s; L_r$	Inductances cycliques, respectivement, statorique et rotorique
L_m	Inductance mutuelle cyclique stator/rotor ou (inductance magnétisante)
σ	Coefficient de dispersion
C_r	Couple résistant
f_r	Coefficient de frottement visqueux
P_s	Puissance active statorique
Q_s	Puissance réactive statorique
P_r	Puissance active rotorique
Q_r	Puissance réactive rotorique
P_{s_ref}	Puissance active de référence statorique
Q_{s_ref}	Puissance réactive de référence statorique
P_{r_ref}	Puissance active de référence rotorique

Q_{r_ref}	Puissance réactive de référence rotorique
$A ; B$	Chute de tension et la constante de temps inverse dans la zone exponentielle de la batterie Li-ion
E_0	Tension à vide de batterie
K	Tension de polarisation
Q	Capacité de batterie
R_{int}	Résistance interne de batterie
I_{bat}	Courant de batterie
R_{ms}	Résistance des enroulements statoriques de la MSAP
$L_d ; L_q$	Inductances directe et en quadrature de la MSAP
ϕ_f	Flux de l'aimant permanent.
$v_{md} ; v_{mq}$	Composantes directe et en quadrature de la tension. de la MSAP
$i_{md} ; i_{mq}$	Composantes directe et en quadrature des courants. de la MSAP
$i_{md_ref} ; i_{mq_ref}$	Composantes directe et en quadrature des courants des références de la MSAP
i_{mac}	Courant demandé par le convertisseur coté rotor de la MADA
p_h	Puissance active harmonique
q_h	Puissance réactive harmonique
$i_{c1} ; i_{c2} ; i_{c3}$	Courants de charge polluant
$i_{cdn} ; i_{cqn}$	Composantes directe et en quadrature des courants harmoniques
$i_{cdn(5,7)} ; i_{cqn(5,7)}$	Composantes directe et en quadrature des courants harmoniques (5,7)
$i_{cdn(rest)} ; i_{cqn(rest)}$	Composantes directe et en quadrature de reste des courants harmoniques
C_{bat}	Capacité de batterie

Notations

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
JTAG	Joint Test Action group
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MCC	Machine à courant continu
PI	Régulateur Proportionnel Intégral
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
MPPT	Maximum Power Point Tracking
RSC	Convertisseur coté rotor
GSC	Convertisseur coté réseau
PLL	Phase-locked Loop
THD	Total Harmonic Distortion (Taux de Distorsion Harmonique)
PC	Personal Computer
FPB	Filtre Passe-Bas
FP	Facteur de Puissance
PCC	Point of Common Coupling (point de raccordement)
Li-ion	lithium-ion

<i>SOC</i>	Stat of charge (état de charge de batterie)
<i>OCV</i>	Open Circuit Voltage (tension en circuit ouvert)
<i>SOH</i>	State of Health (état de santé de batterie)
<i>CEI</i>	Commission Electrotechnique Internationale
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers

Table des Matières

Introduction Générale

CHAPITRE I Etat de l'art sur la conversion de l'énergie éolienne

I.1	Introduction.....	3
I.2	Contexte énergétique et aspects environnementaux.....	3
I.2.1	Problèmes énergétiques.....	3
I.2.2	Problèmes environnementaux.....	4
I.2.3	Quelles conséquences pour les années à venir ?.....	5
I.2.4	Aspects réglementaires.....	5
I.3	Sources d'énergie renouvelables.....	7
I.3.1	L'hydroélectricité.....	7
I.3.2	L'énergie solaire : le solaire photovoltaïque et le solaire thermique.....	8
I.3.3	L'énergie géothermique.....	10
I.3.4	L'énergie de biomasse.....	11
I.3.5	Energie de la mer.....	11
I.3.6	Energie éolienne.....	12
I.4	Conversion de l'énergie éolienne.....	13
I.4.1	Principe et théorie d'une éolienne.....	13
I.4.2	Différents types des aérogénérateurs.....	14
I.4.2.1	Aérogénérateurs à axe vertical.....	14
I.4.2.2	Aérogénérateurs à axe horizontal.....	16
I.4.3	Eléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal.....	16
I.4.4	Technologie d'éoliennes de grande puissance.....	18
I.4.4.1	Les éoliennes à vitesse fixe (constante).....	18
I.4.4.2	Les éoliennes à vitesse variable.....	19
I.4.5	Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne.....	20
I.4.5.1	Machine à courant continu (MCC).....	20
I.4.5.2	Machine asynchrones à cage (MAS).....	20
I.4.5.3	Machine synchrones (MS).....	20
I.4.5.4	Machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	21
I.4.5.5	Machines à reluctance variable.....	21
I.4.5.6	Machines asynchrones à double alimentation (MADA).....	22
I.5	Machine asynchrone à double alimentation.....	22
I.5.1	Structure de la MADA.....	22
I.5.2	Modes de fonctionnement.....	23
I.5.3	Avantage des éoliennes à base de la MADA.....	24
I.6	Système de stockage de l'énergie électrique.....	25
I.6.1	Synthèse sur les différentes techniques de stockage.....	25
I.6.1.1	Stockage inertiel électromécanique.....	25
I.6.1.2	Stockage par air comprimé.....	26
I.6.1.3	Stockage d'hydrogène-Piles à combustible.....	27
I.6.1.4	Système de stockage électrostatiques - Supercondensateurs.....	28
I.6.1.5	Accumulateurs électrochimiques.....	29
I.6.2	Systèmes de stockage à base de batteries Li-ion.....	30
I.6.2.1	Principe de fonctionnement.....	31

I.6.2.2	Technologies des batteries Li-ion	31
I.6.2.3	Coût des batteries Li-ion	32
I.7	Conclusion	33
CHAPITRE II Etude d'une chaîne de conversion éolienne en mode connectée au réseau		
II.1	Introduction	34
II.2	Chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA connectée au réseau électrique	34
II.2.1	Description de la structure	34
II.2.2	Principe de fonctionnement	35
II.3	Modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA	35
II.3.1	Modélisation de la turbine éolienne	35
II.3.2	Modélisation de la MADA	38
II.3.2.1	Equations électriques de la MADA	38
II.3.2.2	Equations magnétiques	39
II.3.2.3	Equation mécanique	39
II.3.2.4	Modèle de la MADA dans le plan (dq)	39
II.3.3	Modélisation des convertisseurs	41
II.3.3.1	Modélisation du convertisseur coté rotor	41
II.3.3.2	Modèle du bus continu	43
II.3.3.3	Modélisation du convertisseur coté réseau	43
II.4	Modélisation des batteries Li-ion	44
II.4.1	Les batteries Li-ion	44
II.4.2	Modèle de batterie Li-ion	45
II.5	Commande vectorielle de la MADA	47
II.5.1	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	47
II.6	Commande indépendante des puissances active et réactive statoriques de la MADA en mode connecte au réseau	49
II.6.1	La commande directe	49
II.6.2	La commande indirecte	50
II.6.2.1	Commande indirecte sans boucle de puissance	50
II.6.2.2	Commande indirecte avec boucle de puissance	50
II.7	Contrôle du convertisseur coté réseau	51
II.8	Contrôle du système de stockage électrochimique	53
II.9	Résultats de simulation	54
II.9.1	Validation de la commande directe de puissance	54
II.9.2	Validation du contrôle de convertisseur coté réseau	58
II.9.3	Validation du contrôle de système de stockage	61
II.10	Conclusion	62
CHAPITRE III Etude d'une chaîne de conversion éolienne en mode iloté associée aux batteries Li-ion .		
III.1	Introduction	63
III.2	Chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la MADA en mode iloté	63
III.2.1	Description du système éolien en mode iloté	63
III.2.2	Principe de fonctionnement	63
III.3	Modélisation de la MADA en mode iloté	64
III.3.1	Equations liants les tensions rotoriques avec les flux rotoriques	64

III.3.2	Equations liants les tensions rotoriques avec les flux rotoriques	65
III.4	Commande de la MADA en mode iloté	67
III.4.1	Boucles internes de régulation des flux rotoriques	67
III.4.2	Boucle externe de régulation de la tension statorique.....	67
III.5	Modèle de la machine synchrone à aimants permanents.....	68
III.6	Commande de la MSAP	68
III.7	Intégration du système de stockage électrochimique dans le système éolien en mode iloté	70
III.8	Résultats de simulation	71
III.8.1	Validation de la commande du système éolien en mode iloté	71
III.8.2	Validation du contrôle du système de stockage	75
III.9	Conclusion	77
CHAPITRE IV Filtrage actif par un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation		
IV.1	Introduction.....	78
IV.2	Filtrage actif par le système éolien.....	78
IV.2.1	Identifications des courants harmoniques par la méthode des puissances réelle et imaginaire	79
IV.2.1.1	Calcul des différentes composantes de tension et de courant	79
IV.2.1.2	Modélisation de la charge polluante	81
IV.3	Filtrage actif par le convertisseur cote réseau	82
IV.3.1	Principe de fonctionnement	82
IV.3.2	La commande en courant du convertisseur coté réseau dans le repère (d, q)	83
IV.3.2.1	Résultats de simulation	84
IV.4	Filtrage actif par le stator de la MADA.....	91
IV.4.1	Principe de fonctionnement	91
IV.4.2	La commande indirecte sans boucle de puissance avec les courants harmoniques de référence ..	92
IV.4.3	Résultats de simulation	94
IV.5	Filtrage actif par le convertisseur cote réseau et le stator de la MADA	96
IV.5.1	Principe de fonctionnement	96
IV.5.2	L'isolation des harmoniques par filtre sélectif.....	97
IV.5.3	Résultats de simulation	99
IV.5.3.1	Filtrage actif sans compensation de la puissance réactive	99
IV.5.3.2	Filtrage actif avec compensation de la puissance réactive	102
IV.6	Conclusion	104

Conclusion Générale

Références Bibliographiques

Annexes

Introduction Générale

Face à l'épuisement à court terme des énergies fossiles, suite à la forte industrialisation des dernières décennies, la prolifération des appareils domestiques électriques, et au changement climatique dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre, le recours aux énergies renouvelables est devenu primordial. La transition énergétique est l'un des plus grands défis technologiques et scientifiques du XXI^e siècle. Les énergies renouvelables non carbonées représentent une alternative majeure aux carburants fossiles. Elles représentent une valeur d'investissement sûre pour la sauvegarde de l'environnement et l'économie d'énergie. L'une des ressources d'énergie renouvelable, la plus utilisée est le vent. L'énergie éolienne apparaît clairement comme une énergie d'appoint complémentaire aux sources conventionnelles d'énergie. Beaucoup de pays se sont intéressés à cette énergie propre. Ces dix dernières années, sa capacité de production mondiale a été pratiquement multipliée par dix. Elle était de 318,137 Gigawatts (GW) au 31 décembre 2013.

L'Algérie, malgré qu'elle ne soit pas considérée comme un pays fortement venté, reçoit quand même une quantité d'énergie éolienne considérable dans certaines de ses régions. La région du Sud-Ouest du pays, est la contrée plus ventée avec des vitesses de vent supérieures à 4 m/s et dépassant même les 6 m/s dans la province d'Adrar. Le gouvernement algérien s'est engagé, dans le cadre du programme de transition énergétique, à atteindre un taux de 40 % de production de l'électricité sur la base d'énergies propres à l'horizon 2030. Dans ce cadre, la Société de l'Electricité et des Energies Renouvelables (SKTM), filiale du groupe Sonelgaz, décide l'installation et la gestion d'une ferme éolienne, d'une capacité de production de 10 MW, à Adrar.

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représente la technologie à très forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés. De nos jours, l'aérogénérateur est la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne. Cette machine permet de générer de l'énergie électrique à partir de l'énergie du vent. L'interface d'électronique de puissance entre l'éolienne et la charge a pour but la commande de l'aérogénérateur pour en extraire un maximum de puissance. L'utilisation de l'énergie éolienne nécessite le stockage de l'électricité en raison de la disponibilité intermittente de cette ressource. L'utilisation du stockage d'électricité est très diversifiée selon les applications stationnaires connectées ou non au réseau. Le développement technologique des chaînes de conversion éolienne, aussi bien au niveau de l'aérogénérateur que de l'électronique de puissance et des batteries de stockage, vise à améliorer et maximiser l'efficacité énergétique de cette conversion d'énergie et contrôler le flux de puissance entre les éoliennes du même réseau ou entre les éoliennes et les charges isolées.

Dans ce travail, la chaîne de conversion d'énergie éolienne et les solutions à mettre en œuvre, afin de répondre aux objectifs de maximisation de la production, la qualité de l'énergie fournie en considérant un stockage par batterie Li-ion, sont étudiés en détails. La chaîne de conversion utilise une Machine Asynchrone à Double Alimentation, alimentée via son rotor par une cascade de deux convertisseurs MLI à deux niveaux. Les objectifs attendus sont : récupérer le maximum de la puissance par la source, assurer l'autonomie énergétique du site isolé et rentabiliser économiquement l'énergie récupérée.

Pour atteindre ces objectifs, le manuscrit de la thèse est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre, expose le contexte énergétique actuel et les aspects environnementaux liés à l'utilisation des différentes sources d'énergies renouvelables existantes. Les technologies d'éoliennes et les composants d'une chaîne de conversion éolienne sont étudiés en détails. Une revue, des différentes machines électriques utilisées pour la conversion de l'énergie éolienne, a été effectuée. Les différents moyens de stockage, de l'énergie électrique utilisée dans les installations éoliennes sont abordés. En particulier, le système de stockage à base de batteries Li-ion a été étudié en détails.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et le contrôle du système éolien à base de la MADA en mode connecté au réseau électrique. La commande découplée des puissances active et réactive basée, sur le contrôle vectoriel par orientation du flux rotorique de la MADA, est détaillée. La modélisation et le contrôle du convertisseur coté réseau, qui assure la régulation de tension du bus continu, et du système de stockage à base de batteries Li-ion. Afin, de valider les différents modèles de la génératrice et le contrôle en puissance active et réactive, des simulations sont effectuées sous différentes conditions.

Le troisième chapitre présente la description de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la MADA et la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) en mode iloté. La modélisation de deux machines, en mode du fonctionnement isolé, est étudiée. Le contrôle vectoriel de la MADA en mode iloté et la commande de la MSAP sont abordés. Pour valider et évaluer les performances du contrôle de système éolien en mode iloté, des simulations sont effectuées

Le dernier chapitre traite l'aspect qualitatif de l'énergie électrique produite par une chaîne de conversion éolienne. Des structures du système hybride éolien–filtre actif, pour la compensation des courants harmoniques, sont proposées. Des simulations sont effectuées pour valider l'efficacité et les performances du système hybride éolien–filtre actif.

Une synthèse des travaux réalisés et quelques perspectives concluront ce travail de thèse.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur la conversion de l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Actuellement, l'énergie électrique est primordiale dans la vie de l'humanité. Sa consommation ne cesse d'augmenter. Pour faire face à cette recrudescence de la demande et éviter l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), beaucoup de pays ont opté pour les énergies renouvelables, dont l'énergie éolienne. L'aérogénérateur est le système utilisé pour la conversion de celle-ci en énergie électrique.

Plusieurs types des machines électriques peuvent jouer le rôle de la génératrice dans le système aérogénérateur, exigeant des caractéristiques spécifiques, dont la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Dans ce chapitre, le contexte énergétique et les aspects environnementaux liés au développement de l'énergie renouvelable, sous ses différents types, sont brièvement présentés. Le système de conversion de l'énergie éolienne et les différents composants constituant l'aérogénérateur y sont définis. Pour ses avantages incontestés, la machine asynchrone à double alimentation, utilisée pour la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, est préférée. Le système de conversion et son principe de fonctionnement sont étudiés en détail. Le stockage de l'énergie électrique, dans les diverses applications de la conversion de l'énergie éolienne est abordée.

I.2 Contexte énergétique et aspects environnementaux

I.2.1 Problèmes énergétiques

Sous l'effet de la démographie et de la croissance économique, la demande énergétique mondiale est en forte croissance. Les énergies fossiles, dont le pétrole au premier rang, assurent aujourd'hui plus de 80 % de l'offre mondiale en énergie. Cette situation se traduit par une dépendance mondiale aux énergies carbonées. Des contraintes environnementales et d'approvisionnement en matières premières se posent avec acuité [1]. Le pic de production du pétrole, *peakoil*, représentant l'instant où la production pétrolière atteindra son maximum semble très proche. A partir de cet instant, la production mondiale ne pourrait que décroître et les tensions entre les états augmenteraient inexorablement. Il serait alors, difficile de prédire l'ampleur des problèmes, et les mesures que prendraient les chefs d'état pour leurs résolutions [2]. La Figure. I. 1 , représente la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire [3].

En plus, de l'épuisement annoncé des ressources pétrolières, leur approvisionnement est soumis à de fortes incertitudes et peut très rapidement se trouver perturbé par des événements d'origine naturelle (tempêtes, typhons), technique (catastrophe industrielle), mais aussi géopolitique (par exemple blocage du détroit d'Ormuz), voire même terroriste [1]. Ces dernières années, la hausse des prix du pétrole depuis 2002 est comparable à celle qu'avaient provoquée les chocs pétroliers de 1973 et 1979¹. Le prix du baril de Brent a été multiplié par 5, dépassant pour la première fois 100 dollars en janvier 2008[4]. L'évolution du prix du pétrole de 1999 à 2014 est illustrée sur la Figure. I. 2.

¹Le 17 octobre 1973, l'Organisation des pays arabes exportateurs de pétrole annonce qu'elle réduira de 5% par mois son débit de pétrole, tant que les États-Unis ne changeront pas leur politique au Moyen-Orient (la guerre du Kippour entre Israël et les pays arabes).

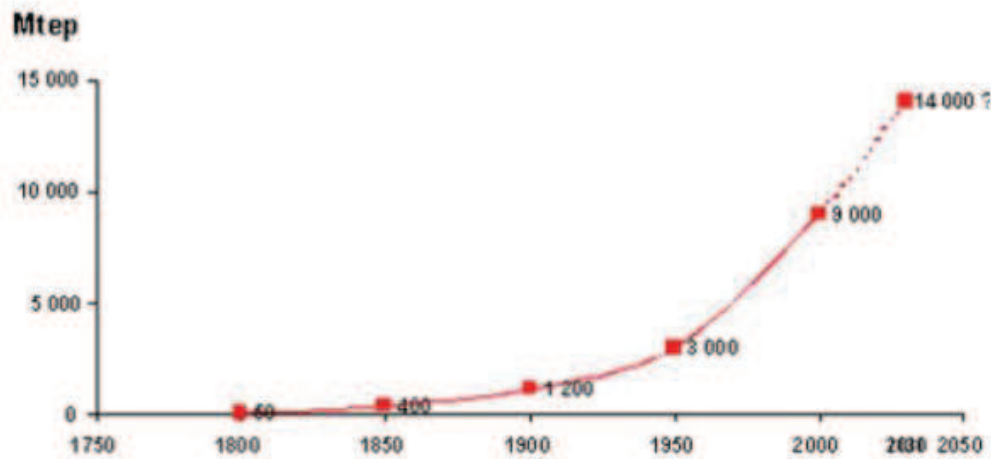


Figure. I. 1: Consommation mondiale annuelle d'énergie primaire[5]

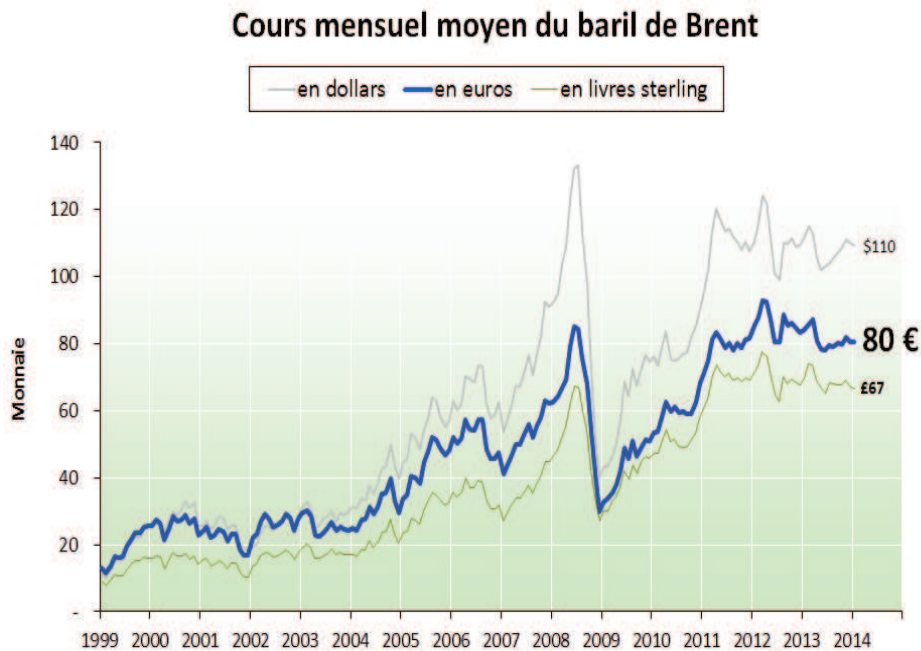


Figure. I. 2 Evolution du prix du pétrole de 1999 à 2014[6].

I.2.2 Problèmes environnementaux

Vital pour le maintien des conditions de vie sur le globe, l'effet de serre désigne la faculté de certains constituants de l'atmosphère à absorber sous forme de chaleur une partie du rayonnement solaire réfléchi par la Terre. La concentration des Gaz à Effet de Serre (GES), a considérablement augmentée au cours des deux derniers siècles, du fait du développement des activités humaines[7]. L'augmentation de la concentration des GES crée des problèmes, dont le réchauffement climatique. Il existe, essentiellement, quatre types de gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et les composés fluorés (cf. Figure. I. 3) [8]. Les cheminées des usines et des centrales à charbon, les pots d'échappement des voitures, la climatisation (utilisant l'hydro fluorocarbure (HFC)) polluent

1300 fois plus que le CO₂. La déforestation, la combustion du pétrole et du charbon, l'élevage intensif et bien d'autres choses contribuent au réchauffement de la planète[4].

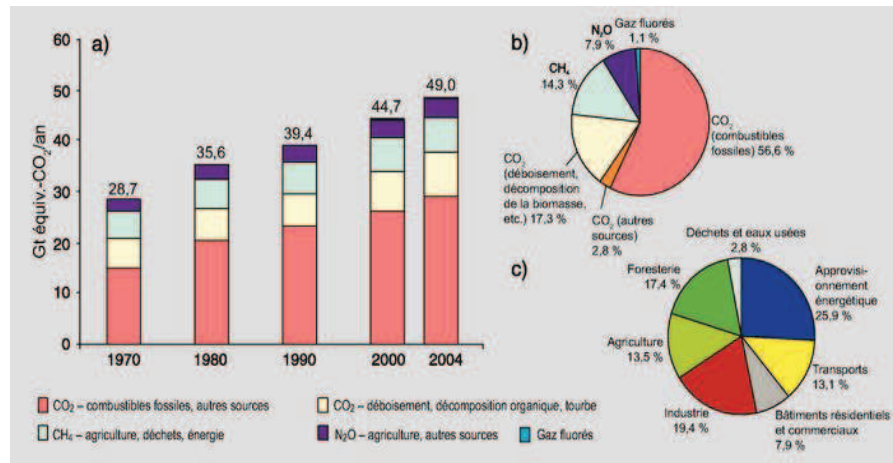


Figure. I. 3 : Contribution à l'effet de serre[9].

I.2.3 Quelles conséquences pour les années à venir ?

Les derniers rapports du GIEC² confirment et renforcent la certitude de l'existence d'une augmentation de l'effet de serre due à l'activité humaine. Il donne des prévisions d'augmentation de la température moyenne du globe et d'élévation du niveau moyen des mers sur le globe. Ainsi, selon les scénarios plus ou moins pessimistes, la température moyenne sur la terre s'élèverait en 2100 de 1,8° à 4° [10]. Par conséquent, la fonte des glaciers et la dilation des océans sous l'effet de la chaleur provoqueront une élévation du niveau de la mer estimée entre 18 et 59 cm. Actuellement, de nombreuses régions côtières sont déjà confrontées à des phénomènes de submersion, d'accélération de l'érosion, d'intrusion d'eau de mer dans les nappes d'eau douce. Une autre conséquence du changement climatique est la diminution des ressources en eau douce qui va frapper certaines régions sèches des latitudes moyennes et tropicales. L'effet sur les populations va se traduire par des déplacements massifs du littoral (74 % de la population mondiale) vers l'intérieur des terres pour ne pas être submergé par la montée des eaux. Cependant, A cause des sécheresses et des inondations, les habitants des régions sinistrées risquent de souffrir de la famine [11]. Sur le plan de la santé publique, le changement climatique influe sur les déterminants sociaux et environnementaux de la santé : air pur, eau potable, nourriture en quantité suffisante, sécurité du logement. Le schéma de la Figure. I. 4, montre les impacts environnementaux liés aux changements climatiques.

I.2.4 Aspects réglementaires

Dans le sillage du sommet mondial sur l'environnement et le développement organisé en 1992 à Rio de Janeiro au Brésil, des conventions internationales ont été adoptées pour fixer le cadre et définir les actions à mener en vue de résoudre les problèmes environnementaux

²GIEC : Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (The Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC) a été créé en 1988 par deux institutions des Nations unies : l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE).

globaux : réchauffement du climat, érosion de la biodiversité, sécheresse et désertification[12].

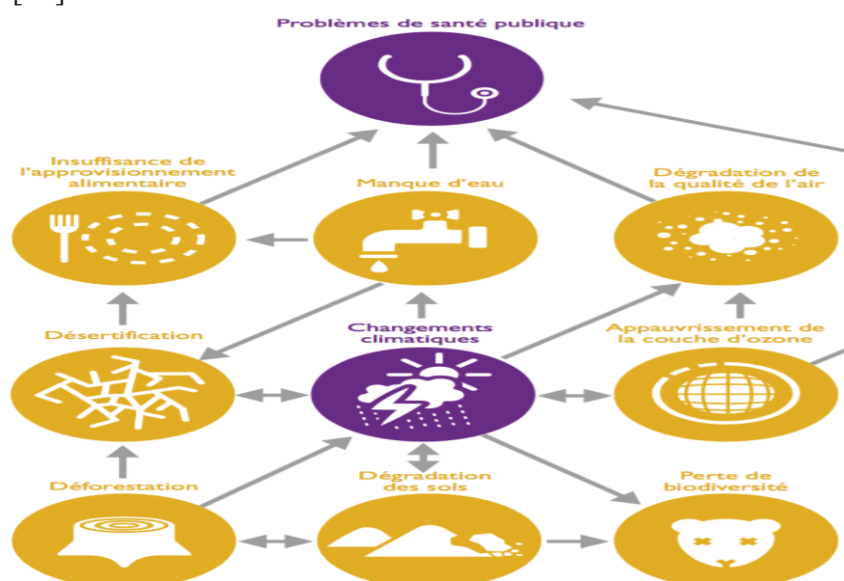


Figure. I. 4:Impacts environnementaux liés aux changements climatiques (Source :Guide ADEME)[13]

Le protocole de Kyoto, élaboré en 1997 pour servir de cadre international à la lutte contre le réchauffement de la Terre, avait fixé pour objectif la réduction moyenne de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 pour les ramener à leur niveau de 1990 [14]. L'essentiel de l'effort de réduction repose sur les pays développés et les pays d'Europe de l'Est à économie en transition. Les pays en développement, y compris les pays émergents (la Chine, le Brésil, l'Inde...etc.) sont dispensés d'engagements contraignants de réduction. Le protocole de Kyoto est entré en vigueur en février 2005 après sa ratification par la Russie à la fin de l'année 2004. L'Australie a ratifié le protocole en décembre 2007, ce qui porte à 175 le nombre de pays qui ont y adhéré et sont tenus de l'appliquer entre 2008 et 2012. Les Etats-Unis et quelques pays du Sud n'ont pas ratifié ce protocole [14].

Le **Tableau. I. 1**, représente l'engagement de réduction des émissions de gaz effet de serre fixés par le protocole de Kyoto.

États-Unis	-7%	Allemagne	-21%
Japon	-6%	Royaume-Uni	-12,5%
Canada	-6%	Italie	-6,5%
Russie	0%	Pays-Bas	-6%
Australie	+8%	France	0%
Union européenne	-8%	Espagne	+15%

Tableau. I. 1:L'engagement de réduction des émissions de gaz effet de serre fixés par le protocole de Kyoto[15]

I.3 Sources d'énergie renouvelables

Actuellement, les sources d'énergie renouvelables font l'objet d'un regain d'intérêt. La cause principale de cet essor est l'épuisement des ressources énergétiques conventionnelles de la Planète (le fuel, le gaz naturel, le charbon et l'uranium). Une autre raison de leur développement est la distribution et la consommation non uniformes des ressources conventionnelles d'énergie sur la Planète. Ainsi, une partie considérable de l'humanité, n'a pas accès à l'électricité (environ 22% ou 1,5 milliards de personnes), ce qui limite son développement [16]. L'augmentation de la participation des énergies renouvelables pour répondre aux besoins des consommateurs est régie par le «Protocole de Kyoto», qui impose des exigences réelles pour les pays signataires (cf. Figure. I. 5). Globalement, en 2009 il y avait 1230 GW installés en énergies renouvelables produisant de l'électricité, ce qui représente 18% de la capacité dans le monde. Cette énergie renouvelable peut être fournie par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux [16].

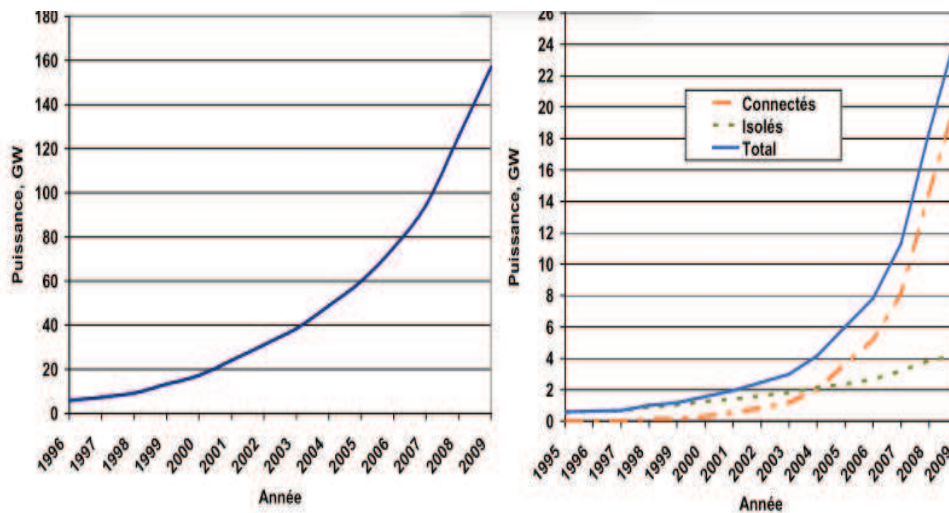


Figure. I. 5 : Développement des puissances installées d'éoliennes et photovoltaïques pour la période 1996-2009[16].

I.3.1 L'hydroélectricité

L'hydroélectricité est 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-réservoirs, de centrales d'éclusées ou au fil de l'eau [17]. Les barrages-réservoirs, 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[18]. En effet, 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 et frappe les aubes d'une turbine. La rotation de la turbine fait tourner des électro-aimants qui produisent un courant dans des enroulements fixes (cf. Figure. I. 6)[17].

L'hydroélectricité est largement acceptée comme une énergie propre et compatible avec les contraintes environnementales. Mais l'importance des grands ouvrages d'art, déviation de cours d'eau, inondations locales, déplacements de population et etc., lors de la construction des grands barrages posent problèmes [19]. La construction d'un barrage hydroélectrique, de grande taille, entraîne parfois un déplacement très important de la population qui peut être désastreux (exemple du barrage des Trois Gorges en Chine)[20].

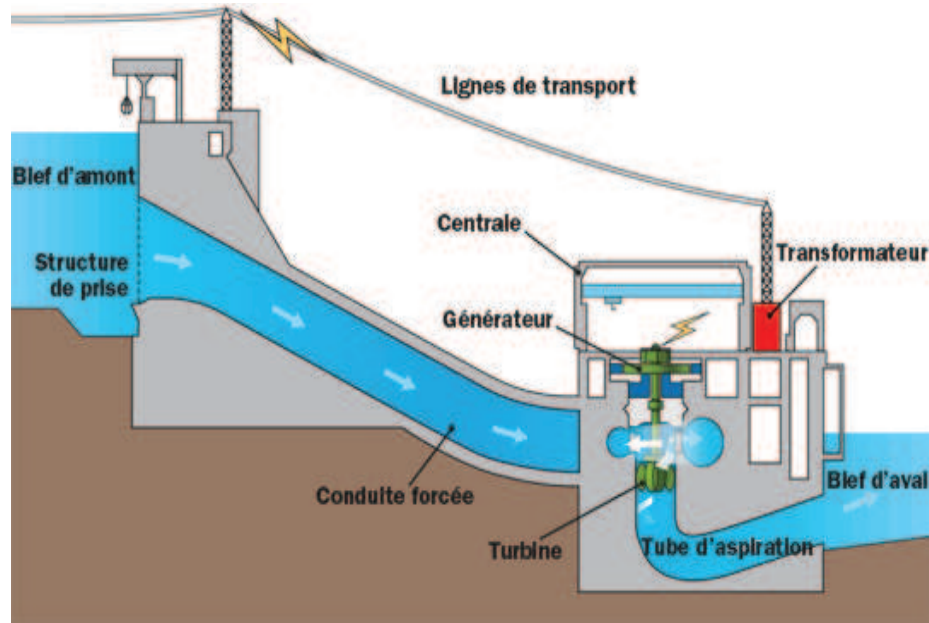


Figure. I. 6 : Principe d'hydroélectricité[21].

I.3.2 L'énergie solaire : le solaire photovoltaïque et le solaire thermique

L'utilisation de l'énergie solaire se fait de deux manières : le solaire photovoltaïque, à l'aide de cellules solaires convertit l'énergie solaire en énergie électrique et le solaire thermique, à l'aide de capteurs, transforme l'énergie du rayonnement solaire en chaleur véhiculée par l'eau [22]. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium avec une couche métallique mince (cf. Figure. I. 7). Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons (composants de la lumière), qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Un système photovoltaïque utilisant des cellules solaires, l'énergie disponible dépend des conditions d'éclairement (conditions atmosphériques, angle du rayonnement, propreté des surfaces...) et de la température de fonctionnement des cellules[23].

Le photovoltaïque est aujourd'hui une réalité industrielle. Depuis la fin des années 90, ce secteur connaît une croissance très forte, d'environ 40% par an. Les nouvelles installations photovoltaïques en 2014 dans le monde ont atteint un niveau de 40 GW. La Chine, le Japon, l'Europe et les Etats-Unis sont les leaders, (cf. Figure. I. 8)[24]. Les installations photovoltaïques sont en général jaugées en termes de capacité de puissance. Les modules photovoltaïques sont testés sous un éclairement de référence (1 kW/m²), et délivrent dans ces

conditions une puissance exprimée en Watt-crête (Wc), qui permet de les comparer entre eux[25].

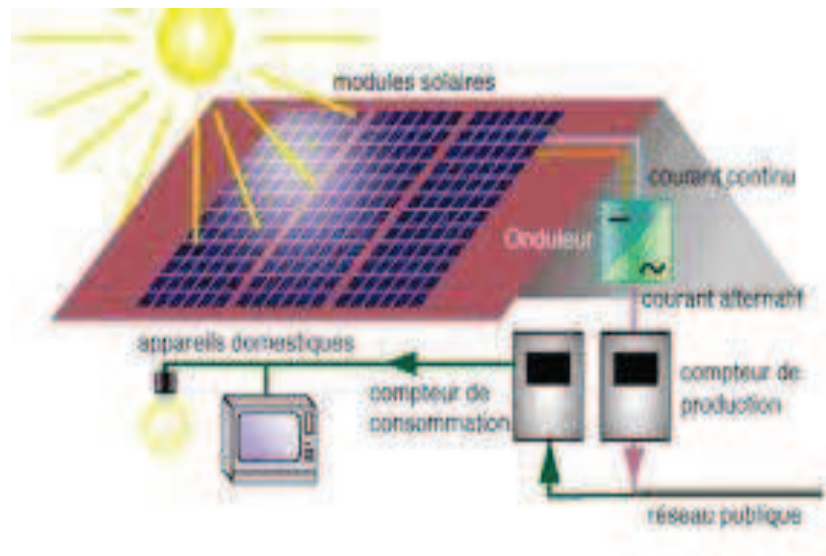


Figure. I. 7 : Principe de photovoltaïque[26].

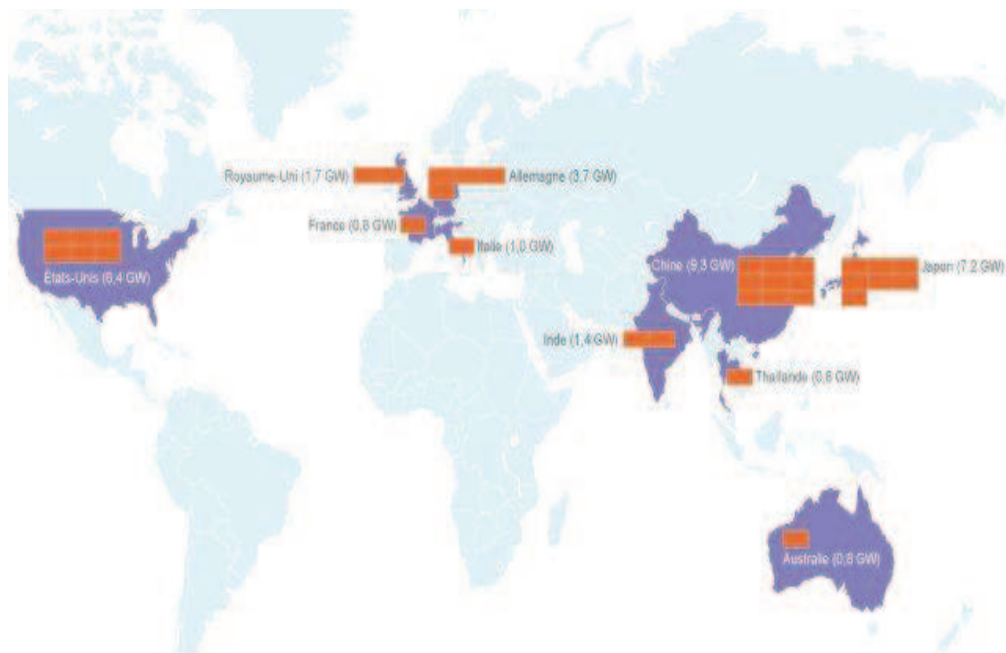


Figure. I. 8 : Les nouvelles installations photovoltaïques en 2014[24]

Le solaire thermique thermodynamique est une des technologies les plus efficaces pour valoriser les énergies renouvelables. C'est au milieu des années 1970, que le concept de centrales solaires thermodynamiques commence à éveiller l'intérêt de centres de recherche et de grands groupes industriels[27]. Cette énergie est le résultat de la transformation en énergie thermique (chaleur) du rayonnement solaire. Cette transformation permet de chauffer de l'air ou de l'eau dans de nombreux cas d'applications solaires. Le solaire thermique basse température permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire, mais aussi dans une

moindre mesure, la production combinée de chauffage par plancher chauffant (plancher solaire direct). Cette application de l'énergie solaire, industrialisée depuis plusieurs ans, est actuellement en phase de croissance accélérée aux Etats-Unis, au Japon et en Europe. Par contre, L'énergie solaire haute température est surtout utilisée dans les centrales solaires thermodynamiques pour produire de l'électricité, les cheminées solaires ou les fours solaires à concentration. Le rayonnement du soleil concentré sur une surface de captage, permet d'obtenir de très hautes températures comprises en général entre 400 et 1.000°C. La chaleur produite par ce processus crée de la vapeur qui alimente une turbine. Cette dernière entraîne un générateur qui va produire de l'électricité : c'est l'héliothermodynamie[28].

I.3.3 L'énergie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre, dont les températures s'étalent de 1 000 °C à 4 300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible, que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [29],[30]. Par ailleurs, les géothermies «haute température» (températures supérieures à 150°C) et «moyenne température» (températures comprises entre 100 et 150°C) permettent, grâce à la vapeur jaillissant (avec suffisamment de pression), d'alimenter une turbine et ainsi de produire de l'électricité [31]. Le principe de production de l'énergie et l'échangeur de chaleur via le géothermique est présenté par la Figure. I. 9. Les centrales géothermiques utilisent la chaleur des nappes d'eau souterraines dans les zones les plus favorables. Cette chaleur est soit directement utilisée (échangeur de chaleur), soit convertie en énergie électrique grâce aux générateurs. La taille typique des centrales géothermiques varie de 5 à 50 MW. La géothermie s'est développée, au 20ème siècle, dans de nombreux pays pour la production d'électricité. Actuellement une vingtaine de pays produisent de l'électricité à partir de la géothermie[32].

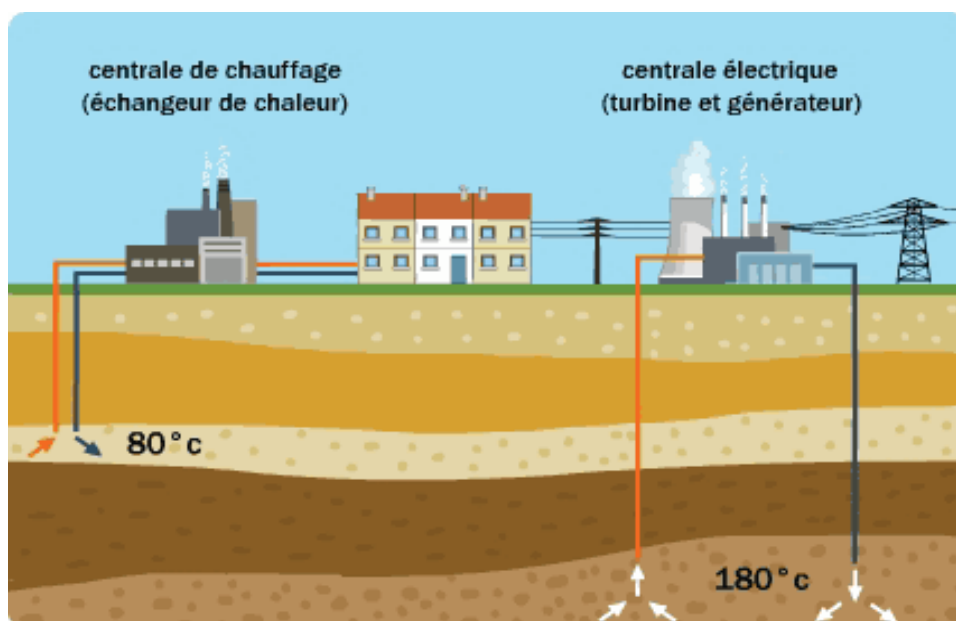


Figure. I. 9 :principe de production de l'énergie géothermique[33].

I.3.4 L'énergie de biomasse

Le terme biomasse désigne, au sens large, l'ensemble de la matière vivante : matière organique d'origine animale ou végétale, les résidus organiques liés à des activités humaines (les ordures ménagères) ou les boues des stations d'épuration[34]. Cette matière organique a pour particularité d'être toujours composée de carbone (du bois aux feuilles en passant par la paille, les déchets alimentaires, le fumier...). La production de l'énergie électrique est produite grâce à la chaleur dégagée par la combustion ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. L'avantage de la conversion énergétique de la biomasse, par rapport aux autres sources d'énergétiques renouvelables, réside dans le fait qu'elle participe en plus activement au traitement des déchets organiques, contribuant ainsi à la réduction de l'impact de nos activités sur l'environnement[35].

La biomasse est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie[29]. L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW. Le principe de biomasse énergie est présenté sur la Figure. I. 10.

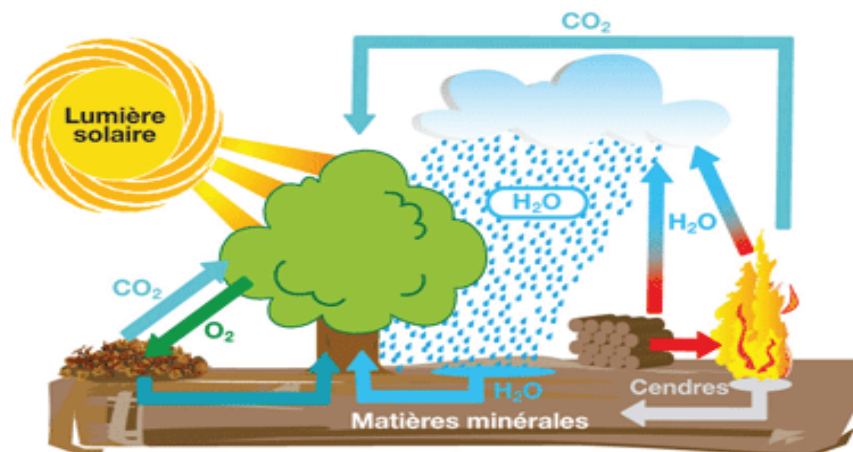


Figure. I. 10 : Principe de biomasse énergie[36].

Le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui l'éthanol (betterave, blé...) et le biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans la lutte contre l'effet de serre. L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement[3].

I.3.5 Energie de la mer

Les vagues qui animent la surface de la mer et des océans du globe représentent une source d'énergie renouvelable inexploitée considérable. L'énergie transportée par les vagues est la somme, à parts égales, d'énergie cinétique liée au champ de vitesse des particules d'eau, et d'énergie potentielle liée à la déformation du domaine fluide autour de sa position au repos (cf. Figure. I. 11). C'est de l'énergie mécanique. De ce fait, l'énergie des courants marins, est

captée sous la surface de l'eau à l'aide d'hydroliennes (éoliennes sous-marines fixées au sol dont les pâles sont actionnées par le flux d'eau qui les traverse). L'énergie produite par les hydroliennes est transformée par un convertisseur, puis transportée par un câble sous-marin jusqu'à la terre [37]. Une expérimentation a été lancée en France au large de Paimpol-Bréhat dans les Côtes d'Armor à 15 km du continent. Dans cette zone, les courants marins sont parmi les plus élevés d'Europe (3 m/s). La France concentre en effet 20% du potentiel hydrolie européen au large de la Bretagne et du Cotentin. Composé de plusieurs hydroliennes placées à 35 m de fond, ce parc d'une capacité de 2 à 4 MW sera raccordé au réseau d'électricité dès son inauguration et permettra d'alimenter environ 4 000 foyers[38].

Techniquement, l'énergie en provenance du mouvement des vagues de la mer et des océans est une énergie très difficilement récupérable, bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie, à exploiter dans l'avenir, ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées[3].

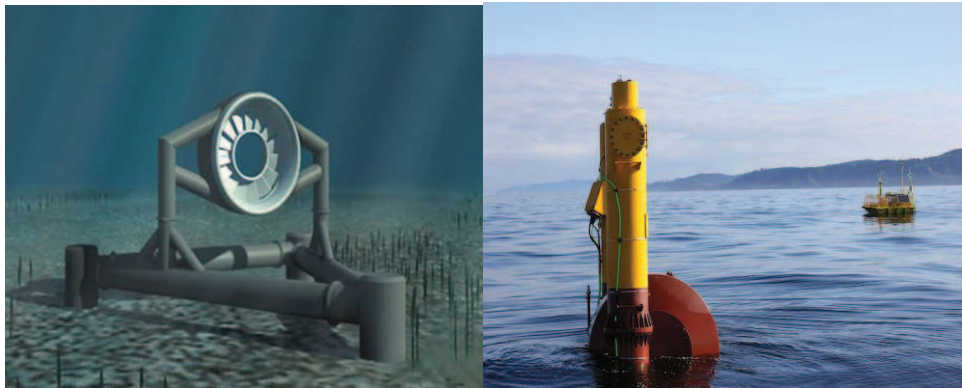


Figure. I. 11: Principe d'énergie de la mer [37].

I.3.6 Énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part celle du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires, des moulins à blé et des constructions de pompage d'eau[39]. Actuellement, l'énergie éolienne est l'une des plus prometteuses des énergies renouvelables de production d'électricité, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses[40],[41].

Avec une puissance mondiale installée de 200 GW en 2011, l'énergie éolienne est devenue un atout majeur de production de l'énergie électrique. L'énergie éolienne, est produite par des aérogénérateurs, comme montré sur la [Figure. I. 12](#), qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent un générateur qui produit de l'électricité. L'énergie éolienne ambitionne de fournir à l'horizon 2020 de 14 à 18 % de l'électricité consommée en Europe.



Figure. I. 12 :Energie éolienne[39].

I.4 Conversion de l'énergie éolienne

Dans cette partie les dispositifs de conversion, permettant de transformer l'énergie éolienne en énergie électrique, les technologies d'éoliennes et les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés.

I.4.1 Principe et théorie d'une éolienne

Le vent est caractérisé par trois grandeurs variables dans le temps : sa direction, sa vitesse et son intensité. L'appareil qui mesure le vent le plus utilisé est l'anémomètre à coupelle. L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Dans l'hypothèse, que la masse volumique de l'air est constante, l'énergie cinétique est égale à [42] :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{I.1})$$

Pour le système à axe horizontal de la Figure. I. 13 où v_1v_2 représentent les vitesses du vent en amont et en aval de l'aérogénérateur, la vitesse du vent qui traverse le rotor est égale à la moyenne de ces deux vitesses soit :

$$\frac{v_1 + v_2}{2} \quad (\text{I.2})$$

La masse d'air en mouvement, en une seconde, est :

$$m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{I.3})$$

La puissance extraite est donnée par la deuxième loi de Newton :

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (I.4)$$

Soit en remplaçant m par son expression (1.3) dans l'équation (1.4):

$$P_m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (I.5)$$

Pour un vent supposé non perturbé, traversant une surface S à une vitesse v_1 pendant une unité de temps (1 seconde), est obtenue une puissance théorique égale à [43][44] :

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (I.6)$$

Où :

ρ : la masse volumique de l'air.

S : la surface des pales balayée par la masse d'air en mouvement.

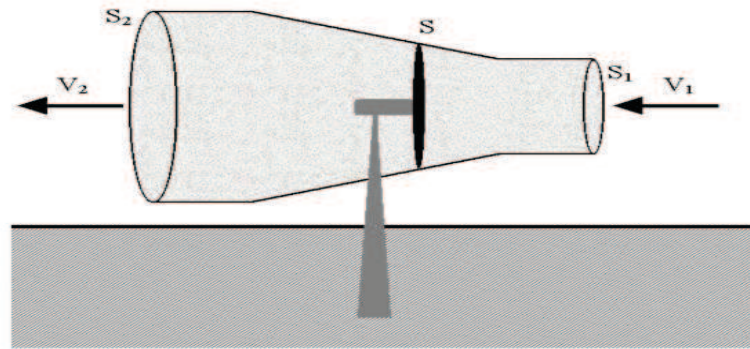


Figure. I. 13 : Tube de courant d'air autour d'un aérogénérateur[41].

I.4.2 Différents types des aérogénérateurs

L'aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Il existe deux grandes catégories d'aérogénérateurs, selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice

I.4.2.1 Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique (cf. Figure. I. 14). Plusieurs prototypes ont vu le jour, mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George

Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924)[45].

A. Avantages aérogénérateurs à axe vertical :

- Leurs turbines peuvent capter le vent quelle que soit sa direction,
- Des systèmes simples qui permettent d'éliminer le problème de forces gyroscopiques sur le rotor,
- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice directement au sol.

B. Inconvénients : aérogénérateurs à axe vertical :

- Elles ont un rendement médiocre (20% de la limite de Betz pour le rotor de Savonius),
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief,
- Ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut le lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production,
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à axe horizontal,
- Les éoliennes de taille moyenne à rotor cylindrique n'ont jamais atteint le stade de la production commerciale.



Figure. I. 14 : Eolienne à axe vertical[46].

I.4.2.2 Aérogénérateurs à axe horizontal

Actuellement, les turbines à axe horizontal (cf. Figure. I. 15) sont les plus utilisées par rapport à celles à axe vertical. Elles présentent un coût moins important et sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales 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[45].

Les turbines, à axe horizontal, sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel, assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent. Actuellement, ceux sont les aérogénérateurs les plus répandus car leur rendement est supérieur à celui des autres.



Figure. I. 15 : Eolienne à axe horizontal[44].

A. Avantages aérogénérateurs à axe horizontal :

- Ce type d'éoliennes capte le vent en hauteur loin de sol, donc le vent est beaucoup moins ralenti par le relief,
- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical,
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour, Il n'est pas nécessaire d'ajouter un local pour l'appareillage.

A. Inconvénients : aérogénérateurs à axe horizontal :

- Coût de construction très élevé,
- L'appareillage se trouvant au sommet de la tour, ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

I.4.3 Eléments constitutifs d'une éolienne à axe horizontal

Une éolienne classique est généralement constituée des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la Figure. I. 16[45]:

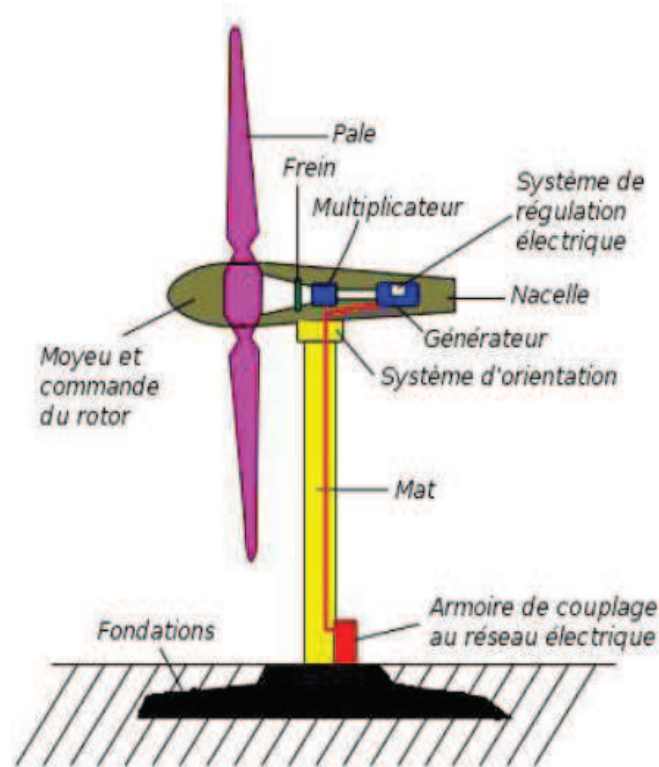


Figure. I. 16 : Constitution d'une éolienne[47].

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

La nacelle: regroupe les éléments mécaniques tels que les arbres lents et rapide, les roulements, le multiplicateur, le générateur et les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle.

Le multiplicateur: sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

La génératrice électrique: c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

Le système de commande: qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

L'arbre: qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Le système d'orientation des pâles: qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

I.4.4 Technologie d'éoliennes de grande puissance

L'énergie cinétique du vent est captée par les pales ensuite transformée en énergie électrique grâce à des générateurs électriques de type synchrone ou asynchrone avec vitesse constante ou variable. Les éoliennes peuvent être aussi classées selon leur vitesse de rotation. Celle-ci peut être fixe ou variable.

I.4.4.1 Les éoliennes à vitesse fixe (constante)

Les premières éoliennes implantées sont à vitesse constante, utilisant des génératrices asynchrones liées directement au réseau. C'est la fréquence du réseau qui impose la vitesse de rotation de la machine (cf. Figure. I. 17). Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage[41]. Cette technologie est moins chère et utilise un système électrique simple ne nécessitant pas un système électronique de commande.

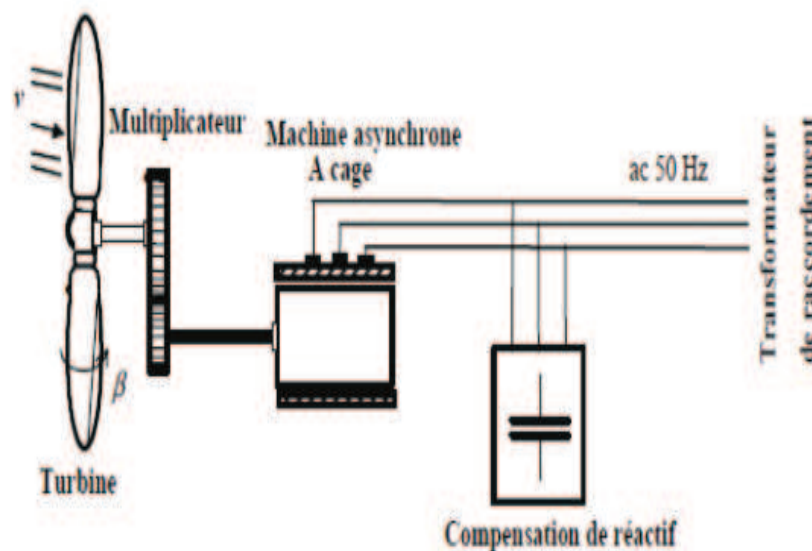


Figure. I. 17 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage[45].

Certaines éoliennes, de ce type sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales (stall control). L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale appelée « Passive Stall ». La puissance captée est alors réduite. La structure du rotor de la turbine est ainsi plus simple, mais les possibilités de réglage de la puissance sont plus limitées[48].

Cette configuration présente les inconvénients suivants [45]:

- Un dispositif consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone,
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité,

- Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau,
- Impossibilité de réglage de la puissance générée.

I.4.4.2 Les éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable utilisent de l'électronique de puissance (cf. Figure. I. 18) pour établir une séparation complète entre la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de l'éolienne adaptée à la vitesse du vent afin d'optimiser la puissance fournie au réseau[49].

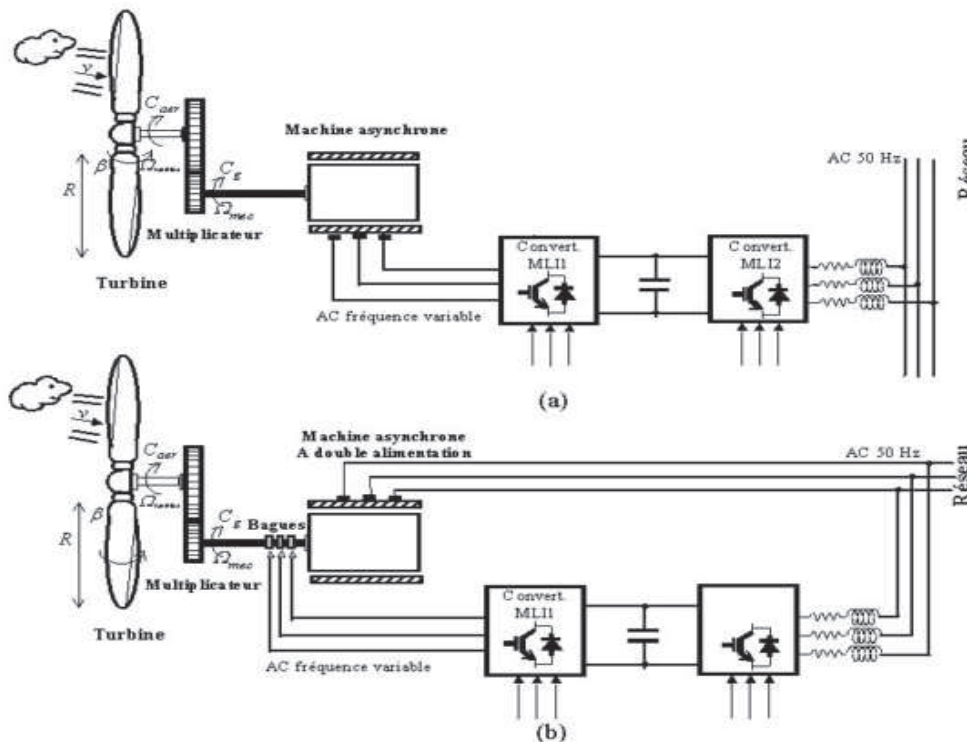


Figure. I. 18 : Eoliennes à vitesse variable[45].

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable. Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants :

- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses où le maximum de puissance peut être aisément converti,
- Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant ainsi, la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale,
- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie,
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

I.4.5 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur à caractéristiques spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites en tenant compte de leurs spécificités[3].

I.4.5.1 Machine à courant continu (MCC)

Ce type de machine n'est utilisé que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieure à 500 W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure. Elles sont également utilisées sur les bateaux, en association avec les panneaux solaires. L'inconvénient essentiel de cette machine est la présence de balais et collecteurs qu'il faut vérifier périodiquement. Elle est plus lourde et plus coûteuse qu'une génératrice à courant alternatif. Mais, elle ne nécessite pas de dispositif complexe pour la charge des batteries, une simple diode supportant l'intensité nominale de la machine suffit pour éviter que la batterie ne soit court-circuitée par l'induit à l'arrêt [50].

I.4.5.2 Machine asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones sont simples de fabrication et moins coûteuses. Elles sont standardisées, fabriquées en série et à grande échelle de puissances. Elles nécessitent peu d'entretien et ont un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau[40]. Ces machines peuvent être facilement utilisées dans le petit éolien, car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au-delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes, qui occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau, en cas de chute de vent, sont leurs principaux inconvénients[51].

I.4.5.3 Machine synchrones (MS)

C'est une machine de conception plus simple que la machine à courant continu. Le rotor induit le champ magnétique tournant. Il peut être un aimant permanent, générant un champ tournant constant. Dans ce cas, la tension fournie par la machine n'est pas réglable. Sa valeur efficace et sa fréquence varient selon la vitesse de rotation. Le rotor n'est pas alimenté en électricité, ce qui est un atout important pour une éolienne. Le stator comprend l'enroulement où se crée le courant électrique alternatif. Ce courant est induit par la variation du champ magnétique due au mouvement du rotor par rapport au stator. Les machines

synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais [50].

I.4.5.4 Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Les éoliennes, basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné, présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance, surtout pour les projets off-shore situés en milieu salin. Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes, basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur. En plus, si la génératrice est équipée d'aimants permanents, le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure, représentée à la [Figure. I. 19](#), est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne[52]. En effet, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau. Tandis, que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent. En plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien (turbine + machine synchrone) et le comportement du réseau.

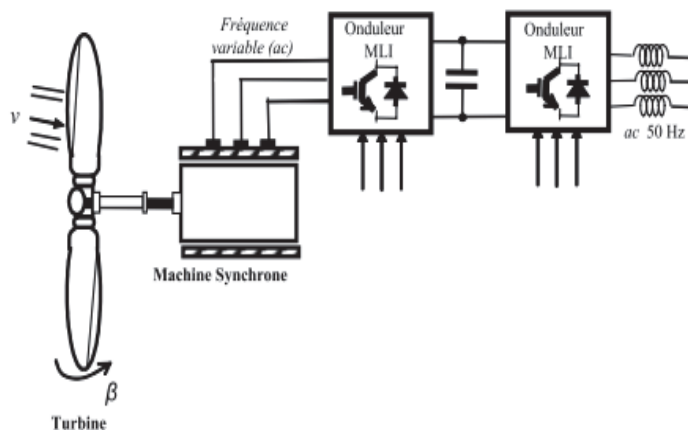


Figure. I. 19 : Eolienne à vitesse variable basée sur MSAP[52].

I.4.5.5 Machines à reluctance variable

Conçues au départ pour produire des courants de fréquence élevée, les machines à reluctance variable sont principalement destinées à des applications exigeant de grandes vitesses de rotation ou des entraînements lents à couple élevé. Elles sont également utilisées comme actionneur de positionnement électromécanique, tel que les moteurs pas à pas [50]. On distingue deux types de structures de la machine à reluctance variable MRV :

- Les MRV non-excitées.
- Les MRV excitées.

I.4.5.6 Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) suscite un intérêt particulier, surtout en tant que génératrice dans le domaine de l'énergie éolienne. Pour ce faire, la structure de cette machine, les différents modes de fonctionnement et les configurations les plus utilisés sont étudiées[45]. Les éoliennes utilisant la MADA, ont le stator directement couplé au réseau alors que le rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques. (cf.Figure. I. 20). Cette machine est choisie pour ce travail de thèse.

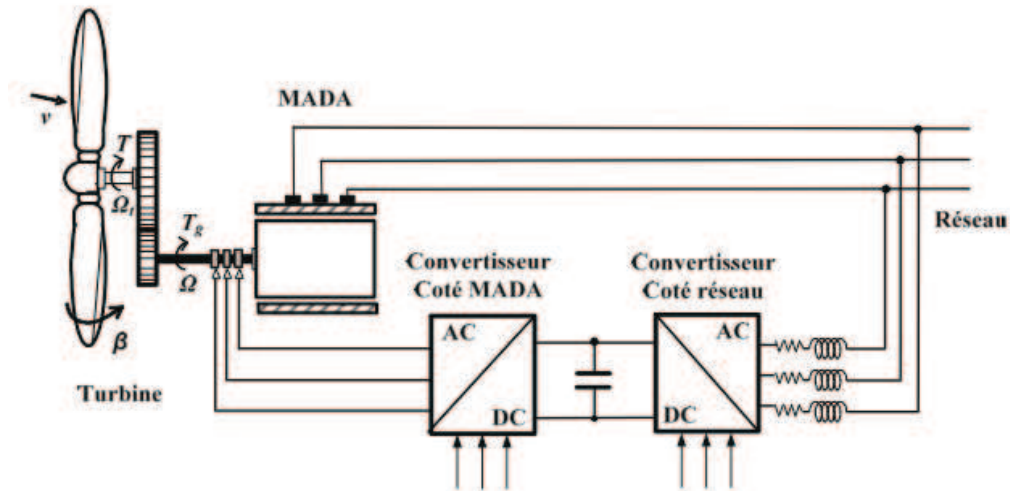


Figure. I. 20 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA[45],[53].

I.5 Machine asynchrone à double alimentation

Ce type de machine asynchrone s'est développé, car la double alimentation permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Avec un onduleur de taille réduite et une commande appropriée, on obtient une qualité de tension similaire à celle de la machine asynchrone classique [50].

I.5.1 Structure de la MADA

Cette machine possède un stator identique à celui d'une machine asynchrone classique. La différence réside dans le rotor qui est composé d'enroulements triphasés disposés, de la même manière que les enroulements statoriques, et connectés en étoile. Leurs extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais, ce qui permet d'accéder aux grandeurs rotoriques (cf.Figure. I. 21). La structure de cette machine, permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone. La différence réside dans le fait, que le rotor, n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme « machine synchrone à excitation alternative »[54].

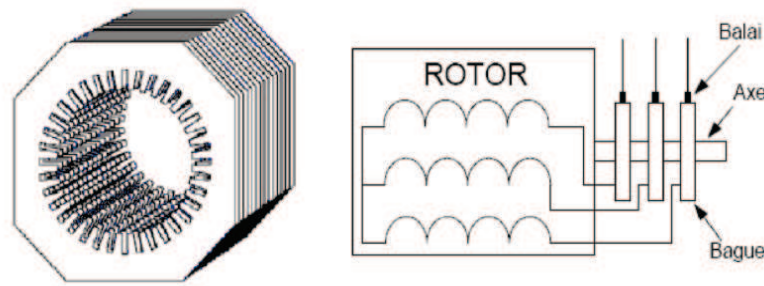


Figure. I. 21 : Structure du rotor de la MADA[41].

I.5.2 Modes de fonctionnement

En fonctionnement, le stator de la MADA est connecté directement au réseau et son rotor est alimenté par un convertisseur de puissance. Son fonctionnement est basé sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Sa puissance rotorique, au lieu d'être dépensée en pertes Joules, est récupérée et injecter dans le réseau. La difficulté est, que la fréquence des courants rotoriques est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années, cette difficulté était surmontée grâce à un regroupement de machines [50]. Avec l'apparition des semi-conducteurs, une solution plus pratique a été mise au point. Une interface électronique composée d'un redresseur et d'un onduleur permet le passage de la puissance de glissement vers le réseau[47]. La MADA peut fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec la machine asynchroneréside, dans le fait, que ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur [41]. Les différents modes de fonctionnement de la MADA sont décrits ci- dessous (cf.Figure. I. 22):

➤ Moteur en hypo synchronisme :

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

➤ Moteur en hyper synchronisme

La puissance statorique est fournie par le réseau, ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique.

➤ Génératrice en hypo synchronisme

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, qui la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hyposynchrone, l'énergie de glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hyposynchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation.

➤ Génératrice en hyper synchronisme

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $(g.P_{mec})$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Les quadrants 3 et 4 sont intéressants pour une utilisation dans un système éolien. Lorsque la MADA fonctionne en génératrice, la turbine fournit une puissance mécanique P_m à la machine.

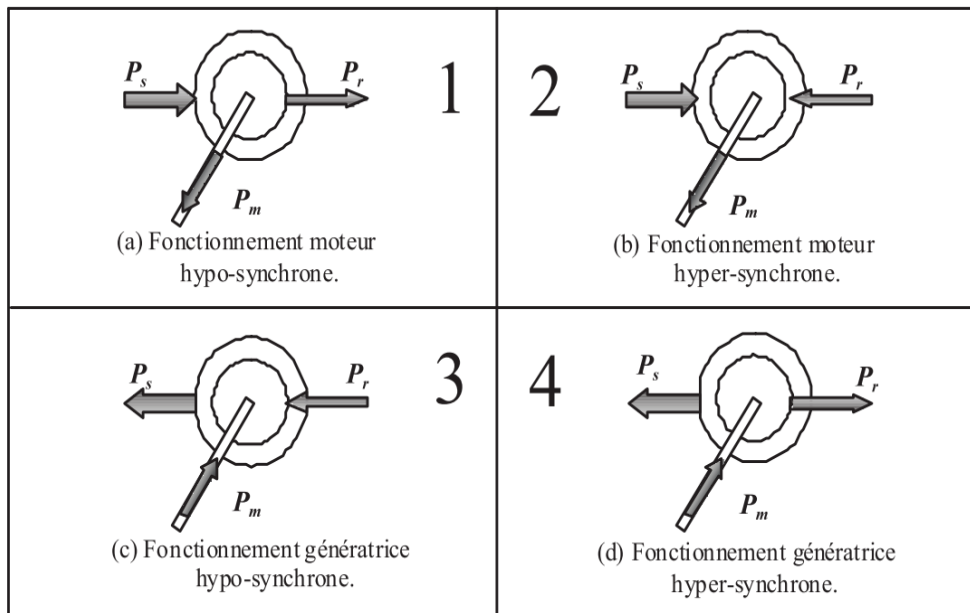


Figure. I. 22 : Les différents modes de fonctionnement de la MADA[41].

I.5.3 Avantage des éoliennes à base de la MADA

La variation de la vitesse acceptable pour un fonctionnement stable de la MADA est de $\pm 30\%$ (correspondant à la valeur du glissement s) autour de la vitesse de synchronisme. Ceci limite la puissance circulant dans le circuit rotorique à $(|g.P_s|)$. De ce fait, les convertisseurs statiques utilisés sont dimensionnés pour faire transiter uniquement la puissance de glissement, c'est à dire au maximum 30% de la puissance nominale de la machine. Par conséquent, les éoliennes à base de la MADA procurent plusieurs avantages[45]

- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins volumineux, moins coûteux, nécessitant un système de refroidissement moins lourd. Ils génèrent moins de perturbations comparativement aux convertisseurs utilisés pour les éoliennes à base de machine asynchrone à cage ou à aimant permanent,
- Les pertes liées aux convertisseurs statiques sont diminuées et le rendement du système de génération est amélioré,
- Le dimensionnement des filtres est réduit et, de ce fait, leur coût s'en trouve amoindri,
- Le facteur de puissance peut être réglé car la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone. En effet, les puissances

active et réactive peuvent être contrôlées de façon indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la MADA.

I.6 Système de stockage de l'énergie électrique

Les différentes technologies de stockage, répondant aux critères techniques et économiques varient considérablement selon la nature des applications et des besoins[55]. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, associé à un cahier des charges, des contraintes de réglementation, du coût et de l'environnement [56]. La sélection d'un système de stockage, sur un site donné, dépend de [57] :

- La quantité et la nature de l'énergie disponible ;
- Des puissances disponibles ;
- La densité de stockage en énergie et puissance, qui conditionne le volume et le poids du système;
- Du coût et de la maintenance, qui sont liés à la maturité de la technologie ;
- Du nombre de cycles et de la profondeur de la décharge ;
- La sécurité

En général, le stockage de l'énergie électrique, issue de la conversion éolienne, peut se faire par sa transformation en une autre forme d'énergie stockable. Les possibilités techniques sont très vastes et concernent pratiquement toutes formes d'énergie : mécanique, chimique ou thermique. Parmi les systèmes de stockage d'énergie, actuellement disponibles : le volant d'inertie, le stockage hydraulique, le stockage sous forme d'air comprimé, les batteries redox, les batteries électrochimiques, le stockage d'hydrogène, le stockage thermique et le supercondensateur.

I.6.1 Synthèse sur les différentes techniques de stockage

De nombreux moyens de stockage de l'énergie électrique existent avec des puissances allant jusqu'à quelques gigawatts. Chacun possède ses caractéristiques et ses contraintes[58]. Pour les installations éoliennes de grande puissance, permettant de répondre aux pics de consommation sur le réseau de distribution d'électricité, les systèmes de stockage d'énergie les plus performants sont : le stockage inertiel électromécanique et les accumulateurs électrochimiques.

I.6.1.1 Stockage inertiel électromécanique

Le principe du stockage inertiel est d'emmagasiner de l'énergie cinétique dans un volant d'inertie, en rotation dans le vide. Ce stockage est réalisé à l'aide d'un moteur électrique, régulant la vitesse du volant d'inertie. Pour récupérer l'énergie emmagasinée dans le volant, il faut inverser le transfert de puissance, en passant du mode moteur au mode générateur[56]. Les principaux composants d'un tel dispositif sont schématisés par la [Figure I. 23](#). Il y a le volant : élément principal de l'accumulation, le moteur-générateur, le tout guidé par des paliers éventuellement magnétiques, un convertisseur électronique de puissance et une enceinte à basse pression[59]. Des matériaux, à haute résistance à la traction (due à la force

centrifuge) à des vitesses périphériques élevées, sont utilisés pour réaliser la partie mobile du volant d'inertie. Les meilleurs matériaux sont les composites à fibres de carbone (structures bobinées). Ils sont en mesure d'atteindre des vitesses périphériques de 1500 m/s, correspondant à une énergie de 100 voire 150 Wh/kg[5]. La densité massique d'énergie d'un volant dépend essentiellement de ses caractéristiques mécaniques et, notamment, de sa masse volumique et de la contrainte maximale qu'il peut supporter[56]. C'est pour cette raison, que les volants d'inertie sont principalement utilisés dans les stockages stationnaires, pour répondre à des demandes de puissance importantes sur de courtes durées.

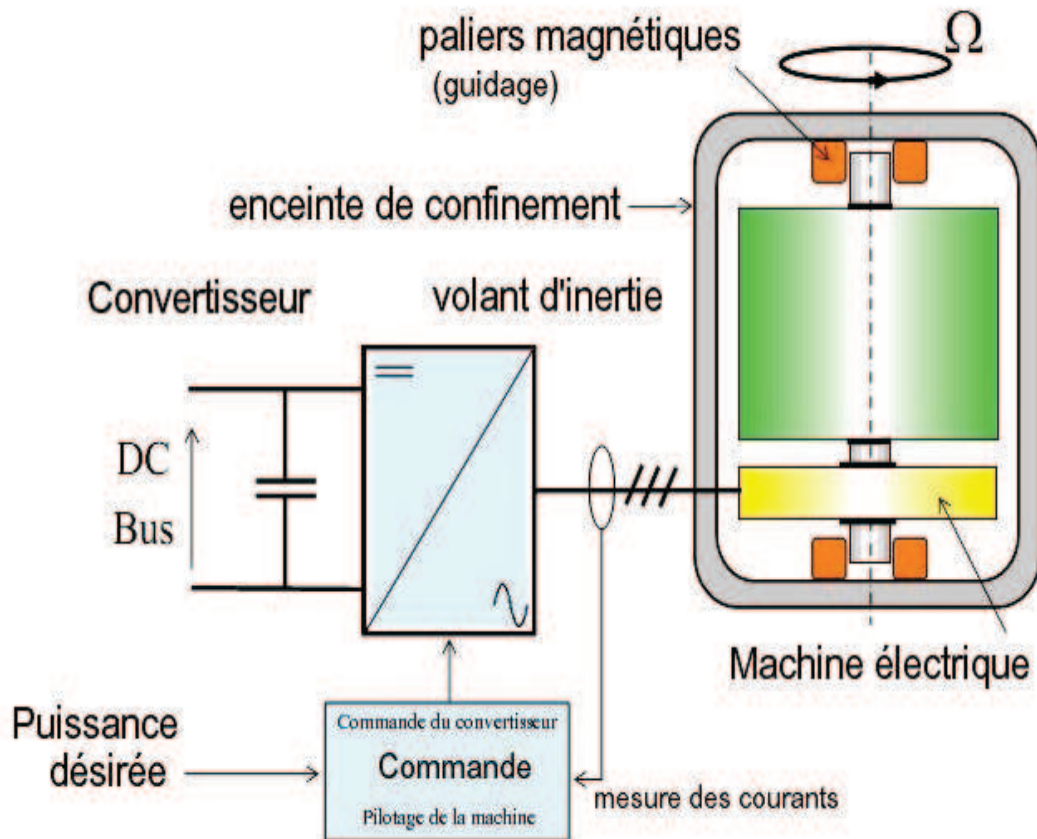


Figure. I. 23: Système de stockage inertiel (volant d'inertie)[59].

I.6.1.2 Stockage par air comprimé

L'utilisation de l'air comprimé, pour stocker de l'énergie, remonte presque à l'origine de la révolution industrielle. Des moteurs à air comprimé ont été utilisés dès le XIX^{ème} siècle, en particulier dans les tramways (exemple celui de Nantes en 1879[60]. Pour les applications stationnaires, le principe consiste d'utiliser l'énergie électrique, issue de la conversion éolienne pour alimenter un compresseur. Il comprime l'air, qui sera stockée dans des cavernes souterraines, où réchauffé par l'apport de gaz naturel, avant d'être détendu dans une turbine. La circulation de l'air des cavernes vers la turbine produit de nouveau de l'énergie électrique (cf. Figure. I. 24)[57]. Toutefois, la compression est très coûteuse en énergie : elle consomme l'équivalent d'un tiers de l'énergie produite. Le principal intérêt de ce système consiste, à réaliser la compression en utilisant l'électricité disponible à prix faible et potentiellement perdu, s'il n'est utilisé à cette fin[61].

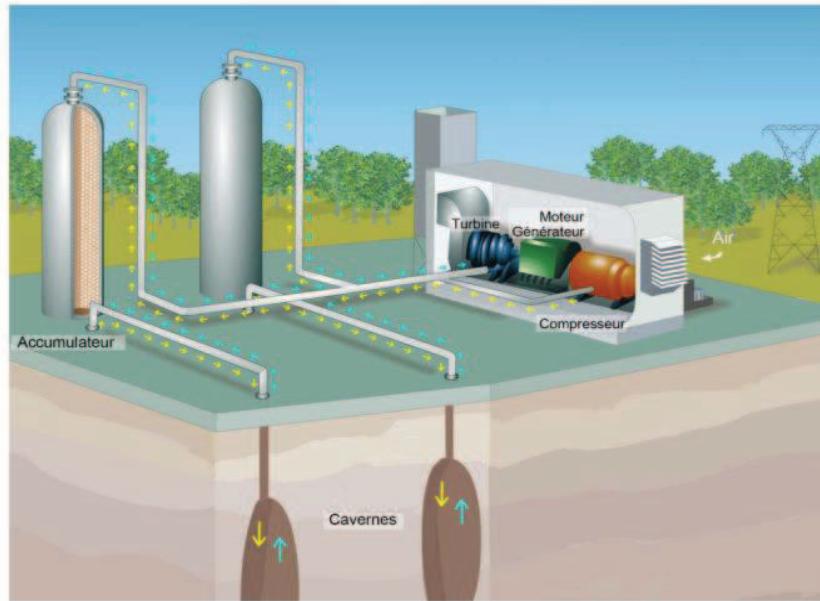


Figure. I. 24 : Principe de stockage par air comprimé[57].

I.6.1.3 Stockage d'hydrogène-Piles à combustible

Ces dernières années, l'hydrogène est apparu comme un outil "tampon" adapté pour pallier l'intermittence de certaines sources d'énergie renouvelables. Le principe de ce type de stockage repose sur la conversion de l'énergie électrique, issue des éoliennes, en énergie chimique par des électrolyseurs alcalins. Deux électrodes plongées dans l'eau sont traversées par le courant électrique excédentaire. Celui-ci est utilisé pour dissocier les molécules H_2O pour récupérer l'hydrogène, avec un rendement énergétique de 60 à 70%. Ainsi, les 2/3 de l'énergie électrique, qui aurait pu être perdue, est récupérée pour produire de l'hydrogène[62]. Celui-ci est stocké pour alimenter une pile à combustible, destinée à fonctionner en l'absence du vent et lors d'une forte demande de puissance[55]. Le stockage chimique, à base de pile à combustible (cf. Figure. I. 25), est composé de plusieurs éléments : un réservoir d'hydrogène, un compresseur d'air, un système de refroidissement, un convertisseur d'électronique de puissance et une unité de contrôle[56]. Néanmoins, le rendement faible (35-40%), le manque de fiabilité, le coût prohibitif d'investissement et d'exploitation de l'ensemble électrolyseur-pile à combustible et l'aspect sécuritaire lié au stockage d'hydrogène, retardent la mise le marché de cette technologie[55].

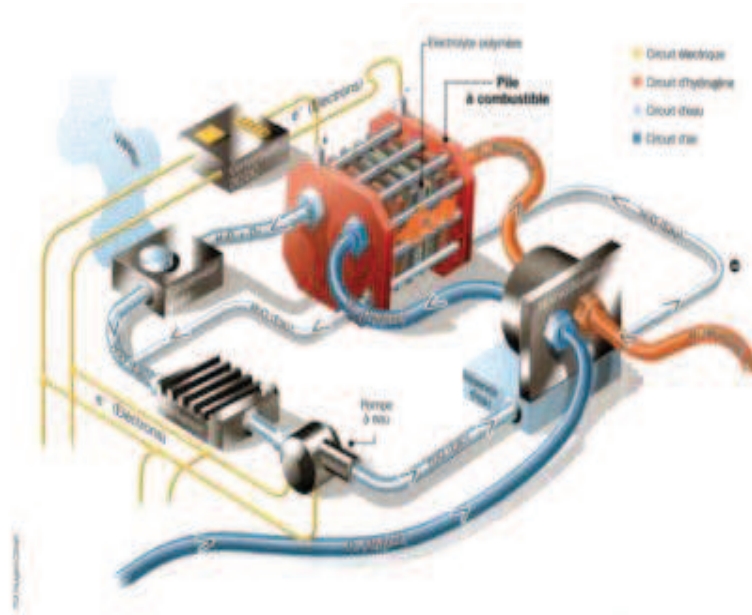


Figure. I. 25 : Système complet du stockage d'énergie chimique par pile à combustible[56].

I.6.1.4 Système de stockage électrostatiques - Supercondensateurs

Le supercondensateur est un système de stockage de l'énergie sous une forme électrostatique. Il est constitué de deux électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et scindées par un séparateur. Celui-ci laisse circuler uniquement les ions et pas les électrons[57]. Son principe est semblable à celui du condensateur, mais dont le film diélectrique est remplacé par un électrolyte conducteur ionique. Le déplacement des ions, positifs ou négatifs, dans l'électrolyte sous l'effet d'un champ électrique appliqué entre les électrodes, permet de former à la frontière une accumulation de charges électriques, appelée double couche[63]. Théoriquement, les ions restent confinés dans l'électrolyte et n'interviennent pas dans la réaction électrochimique à l'interface avec les électrodes, contrairement à un accumulateur électrochimique[58]. Il en résulte une longévité et des cycles beaucoup plus importants. La Figure. I. 26, illustre la formation de la double couche à l'interface électrode-électrolyte pour les états déchargé et chargé du supercondensateur. Toutefois, ce type de stockage est destiné à des applications à petite échelle. Son utilisation, à moyenne ou grande échelle, nécessite un branchement en série de plusieurs éléments pour obtenir la tension demandée[63]. Cela pourrait générer un risque de déséquilibre lors de la mise en série. Néanmoins, son coût unitaire est assez élevé, avec une faible densité énergétique et une autodécharge élevée (5% par jour). Toutes ces raisons réduisent la possibilité d'adopter des supercondensateurs dans des applications stationnaires [55].

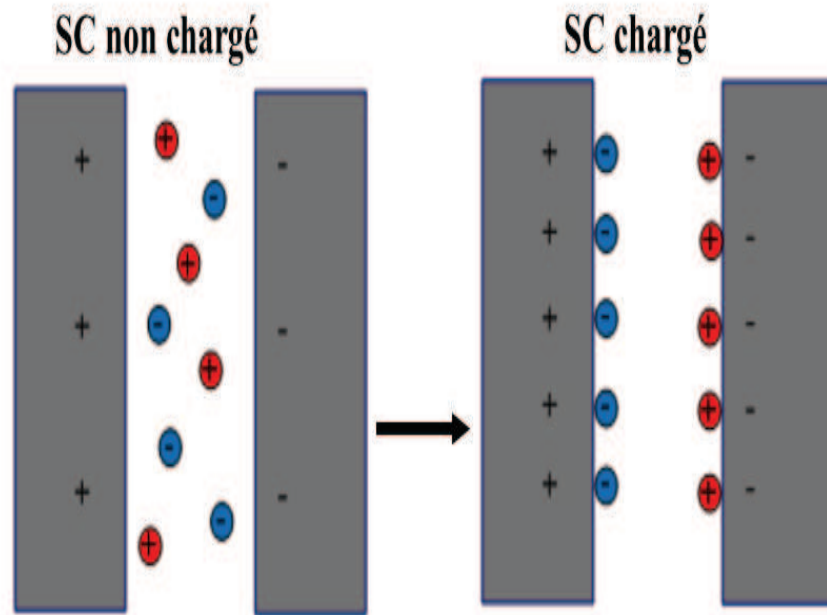


Figure. I. 26 :Schéma de principe du supercondensateur déchargé et chargé[64].

I.6.1.5 Accumulateurs électrochimiques

Les batteries ou accumulateurs électrochimiques sont des dispositifs électrochimiques, qui convertissent l'énergie électrique en énergie chimique pendant le chargement et l'énergie chimique en énergie électrique au cours du déchargement[65]. C'est la modification chimique de l'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie. Une batterie est composée par l'assemblage de plusieurs éléments ou cellules unitaires. Une cellule est composée de trois éléments: une électrode positive, une électrode négative et un électrolyte[58]. Bien qu'il existe de nombreux types d'accumulateurs (Nickel Fer, Zinc Air, Zinc Brome, Vanadium Eedox ...etc.), seules les batteries en Plomb-Acide, Nickel-Cadmium et Nickel Métal hydrure sont aujourd'hui industriellement utilisées. La révolution sont les batteries Lithium-Ion[5].

➤ L'accumulateur au plomb

La batterie acide-plomb, le plus ancien des accumulateurs électrochimiques, a été inventée en 1859 par Gaston Planté. Elle fut utilisée dans le premier véhicule électrique [58]. Aujourd'hui il existe différentes technologies de batterie d'accumulateurs au plomb, qui répondent aux spécificités des diverses applications. La technologie de la batterie au plomb s'est améliorée au fil des ans [66]. Son coût, nettement inférieur à celui des autres technologies, reste le principal facteur d'attraction pour les industriels. Malheureusement, ces batteries ont une faible densité d'énergie (massique et volumique) et une faible acceptation des régimes de décharges élevés[67]. Par ailleurs, la « mort subite » de ces batteries est difficilement compatible avec les exigences d'alimentation fiable dans les applications stationnaires[55].

➤ **L'accumulateur Nickel-Cadmium**

La batterie Nickel-Cadmium, brevetée en 1899, est l'une des batteries les plus performantes et la plus largement commercialisée[5]. Elle est composée d'électrodes en oxyhydroxyde de nickel et en cadmium, et un électrolyte alcalin. Elle possède une énergie spécifique faible, entre 45 et 85 Wh/kg. Elle utilise des matériaux polluants[68]. Ce type de batteries subit, selon le mode d'utilisation, d'un "effet mémoire" réduisant sa capacité utilisable. L'effet est cependant réversible et un cyclage approprié lui permet de retrouver la capacité initiale[69].

➤ **L'accumulateur nickel-hydrure métalliques**

Apparu dans les années 1980, il constitue l'aboutissement de recherches, menées depuis 1970, sur des alliages susceptibles de stocker de l'hydrogène[70]. La batterie Nickel-Hydrure Métallique utilise des électrodes en oxyhydroxyde de nickel et en hydrure métallique, moins polluant que le cadmium, et de la potasse pour électrolyte[68]. La densité d'énergie est importante (+30% par rapport au NiCd), le prix moyennement élevé et la possibilité d'obtenir des courants de décharges élevés. Elle est beaucoup moins toxiques que la batterie Nickel-Cadmium[67]. Cependant, l'accumulateur Nickel-Hydrure Métallique est le siège d'une autodécharge comparable à celle de l'accumulateur Ni-Cd, et est par conséquent adapté aux régimes rapides en charge et en décharge. Il en résulte, qu'en régime permanent, une densité de puissance comparable à celle des accumulateurs au plomb ou Ni-Cd (au mieux 200 W/kg). Par contre, cette batterie est plus adaptée au régime impulsif et fait l'objet d'une utilisation dans les véhicules hybrides[70].

➤ **L'accumulateur Lithium-Ion (Li-ion)**

Au début des années 90, principalement sous l'impulsion des constructeurs japonais d'équipements portables, de nouvelles filières de stockage de l'électricité ont émergé : les accumulateurs au lithium[70]. Les batteries lithium-ion sont très nombreuses et différentes. Leurs densités d'énergies massiques sont plus importantes, que pour les autres types, avec une autodécharge très faible [67]. En plus, contrairement aux autres accumulateurs, ces accumulateurs ne sont pas liés à un couple électrochimique. Tout matériau, pouvant accueillir en son sein des ions lithium, peut être à la base d'un accumulateur lithium-ion. Ceci explique la profusion de variantes existantes, face à la constance observée avec les autres couples[70]. Par ailleurs, ces accumulateurs à base de lithium sont d'une technique récente et en cours de développement. Ils présentent un important potentiel électrochimique. Toutefois, pour des raisons de coût, ces accumulateurs sont aujourd'hui encore fort peu répandus. En Asie (Chine et Japon), leur technologie se développe assez rapidement pour les marchés du portable et des véhicules légers (deux roues et voitures)[69].

I.6.2 Systèmes de stockage à base de batteries Li-ion

Il existe plusieurs moyens de stocker de l'énergie électrique. Les batteries sont les plus utilisées dans les applications stationnaires et notamment les batteries Li-ion.

I.6.2.1 Principe de fonctionnement

La batterie Li-ion est un accumulateur électrochimique. Les réactions électrochimiques assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique qui repose sur l'échange réversible des ions Li^+ entre les électrodes positive et négative, tout au long des cycles de charge et de décharge (cf. Figure. I. 27)[67],[71]. Le groupement de ces deux électrodes est réalisé par le biais de l'électrolyte, qui assure le transport des ions d'une électrode à l'autre. L'électrolyte doit être choisi de manière à assurer la compatibilité de celui-ci avec les matériaux qui constituent les électrodes [72]. L'électrode négative est composée de matériaux carbonés : graphite, carbones hydrogénés, carbones durs, oxydes mixtes de vanadium amorphes, oxydes mixtes à base d'étain ou oxydes mixtes à base de titane [73]. Mais, plusieurs matériaux à base d'oxydes lamellaires, phosphates et spinelles sont utilisés pour l'électrode positive (cathode) tels que : LiCoO_2 (lithium-dioxyde de cobalt), LiFePO_4 (lithium- dioxyde phosphate de Fer), LiNiO_2 (lithium- dioxyde du nickel) et LiMn_2O_4 (lithium- dioxyde du Manganèse) [67].

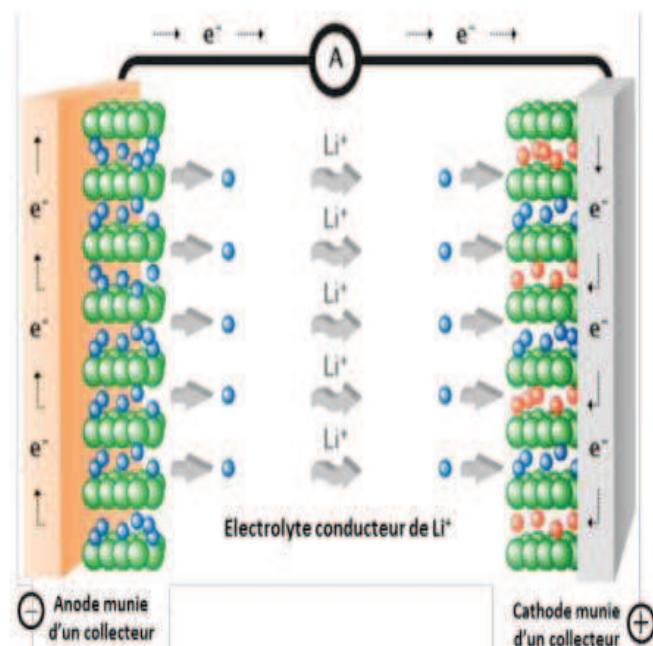


Figure. I. 27: Principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion[8]

I.6.2.2 Technologies des batteries Li-ion

Les technologies des batteries Li-ion sont principalement liées à la composition de leur électrode positive, bien que celle de l'électrode négative puisse être aussi un facteur de distinction [74]. Il existe sur le marché trois principales familles de batteries lithium-ion. La première regroupe les oxydes lamellaires (le dioxyde de cobalt (LiCoO_2), dont la densité d'énergie est la plus élevée), ou de dioxyde de métaux (nickel-manganèse LiMnNiO_4 , nickel-cobalt-aluminium LiNiCoAlO_2 (NCA)), ou encore le nickel-manganèse-cobalt (LiNiMnCoO_2 (NMC)). La deuxième est composée de matériaux dits « spinelle » comme le lithium manganèse LiMn_2O_4 (LMS), où l'utilisation du Manganèse permet d'avoir des électrodes

stables et à faible coût. Par contre sa densité d'énergie est plus faible et la dissolution du manganèse dans l'électrolyte diminue fortement la durée de vie de cette batterie. La troisième famille est constituée par les métaux de transition du phosphate, comme le phosphate de fer LiFePO_4 (LFP). Cette dernière offre un niveau de sécurité plus élevé et une meilleure tenue au vieillissement [8][75]. La comparaison entre ces principales technologies se fait sur les caractéristiques suivantes : énergie spécifique, puissance spécifique, sécurité, performance, durée de vie et coût. Si ces différentes technologies cohabitent encore aujourd'hui, c'est parce qu'aucune d'entre elles ne sort du lot[67],[75].

I.6.2.3 Coût des batteries Li-ion

Le coût d'une batterie Li-ion dépend de plusieurs facteurs : des matériaux, de la main d'œuvre, du développement, de la distribution et de la durée de vie. Le choix de l'électrochimie, retenue lors de la fabrication industrielle des batteries Li-ion, joue un rôle important dans le coût final des batteries. Pour les batteries Li-ion, à destination de l'électronique grand public, les matériaux contribuent à hauteur de 70% ou plus du coût. Par contre, les coûts des matières premières restent minimes par rapport à ceux du processus de fabrication et de développement pour les batteries de traction électrique [71]. Les coûts des matières premières des différents matériaux de cathode sont présentés dans le [Tableau. I. 2](#).

Matières premières	Coût (\$/kg)
LiMn_2O_4	10
LiFePO_4	20
$\text{LiNi}_{0.80}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$	37
$\text{LiNi}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{O}_2$	39
LiCoO_2	60
Graphite	19
$\text{Li}_4\text{T}_5\text{O}_{12}$	12

Tableau. I. 2: Coût des matières premières des batteries Li-ion[71]

Selon les experts de *Bloomberg Energy Finance (BNEF)* et *Mc Kinsey*, le coût moyen des batteries Li-ion au premier semestre 2014 se situe à 540 \$ du kWh, soit 20% de moins par rapport à ceux de 2012 et 50 % de moins par rapport à ceux de 2010. Plusieurs fabricants de batteries estiment des prix prévisionnels de 300 \$ le kWh pour 2015 et 150 \$ pour 2020 [76]. La [Figure. I. 28](#), présente l'évolution du coût moyen des batteries Li-ion, prévue entre 2010 et 2030.

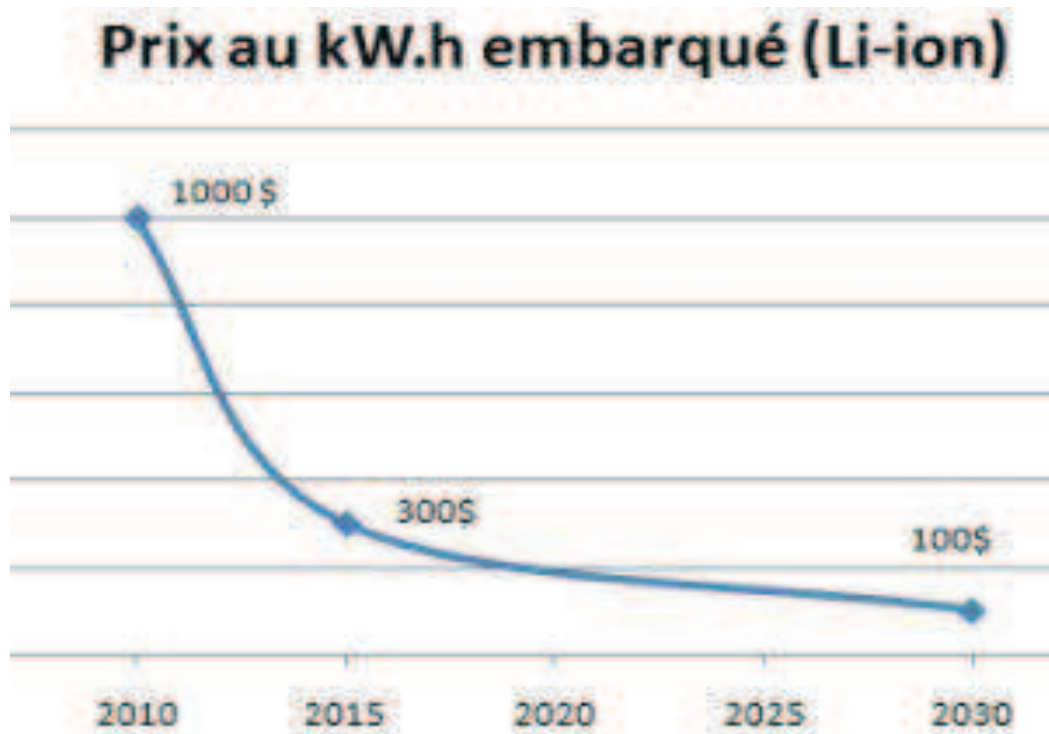


Figure. I. 28: Evolution du coût moyen des batteries Li-ion entre 2010 et 2030[76].

I.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter les aspects environnementaux et technologiques caractérisant les énergies renouvelables et de poser la problématique du présent travail. Elle consiste à étudier un système de conversion de l'énergie éolienne, à base d'une machine asynchrone à double alimentation, pour deux approches : connecté au réseau électrique et en mode îloté avec un système de stockage électrochimique par batteries Li-ion. L'utilité des énergies renouvelables, pour un meilleur environnement et une réduction des gaz à effet de serre, est établie. Les différents potentiels de l'énergie renouvelable, et de l'énergie éolienne en particulier, sont été détaillés. Les différentes technologies des éoliennes, à vitesse fixe et à vitesse variable, les divers types d'aérogénérateurs et leurs différents constituants à vitesse variable sont étudiées. Un intérêt particulier, est consacré à la technologie de conversion basée sur la MADA. Cette technologie permet de réduire le dimensionnement des convertisseurs statiques à 30 % en véhiculant seulement la puissance de glissement. Elle permet aussi le réglage de la puissance réactive. Une synthèse sur les différents systèmes de stockage, utilisés dans les applications stationnaires, est présentée avec le choix des batteries Li-ion pour le stockage l'énergie électrique issue de la conversion éolienne.

Le chapitre suivant, aborde l'étude du modèle de la MADA d'une chaîne de conversion en mode connectée au réseau électrique, et son contrôle en puissance active et réactive. Le modèle du système de stockage à base de batteries Li-ion, dans une application stationnaire de conversion de l'énergie éolienne, est déterminé.

CHAPITRE II

Etude d'une chaîne de conversion éolienne en mode connectée au réseau

II.1 Introduction

Actuellement, la plupart des génératrices utilisées dans les éoliennes, d'une puissance de 1 MW et plus, sont des machines asynchrones à double alimentation. Elles ont l'avantage d'être robustes, de construction mécanique simple et de faible coût.

Dans ce chapitre, la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, à base de la MADA en mode connectée au réseau, est étudiée. La chaîne est subdivisée en plusieurs sous-systèmes élémentaires, modélisés les uns après les autres. Le modèle mathématique, de la turbine éolienne et de la MADA dans les repères triphasé (a,b,c) et de Park (d,q), est détaillé. Les modèles des convertisseurs de puissance et du système de stockage électrochimique basé sur les batteries Li-ion, y sont explicités.

Les lois de commande de la MADA, pilotée par le rotor via des convertisseurs contrôlés par la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI), sont établies. Afin de valider le modèle de la génératrice et le contrôle en puissance active et réactive, des simulations sont effectuées sous différentes conditions.

II.2 Chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA connectée au réseau électrique

II.2.1 Description de la structure

Le principe de fonctionnement d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne consiste à extraire l'énergie cinétique du vent et de la transformer en énergie mécanique, grâce à la partie tournante (la turbine) utilisant des profils aérodynamiques (pales). Le flux d'air crée autour du profil une poussée, qui entraîne le rotor à une vitesse donnée, et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée en puissance électrique par l'intermédiaire d'un générateur[44].

La structure de la chaîne de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine éolienne. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau. Il constitue le principal support de transmission de l'énergie générée[53]. L'enroulement rotorique, triphasé bobiné avec bagues collectrices, y est connecté par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance et un filtre triphasé (RL) pour atténuer les harmoniques de courant côté réseau (cf. Figure. II. 1)[77]. Pour la majorité des éoliennes proposées sur le marché, cette interface est constituée de deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu, à interrupteurs commandables à la fermeture et à l'ouverture. Les deux convertisseurs, fonctionnant indifféremment en mode redresseur ou onduleur, sont dimensionnés seulement pour le transit de la puissance destinée à la magnétisation de la machine, c'est à dire au maximum 30% de la puissance nominale de la machine, donc moins coûteux [78],[79]. Cette structure permet le contrôle du facteur de puissance de l'installation sur les quatre quadrants de fonctionnement. Actuellement, les constructeurs d'éoliennes misent sur cet avantage pour développer les chaînes de conversion.

Pour le stockage de l'énergie, un système de stockage électrochimique, basé sur les batteries Li-ion, est choisi. Il permet de limiter les inconvénients liés à l'intermittence des

énergies éolienne et d'optimiser le fonctionnement de la chaîne de conversion éolienne pour les faibles vitesse du vent[22].

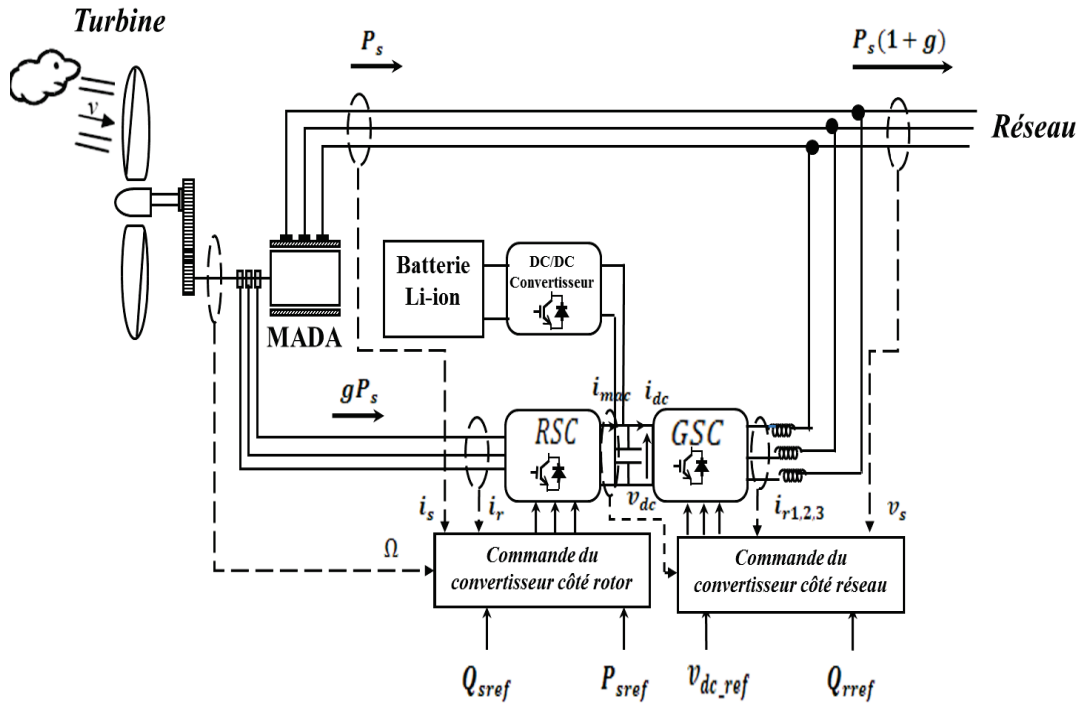


Figure. II. 1:Schéma de principe du système éolien en mode connecté

II.2.2 Principe de fonctionnement

Pour expliquer le principe de fonctionnement d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, on suppose que les pertes sont négligeables. Ainsi, la puissance P fournie au stator traverse l'entrefer et se transforme en partie sous forme de puissance mécanique $(1/g)P$ et le reste sous forme de grandeurs alternatives de fréquence gf [53]. Ces dernières, de fréquence variable, sont transformées en énergie de même fréquence, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur, que celle du réseau électrique. Ainsi, le réseau reçoit $(1+g)P$ [77],[80].

Les enroulements du rotor sont accessibles grâce à un système de collecteur-balais. Dès que la machine est connectée au réseau électrique, apparaît alors dans le stator un flux magnétique tournant à vitesse constante. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires des enroulements, donc du courant statorique[53].

II.3 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne à base de la MADA

Le modèle de la chaîne de conversion éolienne, basée sur une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine éolienne et pilotée par le rotor au moyen de deux convertisseurs de puissance fonctionnant en MLI, est étudié.

II.3.1 Modélisation de la turbine éolienne

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (cf. Figure. II. 1). La puissance de la masse d'air en mouvement, passant par la section de la surface active S de la voilure, est obtenue à partir de l'énergie cinétique

des particules. La puissance de la masse d'air traversant la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est définie par les références [45],[46],[81].

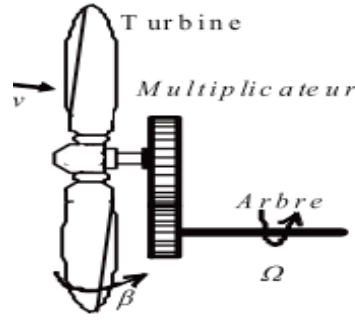


Figure. II. 2 :Turbine éolienne[45]

La puissance P_{mt} (mécanique théorique) disponible est [82],[83] :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (\text{II. 1})$$

Où:

ρ représente la masse volumique de l'air (kg/m³),

v_1 la vitesse du vent (m/s),

S la surface utile traversée par le vent :

$$S = 2 R H \quad (\text{II. 2})$$

Où R représente le rayon de la voilure (m) et H sa hauteur (m).

La vitesse de fonctionnement d'une éolienne est décrite par sa vitesse réduite λ , qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit:

$$\lambda = \frac{R \Omega_{turbine}}{v_1} \quad (\text{II. 3})$$

Avec Ω la vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s).

En utilisant le coefficient de puissance $C_p(\lambda)$, la puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur est:

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) P_{mt} \quad (\text{II. 4})$$

$$P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S v_1^3 \quad (\text{II. 5})$$

La courbe de C_p en fonction de λ et β est illustré sur la Figure. II. 3.

A partir de cette puissance, le couple s'écrit:

$$C_{aer} = \frac{P_{mt}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v_1} \right) \rho \pi R^2 v_1^3 \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II. 6})$$

En tenant compte du multiplicateur (modélisé par un simple gain), dont le but est d'adapter la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. La vitesse et le couple après multiplication sont:

$$C_m = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{II. 7})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II. 8})$$

L'expression du couple mécanique développé par ce dispositif est :

$$C_{mec} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v_1} \right) \rho \pi R^2 v_1^3 \frac{1}{\Omega_{mec}} \quad (\text{II. 9})$$

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine-générateur est donnée par :

$$(J_t - J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} - C_{em} - (f_t - f_m) \Omega_{mec} \quad (\text{II. 10})$$

Où:

J_t et J_m sont respectivement les moments d'inertie de la turbine et de la machine;

f_m le coefficient de frottement de la machine;

f_t le coefficient de frottement des pâles

C_{mec} Le couple mécanique issu du multiplicateur.

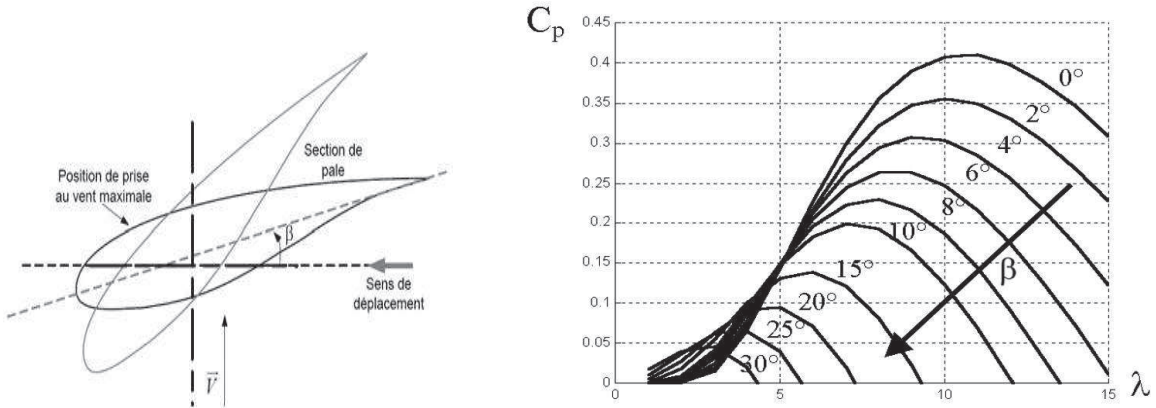


Figure. II. 3 : Flux d'air sur un profil de pale(a). Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de(b)[47].

Le schéma bloc correspondant au modèle de la turbine éolienne est représenté par la Figure. II. 3.

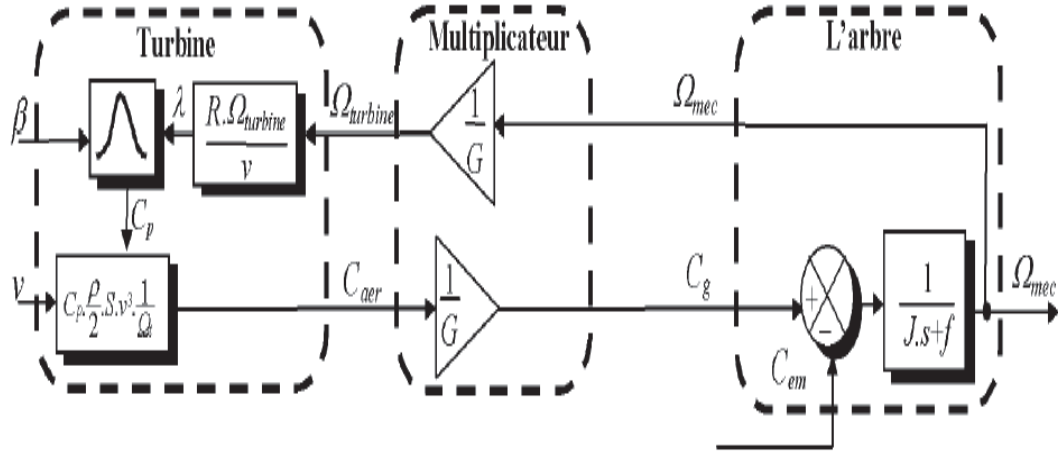


Figure. II. 4 :Schéma bloc du modèle de la turbine[53]

II.3.2 Modélisation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition des enroulements et sa géométrie propre, est très complexe à analyser en tenant compte de sa configuration exacte [80]. Pour l'élaboration d'un modèle simple, il est nécessaire, d'adopter les hypothèses simplificatrices suivantes [84] :

- La machine est symétrique et à entrefer constant;
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté; il en résulte que les pertes fer et par hystérésis sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants;
- La f.m.m créée dans une phase du stator et du rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer;
- L'influence de l'effet de la température n'est pas prise en compte, par conséquent tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.

II.3.2.1 Equations électriques de la MADA

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques sont [85]:

$$\begin{cases} [v_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [v_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II. 11})$$

$$\text{Où : } [v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

II.3.2.2 Equations magnétiques

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

Où :

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

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

Cette dernière matrice représente l'inductance mutuelle entre le rotor et le stator, avec θ l'écart angulaire entre les axes du stator et du rotor.

II.3.2.3 Equation mécanique

L'équation mécanique qui détermine la dynamique de la machine est:

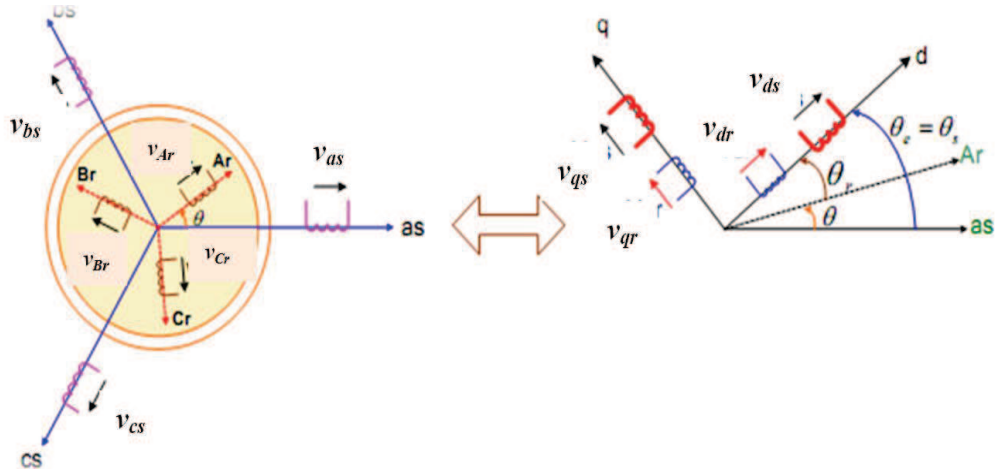
$$J_m \frac{d\Omega}{d\theta} = C_{em} - C_r - f_m \cdot \Omega \quad (\text{II. 14})$$

Où:

$$C_{em} = p[i_s]^t \left(\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) [i_r] \quad (\text{II. 15})$$

II.3.2.4 Modèle de la MADA dans le plan (dq)

La résolution analytique dans le repère (abc) de système d'équations (II.11) est très difficile, car les éléments de la matrice des inductances mutuelles $[M_{sr}]$ sont fonction de l'angle θ (angle de rotation de la machine). La transformation de Park est un outil mathématique, permettant de passer d'un système triphasé à un autre diphasé de repère (d,q) où les éléments sont continus, ce qui simplifie la résolution de ce système d'équations[77].

Figure. II. 5: Passage du repère *abc* au repère *dq*[46]

Cette transformation est caractérisée par une matrice de rotation dite matrice de Park tel que :

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)][x_{adc}] \quad (\text{II. 16})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 17})$$

La transformée de Park est appliquée pour définir chacun des vecteurs tensions, courants, et flux statoriques et rotoriques.

En supposant, que le système est équilibré, donc la composante homopolaire nulle, le modèle diphasé obtenu est représenté par les équations [86]:

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

Où :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$: Mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Où $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ et $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ sont respectivement les pulsations électriques et mécaniques.

Tel que $\theta_s = \theta + \theta_r$

Dans le repère d,q lié au champs tournant, le système s'écrit :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 21})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 22})$$

Avec ω_s et ω_r sont respectivement les pulsations des grandeurs statoriques et rotoriques.

L'application de la transformation de Park conduit à différentes formes de l'équation du couple électromagnétique instantané, telle que:

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (i_{qr} \varphi_{ds} - i_{dr} \varphi_{qs}) \quad (\text{II. 23})$$

Les expressions des puissances active et réactive sont:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} - v_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

II.3.3 Modélisation des convertisseurs

Suivant l'usage souhaité pour le modèle du convertisseur, il existe différents niveaux de modélisation électrique des convertisseurs, niveaux que l'on peut classer par ordre décroissant de complexité comme suit : les modèles instantanés, les modèles moyens, et les modèles moyens linéarisés [87]. Toutefois, comme pour le cas d'une machine synchrone, le modèle le plus adapté est celui qui convient, à la fois, à la simulation et l'élaboration de la commande[88].

II.3.3.1 Modélisation du convertisseur coté rotor

Dans ce travail, l'objectif de la modélisation de l'onduleur (convertisseur côté rotor de la MADA) est de trouver une relation entre les grandeurs de la commande et les grandeurs électriques de la partie alternative et continue de l'onduleur. Ainsi, il est aisé de voir comment les grandeurs de la commande agissent sur les interrupteurs commandables[85],[89].

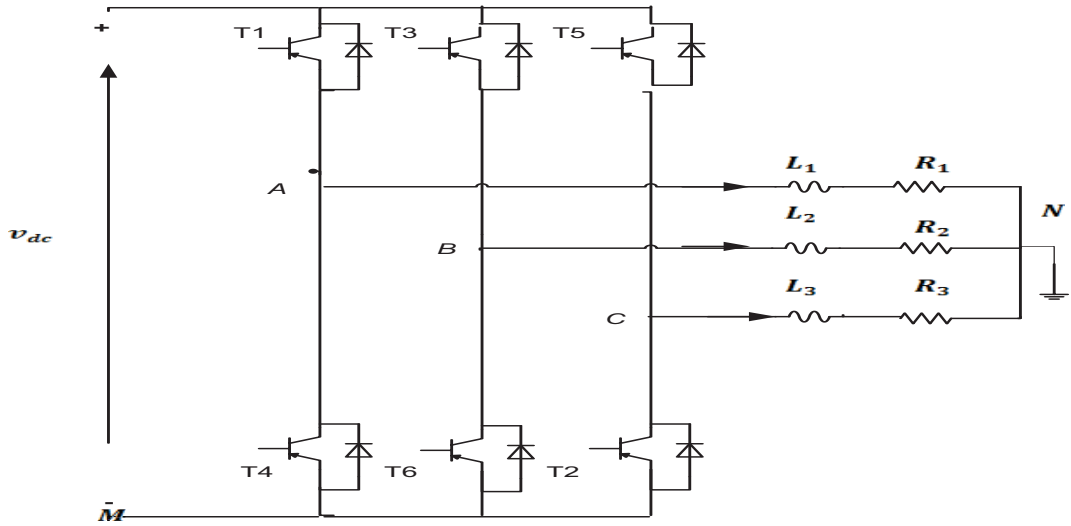


Figure. II. 6: Onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur utilisé est un onduleur triphasé à deux niveaux (six interrupteurs). En définissant la fonction de connexion d'un interrupteur F_{ks} , où k représente le numéro du bras ($k=1,2$ ou 3) et s le numéro de l'interrupteur considéré ($s=1$ pour l'interrupteur du haut et $s=0$ pour l'interrupteur du bas), et sachant que les interrupteurs d'un même bras sont complémentaires, on peut écrire :

$$\begin{aligned} F_{11} &= 1 - F_{10} \\ F_{21} &= 1 - F_{20} \\ F_{31} &= 1 - F_{30} \end{aligned} \quad (\text{II. 25})$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur sont exprimées, au moyen des fonctions de connexion:

$$\begin{cases} v_{AM} = F_{11} \cdot v_{dc} \\ v_{BM} = F_{21} \cdot v_{dc} \\ v_{CM} = F_{31} \cdot v_{dc} \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur s'écrivent, au moyen des fonctions de connexion:

$$\begin{cases} v_{AB} = v_{AM} - v_{BM} = (F_{11} - F_{21}) \cdot v_{dc} \\ v_{BC} = v_{BM} - v_{CM} = (F_{21} - F_{31}) \cdot v_{dc} \\ v_{CA} = v_{CM} - v_{AM} = (F_{31} - F_{11}) \cdot v_{dc} \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

Les tensions simples sont liées aux tensions composées par les relations :

$$\begin{cases} v_{AN} = v_A = \frac{v_{AB} - v_{CA}}{3} \\ v_{BN} = v_B = \frac{v_{BC} - v_{AB}}{3} \\ v_{CN} = v_C = \frac{v_{CA} - v_{BC}}{3} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

Les équations précédentes permettent d'exprimer les tensions simples de l'onduleur au moyen des fonctions de connexion:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \cdot v_{dc} \quad (\text{II. 29})$$

II.3.3.2 Modèle du bus continu

Les deux convertisseurs du système éolien (coté MADA et coté réseau) sont interconnectés par l'intermédiaire d'un bus continu qui autorise ainsi un transfert de puissance entre deux sources à fréquences différentes (cf. Figure. II. 7)[45].

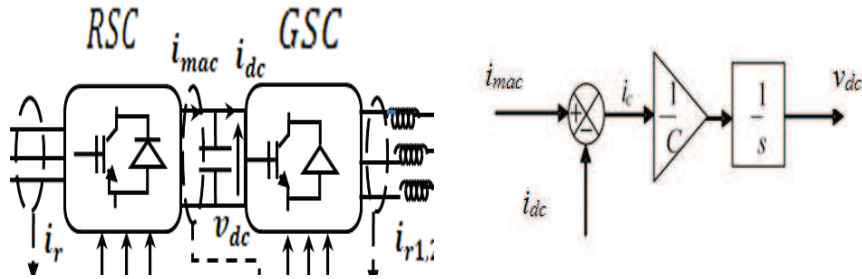


Figure. II. 7 : Interconnexion des deux convertisseurs statiques via un bus continu[45]

Les deux courants modulés (i_{mac} , i_{dc}) sont respectivement issus du convertisseur coté MADA et du celui coté réseau et C représente la capacité du bus continu[45],[90]. La tension du bus continu est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{dc} - i_{mac}) \quad (\text{II. 30})$$

II.3.3.3 Modélisation du convertisseur coté réseau

Le rôle de ce convertisseur est le transfert d'une partie de la puissance convertie vers le réseau électrique ou la charge et le maintien de la tension de bus continu constante. Pour assurer ces tâches le convertisseur côté réseau doit fonctionner en mode redresseur et en mode onduleur. Dans les deux cas, la modélisation est similaire à celle côté rotor de la MADA établie auparavant

Le réseau (source), alimentant ce convertisseur est modélisé par une FEM triphasée sinusoïdale en série avec une inductance l et une résistance r , qui représentent l'impédance totale de la ligne[91],[92],[93]. On suppose, que le réseau est équilibré, de mêmes impédances dans les trois phases, les tensions de lignes sont exprimées comme suit:

$$\begin{cases} v_{s1} = r i_{res1} + l \frac{di_1}{dt} + v_{c1} \\ v_{s2} = r i_{res2} + l \frac{di_2}{dt} + v_{c2} \\ v_{s3} = r i_{res3} + l \frac{di_3}{dt} + v_{c3} \end{cases} \quad (\text{II. 31})$$

Et les courants des phases du réseau sont alors donnés par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r}{l} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{res1} \\ i_{res2} \\ i_{res3} \end{bmatrix} + \frac{1}{l} \begin{bmatrix} v_{s1} - v_{c1} \\ v_{s2} - v_{c2} \\ v_{s3} - v_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 32})$$

A partir ces relations, on peut établir le schéma fonctionnel global du convertisseur côté réseau, comme le montre la Figure. II. 8.

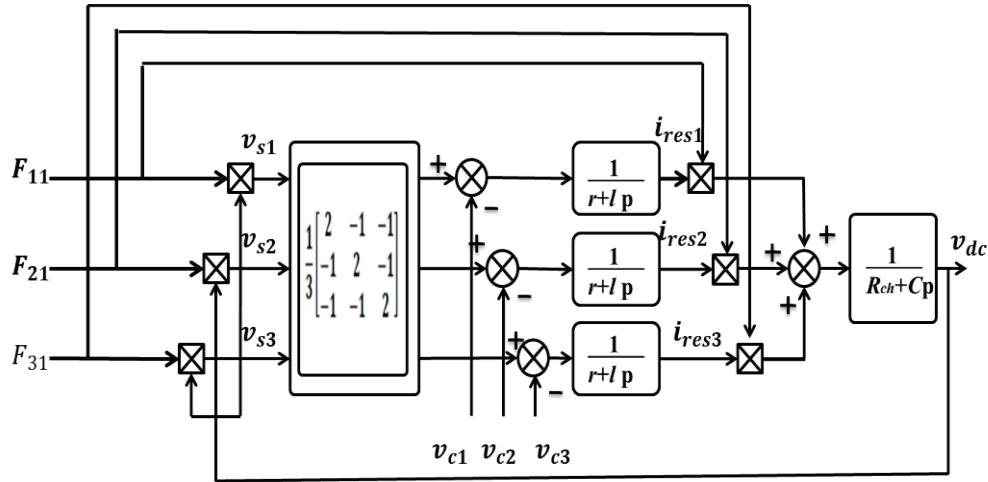


Figure. II. 8 :Schéma fonctionnel du convertisseur côté réseau[91]

II.4 Modélisation des batteries Li-ion

II.4.1 Les batteries Li-ion

La batterie Li-ion est un accumulateur électrochimique qui fonctionne grâce aux réactions électrochimiques. Ces dernières assurent la conversion de l'énergie électrique en un processus chimique, reposant sur l'échange réversible des ions Li^+ entre les électrodes positive et négative, tout le long des cycles de charge ou de décharge. Le lien entre les deux électrodes est réalisé par le biais de l'électrolyte[94],[75]. Celui-ci assure le transport des charges d'une électrode à l'autre. L'électrolyte est choisi de manière à assurer sa compatibilité avec les matériaux constituant les électrodes[72].

Ces dernières années, la technologie Li-ion est devenue prépondérante sur l'ensemble des marchés du stockage d'énergie. Car le rapport énergie/poids est primordial pour les applications en électronique, véhicule électrique et énergie renouvelable. Les projets d'installation de batterie de stockage, dans les systèmes de production d'énergie renouvelable, se multiplient[95]. Prochainement, un système de batteries Li-ion devrait être mis en service en Italie par le constructeur de batteries français Saft. Ce système d'une puissance de 2 MW pourrait stocker jusqu'à 1MWh d'électricité[96].

Le **Tableau. II. 1**, représente les propriétés techniques des éléments de batteries Li-ion choisis pour le présent travail.

Batteries	Ko40HP
Fabricant	DowKokam
Nom commercial	SLIB90216216H
Composition chimique (Electrode négative/ Electrode positive)	Graphite/NMC
Tension nominale (V)	3.7
Capacité nominale (Ah)	40
Résistance interne (mΩ) (Conditions de mesures)	0.80 (AC_1kHz,3°C)
Courants Max charge/décharge	80/200
Energie spécifique (Wh /Kg)	143.68
Masse (kg)	1.030
Volume (l)	0.508
Coût (€)	82.22

Tableau. II. 1: Données fabricants des batteries Li-ion étudiées[8].

II.4.2 Modèle de batterie Li-ion

Pour définir finement les phénomènes électrochimiques dans une cellule de batterie, on distingue plusieurs types de modèles de différentes conceptions [66]. La première méthode de modélisation utilise les lois de l'électrochimie (modèle électrochimique) qui permettent, après la caractérisation des phénomènes physico-chimiques au sein de la batterie, en utilisant des techniques spéciales, d'obtenir une bonne précision[97],[98]. La deuxième est basée sur les propriétés physiques et les tests expérimentaux(modèle empirique), il s'agit de courbes obtenues par des essais et ensuite extrapolées[97]. La troisième de type mathématique est utilisée pour développer des modèles de batterie. Ces modèles sont basés sur l'approche phénoménologique qui utilise la résolution numérique, au lieu d'équations ou de courbes des paramètres physicochimiques [99],[67]. La quatrième repose sur la modélisation par des circuits électriques équivalents, à constantes localisées permettant d'affecter à chaque réaction chimique une impédance [100]. Elle s'appuie sur l'analogie entre le domaine de

l'électrochimie et celui de l'électricité. Ainsi, les éléments électriques du circuit équivalent permettent de décrire les phénomènes qui interviennent au sein du système [101].

Pour ce travail, c'est le modèle mathématique proposé par Tremblay et al [102] qui a été choisi. Ce modèle permet de simuler le comportement dynamique des batteries, en utilisant l'état de charge (SOC) comme seule variable d'état. Ce modèle est valable pour les différents types de batteries : Plomb-Acide, NiCd, NiMH et Li-ion. La batterie est modélisée par une source « contrôlée » de tension mise en série avec une résistance (cf. Figure. II. 9).

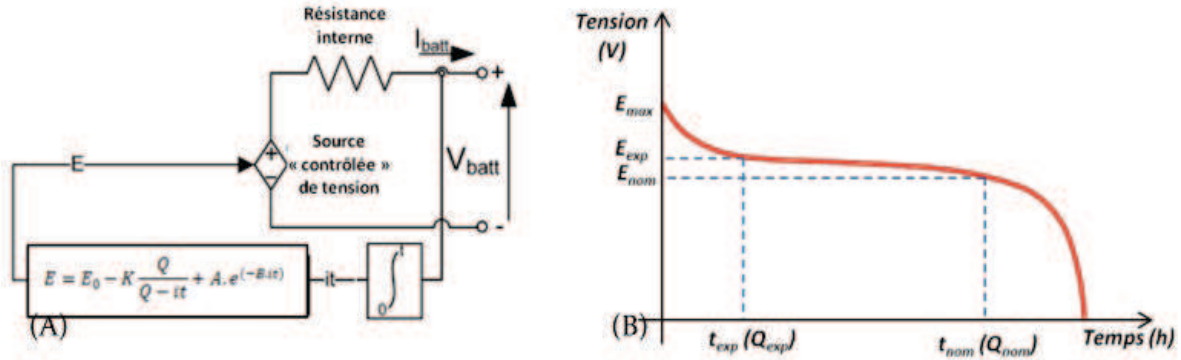


Figure. II. 9:Modèle générique d'une batterie[102]

L'équation non-linéaire II.30 décrit la variation de la tension (E) de la source « contrôlée » en fonction du courant traversant la batterie.

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int_0^t i \cdot dt} + A \cdot e^{(-B \cdot \int_0^t i \cdot dt)} \quad (\text{II. 33})$$

La Figure. II. 10, permet de montrer la variation de la tension d'un pack de batterie Ko40HP obtenue par la simulation du modèle. La variation de la tension correspond à une décharge complète du pack de batterie avec $I_{bat}=16A$.

Ce modèle a le mérite d'être simple à caractériser et donne des résultats suffisamment précis. Toutefois, ce modèle possède quelques défauts décrits[8],[103]:

- La résistance interne du modèle est constante et ne varie pas durant les cycles de charge/décharge en fonction de l'amplitude de courant.
- Le modèle ne prend pas en considération l'influence de la température sur les paramètres identifiés.
- Le phénomène de l'autodécharge n'est pas pris en compte.

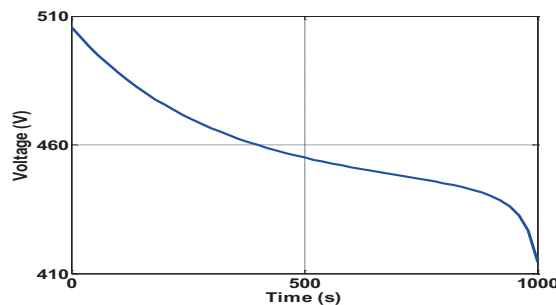


Figure. II. 10:Variation de la tension pour une décharge à $I_{bat}=16A$

II.5 Commande vectorielle de la MADA

De nombreuses études ont été menées pour obtenir les différentes structures de la commande vectorielle de la MADA [45]. Actuellement, cette commande est une référence universelle et industrielle du contrôle découplé des puissances active et réactive de la MADA[41]. Le concept de l'orientation du flux, statorique ou de l'entrefer, semble être similaire à la technique de découplage couple-flux appliquée à la commande du moteur à induction à cage. Les problèmes de régulation du couple (puissance active) ou bien de la vitesse et de la puissance réactive du côté stator dépendent du type d'application : vitesse et flux pour le fonctionnement en moteur et puissances active et réactive pour le fonctionnement en générateur[51],[104].

II.5.1 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour contrôler la production d'électricité, via la conversion de l'énergie éolienne, il est intéressant d'établir les équations, d'un contrôle indépendant des puissances active et réactive qui lient les tensions et courants rotoriques générés par un onduleur, aux puissances active et réactive statoriques[54],[82]. Par l'orientation d'un des flux, le modèle obtenu de la MADA et le dispositif de la commande qui en résulte, se simplifient. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu par l'orientation du repère de Park de manière que le flux statorique, suivant l'axe q soit constamment nul [78] $\varphi_{qs} = 0$

On peut écrire :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0 \quad (\text{II. 34})$$

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = M i_{qr} + L_s i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II. 35})$$

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \varphi_s \omega_s \end{cases} \quad (\text{II. 36})$$

A partir des équations des composantes directes et en quadrature du flux statorique (II.20), nous obtenons les relations liant les courants statoriques à ceux du rotor :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

Dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive sont :

$$\begin{cases} P = v_s i_{qs} \\ Q = v_s i_{ds} \end{cases} \quad (\text{II. 38})$$

En remplaçant les courants statoriques par les valeurs de l'équation (II.37) dans l'équation (II.38), nous obtenons les expressions des puissances active et réactive:

$$\begin{cases} P = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q = v_s \frac{\varphi_s}{L_s} - v_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (\text{II. 39})$$

En tirant $\varphi_s = \frac{v_s}{\omega_s}$ de l'équation (II.38), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q = \frac{v_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{v_s M}{L_s} i_{dr} \quad (\text{II. 40})$$

Les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques, lors du remplacement des courants de l'équation (II.38) dans (II.19) donnent :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \left(L_{r-} \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_{r-} \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \left(L_{r-} \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_{r-} \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{v_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 41})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, alors que les tensions rotoriques:

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - g \omega_s \left(L_{r-} \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + g \omega_s \left(L_{r-} \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{v_s M}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II. 42})$$

Où:

$\left(L_{r-} \frac{M^2}{L_s} \right)$: le terme du couplage entre les deux axes

$\left(g \frac{v_s M}{L_s} \right)$: la force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable.

Les équations précédentes montrent que l'opportunité de mettre en place une commande vectorielle de la MADA est possible, car si l'influence des couplages est prise en compte, chaque axe peut être commandé avec son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs sont la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator, de façon à optimiser la qualité de l'énergie fournie au réseau[54],[105],[106].

Les équations précédentes permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à contrôler (cf. Figure. II. 11).

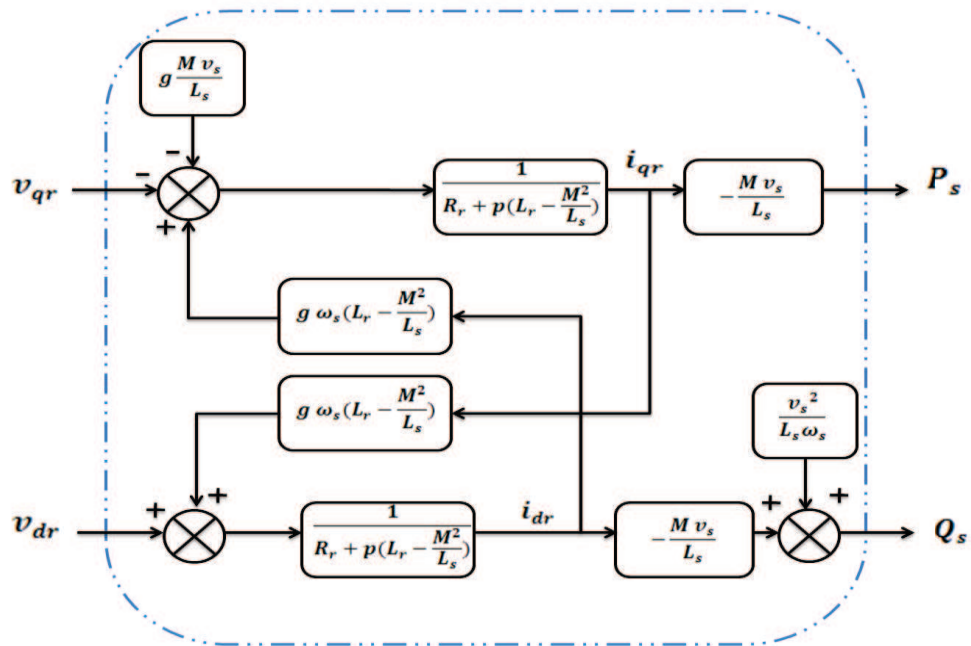


Figure. II. 11:Schéma bloc de la MADA[107] .

Sur la base du modèle établi et selon la compensation ou non des termes de couplage, il existe deux méthodes de commande des puissances de la MADA : la commande directe et la commande indirecte[77],[54],[105].

II.6 Commande indépendante des puissances active et réactive statoriques de la MADA en mode connecte au réseau

II.6.1 La commande directe

La commande directe est réalisée par la mise en place d'une boucle de régulation sur chaque axe (cf. Figure. II. 12). Le découplage entre ces axes étant considéré total, la régulation est indépendante pour chacune des puissances active et réactive[108],[19].

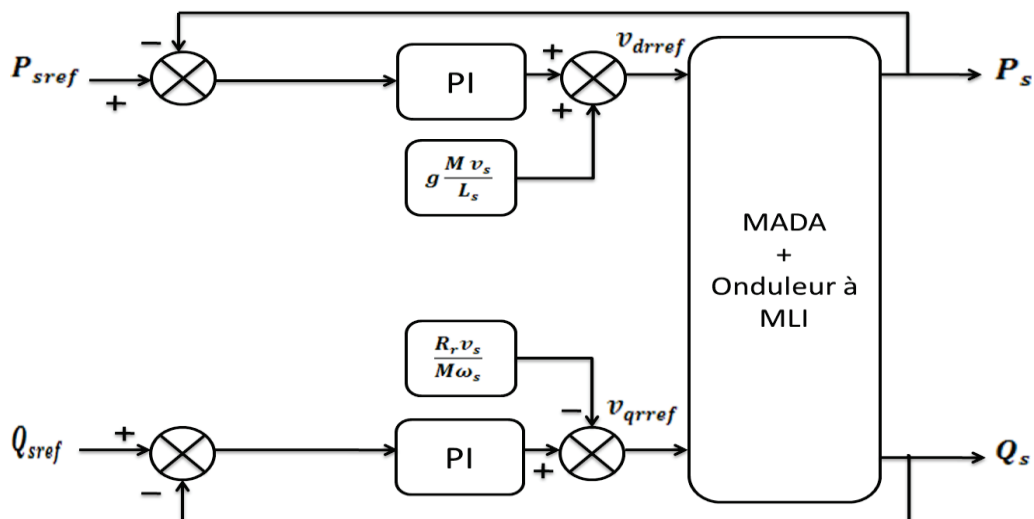


Figure. II. 12: schéma bloc de la commande directe[41]

II.6.2 La commande indirecte

Cette méthode consiste à estimer les valeurs des tensions rotoriques à partir des valeurs des puissances active et réactive. Ainsi, les courants rotoriques sont régulés indirectement. Dans ce cas deux structures peuvent être élaborées. L'une utilise une boucle de régulation le courant. L'autre se base sur la première tout en ajoutant une boucle pour les puissances[107][108].

II.6.2.1 Commande indirecte sans boucle de puissance

Pour garantir une bonne stabilité du système, est introduite une boucle de régulation des courants rotoriques, dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances imposées à la machine (cf. Figure. II. 13)[46],[82],[107].

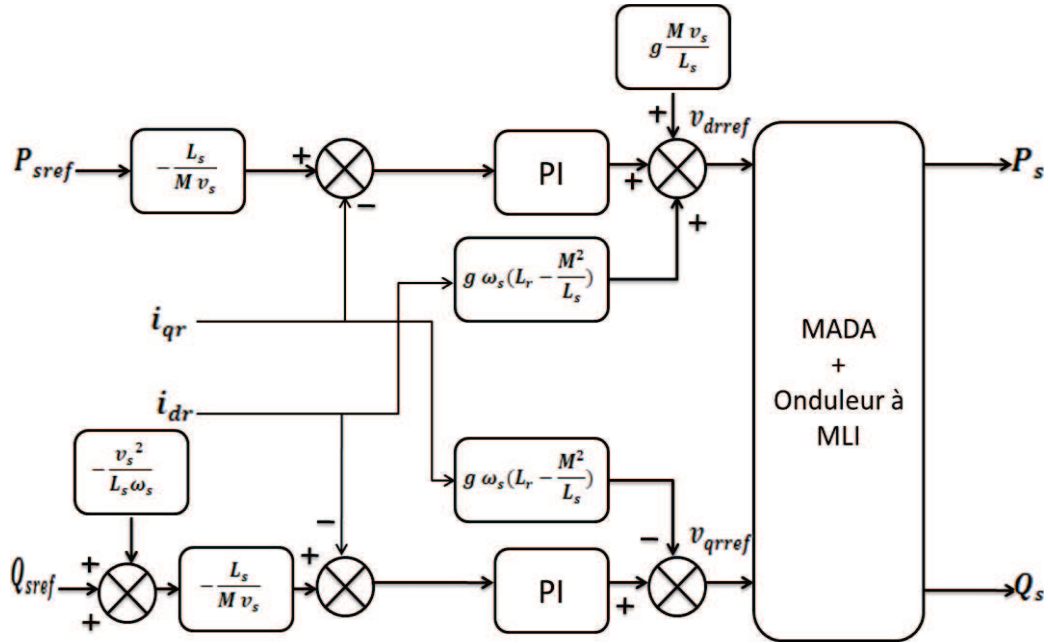


Figure. II. 13 : Schéma bloc de la commande indirecte[41]

II.6.2.2 Commande indirecte avec boucle de puissance

Pour améliorer la commande précédente, est introduite une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances, afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système.

Ainsi, est obtenu le schéma bloc présenté par la Figure. II. 14. On distingue les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance. Ce type de régulation donne une dynamique satisfaisante et une erreur statique nulle [108].

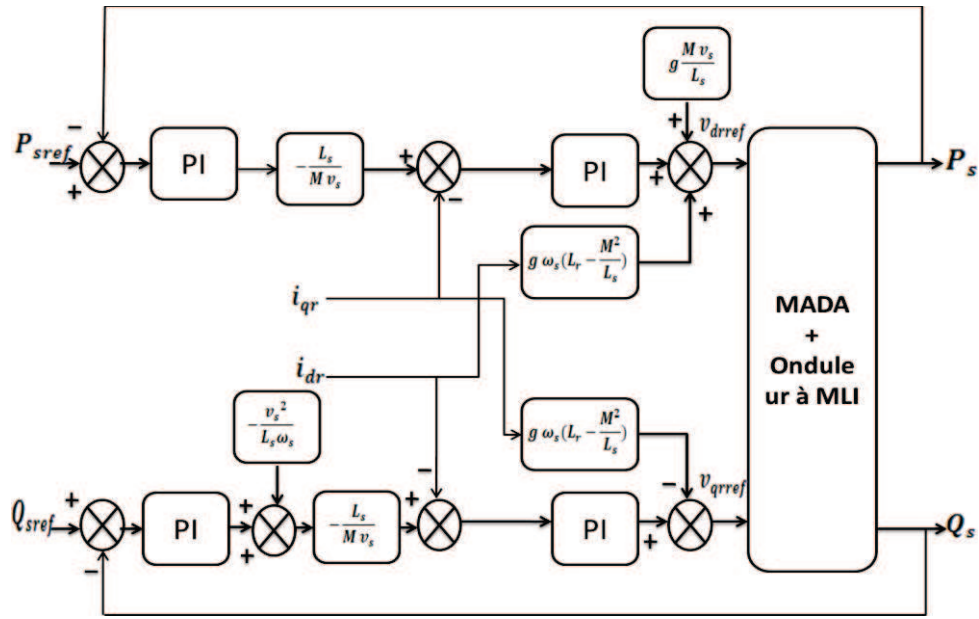


Figure. II. 14 :Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles de puissance[41]

Vu sa simplicité et son efficacité, la commande directe de puissance a été choisie pour le contrôle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur la MADA.

II.7 Contrôle du convertisseur coté réseau

Plusieurs stratégies de contrôle sont proposées, dans les travaux de recherche récents, pour le convertisseur coté réseau (redresseur à MLI). Bien que ces stratégies de contrôle atteignent globalement le même but, soit un facteur de puissance élevé et un courant de forme proche de la sinusoïde, leurs principes diffèrent[91],[109],[110]. Ces stratégies englobent la commande par le contrôle de l'angle de la puissance du redresseur [111], la commande à hystérésis de courant[112], la commande en courant du redresseur dans le repère abc[113], la commande en courant du redresseur dans le repère (d,q)[114], la commande directe de puissance DPC et la commande de (VF-DPC)[115].

Dans ce travail, c'est la méthode de contrôle en courants dans le repère tournant (d,q), qui est choisie. Ainsi, le contrôle du convertisseur peut se faire sous la forme d'une régulation en cascade. Deux boucles internes régulent les courants des phases du réseau électrique, et une externe assure la régulation de la tension du bus continu.

La commande en courant du redresseur à MLI dans le repère tournant dq présente, dans ce cas, l'avantage que, les grandeurs régulées sont des grandeurs continues [91]. Ceci permet d'améliorer le contrôle de ce convertisseur, car les correcteurs PI sont bien adaptés à la régulation de grandeurs continues.

Les équations dans le repère tournant $d-q$ sont obtenues à l'aide de la transformation de Park [113],[116]:

$$\begin{cases} v_{cd} = v_d - r i_d - l \frac{di_d}{dt} + l \omega i_q \\ v_{cq} = v_q - r i_q - l \frac{di_q}{dt} - l \omega i_d \end{cases} \quad (\text{II. 43})$$

Où :

v_{cd} et v_{cq} : sont les composantes de Park des tensions à l'entrée du convertisseur.

v_d et v_q : Les composantes de Park des tensions du réseau.

i_d et i_q : Les composantes de Park des courants du réseau.

ω : La pulsation du réseau.

Les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} [v_d i_d + v_q i_q] \\ Q = \frac{3}{2} [v_q i_d - v_d i_q] \end{cases} \quad (\text{II. 44})$$

Ce système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} v_d & v_q \\ v_q & -v_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{II. 45})$$

Ce qui implique que les courants de ligne peuvent être obtenus par:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{(V_d^2 + V_q^2)} \begin{bmatrix} v_d & v_q \\ v_q & -v_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{II. 46})$$

Et on suppose que :

$$P = v_{dc} i_{dc} \quad (\text{II. 47})$$

Les tensions et les courants de réseau mesuré dans le repère tournant dq (la transformation de Park) sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{dmes} \\ v_{qmes} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{1mes} \\ v_{2mes} \\ v_{3mes} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 48})$$

$$\begin{bmatrix} i_{dmes} \\ i_{qmes} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1mes} \\ i_{2mes} \\ i_{3mes} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 49})$$

Le schéma bloc du contrôle du convertisseur coté réseau est alors représenté dans la Figure. II. 15.

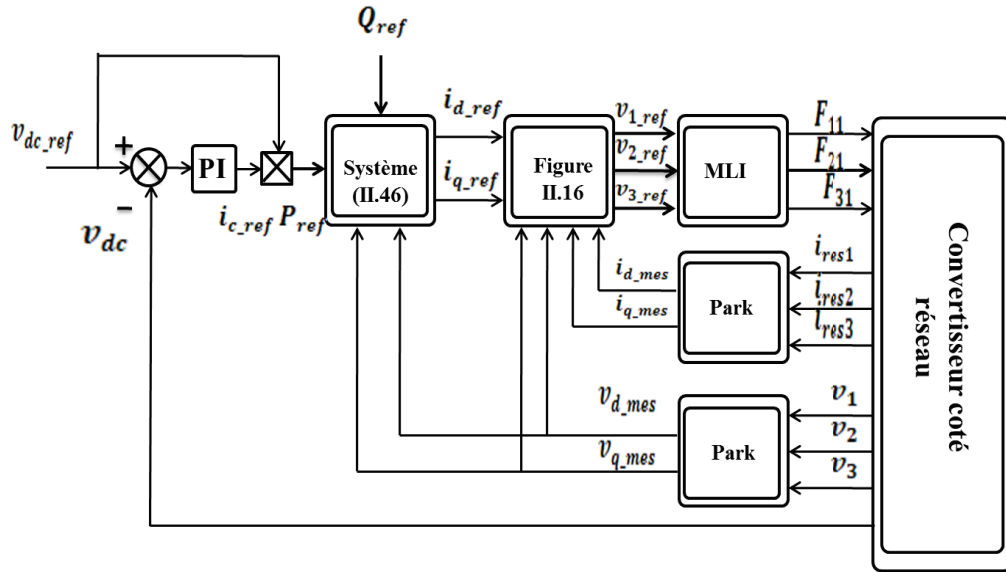


Figure. II. 15 : Commande en courant dans le repère tournant dq du convertisseur coté réseau[113]

Les boucles internes de régulation des courants du réseau dans le repère tournant (dq) sont montrées sur la Figure. II. 16.

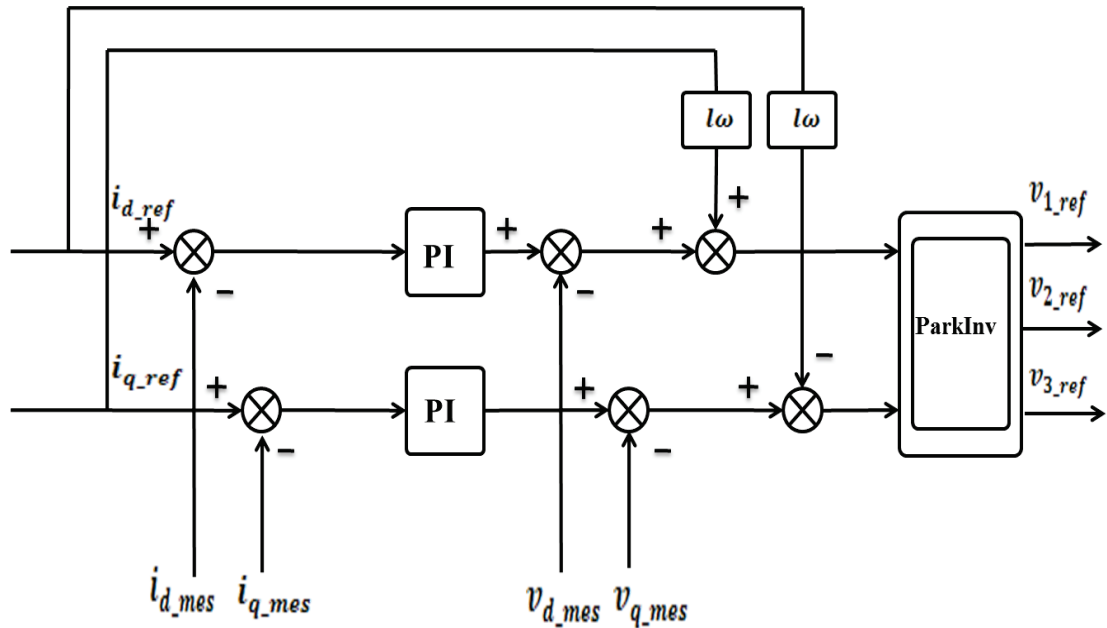


Figure. II. 16 : Boucle internes de régulation des courants du réseau avec compensation de tension[113]

II.8 Contrôle du système de stockage électrochimique

Dans les applications de la production d'électricité d'origine renouvelable et intermittente, le système de stockage permet d'acquérir (charge) ou d'injecter (décharge) une puissance électrique donnée, afin de garantir une stabilité du réseau et une continuité de service[59],[117]. Autrement dit, il s'agit de stocker l'énergie fournie par la production (éolienne) pendant les creux de consommation pour la restituer pendant les pointes

(nivellement de charge). Dans ce contexte, le réglage de la fréquence d'un réseau électrique nécessite de prévoir une marge de puissance suffisante, de 2,5% dans un réseau de très forte puissance jusqu'à 30% pour des réseaux isolés de faible puissance[63],[118]. De plus, la stabilisation transitoire des réseaux, le lissage des creux de tension ainsi que le lissage des charges fluctuantes demande un moyen de stockage capable de répondre très rapidement aux besoins de puissance[16],[119],[120].

Dans ce cas, le système de stockage électrochimique à base des batteries Li-ion est utilisé comme un tampon de puissance. Il fournit la puissance si la différence entre l'énergie produite et l'énergie appelée par la charge est négative. Il récupère la puissance si cette différence est positive. L'excès d'énergie est stocké dans les batteries Li-ion. Pour ce faire, le convertisseur de puissance côté batteries est contrôlé en courant avec l'expression de la puissance :

$$P_{bat} = P_w - P_g \quad (\text{II. 50})$$

Le convertisseur d'interface de type hacheur *buck-boost*, contrôlé en courant, par un correcteur PI, est schématisé par la Figure. II. 17.

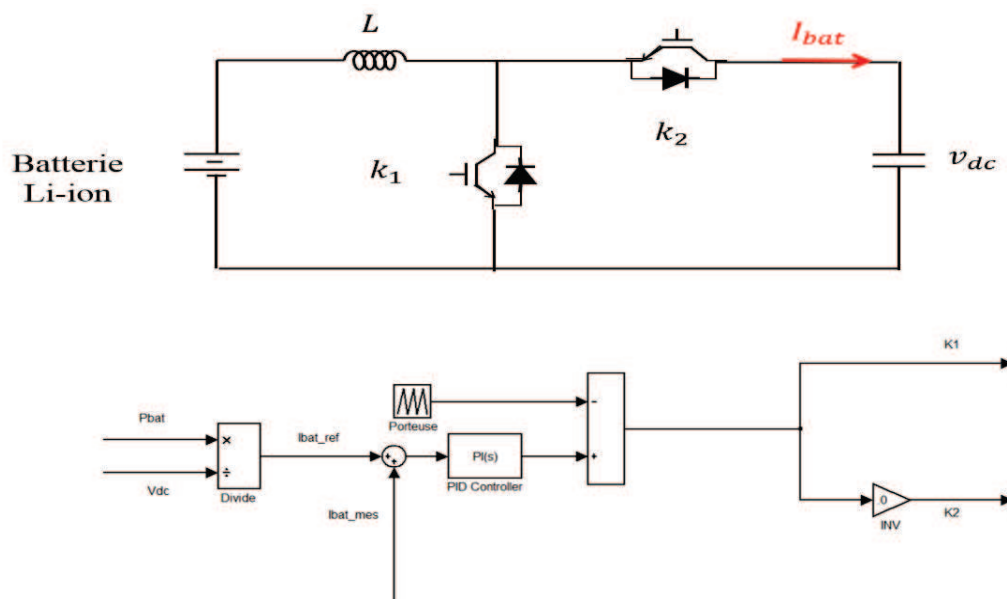


Figure. II. 17 : Schéma bloc du contrôle de hacheur *buck-boost* [68].

II.9 Résultats de simulation

La simulation d'une éolienne à vitesse variable reposant sur la MADA (dont les paramètres sont fournis en annexe A) a été réalisée dans l'environnement MATLAB 7.5 – SIMULINK.

II.9.1 Validation de la commande directe de puissance

Le rotor de la MADA alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux. L'entrée de l'onduleur est une source de tension continue, supposée parfaite. Cet onduleur est commandé

par la technique MLI triangulo-sinusoïdale dont la porteuse est symétrique bipolaire avec une fréquence $f_p=5$ KHz et une valeur crête $A_p=150$.

Cet essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive, tout en maintenant une vitesse, d'entraînement de la MADA, constante. Les résultats de la simulation montrent l'évolution de la performance et la robustesse de la commande directe de la puissance appliquée à la machine asynchrone doublement alimentée.

➤ Conditions d'essai

- à $t=0.6$ s et $t=1.2$ s échelon de puissance active (P_{sref} passe de 0W à -1000W) et (P_{sref} passe de -1000W à 500W).
- à $t=0.8$ s et $t=1.6$ s échelon de puissance réactive (Q_{sref} passe de 0 VAR à -1000 VAR) et (Q_{sref} passe de -1000 VAR à 1500 VAR).
- La machine entraînée à une vitesse fixe 1410 tr/min.
- La tension de bus continue est fixée à $v_{dc}=600$ V.

Les résultats de la simulation donnent les différentes courbes obtenues par la commande directe des puissances active et réactive générées au niveau du stator de la MADA. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances active et réactive du générateur et du flux et du couple comme montré sur la Figure. II. 18 et la Figure. II. 19. La composante en quadrature du courant rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.

La Figure. II. 21, montre que les puissances active et réactive délivrées par la MADA suivent bien les références correspondantes. Ceci est dû au contrôle des composantes en quadrature et directe du courant rotorique de la MADA (cf. Figure. II. 20).

La Figure. II. 22, illustre les deux composantes en quadrature et directe du courant statorique de la MADA.

La Figure. II. 23, montre que la fréquence des courants rotoriques et des tensions composées du convertisseur côté rotor est imposée par la relation $f_r = g f_s$.

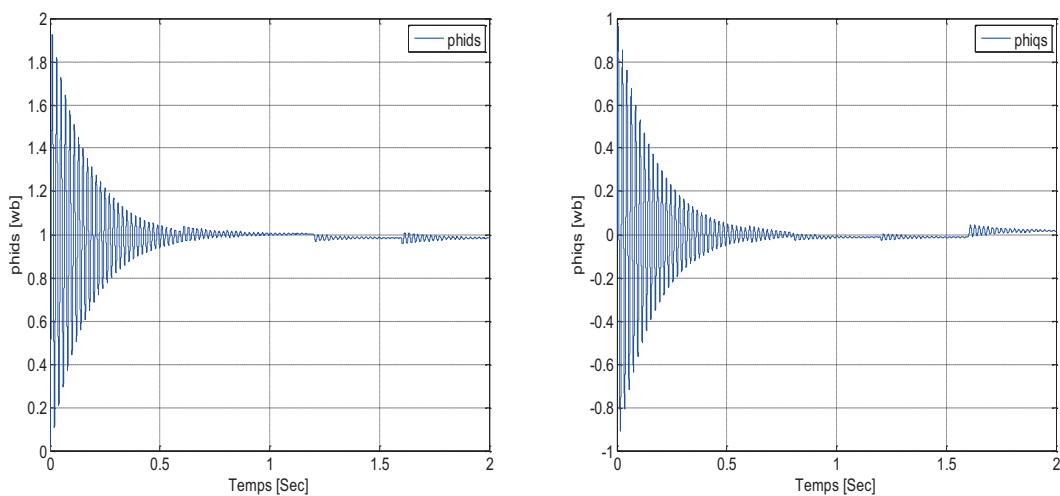


Figure. II. 18 : Flux statorique selon l'axe d et q

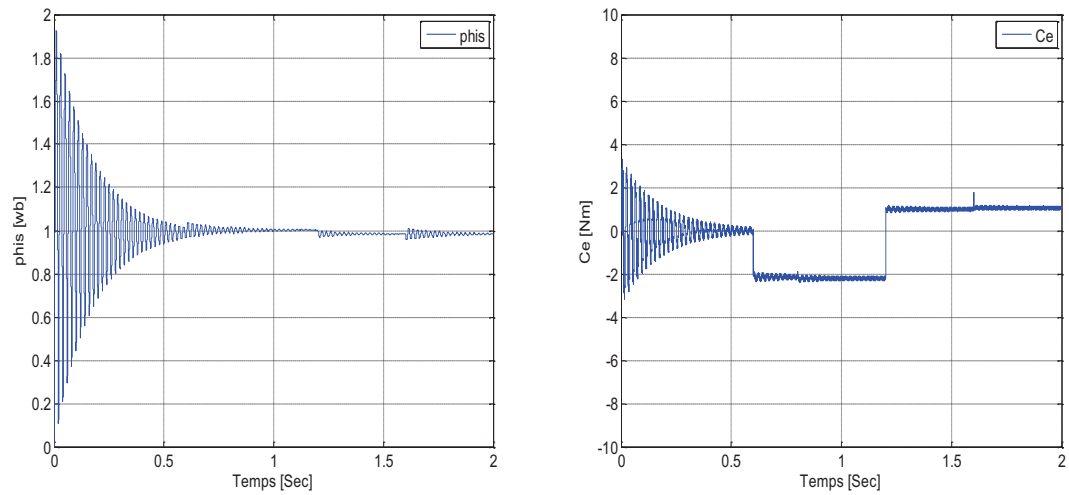


Figure. II. 19: Couple électromagnétique et le flux statorique résultant

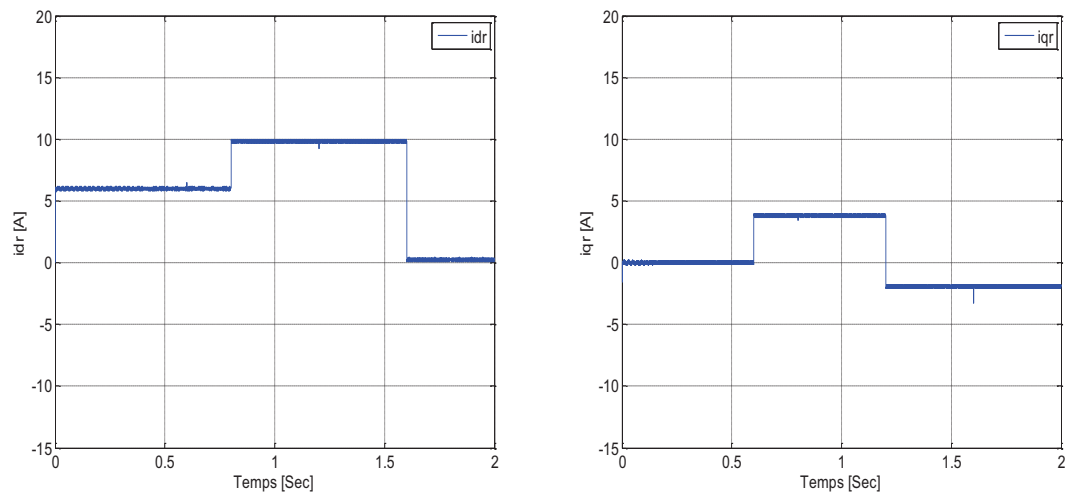


Figure. II. 20: Courant rotorique selon l'axe d et q

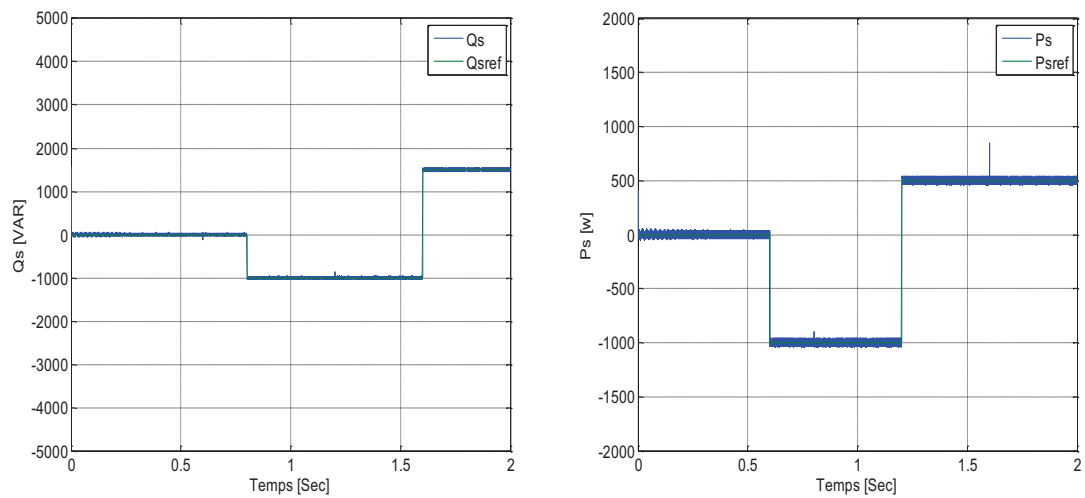


Figure. II. 21 : Puissance active et réactive statorique

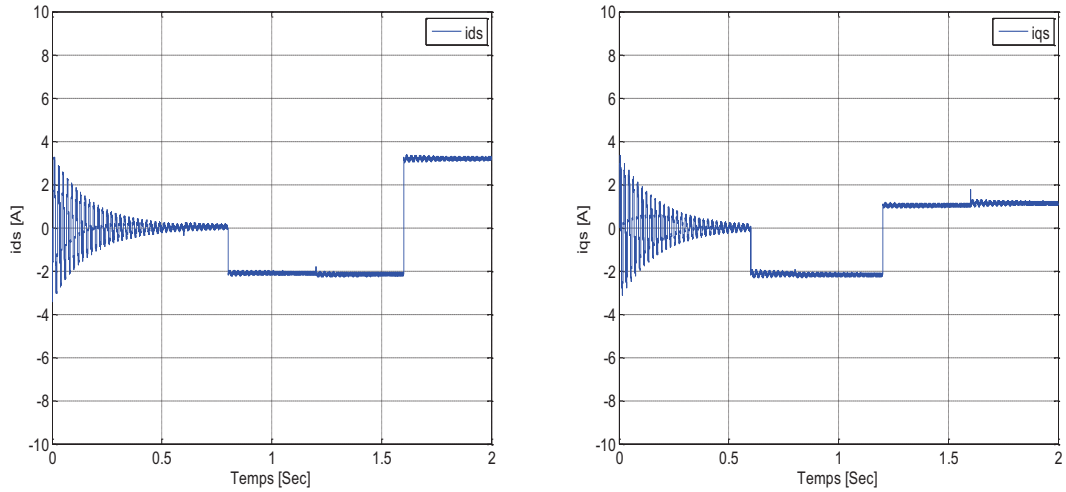


Figure. II. 22 : Courant statorique selon l'axe d et q

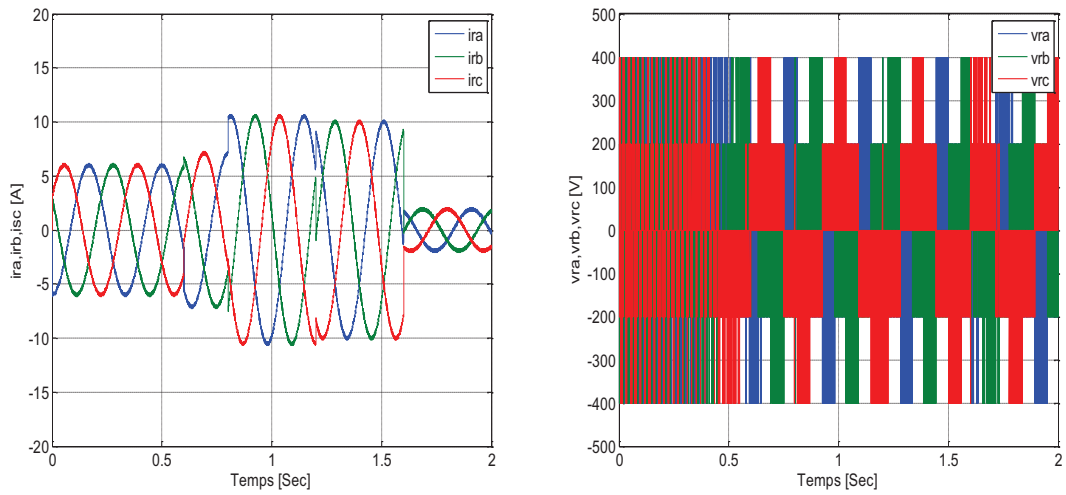


Figure. II. 23: Courants et tension rotorique

Il est à noter que, durant la période où la puissance active délivrée par la MADA est négative et la puissance réactive est nulle, le courant statorique i_{sa} est en opposition de phase par rapport à la tension réseau (cf. Figure. II. 24). Ceci s'explique par le fait que la MADA n'injecte que de la puissance active dans le réseau.

Durant la période où la puissance réactive est négative, est observé un déphasage (avance de phase) entre le courant et la tension statorique de la MADA. Dans ce cas, la MADA fournit au réseau de la puissance réactive en plus de celle active. En revanche, pendant la période où la puissance active et réactive passe aux valeurs positives (fonctionnement moteur), le courant statorique devient en retard de phase par rapport à la tension réseau.

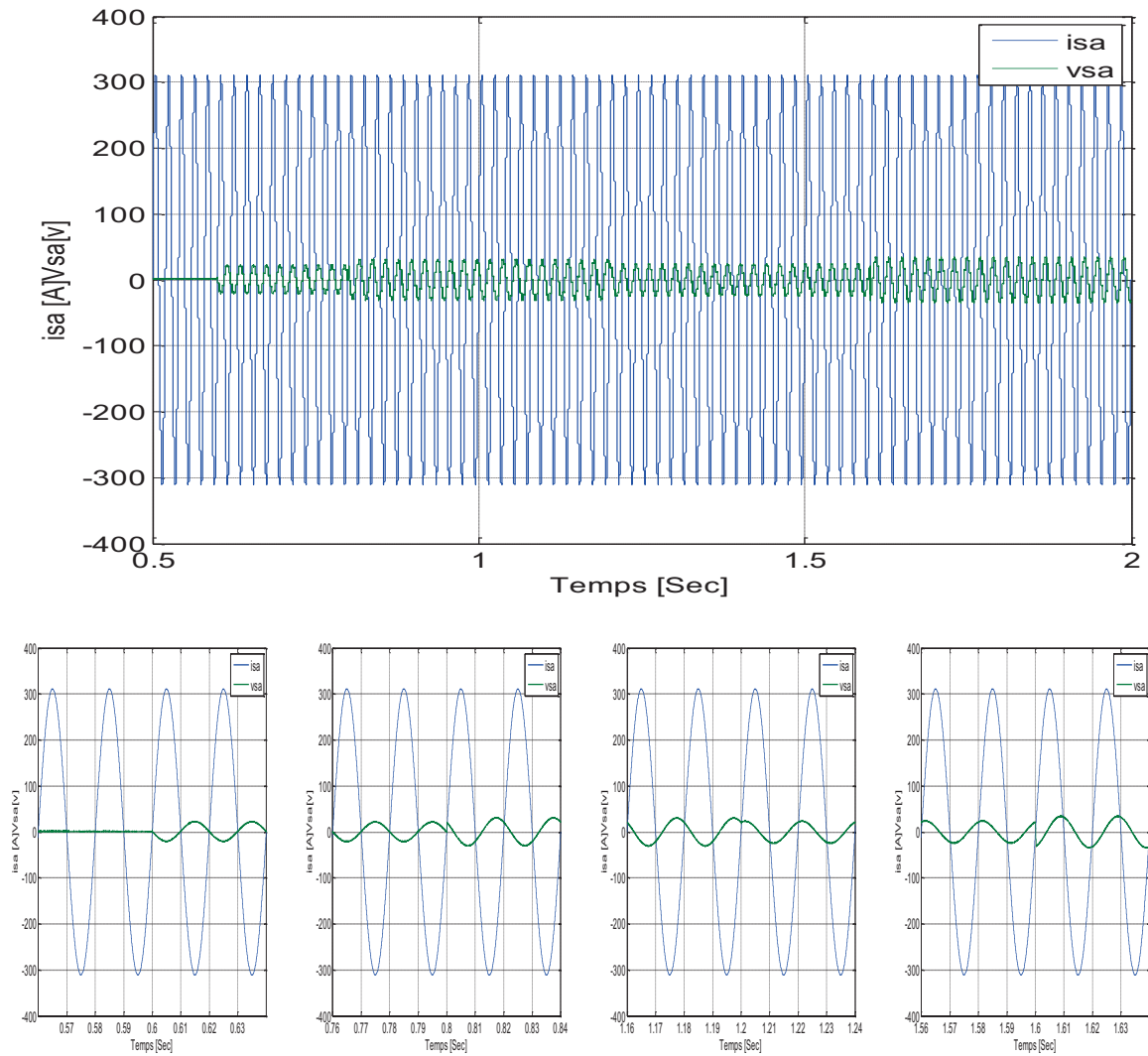


Figure. II. 24: Courant (x10) et tension d'une phase statorique avec un zoom

II.9.2 Validation du contrôle de convertisseur coté réseau

Le convertisseur coté rotor de la MADA est alimenté à travers le bus continu par le second convertisseur coté réseau. Le test du contrôle, de ce dernier dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne en mode connecté au réseau électrique est effectué.

➤ Conditions d'essai

- à $t=1.2$ s échelon de la puissance réactive (Q_{sref} passe de -3000 VAR à 0 VAR) puis à $t=1.7$ s (Q_{sref} passe de 0 VAR à 3000 VAR).
- à $t=1.7$ s échelon de la puissance active (P_{sref} passe de -1000W à 1000 W).
- à $t=1.3$ s et $t=1.5$ s échelon de la vitesse de rotation (n passe de 200 tr/min à 1500 tr/min) et (n passe 1500 tr/min à 2000 tr/min).
- La tension de bus continue est fixée à $v_{dc}=600V$.

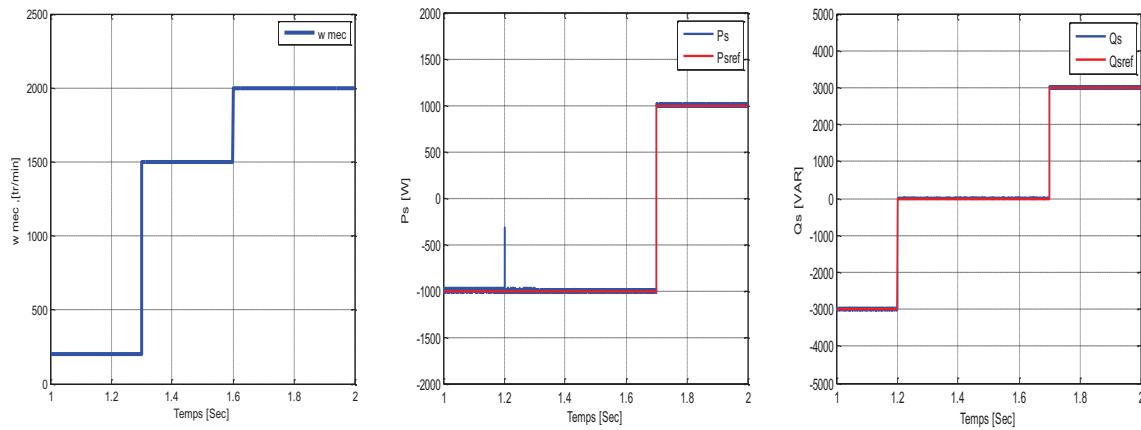


Figure. II. 25 : Vitesse mécanique de la MADA (a) .Puissance active et réactive statorique (b,c)

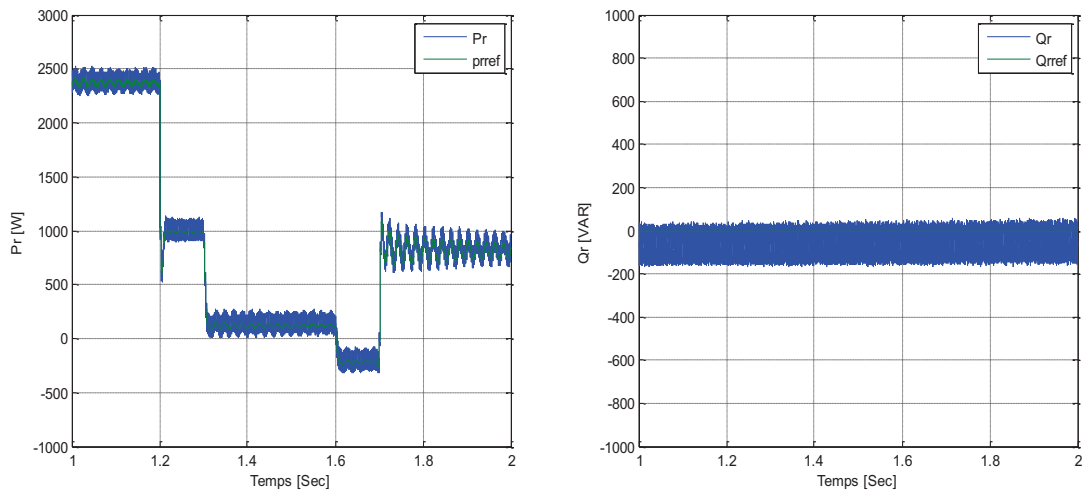


Figure. II. 26 : Puissance active (a) et réactive rotorique (b)

La Figure. II. 25(a), montre la variation de vitesse mécanique de la machine durant toute la durée de la simulation pour trois modes du fonctionnement de la MADA. Les Figure. II. 25(a) et (b) montrent que les puissances active et réactive produites par la machine suivent bien les références correspondantes. Ceci est dû au contrôle vectoriel basé sur le découplage des composantes en quadrature et directe du courant statorique.

La Figure. II. 26(a), montre que la puissance active rotorique est influencée par la vitesse mécanique de la MADA et la puissance active statorique. Par contre, la puissance réactive rotorique (cf. Figure. II. 26 (b)) garde sa valeur moyenne nulle, cela indique le bon fonctionnement à facteur de puissance unitaire du convertisseur coté réseau.

La Figure. II. 27, montre illustre l'évolution des courants cotés réseau durant la durée de la simulation. Les courants produits par le convertisseur côté réseau ont une forme quasi-sinusoïdale. De plus, elle montre la variation d'amplitude de des courants cotés réseau en fonction de la vitesse mécanique et de la puissance active statorique produite, ainsi que le changement de séquence des phases de ces courants lors de transition du régime hypo synchrone au régime hypersynchrone à l'instant ($t=1.6s$) et lors du passage de régime génératrice au régime moteur à l'instant ($t=1.7s$).

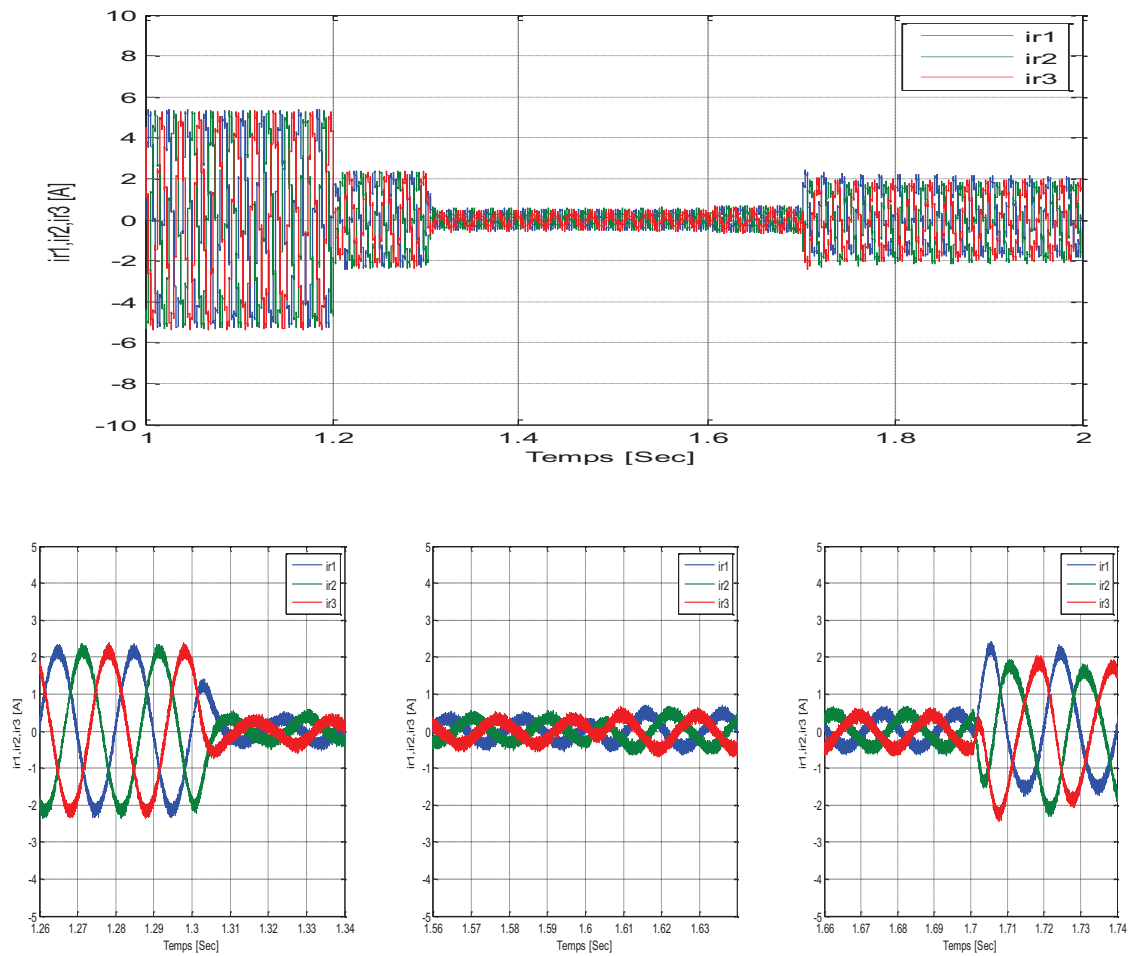


Figure. II. 27 : Courants du convertisseur coté réseau avec un zoom

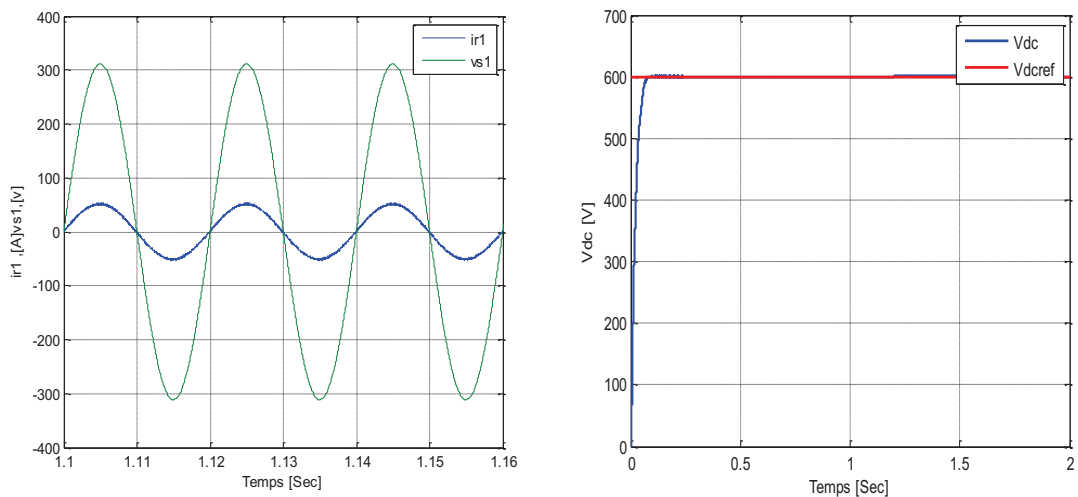


Figure. II. 28 : Courant (x10) et tension d'une phase statorique (a). Tension du bus continue (b)

La Figure. II. 28(a), montre le courant et la tension d'une phase statorique de la MADA : le courant et la tension sont en phase, car la puissance réactive produite par le stator de la machine au réseau électrique est nulle. La Figure. II. 28(b), indique que la tension du bus continu est bien régulée avec des faibles ondulations lors des variations de la puissance

statorique ou de vitesse d'entraînement. Ceci confirme que le convertisseur coté réseau est bien contrôlé lors de l'utilisation de la commande en courants dans le repère tournante (dq).

II.9.3 Validation du contrôle de système de stockage

Pour tester le contrôle de système de stockage électrochimique, dans une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la MADA connectée au réseau électrique, des simulations sont effectuées. La vitesse mécanique de la machine varie autour de la valeur de synchronisation (cf. Figure. II. 29). Les résultats de simulation, ci-dessous, représentent le cas où le réseau demande une puissance constante de 7.5Kw (fonctionnement à puissance lissée).

La Figure. II. 29 (b), montre que la puissance éolienne varie en fonction de vitesse de vent, cela est indispensable pour extraire le maximum de puissance possible (l'algorithme de MPPT). Et que, le système éolien ne peut pas assurer durant toute la période la puissance demandée par le réseau électrique.

La Figure. II. 30 (a), montre que la puissance du système de stockage (batteries Li-ion) varie autour de zéro (charge /décharge) afin de maintenir la puissance fournie au réseau reste constante (7.5Kw).

La Figure. II. 30 (b), illustre l'évolution de la tension du pack de batteries durant la période de charge /décharge. Il y a variation de la tension en fonction de puissance éolienne générée et celle demandée par le réseau électrique. Ceci confirme les bonnes performances de stratégie de contrôle (fonctionnement à puissance lissée).

La Figure. II. 31 (a) et (b), montre que l'amplitude et la fréquence des courants rotoriques évoluant en fonction de la puissance éolienne fournie et la vitesse mécanique de la MADA ($f_r = g f_s$). Il y a transition du régime hypersynchrone au régime hypo synchrone et vice versa.

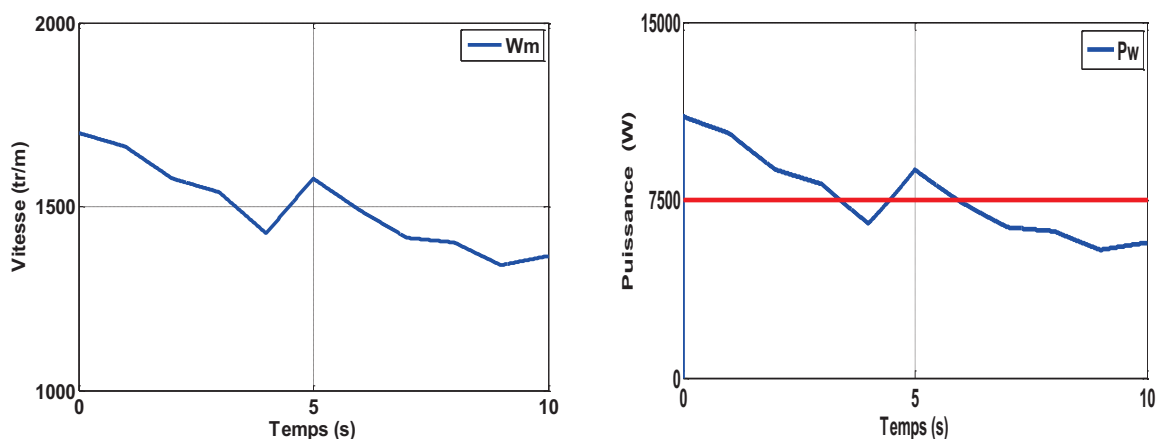


Figure. II. 29 : Vitesse mécanique de la MADA (a). Puissance éolienne (b).

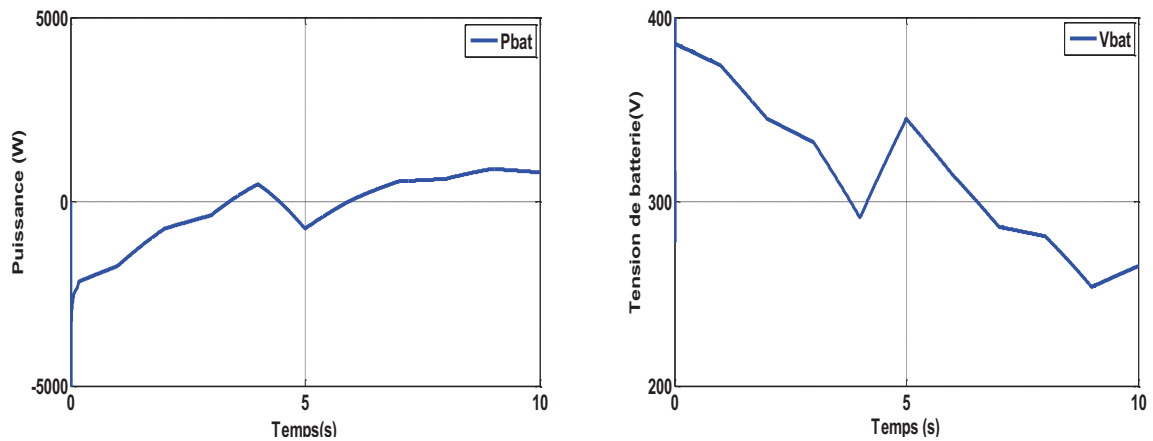


Figure. II. 30 : Puissance de la batterie (a).Tension de la batterie (b)

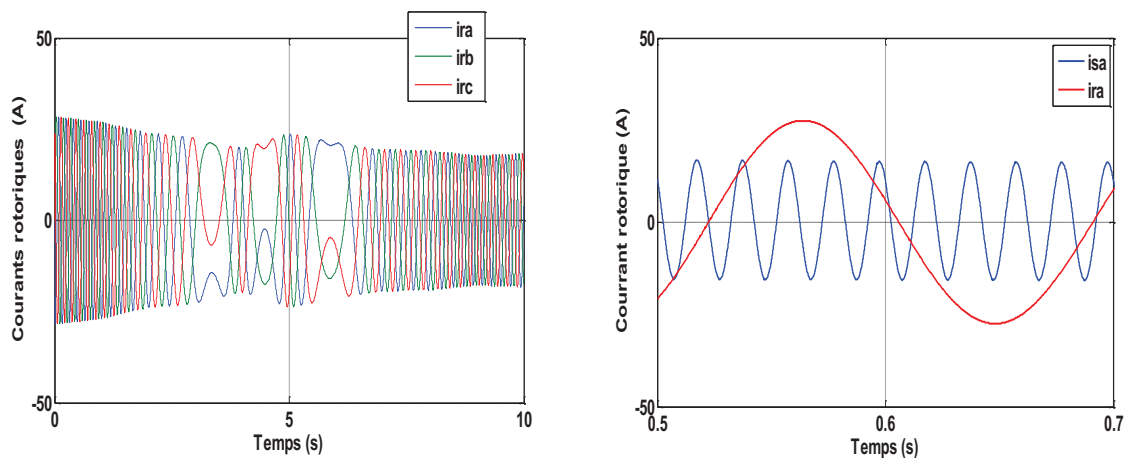


Figure. II. 31 : Courants rotoriques de la MADA (a).Le courant (x10) et la tension d'une phase statorique (b).

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation et la commande du système éolien à base de la MADA et des batteries Li-ion en mode connecté au réseau électrique, a été étudiée. Les modèles mathématiques des différents constituants du système éolien ont été établis, en particulier le modèle de la MADA à l'aide de ses équations électriques et de flux dans le système d'axe d-q lié au synchronisme. Puis, le modèle mathématique de batterie Li-ion a été présenté. Deux stratégies de commande vectorielle en puissance de la machine, ont été détaillées : la commande directe et la commande indirecte sans et avec boucles de puissance. Enfin, des simulations de la commande du système éolien complet ont été effectuées, pour évaluer les performances de commande directe de puissance et valider le contrôle du système de stockage électrochimique basé sur des batteries Li-ion avec la stratégie de fonctionnement à puissance lissée.

Dans le chapitre qui suit, la modélisation et le contrôle d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, à base de la MADA couplée à une deuxième génératrice MSAP et des batteries Li-ion, assurant l'alimentation électrique d'une charge complètement isolée sont abordés.

CHAPITRE III

Etude d'une chaîne de conversion éolienne en mode îloté associée aux batteries Li-ion

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et le contrôle d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA, de la MSAP et des batteries Li-ion en mode isolé. Après la description d'un système éolien autonome et l'étude de son principe de fonctionnement, un modèle de la MADA, en mode isolé, est développé. La commande de la MADA, permettant de maintenir l'amplitude et la fréquence des tensions statoriques constantes pour une vitesse de vent variable, est particulièrement étudiée. La modélisation et la commande de la MSAP, qui assure le réglage de la tension du bus continu durant la variation de vitesse de vent, sont abordées. L'intégration du système de stockage électrochimique, basée sur des batteries Li-ion dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en mode iloté, est aussi présentée. Ce chapitre se termine par l'évaluation des performances et de la robustesse du système proposé, par la présentation des résultats de la simulation.

III.2 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la MADA en mode iloté

III.2.1 Description du système éolien en mode iloté

Le système de conversion d'énergie éolienne, couplé avec des batteries Li-ion débité sur une charge isolée, est étudié dans ce chapitre. Ce système est constitué d'une turbine éolienne et de deux génératrices MADA et MSAP. La génératrice principale est la MADA, la MSAP assure la magnétisation et le réglage de tension du bus continu via un convertisseur MLI (cf. [Figure III. 1](#)). Les deux machines sont interconnectées par l'intermédiaire d'une cascade de deux convertisseurs MLI à deux niveaux. La charge est connectée directement au stator de la MADA. Les deux génératrices sont liées sur le même arbre et entraînées par une turbine éolienne. Un système de stockage électrochimique, à base de batteries Li-ion, est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC au bus continu. Ce dispositif permet d'assurer l'alimentation de charge isolée en cas de vent de faible vitesse [121].

III.2.2 Principe de fonctionnement

La chaîne de conversion d'énergie éolienne, comprenant la MADA couplée avec le système de stockage électrochimique à base des batteries Li-ion est représentée par la [Figure III. 1](#). La régulation de la tension du bus continu est assurée principalement par l'ensemble (convertisseur MLI+MSAP). Pour les faibles vitesses du vent, le deuxième dispositif (convertisseur DC/DC+batteries Li-ion) est utilisé. Dans celui-ci la MADA joue le rôle d'un transformateur électrique, le primaire étant le stator et le secondaire le rotor de la machine. La charge est alimentée par la génératrice principale MADA. Le contrôle de l'amplitude et de la fréquence des tensions statoriques se fait via le convertisseur MLI le côté rotor. Pour les grandes vitesses du vent avec de faibles demandes de puissance par la charge isolée, le système de stockage est sollicité pour stocker la surproduction de puissance éolienne. Dans le cas où la vitesse de vent est faible et la demande de puissance supérieure à celle disponible

de l'éolienne, les batteries Li-ion interviennent pour compenser l'écart de demande [121],[122].

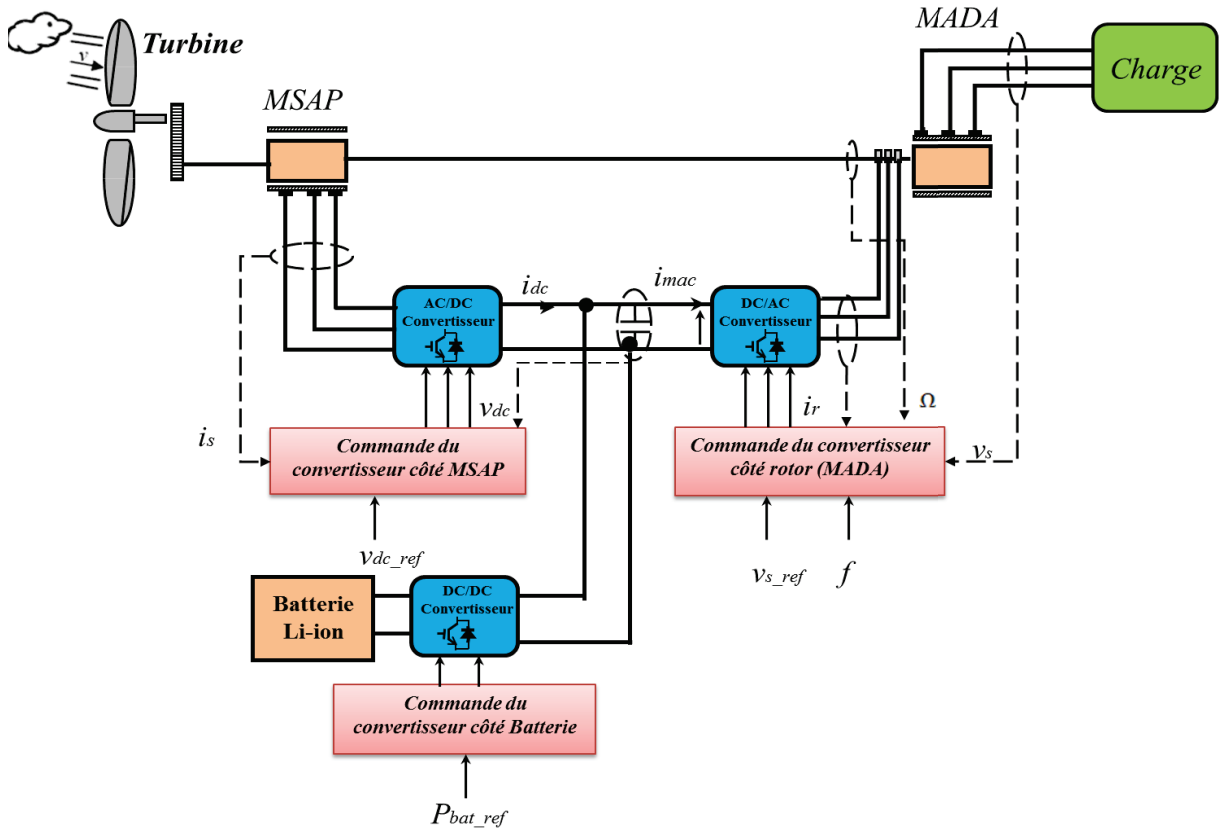


Figure III. 1 : Schéma de principe du système éolien en mode îloté[121].

III.3 Modélisation de la MADA en mode îloté

Dans ce mode, la MADA est modélisée avec des tensions statoriques comme étant les grandeurs de sortie, ce qui permet le contrôle de leurs amplitudes et fréquences. Ce contrôle est effectué sous des contraintes de variation des vitesses du vent et de demande de puissance de la charge isolée.

Le modèle établi dans le repère (d,q) est orienté de la même manière que pour le premier cas de connexion au réseau électrique, c'est à dire en orientant l'axe d suivant le flux statorique[121],[123].

III.3.1 Equations liants les tensions rotoriques avec les flux rotoriques

A partir des équations des flux rotoriques données par (II.12), on écrit les expressions des courants rotoriques[121],[124]:

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{L_r} - \frac{M}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 1})$$

En les remplaçant dans les équations des tensions rotoriques (II.19), on obtient:

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{R_r}{L_r} (\varphi_{dr} - M i_{ds}) + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ v_{qr} = \frac{R_r}{L_r} (\varphi_{qr} - M i_{qs}) + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 2})$$

avec $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ (constante de temps électrique du circuit rotorique):

$$\begin{cases} v_{dr} = \frac{\varphi_{dr}}{T_r} - \frac{M}{T_r} i_{ds} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \varphi_{qr} \\ v_{qr} = \frac{\varphi_{qr}}{T_r} - \frac{M}{T_r} i_{qs} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 3})$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -\frac{\varphi_{dr}}{T_r} + v_{dr} + E_d \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -\frac{\varphi_{qr}}{T_r} + v_{qr} + E_q \end{cases} \quad (\text{III. 4})$$

Où E_d et E_q sont les f.m.m représentant les termes de couplage entre les deux axes, ils sont donnés par :

$$\begin{cases} E_d = \frac{M}{T_r} i_{ds} + \omega_r \varphi_{qr} \\ E_q = \frac{M}{T_r} i_{qs} - \omega_r \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

III.3.2 Equations liants les tensions rotoriques avec les flux rotoriques

Afin d'exprimer les tensions statoriques en fonction des flux rotoriques, nous simplifions les équations (II.12) et (II.39) établies dans le chapitre précédant, on obtient [122],[125].

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} - M i_{ds}) \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + \frac{M}{L_r} (\varphi_{qr} - M i_{qs}) \end{cases} \quad (\text{III. 6})$$

Qui peuvent encore s'écrire en fonction du coefficient de dispersion $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} + L_s \sigma i_{ds} \\ \varphi_{qs} = \frac{M}{L_r} \varphi_{qr} + L_s \sigma i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 7})$$

Pour l'hypothèse d'un flux statorique constant, les tensions statoriques données par (III.6) se réduisent au système d'équations :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

En remplaçant φ_{sd} et φ_{sq} par leurs formules données par (III.6), on trouve v_{ds} et v_{qs} :

$$\begin{cases} v_{ds} = -\omega_s \frac{M}{L_r} (\varphi_{qr} + A_d) \\ v_{qs} = +\omega_s \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} + A_q) \end{cases} \quad (\text{III. 9})$$

Où A_d et A_q sont des termes qui dépendent des courants statoriques i_{ds} et i_{qs} , ils représentent la perturbation due à la charge.

$$\begin{cases} A_d = \frac{L_r}{M} (L_s \sigma i_{qs} - \frac{R_s}{\omega_s} i_{ds}) \\ A_q = \frac{L_r}{M} (L_s \sigma i_{ds} + \frac{R_s}{\omega_s} i_{qs}) \end{cases} \quad (\text{III. 10})$$

Les deux systèmes d'équations (III.3) et (III.4) permettent d'obtenir le modèle interne de la MADA en mode îloté, ayant comme entrées les tensions rotoriques et comme sorties les tensions statoriques (cf. Figure III. 2)[121].

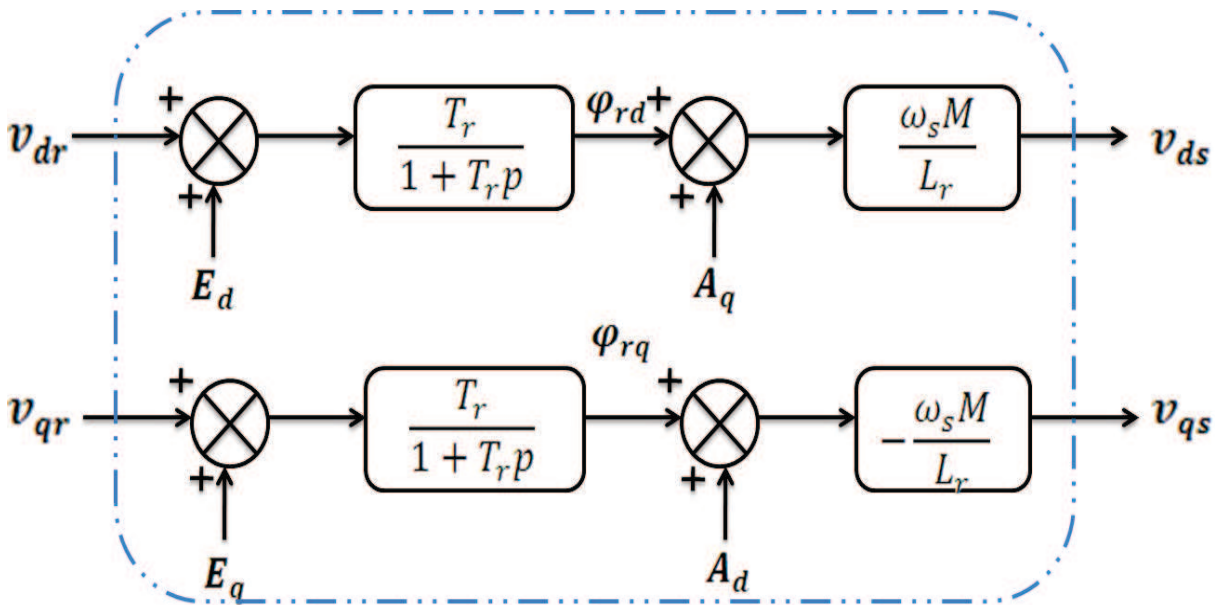


Figure III. 2: Modèle interne de la MADA dans le mode îloté[121]

III.4 Commande de la MADA en mode îloté

En se basant sur le modèle interne de la MADA en mode isolé, on constate que la structure de commande de cette dernière doit être composée de deux boucles de régulation [121],[124].

III.4.1 Boucles internes de régulation des flux rotoriques

D'après le modèle interne de la MADA en mode isolé, on remarque que les tensions et les flux rotoriques sont liés par une fonction de transfert du premier ordre avec des coefficients de couplage E_d et E_q . De ce fait, il est possible de contrôler séparément les deux axes d et q avec leurs propres régulateurs, après compensation des termes de couplage comme indiqué par la Figure III. 2.

III.4.2 Boucle externe de régulation de la tension statorique

Ce même modèle montre que la fonction de transfert, liant la tension statorique au flux rotorique, est un simple gain à un terme de perturbation qu'on peut compenser. Ainsi, un simple intégrateur est utilisé pour annuler l'erreur statique entre la valeur mesurée et la valeur de référence imposée de la tension statorique[123].

Figure III. 3, illustre le schéma bloc de régulation d'amplitude de tension statorique.

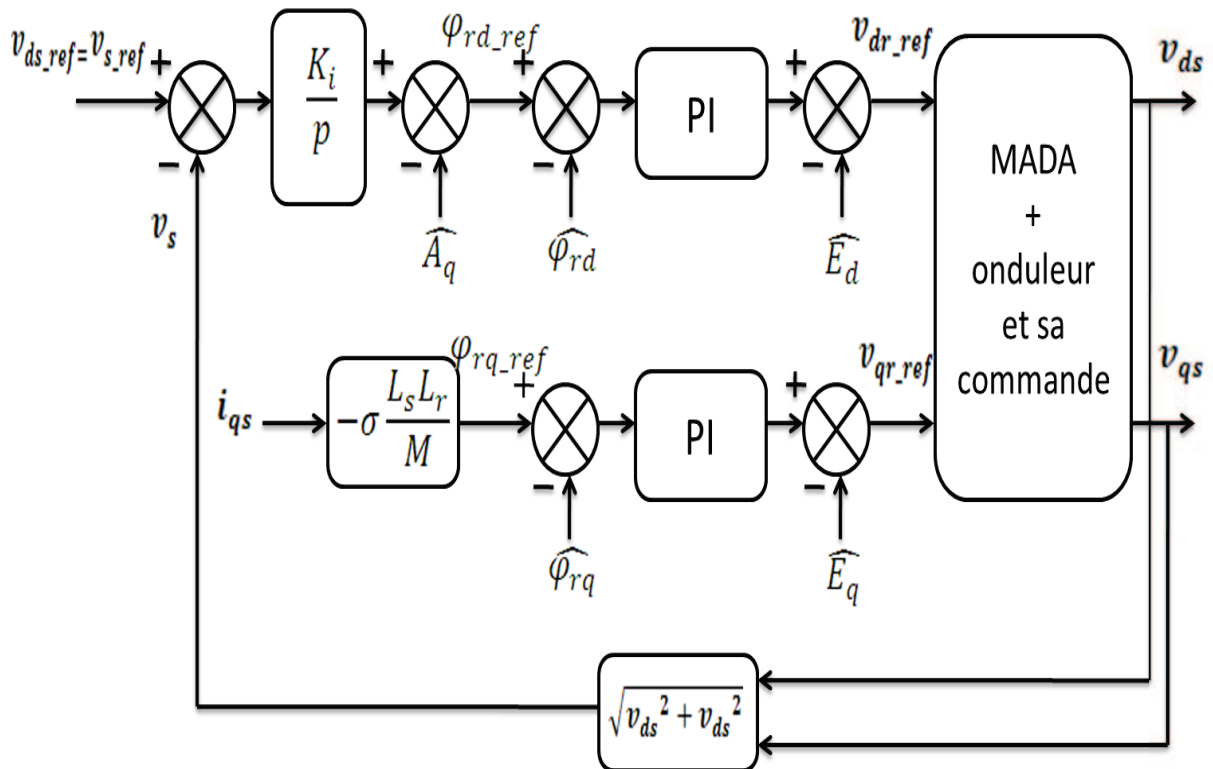


Figure III. 3: Schéma bloc global de la commande de la MADA en mode îloté[121].

III.5 Modèle de la machine synchrone à aimants permanents

Les machines à aimants permanents et à commutation électronique ont connu, ces derniers 25 années, des progrès continus et une pénétration croissante de nouveaux domaines, particulièrement dans les machines-outils et la robotique ainsi que la majorité des nouveaux actionneurs pour l'informatique et les génératrices autonomes [126],[127]. Plusieurs qualités spécifiques contribuent au succès des MSAP, comme l'absence de contacts glissants. L'utilisation des aimants permanents permettent d'obtenir une très grande variété de structures par le jeu d'implantation varié des aimants (en surface ou enterrés, rotor intérieur ou extérieurs, ...etc.)[126]. La construction de la machine synchrone à aimants permanents est identique à celle de la machine synchrone classique. La seule différence réside dans l'enroulement inducteur, qui est remplacé par des aimants disposés à la surface du rotor. Ainsi, elle ne possède plus de système ballais-collecteurs, ce qui améliore la maintenance et l'entretien de la machine[128].

L'objectif principal de l'utilisation de la MSAP est de magnétiser la MADA via le rotor et d'assurer le réglage de la tension du bus continu, en utilisant le convertisseur MLI branché au stator de la MSAP[125].

Le modèle de la MSAP dans le repère (d,q) est décrit par les équations suivantes où E_{md} et E_{mq} sont les termes de couplage [19],[68].

$$\begin{cases} v_{md} = R_{ms}i_{md} + L_d \frac{di_{md}}{dt} - E_d \\ v_{mq} = R_{ms}i_{mq} + L_q \frac{di_{mq}}{dt} - E_q \end{cases} \quad (\text{III. 11})$$

$$\begin{cases} E_{md} = \omega L_q i_{mq} \\ E_{mq} = -\omega L_d i_{md} - \omega \phi_f \end{cases} \quad (\text{III. 12})$$

Avec : v_{md}, v_{mq} : Les composantes directe et en quadrature de la tension.

i_{md}, i_{mq} : Les composantes directe et en quadrature des courants.

L_d, L_q : Inductances directe et en quadrature.

R_{ms} : La résistance des enroulements statoriques.

ϕ_f : Le flux de l'aimant permanent.

III.6 Commande de la MSAP

De deux boucles de régulation en cascade sont utilisées pour conserver la tension du bus continu constante, indépendamment de la puissance du rotor de la MADA, en utilisant la puissance délivrée par la MSAP et contrôlée par le convertisseur MLI[121],[125].

- Boucle interne de régulation du courant de la MSAP
- Boucle externe de régulation de la tension du bus continu.

La fonction de transfert entre les courants du stator et les tensions de la MSAP peut être contrôlée par un régulateur PI, voir la [Figure III.4](#).

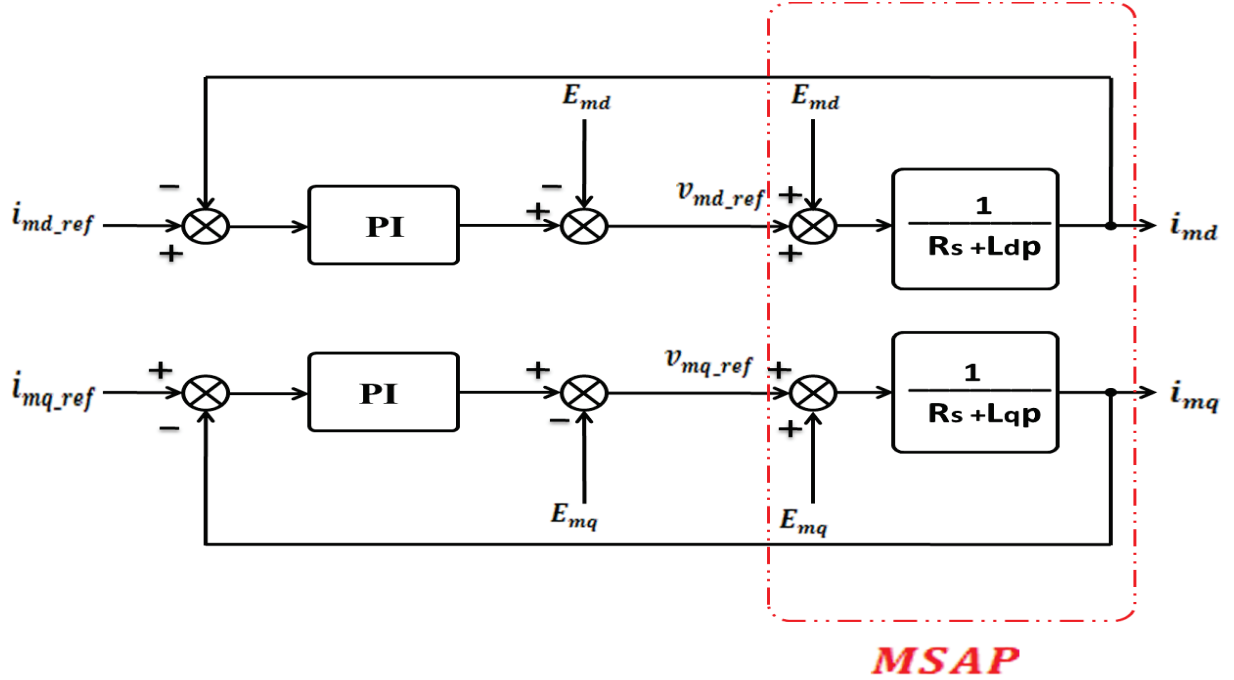


Figure III.4 : Boucle de régulation interne du courant de la MSAP[122]

En régime permanent, en négligeant les termes comportant la résistance statorique, les expressions des tensions (III.9) peuvent s'écrire:

$$\begin{cases} v_{md} = -E_{md} = -\omega L_q i_{mq} \\ v_{mq} = -E_{md} = \omega L_d i_{md} + \omega \phi_f \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

On suppose que le modèle du convertisseur MLI connecté au stator de la MSAP est idéal (en négligeant les pertes)

$$P = v_{md} i_{md} + v_{mq} i_{mq} = v_{dc} i_{dc} \quad (\text{III. 14})$$

i_{dc} : le courant à la sortie du redresseur.

En remplaçant v_{md} et v_{mq} données par (III.10) dans la relation (III.11), en supposant que la machine est à pôles lisses ($L_d = L_q$) :

$$i_{mq} = \frac{P}{\omega \phi_f} \quad (\text{III. 15})$$

$$v_{md} = \frac{L_q P}{\phi_f} \quad (\text{III. 16})$$

D'après (III.13) et (III.14) V_d et i_q dépendent de la puissance active P demandée par le rotor de la MADA. La stratégie de commande utilisée consiste à avoir le maximum de puissance pour un minimum de courant, ce qui justifie le choix $i_{md_ref} = 0$.

La boucle externe de régulation de la tension est donnée par la Figure III. 5 où i_{mac} est le courant demandé par le convertisseur coté rotor de la MADA.

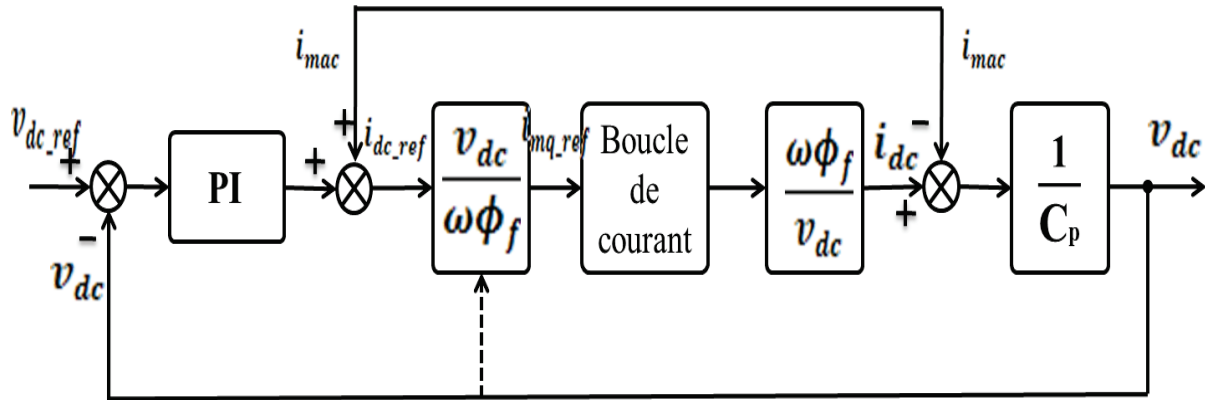


Figure III. 5: Boucle de régulation externe de la tension continue[121].

III.7 Intégration du système de stockage électrochimique dans le système éolien en mode îloté

Le problème majeur dans un système éolien en mode isolé est de pouvoir assurer l'autonomie des consommateurs, malgré les impondérabilités des générateurs d'énergie. Pour ce faire, l'énergie primaire choisie doit être en quantité suffisante pour couvrir les besoins, à proximité des bâtiments, et limiter les pertes en ligne. Pour les sources ayant une production irrégulière et stochastique et un système n'ayant pas, dans ce cas, suffisamment de charges pour lisser la demande ou la coupler, les unités de stockage sont obligatoires pour servir de réserve tampon entre les puissances produites et demandées[68],[129],[130]. Depuis la technologie de stockage dominante utilisée dans les applications de production en site isolé d'énergie d'origine renouvelable est la technologie Plomb-Acide, qui grâce à sa maturité technologique est plus compétitive[131]. Toutefois, diverses limites freinent le développement de tels systèmes : la durée de vie, le recyclage en fin de vie, l'impact sur l'environnement, le coût, le rendement de stockage et de restitution de l'énergie[132],[133]. Actuellement, la technologie Li-ion est envisagée comme solution crédible pour les applications énergétiques autonomes, en raison des gains substantiels en terme de rendement et de durée de vie[131],[134]. Cette technologie s'accapare plus de 70% du marché mondial actuel dans les domaines de construction des accumulateurs portables et une bonne partie de véhicules électriques et hybrides. Elle possède des caractéristiques et un potentiel d'amélioration important pouvant servir au développement de nouveaux systèmes de production notamment les systèmes photovoltaïques et éoliens[132].

L'objectif de ce travail, est l'intégration du système de stockage à base des batteries Li-ion pour la gestion des transits de puissance. Ceci permet d'obtenir une puissance générée sur le réseau isolé égale à la référence de puissance demandée par la charge avec une amplitude et

une fréquence des tensions du réseau constantes, quel que soit la vitesse du vent. Le système éolien basé sur la MADA et la MSAP doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a pas ou peu de vent. Il est nécessaire qu'une partie de la production de la journée (surproduction de puissance éolienne) soit stockée dans des batteries Li-ion. Pour atteindre cet objectif, le principe du fonctionnement à puissance lissée est utilisé et développé pour la gestion de l'énergie éolienne en mode connecté au réseau électrique. L'évolution des trois puissances (éolienne, du réseau isolé et de la batterie), utilisant le contrôle de lissage de puissance par un système de stockage électrochimique sont illustrées par la [Figure III. 6](#).

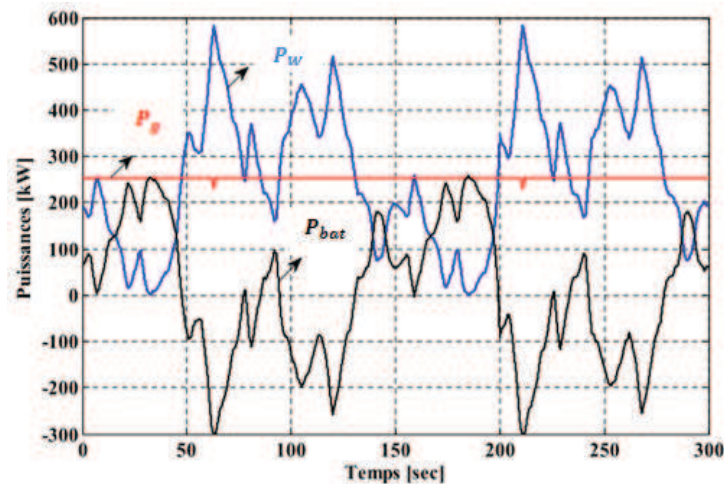


Figure III. 6 : Principe du fonctionnement à puissance lissée[19].

III.8 Résultats de simulation

L'ensemble du système éolien à vitesse variable en mode îloté et sa commande ont été simulés sous MATLAB 7.5 – SIMULINK. Les paramètres, de la MADA de puissance 7.5KW et de la MSAP de 5.1KW, sont donnés en annexe B. Les résultats obtenus, de la commande du système éolien en mode autonome et du contrôle de système de stockage électrochimique à base des batteries Li-ion dont les paramètres se trouvant dans le [Tableau.II.1](#), sont présentés.

III.8.1 Validation de la commande du système éolien en mode îloté

Pour valider le modèle choisi du système éolien en mode isolé et sa commande, l'ensemble est schématisé par la [Figure III. 7](#). La simulation de ce système éolien est faite en respectant les conditions suivantes :

- Les deux machines (MADA et MSAP) sont entraînées à une vitesse mécanique dont l'allure est donnée par la [Figure III. 8 \(a\)](#) ;
- La référence de la tension statorique est fixée à une amplitude efficace de 220V et fréquence de 50Hz;
- Le système débite sur une charge résistive pure de 150 Ω par phase jusqu'à $t = 5s$, entre $t = 5$ et 14s la charge est égale 200 Ω ;
- à l'instant $t=14s$, une charge inductive (résistance 150 Ω en série et inductance 20mH) est appliquée;

- La fréquence de porteuse utilisé pour la commande MLI $f_p=3$ KHz et l'amplitude $A_p=150V$ pour le convertisseur côté rotor et $f_p=3KHz$, $A_p=100V$ pour le convertisseur côté MSAP;
- La capacité est initialement chargée d'une valeur de $V_{dc}=200V$;
- La référence de tension du bus continu est $V_{dc_ref}=600V$.

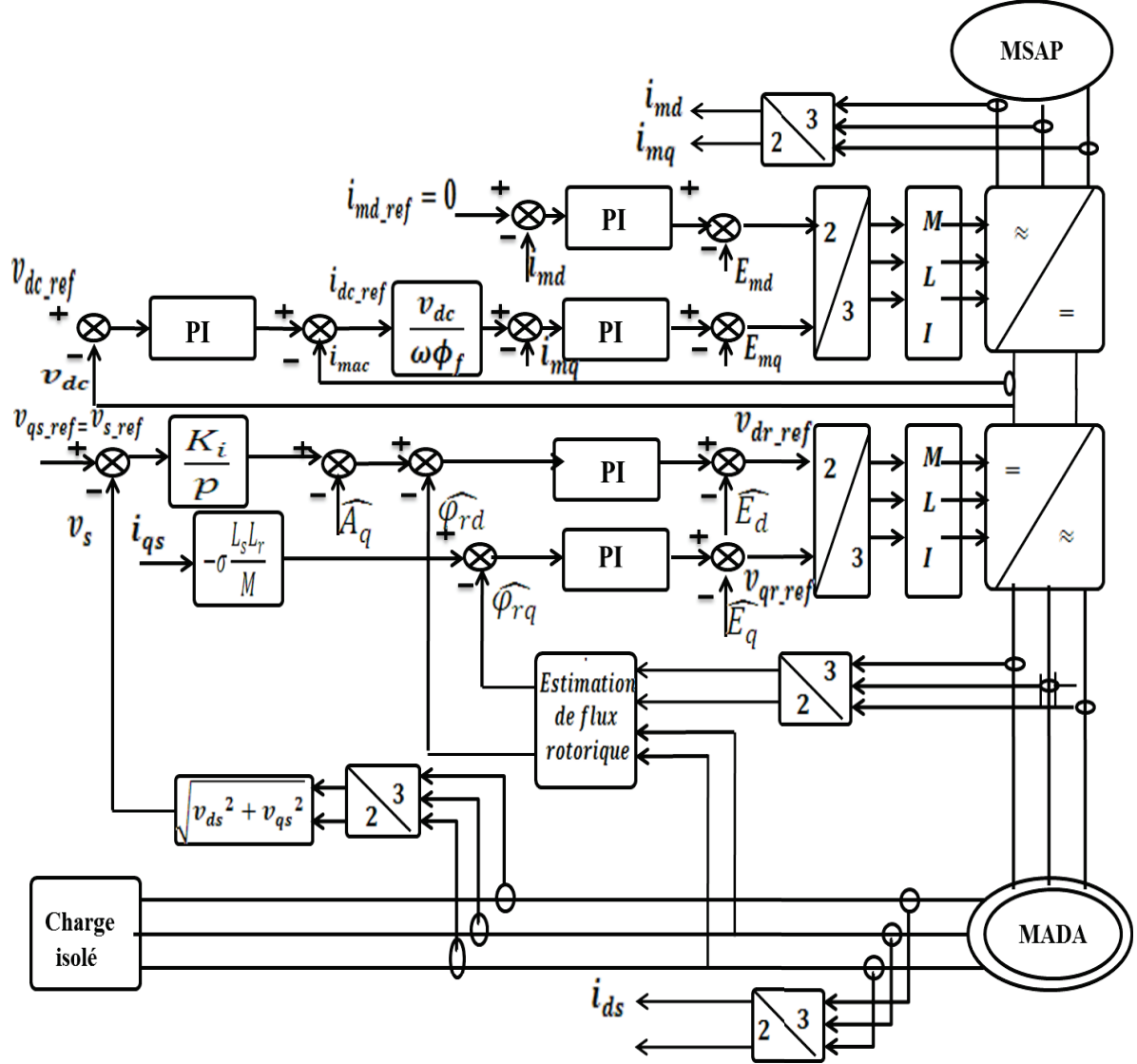


Figure III. 7 : Schéma bloc global du système et de sa commande[123].

La MADA est entraînée à une vitesse mécanique donnée par la Figure III. 8 (a) pour les régimes hyper et hyposynchrone. Il est clair, que les tensions statoriques directe et en quadrature (cf. Figure III. 8 (b)) suivent les références imposées même lors de la variation de la vitesse d'entraînement et de charge isolée ($V_{sq} = 220 \cdot \sqrt{2}$ & $V_{sd} = 0$). Ceci confirme la robustesse et les bonnes performances de la stratégie de commande de la MADA en mode îloté ce qui permet de garder l'amplitude et la fréquence de tension de réseau isolé constante durant la variation de la vitesse du vent.

La Figure III. 9, montre que l'amplitude des tensions rotoriques diminue avec la diminution de la valeur absolue du glissement, selon la relation $V_r = mgV_s$ avec m : rapport de transformation de la machine. Sur la même figure, on observe que la fréquence des tensions

rotoriques varie selon la relation $f_r = g f_s$. La valeur de la fréquence tend à s'annuler lorsque la vitesse mécanique s'approche de celle du synchronisme (1500tr/mn).

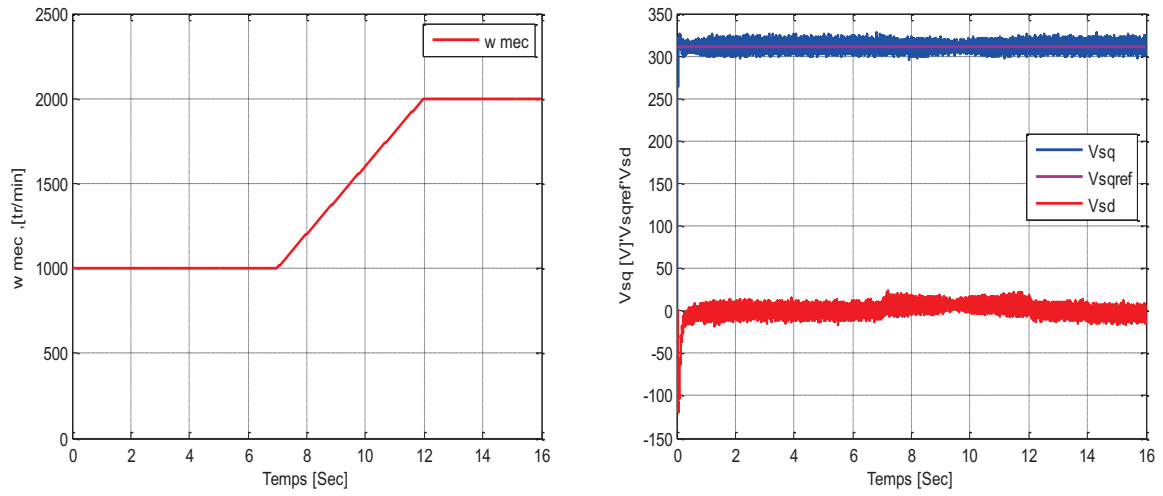


Figure III. 8 : Vitesse mécanique d'entraînement (a). Tensions V_{sd} et V_{sq} (b)

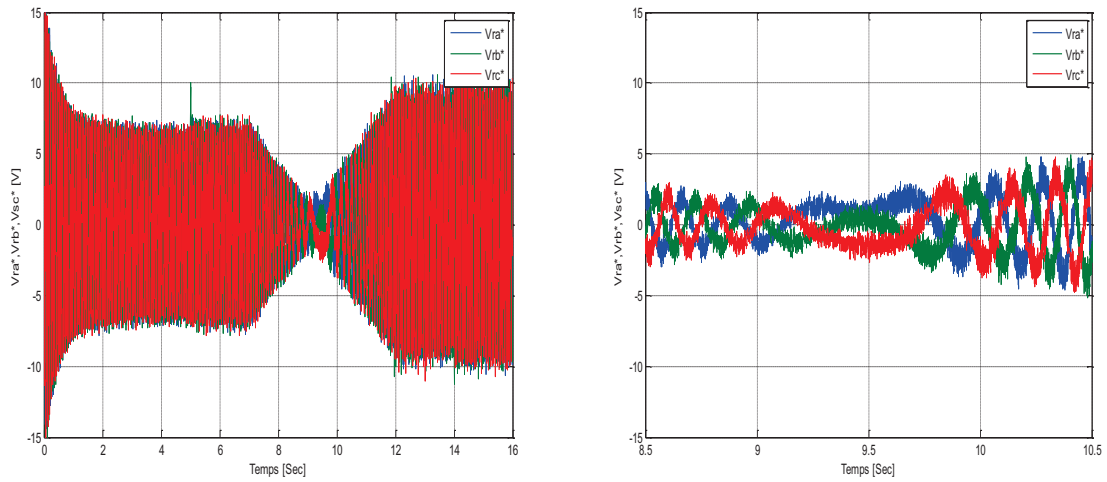


Figure III. 9 : Tensions rotoriques

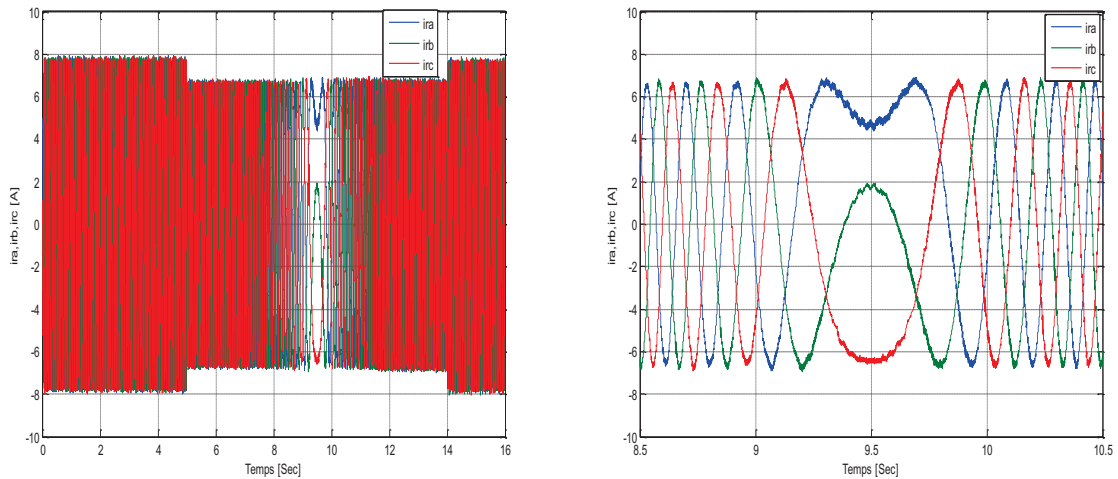


Figure III. 10 : Courants rotoriques

La Figure III. 10, illustre l'évolution des courants rotoriques pendant la durée de fonctionnement. L'amplitude des courants rotoriques n'est influencée que par la variation de la charge et sa fréquence varie en fonction de la vitesse mécanique. Cet effet est distingué lors du passage par la vitesse de synchronisme, où on note le changement de phase des courants rotoriques.

La Figure III. 11, représente l'évolution de tension de la première phase statorique et de son courant ($\times 100$). Sur cette figure, l'amplitude de la tension statorique est fixée à $220V_{\text{eff}}/50\text{Hz}$, dans les trois zones de la vitesse (synchronisme, en au-dessous et en au-dessus du synchronisme). L'amplitude du courant statorique évolue avec la variation de la charge isolée.

Pour la commande de la MSAP en mode îloté, la Figure III. 12 (a) illustre l'évolution des puissances active et réactive délivrée par la machine durant toute la durée de fonctionnement. La tension du bus continu et sa référence sont représentées sur la Figure III. 12 (b). On remarque que après la phase transitoire, la tension du bus continu suit bien sa référence $V_{dc_ref} = 600V$ durant les régimes hyper et hypo synchrone de la MADA et même lors de la variation de charge. Ceci est dû au bon contrôle des composantes en quadrature et directe du courant de la MSAP (cf. Figure III. 13).

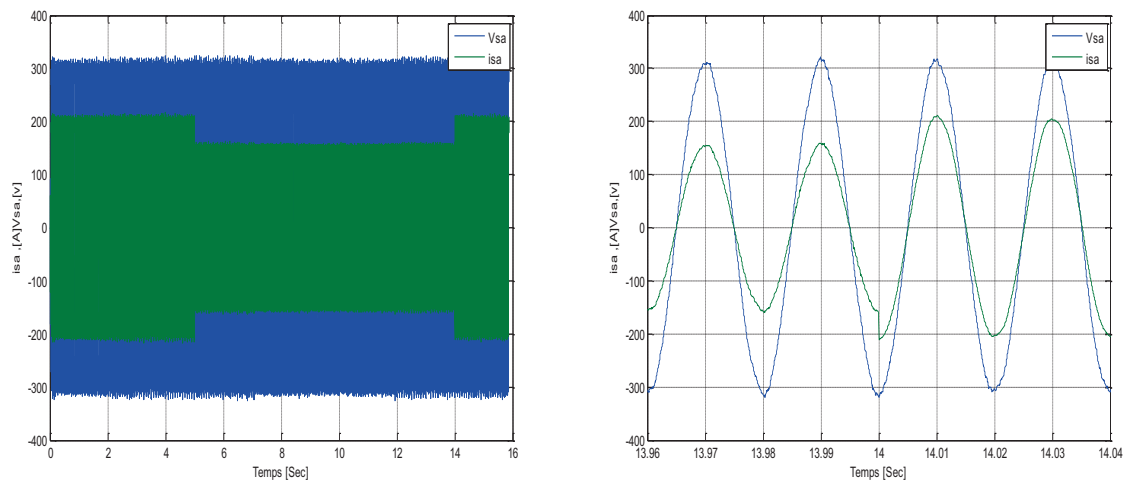


Figure III. 11 : Tension et courant ($i_{sa} \times 100$) statorique

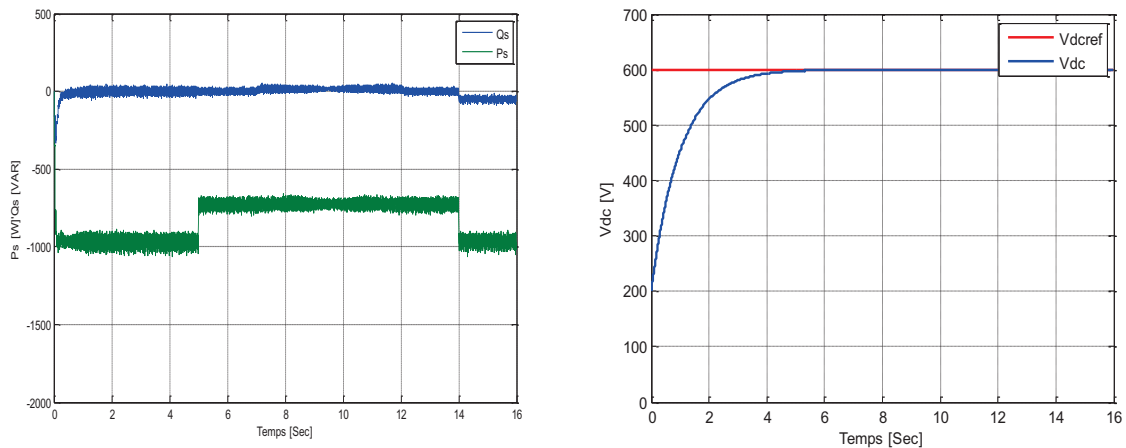


Figure III. 12 : Puissances statoriques active et réactive (a). Tension du bus continu (b)

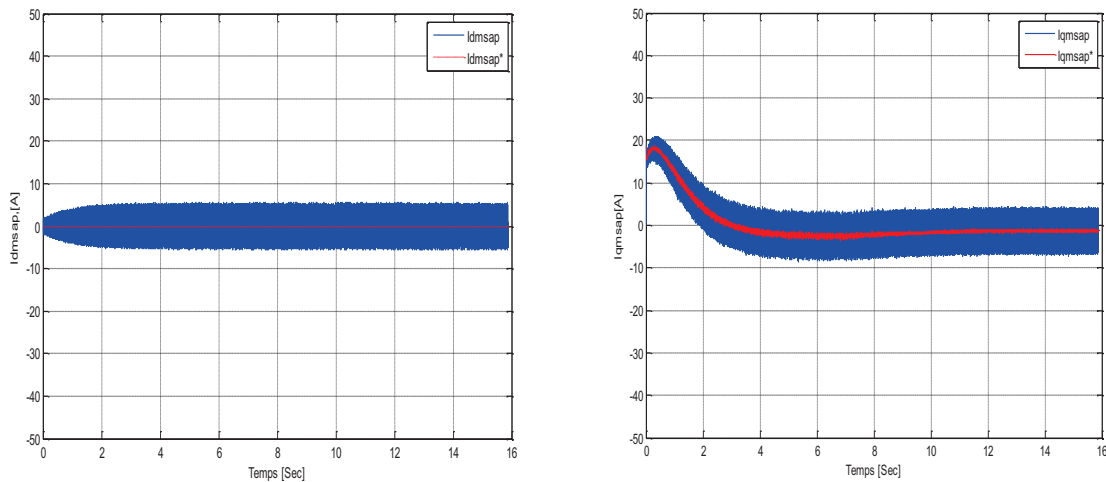


Figure III. 13 : Courant I_{sd} de la MSAP (a). Courant I_{sq} de la MSAP (b)

III.8.2 Validation du contrôle du système de stockage

Les résultats de simulation, correspondant à l'intégration des batteries Li-ion dans le système éolien en mode îloté, sont présentés.

La Figure III. 14 (a), représente l'allure de la vitesse mécanique de la MADA avec une transition du régime hyper-synchrone au régime hypo-synchrone et inversement.

La Figure III. 14 (b), montre que l'amplitude de la composante, en quadrature des tensions statoriques, suit bien sa référence ($V_{sq} = 220 \cdot \sqrt{2}$) durant toute la durée de fonctionnement même lors de la variation de la vitesse d'entraînement. La composante directe est toujours nulle, cela explique par le fait que la commande vectorielle utilisée dans ce mode de fonctionnement est basé sur le principe de flux statorique orienté et que la charge connectée au stator de la MADA est purement résistive (pas de demande de puissance réactive).

La Figure III. 15(b), montre que la tension statorique est fixée à une valeur efficace de 220 V et une fréquence de 50Hz même lors de la variation de la vitesse d'entraînement. La puissance délivrée par le système éolien et celle de la charge isolée connectée au stator de la MADA sont illustrées sur la Figure III. 15 (b). Le système éolien ne peut pas assurer la demande de puissance de la charge durant toute la durée de fonctionnement. C'est pourquoi la puissance produite durant les périodes de faible consommation par le système éolien doit être stockée dans les batteries Li-ion pour être restituée ensuite pendant les périodes où le vent sera plus faible (cf. Figure III. 16 (a)).

L'évolution de la tension des batteries Li-ion durant toute la durée de fonctionnement est présentée sur la Figure III. 16 (b). On constate l'augmentation de la tension des batteries (charge) durant la phase de stockage de puissance éolienne délivrée et la diminution de la tension des batteries pendant la phase (décharge) où le système de stockage compense le manque de production de puissance éolienne.

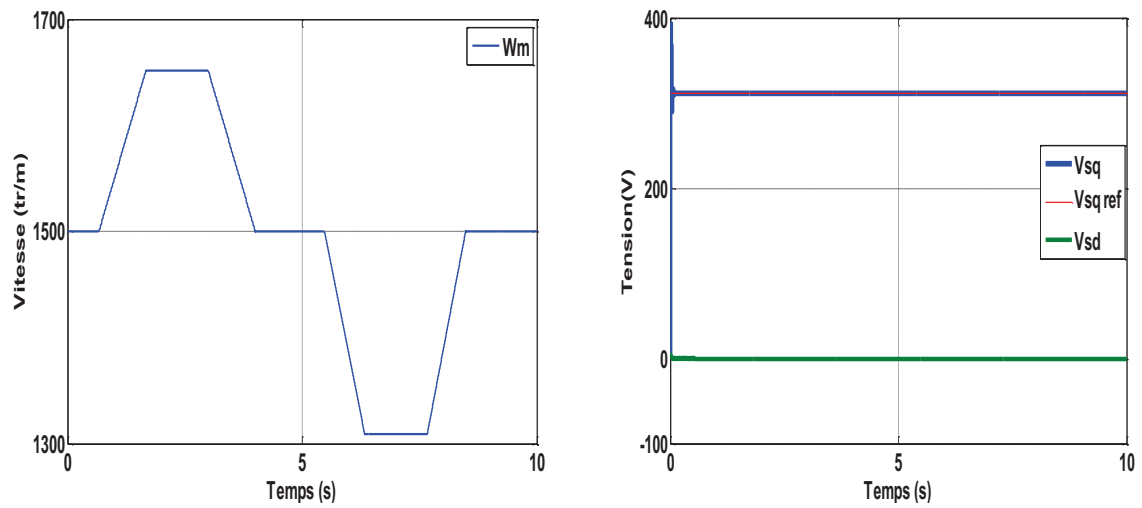


Figure III. 14: Vitesse mécanique d'entraînement (avec des batteries) (a). Tensions V_{sd} et V_{sq} (b)

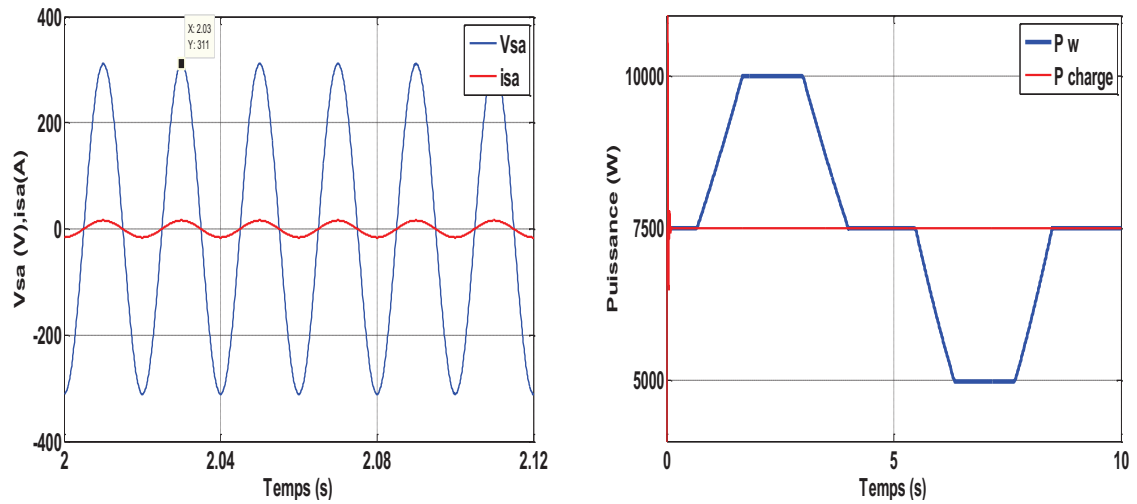


Figure III. 15 : Tension et courant statorique (a).Puissance active d'éolienne et de charge(b).

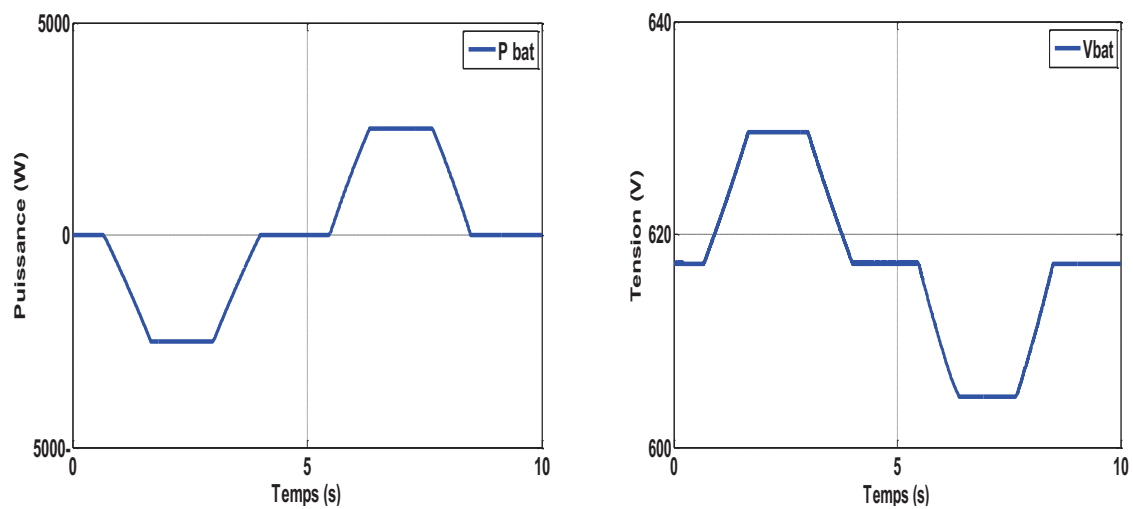


Figure III. 16 : Puissance de batterie (a). Tension de batterie (b)

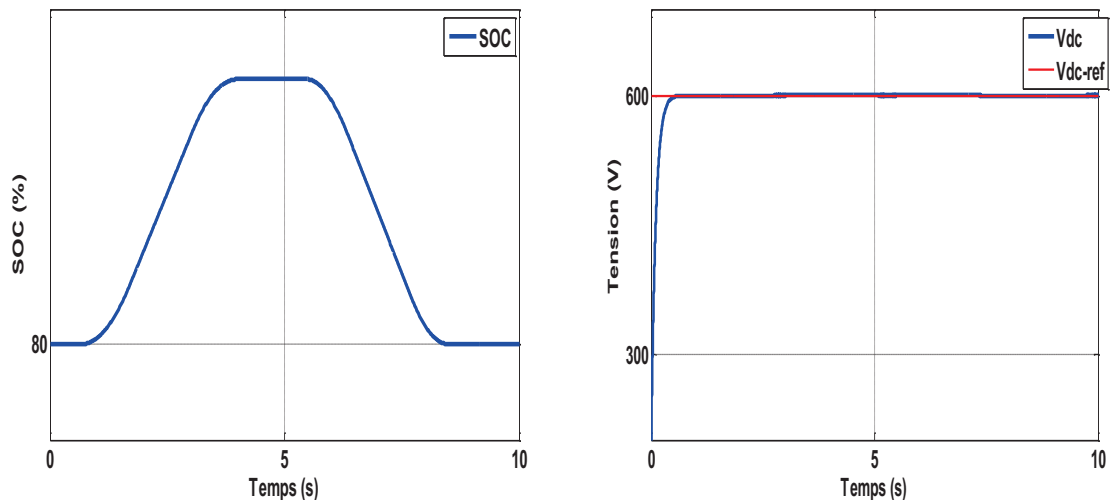


Figure III. 17 : Etat de charge de batterie (SOC) (a). Tension du bus continu (b).

La Figure III. 17 (a), illustre l'évolution de l'état de charge de la batterie (SOC) durant la durée de fonctionnement du système éolien. La première phase correspond à la charge de batterie suivie par une période de courant nul (repos). Puis une phase de décharge qui correspond à l'utilisation des batteries pour assurer la demande de puissance de la charge isolée. La Figure III. 17 (b), montre que la tension du bus continu est bien réglée via la commande vectorielle de la MSAP à une valeur de référence $V_{dc_ref} = 600V$.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, un système éolien utilisant deux machines électriques (MADA & MSAP) et couplé avec des batteries Li-ion pour une alimentation totalement autonome a été présenté. La modélisation des deux génératrices MADA et MSAP, dans un système en mode isolé, a été effectuée. La commande vectorielle à flux orienté de MADA, dont l'objectif de contrôler l'amplitude et la fréquence des tensions statoriques, a été développée. Puis, la commande vectorielle de la MSAP a été établie, afin d'assurer le réglage de la tension du bus continu durant la durée de fonctionnement du système éolien. Enfin, des résultats de la simulation de la commande vectorielle de la MADA et de MSAP, dans le système éolien en mode îloté, et de l'intégration des batteries Li-ion ont été présentés pour valider les performances de système proposé.

L'amélioration de la qualité de l'énergie électrique via un système éolien à base de la MADA et des batteries Li-ion fera l'objet du chapitre suivant. Afin, de compenser les harmoniques produits par une charge non linéaire polluante ou déséquilibrée, trois structures du système hybride éolien-filtre actif sont proposées.

CHAPITRE IV

Filtrage actif par un système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation

IV.1 Introduction

Ces dernières années, la prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques (les redresseurs à diodes et à thyristors et les gradateurs) , a entraîné une augmentation régulière du niveau de pollution harmonique du réseau électrique, des déséquilibres de courants et une importante consommation de la puissance réactive[135],[136]. Ainsi, les réseaux électriques fonctionnent sous un environnement de plus en plus agressif. Ils subissent de nombreuses perturbations, qui peuvent être d'origine interne comme les perturbations sur l'amplitude ou les valeurs efficaces et les déséquilibres des systèmes triphasés, les distorsions harmoniques[137],[138].

Les conséquences de ces perturbations sont néfastes tant pour le distributeur de l'électricité (augmentation des pertes dans les lignes, réduction de la capacité de transport, vieillissement rapide de certains éléments constituant le réseau, interférence avec les signaux de commande...etc.) que pour l'utilisateur (dysfonctionnement, détérioration du rendement, vieillissement rapide de l'équipement alimenté... etc.)[138]. Plusieurs solutions sont proposées pour résoudre le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution. Parmi ces solutions, l'utilisation de filtres passif, de redresseurs à MLI, de filtres actifs[91]. Toutefois, l'efficacité et la souplesse du filtrage actif qu'est auto-adaptatif, répond le mieux aux contraintes industrielles et ne nécessite pas la connaissance à priori des caractéristiques du réseau et de la charge. Ceci rend leur utilisation, de plus en plus importante, surtout dans les industries développées [135],[138].

Dans ce chapitre, l'intégration du filtrage actif dans le système de conversion d'énergie éolienne à base de la MADA, afin de compenser les courants harmoniques produits par des charges non linéaires sur le réseau électrique, est étudiée. La méthode d'identification des courants harmoniques et les configurations du filtrage actif par le système éolien et leurs commandes hybrides sont développées. Des simulations sont effectuées sous différentes conditions pour valider le fonctionnement hybride (filtre actif, éolienne) avec les trois configurations proposées.

IV.2 Filtrage actif par le système éolien

Le réseau électrique doit fournir aux clients l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tension sinusoïdale, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies[139]. Pour ce faire, il est nécessaire de diminuer la pollution harmonique diffusée dans le réseau électrique, afin qu'elle se propage le moins possible, et ainsi assurer une meilleure qualité de services. Dans ce contexte, les avantages du système éolien à base de la MADA, tel que la connexion au réseau de distribution, la cascade alimentant le rotor de la MADA, l'amplification de la puissance entre le rotor et le stator, sont exploités pour établir un fonctionnement hybride (filtre actif, éolienne)[85],[140]. Cependant, pour la mise en œuvre de ce système, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de trouver une méthode d'identification en mesure d'améliorer les performances du filtrage actif.

IV.2.1 Identifications des courants harmoniques par la méthode des puissances réelle et imaginaire

La méthode d'identification la plus utilisée est la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées[141]. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation[135],[142]. Pour ces raisons, cette méthode a été choisie pour l'identification des courants harmoniques générés par le convertisseur statique. En plus, elle est utilisée pour compenser le déséquilibre des courants et la puissance réactive absorbée par les charges non linéaires.

IV.2.1.1 Calcul des différentes composantes de tension et de courant

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées repose sur le calcul des composantes de Park (de courant). Elle nécessite l'utilisation de signaux sinusoïdaux générés par un système Phase Locked Loop (PLL).

Le calcul des composantes de Concordia permet après une rotation de l'angle θ donner les composantes de Park[136],[142].

Les composantes de Concordia :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.2})$$

Les composantes de Park :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.3})$$

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.4})$$

Puisque la puissance reste invariable dans le repère de Park, alors :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sd} & v_{sq} \\ v_{sq} & -v_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{cases} p = p_c + p_h \\ q = q_c + q_h \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

De l'équation (IV.4), nous pouvons déduire les composantes de courant :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{cd}^2 + v_{cq}^2} \begin{bmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

En séparant le courant, dans le repère (d, q) , en trois termes : actif, réactif à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques, on obtient :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q_c \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique produit par les charges non linéaire et le déséquilibre}} \quad (\text{IV. 8})$$

Avec : $\Delta = v_{cd}^2 + v_{cq}^2$

Suivant l'équation (IV.11) du filtre actif de puissance, on peut compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le Tableau IV.1 résume les modes de compensations possibles[143] :

Modes de Compensations	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$p_f = p_h$ $q_f = q_h$	$p_f = 0$ $q_f = q_c$	$p_f = p_h$ $q_f = q_c$

Tableau IV. 1: Calcul des courants harmoniques des références[137].

Pour la compensation, par exemple, des harmoniques de courant et de l'énergie réactive en même temps, les courants harmoniques i_{cdn} et i_{cqn} de référence sont obtenus par :

$$\begin{bmatrix} i_{cdn} \\ i_{cqn} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{sd} & -v_{sq} \\ v_{sq} & v_{sd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_h \\ q_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 9})$$

La méthode des puissances instantanées possède les caractéristiques suivantes[144]:

- C'est une théorie inhérente aux systèmes triphasés,
- Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmoniques),
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne un bons temps de réponse dynamique,

- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif,
- Une méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

Le schéma de la Figure IV. 1 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des courants de référence par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

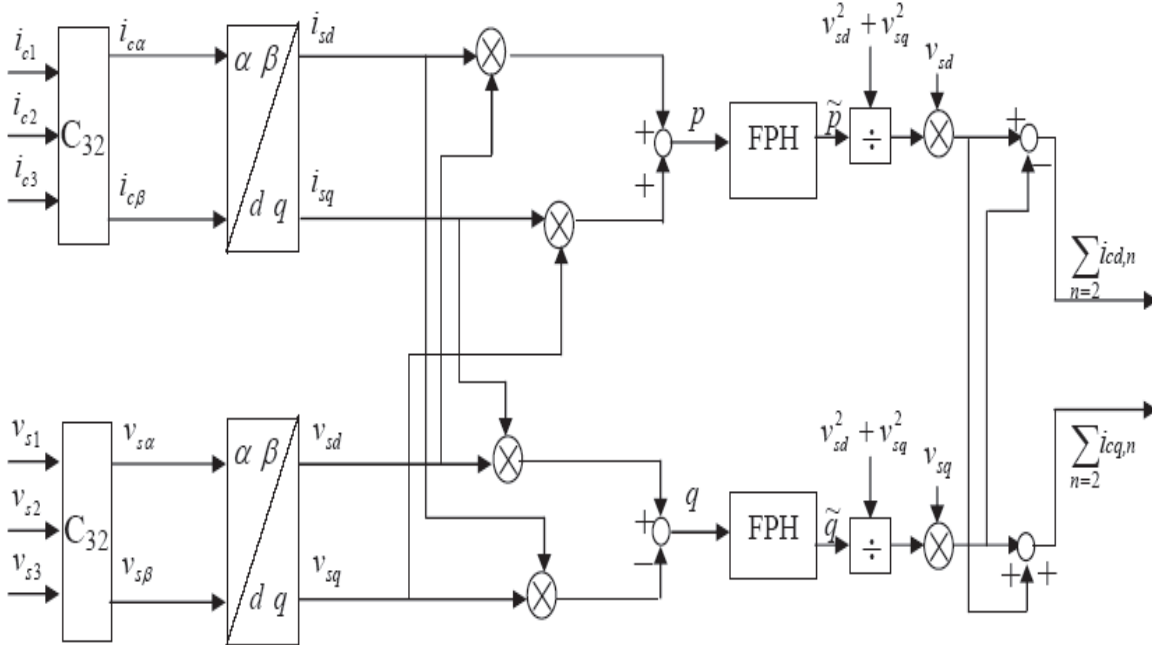


Figure IV. 1 : Méthode des puissances réelle et imaginaire en utilisant la transformation de Park[138]

IV.2.1.2 Modélisation de la charge polluante

Les équipements dotés de dispositifs de l'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cycloconvertisseurs de puissances unitaires importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tensions sont typiquement des sources harmoniques identifiables[136]. Dans ce travail, une charge polluante, type redresseur à thyristor absorbant un courant non sinusoïdal, est connectée aux points de raccordement de la charge au réseau PCC (Point of Common Coupling). Afin d'assurer l'injection de puissance éolienne convertie en énergie électrique dans le réseau, dans ce dernier est raccordé le système éolien à base de la MADA.

Pour fournir de l'énergie électrique de qualité acceptable, une combinaison entre la qualité de la tension et celle du courant, la modélisation de cette charge polluante, connectée au même réseau avec le système éolien, est indispensable. La charge polluante est modélisée comme étant des sources de courants parfaits (les semi-conducteurs étant considérés parfaits). Cette charge est un pont redresseur triphasé à thyristor qui génère les harmoniques et absorbe l'énergie réactive.

Le courant circulant dans la première phase est donné par l'équation suivante[145].

$$i_{c1}(t) = \begin{cases} +I_c & \text{si } 2k\pi + \alpha \leq \theta \leq \frac{\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \\ 0 & \text{si } \frac{\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \\ -I_c & \text{si } \frac{5\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{7\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \end{cases} \quad (\text{IV. 10})$$

$$\text{si } \frac{\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{5\pi}{6} + \alpha + 2k\pi$$

$$\text{et si } \frac{11\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{12\pi}{6} + \alpha + 2k\pi$$

$$\text{si } \frac{7\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \leq \theta \leq \frac{11\pi}{6} + \alpha + 2k\pi$$

Sachant que :

i_{c2} et i_{c3} sont décalés respectivement de 120° et de 240° par rapport à i_{c1}

α est l'angle d'amorçage

$$\theta = \omega t$$

IV.3 Filtrage actif par le convertisseur cote réseau

IV.3.1 Principe de fonctionnement

La MADA dans le système éolien est piloté par le rotor par l'intermédiaire d'une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux commandés en MLI [145]. Cependant, le convertisseur de puissance côté réseau a la même topologie que le filtre actif parallèle. Cet avantage est utilisé pour la mise en place d'une deuxième fonction du filtrage actif, ayant pour mission principale le réglage de la tension du bus continu[78]. Cette modification du fonctionnement concerne seulement la partie contrôle du système éolien à base de la MADA[85]. La structure hybride de système éolien avec le filtrage actif basé sur le convertisseur côté réseau est montrée par la [Figure IV. 2](#).

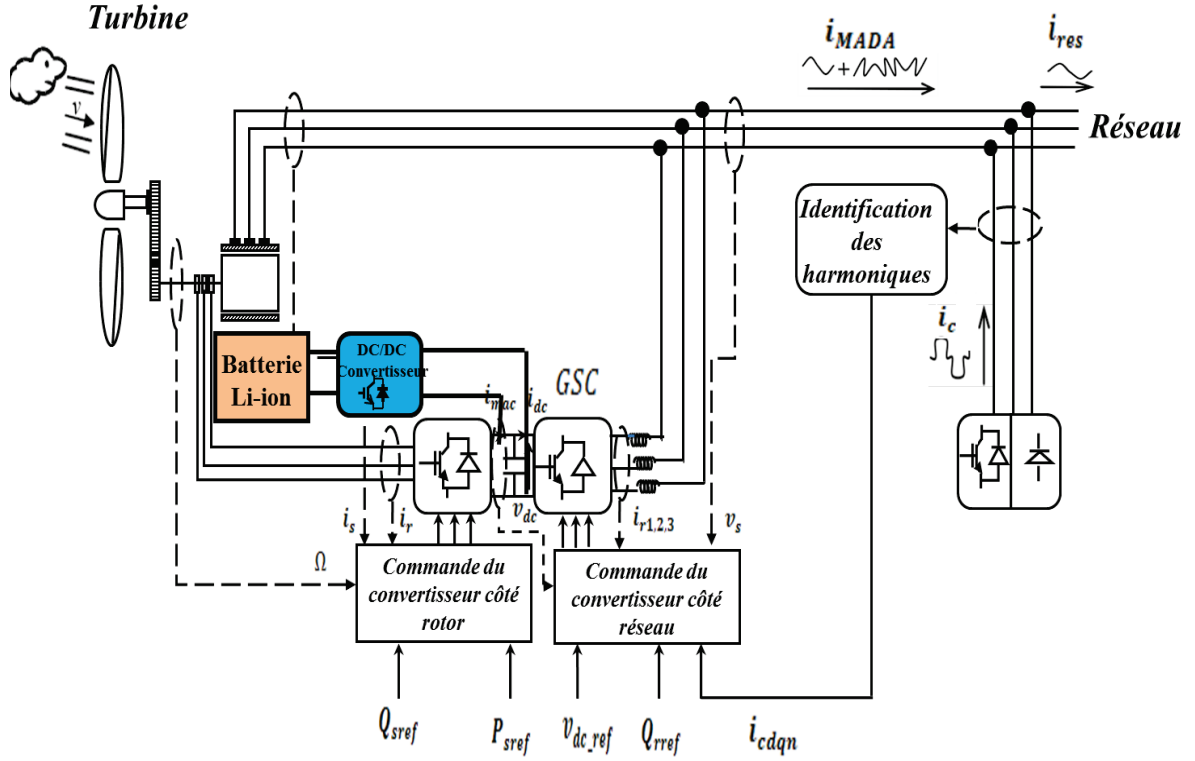


Figure IV. 2: Schéma de principe de filtrage actif par convertisseur côté réseau[85]

Une commande de ce système hybride est développée pour assurer, en plus du contrôle de la conversion de la puissance éolienne en énergie électrique, la fonction de filtrage actif pour dépolluer le réseau et améliorer la qualité de l'énergie électrique. Ainsi, le convertisseur côté réseau produit en plus des courants sinusoïdaux correspondant à la puissance que la MADA doit fournir via son rotor et pour maintenir la tension du bus continu constante, des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase de telle sorte que le courant de réseau i_{res} soit sinusoïdal.

IV.3.2 La commande en courant du convertisseur côté réseau dans le repère (d, q)

La structure de commande présentée sur la Figure IV. 3, montre que la régulation des courants dans le convertisseur côté réseau dans un système éolien à base de la MADA. Les boucles de courant s'effectuent sur les deux axes, direct et en quadrature, que l'on peut ajouter en repère tournant (d, q) , les courants harmoniques de référence obtenus par la méthode d'identification par une simple addition des courants[93],[78]. De ce fait, on peut contrôler les deux fonctions du système, la conversion de l'énergie éolienne et la compensation des courants harmoniques dans le réseau électrique.

Les équations permettant le contrôle du convertisseur côté réseau dans le repère tournant sont:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 11})$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{(V_d^2 + V_q^2)} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 12})$$

Les courants de référence sont déterminés, à partir des courants de référence du réseau et des courants harmoniques absorbés par la charge polluante par :

$$\begin{cases} i_{dtotal} = i_d + i_{cdnr} \\ i_{qtotal} = i_q + i_{cqnr} \end{cases} \quad (\text{IV. 13})$$

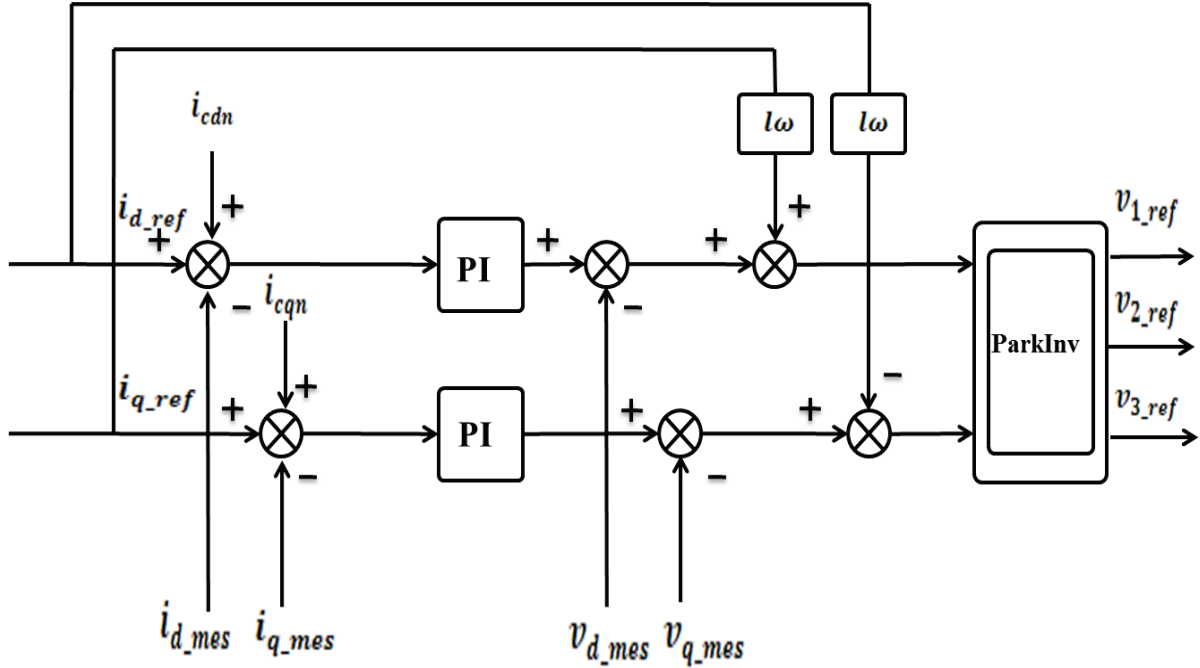


Figure IV. 3: Boucle de régulation des courants de réseau avec les références harmoniques[78].

IV.3.2.1 Résultats de simulation

A. Filtrage actif sans compensation de la puissance réactive

La simulation du système hybride éolien-filtre actif est effectuée avec les paramètres détaillés dans l'annexe A. La charge non linéaire est un redresseur triphasé à thyristors alimentant une charge R, L avec ($\alpha=30$). Les essais de simulation sont réalisés avec et sans compensation de la puissance réactive, sous les conditions suivantes :

- Charge du redresseur $R = 70\Omega$; $L = 500\text{mH}$
- à $t=1.3\text{ s}$ et $t=1.7\text{ s}$ échelon de puissance active (P_{sref} passe de -1000W à -0W) et (P_{sref} passe de 0W à -1000W).
- à $t=1\text{ s}$ et $t=1.6\text{ s}$ échelon de puissance réactive (Q_{sref} passe de -1000 VAR à 0VAR) et (Q_{sref} passe de -0VAR à -1000 VAR).
- La machine est entraînée à une vitesse fixe 500 tr/min .
- La tension de bus continu est fixée à $v_{dc}=600\text{V}$
- La fréquence de porteuse $f_p=5\text{ KHz}$ et l'amplitude $A_p=150\text{V}$ pour le convertisseur coté rotor et $f_p=5\text{ KHz}$, $A_p=350\text{V}$ pour le cas du convertisseur coté réseau.
- à $t=1.2$ l'application de filtrage actif.

La Figure IV. 4, illustre les résultats de simulation obtenus par le système hybride (éolien-filtre actif), en utilisant le convertisseur côté réseau, pour assurer la fonction filtrage active avec ses fonctions standards du contrôle de la tension du bus continu et l'échange de la puissance éolienne, via le rotor de la MADA.

La Figure IV. 4(a), montre la poursuite des consignes pour les puissances active et réactive statorique de la MADA, avant et après l'application du filtrage actif à ($t=1.2s$).

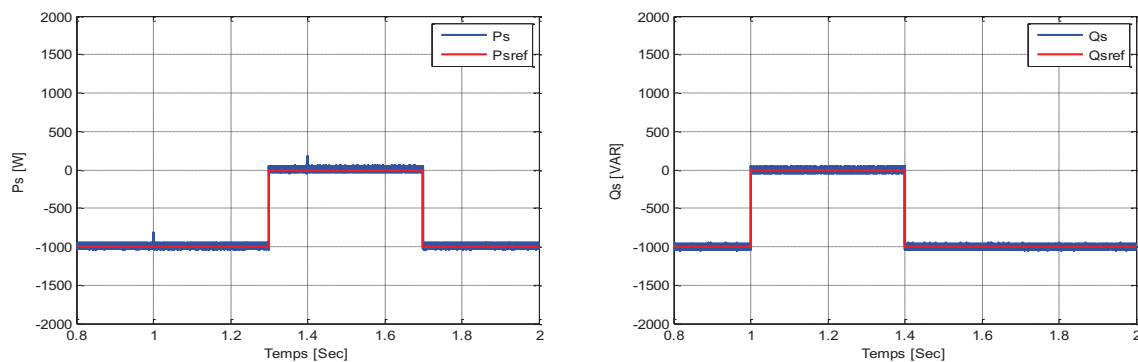
La Figure IV. 4(b), montre les deux courants de la première phase statorique et celle de la charge polluante. On distingue la déformation du courant de la charge non linéaire injecté dans le réseau électrique. En revanche, le courant statorique correspondant à la puissance active délivrée par la MADA est quasi sinusoïdale.

La Figure IV. 4(c), représente les deux courants du réseau et du convertisseur côté réseau avant et après l'application du filtrage actif à ($t=1.2s$). On observe l'amélioration de la qualité du courant du réseau après filtrage actif, donc les courants harmoniques sont compensés par le convertisseur côté réseau en assurant le réglage de la tension du bus continu.

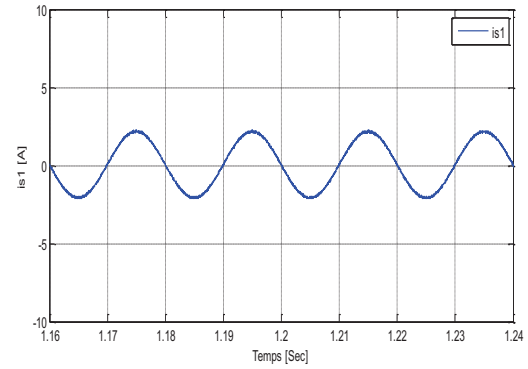
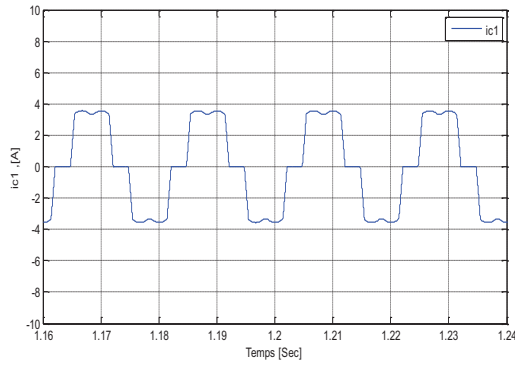
De la Figure IV. 4(d), on constate que le courant du convertisseur côté réseau suit bien sa référence dans le fonctionnement hybride (éolien-filtre actif). Sur cette figure on observe le déphasage (avance de phase) entre le courant et la tension du réseau, cela s'explique par le fait que la charge polluante (redresseur triphasé à thyristors) absorbe la puissance réactive et que le système hybride assure seulement la compensation des courants harmoniques.

La Figure IV. 4(e), montre la régulation de tension du bus continu à la valeur désirée $V_{dc_ref}=600V$. On constate sur cette figure une poursuite de la consigne pour la tension du bus continu avant et après l'application du filtrage actif avec de faibles ondulations dues à l'ordre des courants harmoniques compensés.

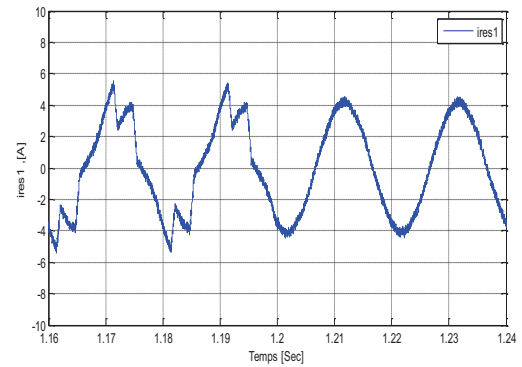
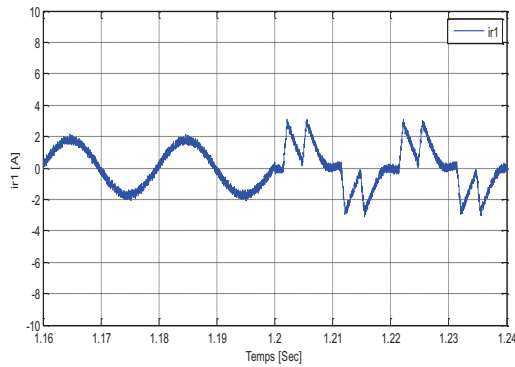
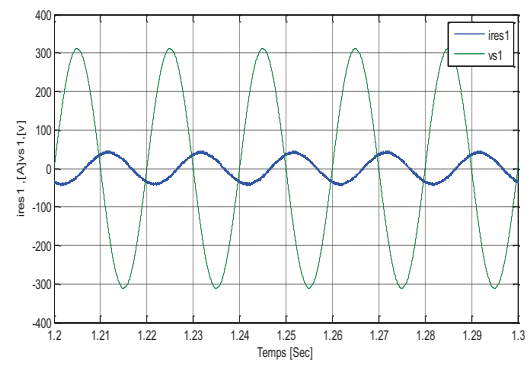
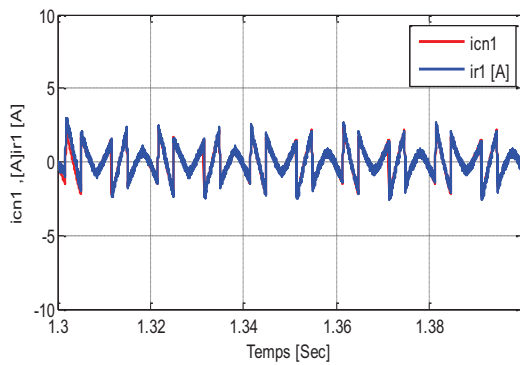
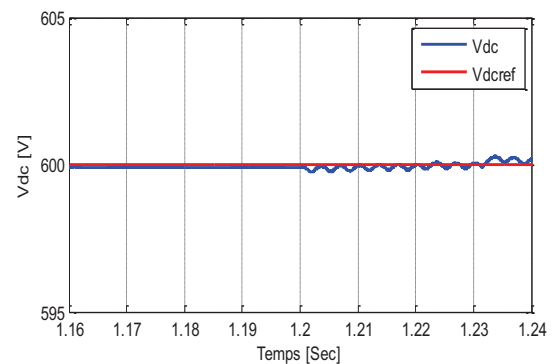
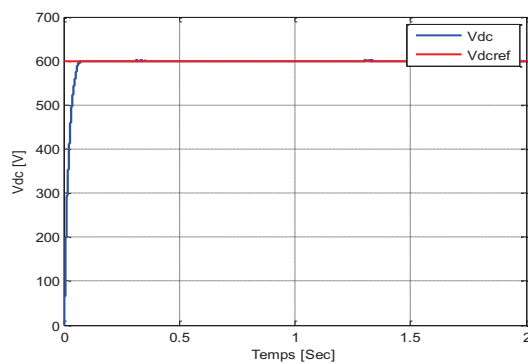
Les spectres harmoniques du courant de réseau avant et après compensation sont représentés par la Figure IV. 4(f). Le THD du courant de réseau passe de 23.95 % avant compensation à 3.62 % après compensation avec un courant quasi sinusoïdal (cf. Figure(c)).



a) Puissance active et réactive statorique



b) Courant de charge polluante et de stator de la MADA

c) Courant du convertisseur côté réseau i_{r1} et du réseau i_{res1} d) Courant du convertisseur côté réseau i_{r1} avec sa référence ; Tension v_{s1} et courant du réseau ($i_{res1} \times 10$)

e) Tension de bus continu avec un zoom

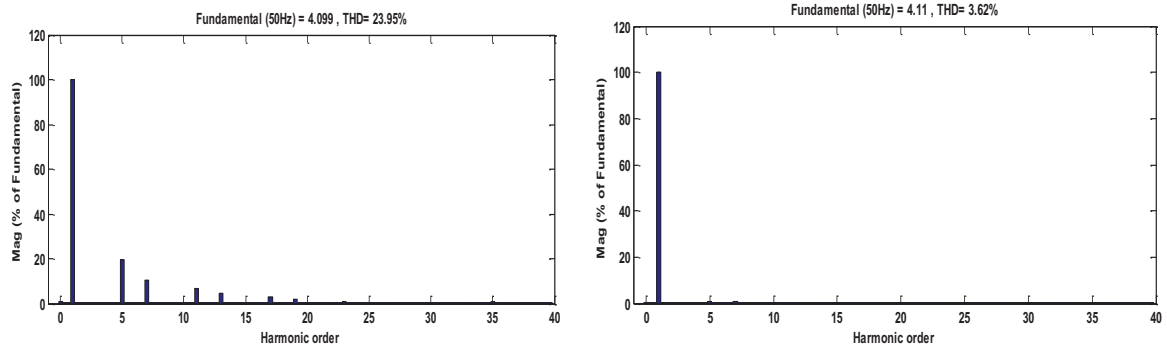
f) Spectres harmoniques du courant de réseau i_{res} avant et après filtrage actif

Figure IV. 4: Résultats de simulation du système hybride (éolien-filtre actif) basé sur le convertisseur côté réseau (a,b,c,d,e,f) sans compensation de la puissance réactive.

B. Filtrage actif avec compensation de la puissance réactive

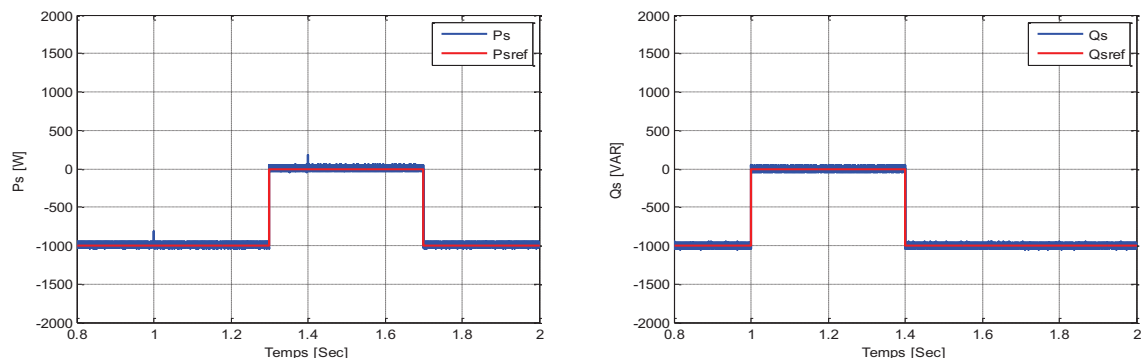
Pour tester le système hybride (éolien-filtre actif) avec la compensation de la puissance réactive absorbée par la charge polluante (redresseur triphasé à thyristors), une simulation de ce système, sous les mêmes conditions en ajoutant la fonction de compensation au contrôle du convertisseur côté réseau, a été réalisée.

La Figure IV. 5, représente les résultats de simulation obtenus, les puissances active et réactive fournies par le stator de la MADA au réseau suivent bien leurs références Figure IV. 5(a).

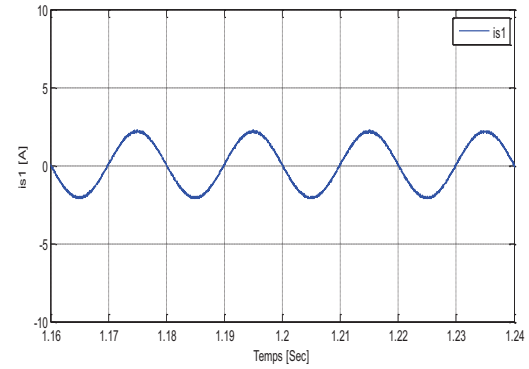
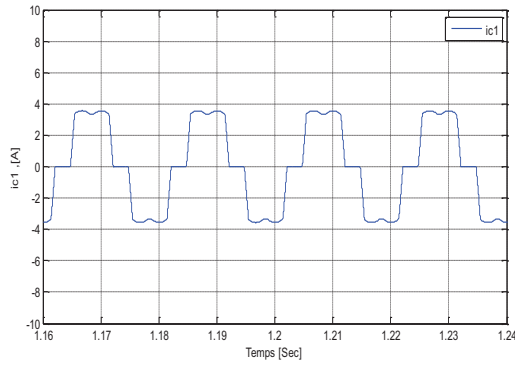
De la Figure IV. 5(d), on constate que le courant et la tension du réseau sont en phase, cela signifie que le système hybride (éolien-filtre actif) est capable de compenser la puissance réactive absorbée par la charge polluante.

On observe sur la Figure IV. 5(f), une remarquable réduction du THD du courant du réseau qui passe de 23.95 % à 7.04 % après injection des courants de compensation par le système hybride (éolien-filtre actif).

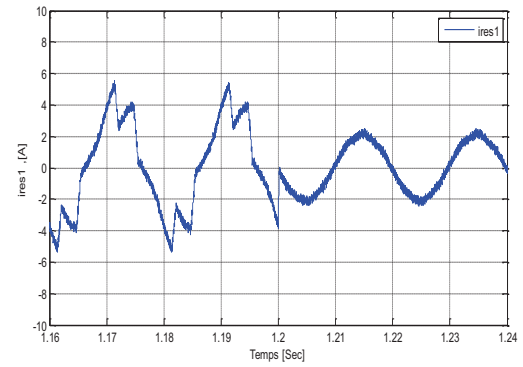
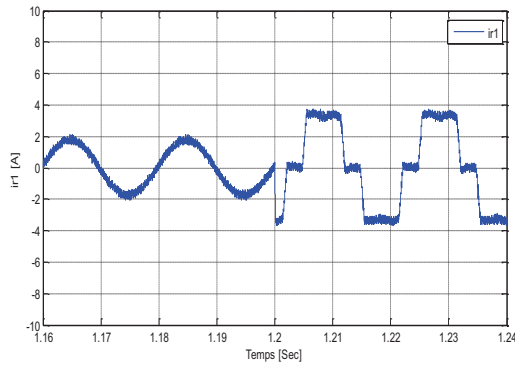
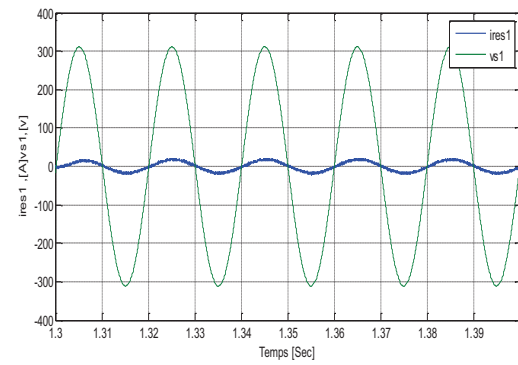
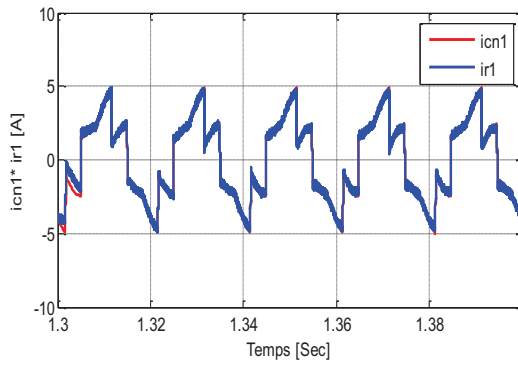
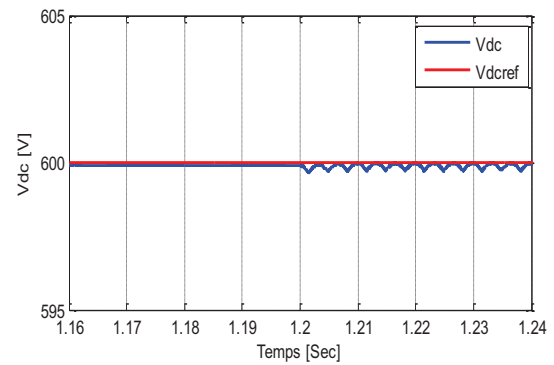
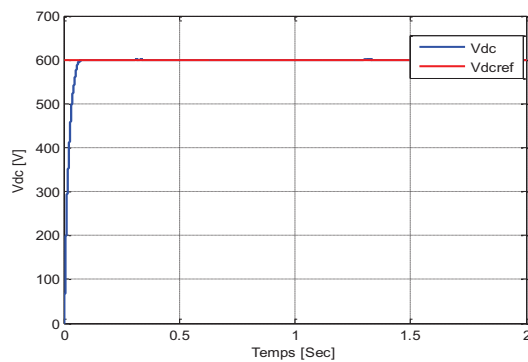
Ces résultats confirment le bon fonctionnement du filtre actif même avec compensation de la puissance réactive.



a) Puissance active et réactive statorique



b) Courant de charge polluante et de stator de la MADA

c) Courant du convertisseur côté réseau i_{r1} et du réseau i_{res1} d) Courant du convertisseur côté réseau i_{r1} avec sa référence ; Tension v_{s1} et courant du réseau ($i_{res1} \times 10$)

e) Tension de bus continu avec un zoom

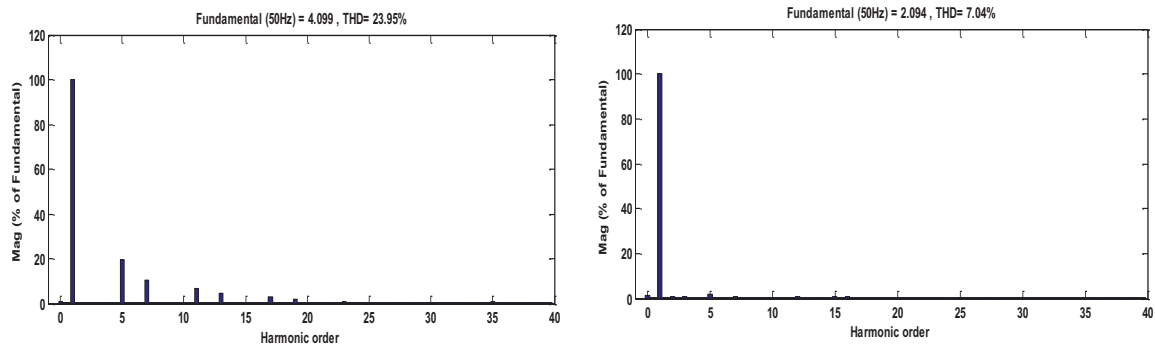
f) Spectres harmoniques du courant de réseau i_{res} avant et après filtrage actif

Figure IV. 5: Résultats de simulation du système hybride (éolien-filtre actif) basé sur le convertisseur côté réseau (a,b,c,d,e,f) avec compensation de la puissance réactive.

C. Compensation d'une charge linéaire déséquilibrée

Un système triphasé est dit déséquilibré lorsqu'au moins l'une de ses tensions ou de ses courants du réseau diffèrent des deux autres en amplitude et/ou en phase. Dans ce travail, le déséquilibre des courants est provoqué par une charge triphasée déséquilibrée connectée au même réseau que le système éolien à base de la MADA. Ce déséquilibre crée une puissance harmonique fluctuante de pulsation multiple de celle du fondamentale (2ω), due à l'interaction de la composante directe de la tension avec la composante inverse du courant, ou à l'interaction de la composante directe du courant avec la composante inverse de la tension. L'interaction de la composante inverse de la tension avec la composante inverse du courant crée une puissance continue[135],[137].

Pour identifier la puissance harmonique fluctuante liée au déséquilibre des courants, nous avons utilisé la même méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées. Le système hybride (éolien-filtre actif) avec une charge triphasée déséquilibrée connectée au même réseau, est illustré par la Figure IV. 6. Le système hybride (éolien-filtre actif) est testé avec une charge triphasée déséquilibrée, avec les mêmes paramètres que ceux de la première simulation. La charge linéaire est définie par :

$$R_1=20\Omega ; L_1=0.9\text{mH}$$

$$R_2=50\Omega ; L_2=0.9\text{mH}$$

$$R_3=100\Omega ; L_3=0.9\text{mH}$$

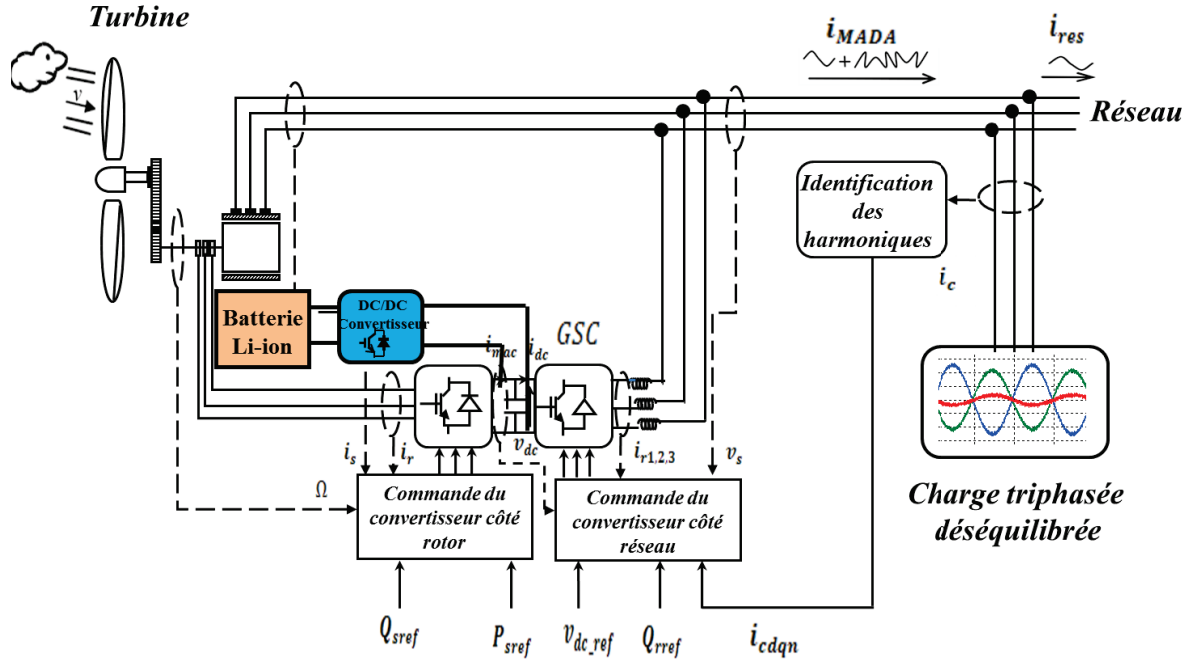


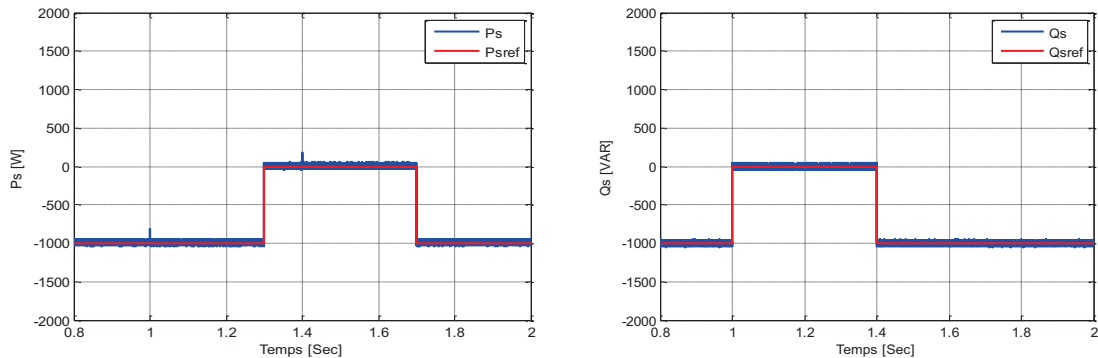
Figure IV. 6: Déséquilibre de la charge

La Figure IV. 7, représente les résultats de simulation obtenus par le système hybride (éolien-filtre actif) avec une charge triphasée déséquilibrée. On observe de la Figure IV. 7 (a), un bon suivi des consignes pour les puissances active et réactive délivrées par le stator de la MADA au réseau, même après compensation des courants de déséquilibre de charge linéaire.

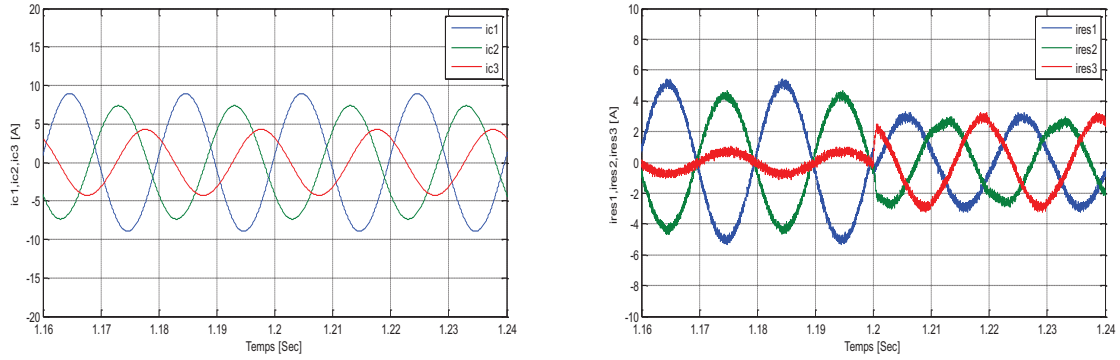
De la Figure IV. 7 (b), il est clair que les courants de la charge sont déséquilibrés et le système hybride (éolien-filtre actif) capable de compenser ce déséquilibre aux points de raccordement de la charge au réseau PCC.

On constate sur la Figure IV. 7 (c), que les courants fournis par le convertisseur côté réseau sont déséquilibrés, cela s'explique par le fait que le système hybride (éolien-filtre actif) utilise ce convertisseur pour compenser le déséquilibre de charge. De plus, on note que le courant et la tension du réseau sont en phase.

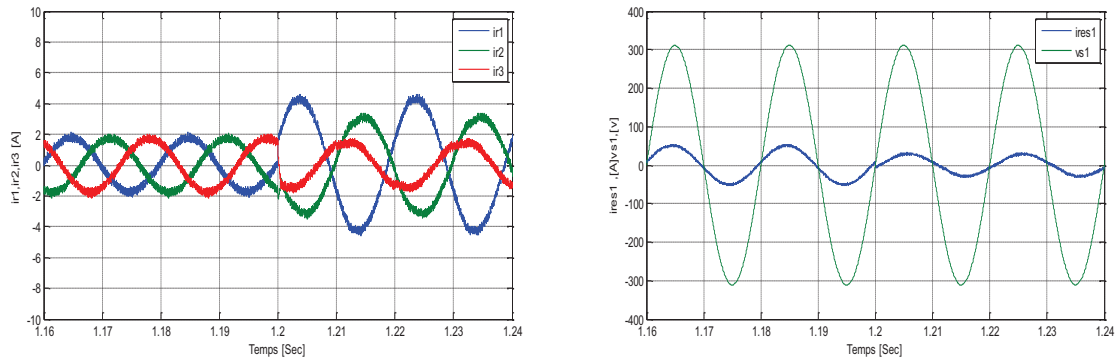
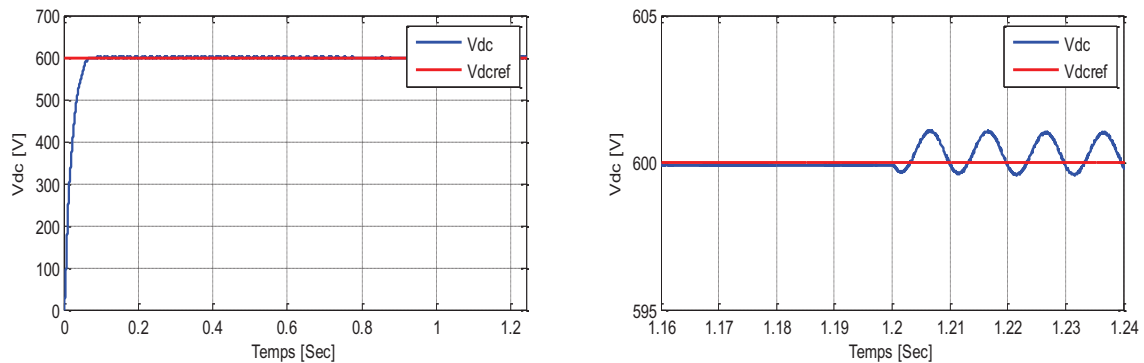
Pour la tension du bus continu, la Figure IV. 7 (d) montre la bonne régulation durant toute la durée de fonctionnement avec des ondulations acceptables après compensation du déséquilibre.



a) Puissance active et réactive statorique



b) Courants de charge déséquilibrée et du réseau

c) Courants du convertisseur coté réseau ; Tension v_{s1} et le courant du réseau ($i_{res1} \times 10$)

d) La tension de bus continu avec un zoom

Figure IV. 7: Résultats de simulation de compensation de charge linéaire déséquilibrée par le système hybride (éolien-filtre actif) basé sur le convertisseur côté réseau (a,b,c,d)

IV.4 Filtrage actif par le stator de la MADA

IV.4.1 Principe de fonctionnement

L'onduleur de tension utilisé pour le filtrage actif est de même structure que le convertisseur coté rotor utilisé pour effectuer la commande de la MADA dans un système de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable[84],[146].

Ce système est simultanément capable de fournir les puissances active et réactive et compenser les courants harmoniques via le stator de la MADA. Dans ce cas, les courants

statoriques débités par la MADA sont constitués d'une composante fondamentale sinusoïdale, correspondant à la puissance qu'elle doit fournir et d'une somme de composantes harmoniques, représentant le courant absorbé par la charge non linéaire[147],[148],[149]. La Figure IV. 8, illustre le schéma global du filtrage actif par le stator de la MADA.

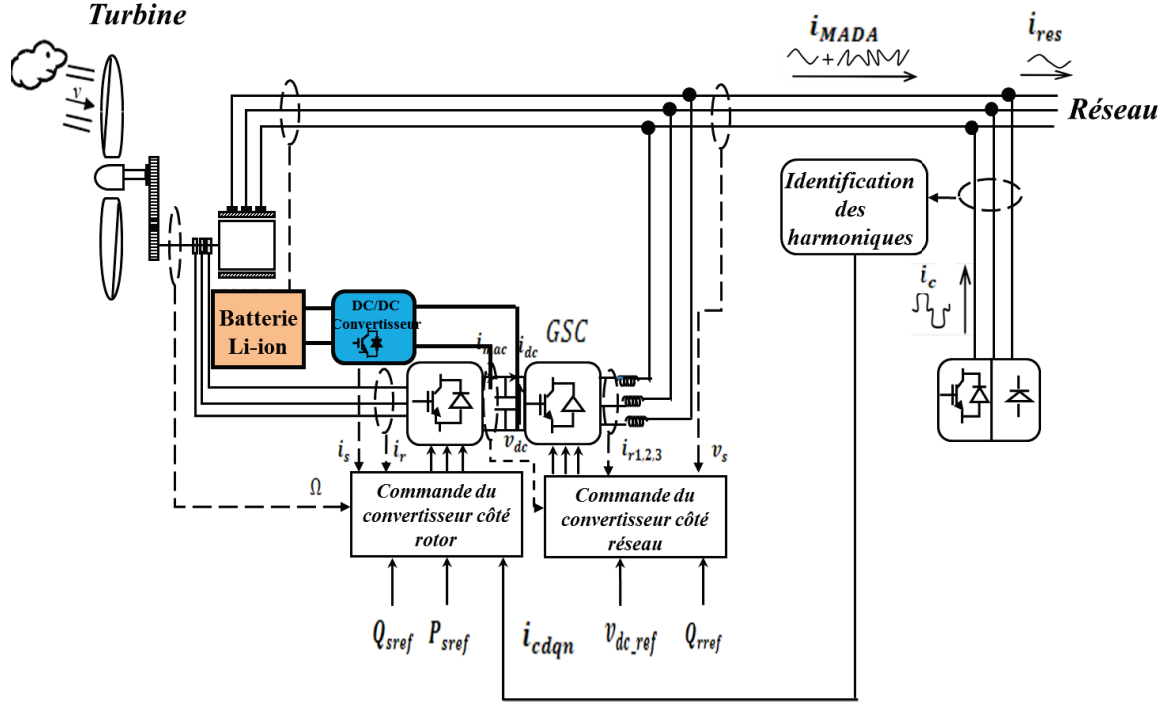


Figure IV. 8: Schéma de principe de filtrage actif par le stator de la MADA[149].

IV.4.2 La commande indirecte sans boucle de puissance avec les courants harmoniques de référence

La commande indirecte sans boucle de puissance de la MADA présente un avantage majeur, car elle intègre une boucle de régulation des courants rotoriques [84]. Ainsi, la fonction de filtrage actif est simple à réaliser par une addition des courants harmoniques de référence et des courants rotoriques. Le calcul des courants harmoniques de référence s'effectue à l'aide de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants rotoriques de référence se calculent, à partir des courants de référence de la charge non-linéaire et des grandeurs de la machine [78],[149],[82]. Pour ce faire, on rappelle les équations, vu au chapitre II, permettant de contrôler la MADA:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{\varphi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (IV. 14)$$

$$\begin{cases} P = -v_s \frac{M}{L_s} i_{qr} \\ Q = v_s \frac{v_s^2}{L_s \omega_s} - v_s \frac{M}{L_s} i_{dr} \end{cases} \quad (IV. 15)$$

$$\begin{aligned}
v_{dr} &= R_r i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{qr} \\
v_{qr} &= R_r i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) i_{dr} + g \frac{v_s M}{L_s}
\end{aligned} \tag{IV. 16}$$

Si l'on remplace le flux statorique $\varphi_s = \frac{v_s}{\omega_s}$ dans l'équation (IV.13) on obtient l'expression:

$$\begin{cases} i_{dr} = -\frac{L_s}{M} i_{ds} \\ i_{qr} = -\frac{L_s}{M} i_{qs} \end{cases} \tag{IV. 17}$$

Les références des courants sont alors égales aux courants nécessaires à la régulation des puissances et à la génération des courants harmoniques :

$$\begin{cases} i_{drtotal} = i_{dr} + i_{cdnr} \\ i_{qrtotal} = i_{qr} + i_{cqnr} \end{cases} \tag{IV. 18}$$

La relation qui permet de faire le lien entre les courants harmoniques et la commande de l'onduleur alimentant le rotor est :

$$\begin{cases} i_{cdnr} = -\frac{L_s}{M} i_{cdns} \\ i_{cqnr} = -\frac{L_s}{M} i_{cqns} \end{cases} \tag{IV. 19}$$

Dans l'équation (IV.18) i_{cdnr} et i_{cqnr} correspondent aux courants harmoniques dans le repère tournant (d, q) , on obtient le schéma de régulation représentée par la [Figure IV. 9](#):

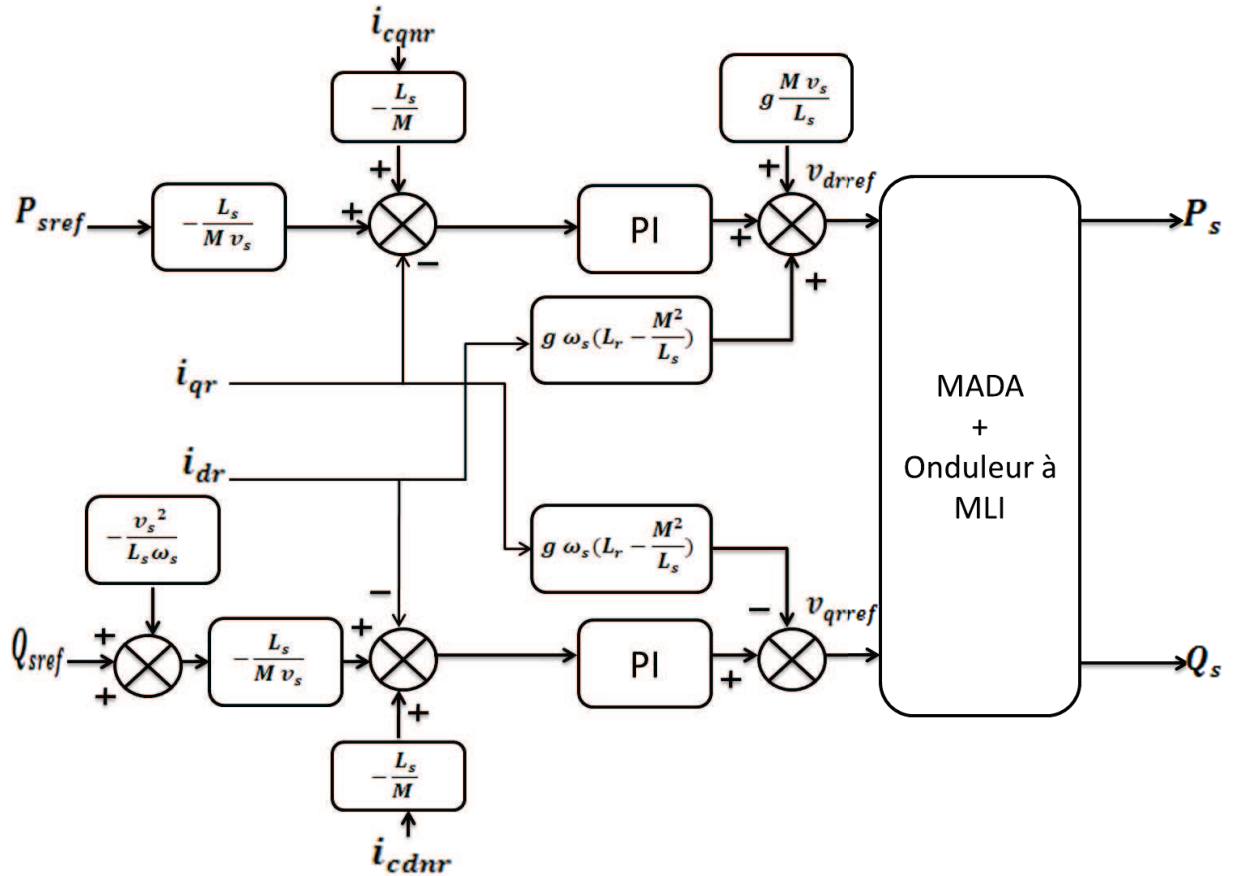
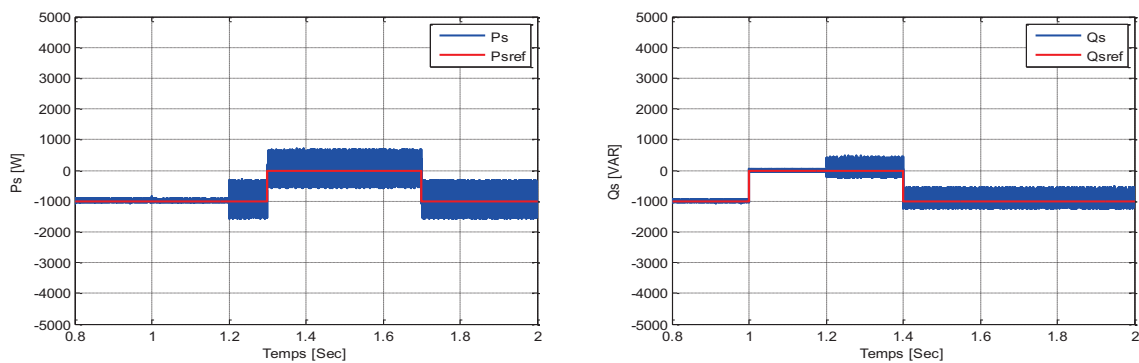


Figure IV. 9: Commande indirecte sans boucle de puissance avec les références harmoniques[149].

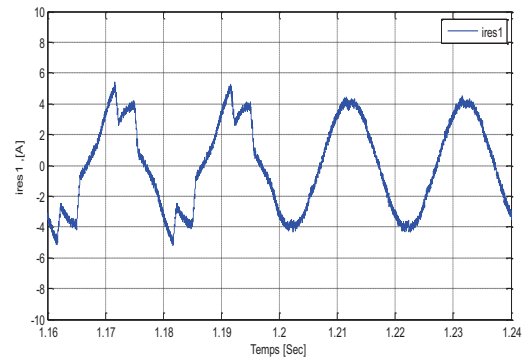
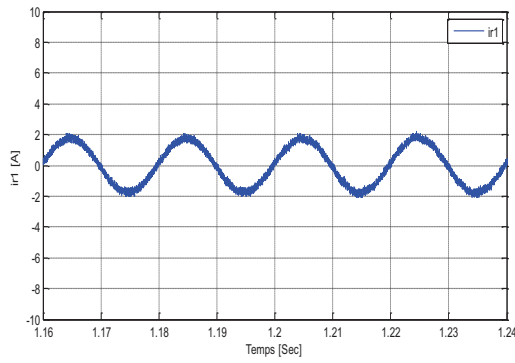
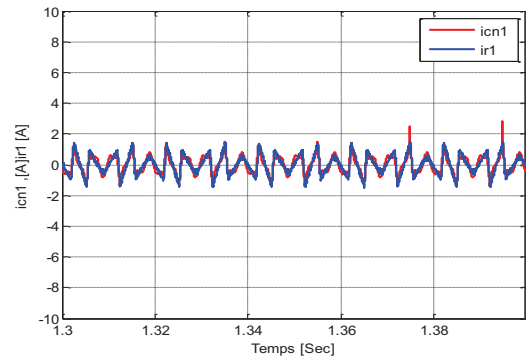
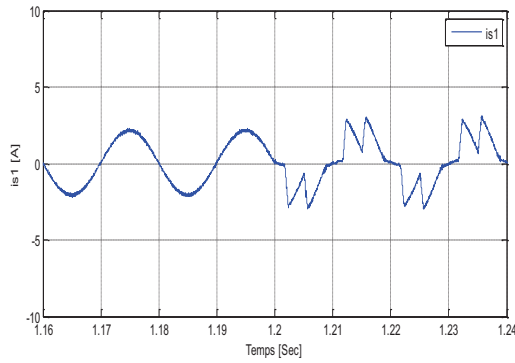
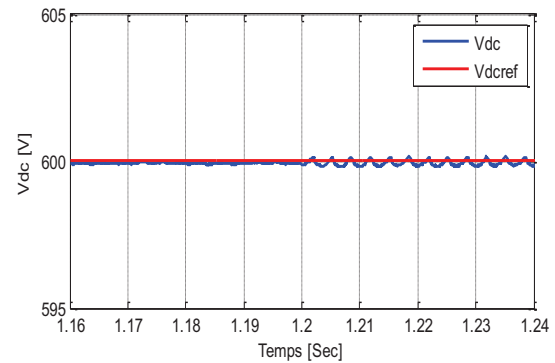
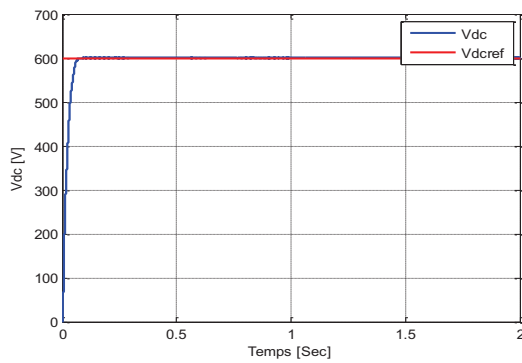
IV.4.3 Résultats de simulation

Pour tester les performances de cette structure du système hybride (éolien-filtre actif) avec une charge polluante (redresseur triphasé à thyristors), une simulation de ce système a été réalisée avec les mêmes paramètres de la première simulation.

La Figure IV. 10, montre les résultats de simulation obtenus par le système hybride (éolien-filtre actif), en utilisant le stator de la MADA pour compenser les courants harmoniques absorbés par la charge polluante (redresseur triphasé à thyristors).



a) Puissance active et réactive statorique

b) Courant du convertisseur côté réseau i_{r1} et du réseauc) Courant statorique i_{s1} avec sa référence

d) tension de bus continu avec un zoom

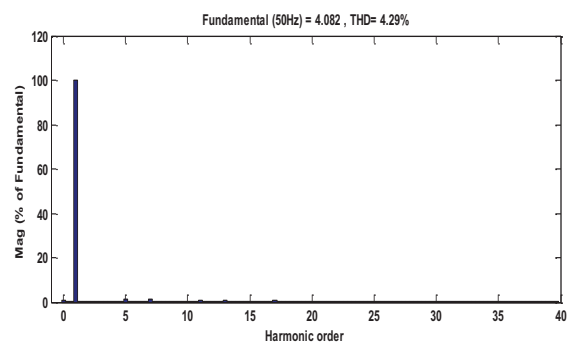
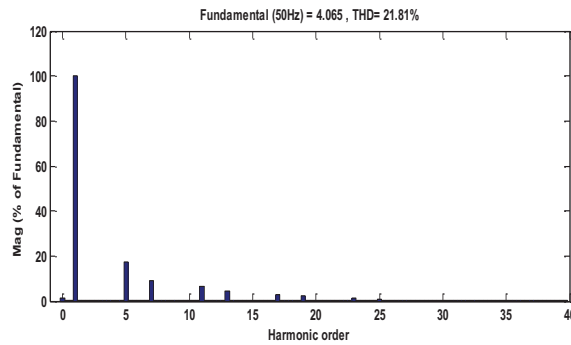
e) Spectres harmoniques du courant de réseau i_{res} avant et après filtrage actif

Figure IV. 10 : Résultats de simulation du filtrage actif par le stator de la MADA (a,b,c,d,e)

On constate sur la **Figure IV. 10 (a)**, que les puissances statoriques active et réactive suivent leurs références avec une remarquable perturbation après l'application du filtrage actif à l'instant ($t=1.2s$), cela peut s'expliquer par le fait que la MADA fournit via son stator en plus de la puissance demandée par le réseau une puissance harmonique correspondant à la charge non linéaire. Le courant fourni par le convertisseur coté réseau (**cf. Figure IV. 10 (b)**) est quasi sinusoïdale, car contrairement à la première structure, ce convertisseur ne participe pas à la compensation des courants harmoniques. On constate que le courant du réseau devint quasi sinusoïdal après l'application du filtrage actif par le stator de la MADA à l'instant ($t=1.2s$).

Sur la **Figure IV. 10 (c)**, on remarque que le courant débité par le stator de la MADA change à l'instant ($t=1.2s$) et les courants harmoniques sont compensés, en plus du courant sinusoïdal correspondant à la puissance qu'elle doit fournir par le système éolien. En plus, on observe une poursuite des consignes pour le courant statorique de la MADA durant la compensation des courants harmoniques.

La **Figure IV. 10 (d)**, montre la régulation de tension du bus continu à la valeur désirée $V_{dc_ref}=600V$. On constate sur cette figure une poursuite de consigne pour la tension du bus continu avant et après l'application du filtrage actif à l'instant ($t=1.2s$) avec des ondulations acceptables due à l'ordre des courants harmoniques compensés.

On note sur la **Figure IV. 10 (e)**, que le THD du courant de réseau passe de 21.81 % avant compensation à 4.08 % après compensation avec un courant quasi sinusoïdal.

IV.5 Filtrage actif par le convertisseur cote réseau et le stator de la MADA

IV.5.1 Principe de fonctionnement

L'optimisation du dimensionnement du convertisseur statique en diminuant le courant maximal traverse les semi-conducteurs permet de minimiser la masse et le volume des composants de filtrage et de réduire le coût de l'ensemble des composants de l'électronique de puissance[45]. Dans le système éolien à base de la MADA, les deux convertisseurs à MLI sont sur dimensionnés avec 30% de la puissance apparente de la génératrice éolienne. Pour maintenir l'avantage de ce dimensionnement, une structure originale du système hybride éolien-filtre actif, basé sur la combinaison de deux premières structures, est proposée.

L'objectif est de faire fonctionner les deux convertisseurs du système éolien dans une plage de puissance réduite, en partageant la puissance harmonique compensée entre le stator et le rotor de la MADA. De plus, la compensation des harmoniques du courant avec la partie haut fréquence par le stator de la MADA implique une création des couples pulsatoires. Ils sont dus aux actions mutuelles entre harmoniques du courant y compris le fondamentale, autrement dit l'action du champ tournant statorique fondamental sur le champ tournant rotorique harmonique et de l'action du champ tournant rotorique fondamental sur le champ tournant statorique harmonique. De ce fait, la fatigue mécanique (vibrations) de la machine, l'échauffement des enroulements statoriques et rotoriques (effet de joule) et des pertes fer supplémentaires sont produits. Ceci conduit à la dégradation des performances de la MADA, notamment sa fiabilité et sa durée de vie globale[149].

C'est pourquoi, afin de limiter l'impact des courants harmoniques sur la machine, le principe de fonctionnement de structure proposée est basé sur l'isolement (ou élimination) des harmoniques 5 et 7 qui correspondent à la plus grande partie de la puissance harmonique compensée. Par conséquent, ces deux harmoniques, compensés par le stator de la MADA, évitent de surcharger les deux convertisseurs statiques par cette puissance supplémentaire. En même temps, le reste des harmoniques à fréquences élevées et à puissance harmonique faible est compensé par le convertisseur côté réseau. Ceci permet de garder la tension du bus continu stable et de gérée au mieux l'échange de puissance éolienne via le rotor de la MADA.

Avec cette structure originale, on bénéficie des avantages des deux structures du système hybride éolien-filtre actif sans redimensionnement des deux convertisseurs statiques. La Figure IV. 11, illustre la structure du système hybride éolien-filtre actif proposée.

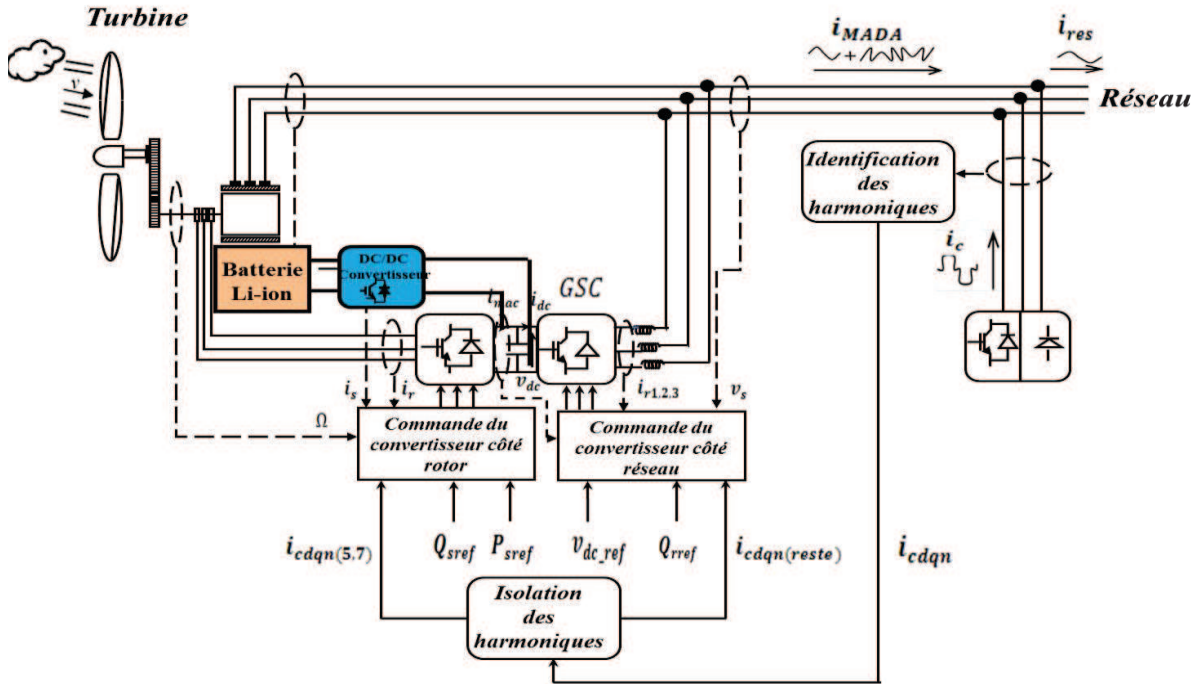


Figure IV. 11 : Schéma de principe de filtrage actif par le convertisseur coté réseau et le stator de la MADA

IV.5.2 L'isolation des harmoniques par filtre sélectif

Le filtre sélectif est un filtre passe-bande, qui extrait dans le repère (α, β) les composantes des courants harmoniques. La fonction de transfert de ce filtre est définie par l'équation [147],[150] :

$$H(p) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(P)}{x_{\alpha\beta}(P)} = k \frac{(P + k) + j\omega_c}{(P + k)^2 + j\omega_c^2} \quad (\text{IV. 20})$$

Où $x_{\alpha\beta}$ est la composante du signal mesuré dans le repère (α, β) définie par :

$$x_{\alpha\beta}(p) = x_{\alpha}(P) + jx_{\beta}(P) \quad (\text{IV. 21})$$

Et $\hat{x}_{\alpha\beta}(p)$ est la composante fondamentale dans le repère (α, β) définie par :

$$\hat{x}_{\alpha\beta}(P) = \hat{x}_{\alpha}(P) + j.\hat{x}_{\beta}(P) \quad (\text{IV. 22})$$

Et dans l'équation (IV. 20) k : une constante et ω_c : la pulsation de signal filtré.

En traçant le diagramme de Bode de cette fonction de transfert pour $\omega_c = 2 \pi f_c$ ($f_c = 50\text{Hz}$) et pour différentes valeurs de k , on obtient le diagramme de la Figure IV. 12.

On remarque qu'il s'agit bien d'un filtre sélectif car les pentes du gain sont très importantes autour de la pulsation de coupure ω_c . En plus, ce filtre présente l'avantage d'avoir un déphasage de 0° à la pulsation de coupure, cela signifie que le signal extrait du signal d'entrée est en phase avec celui-ci [149],[151].

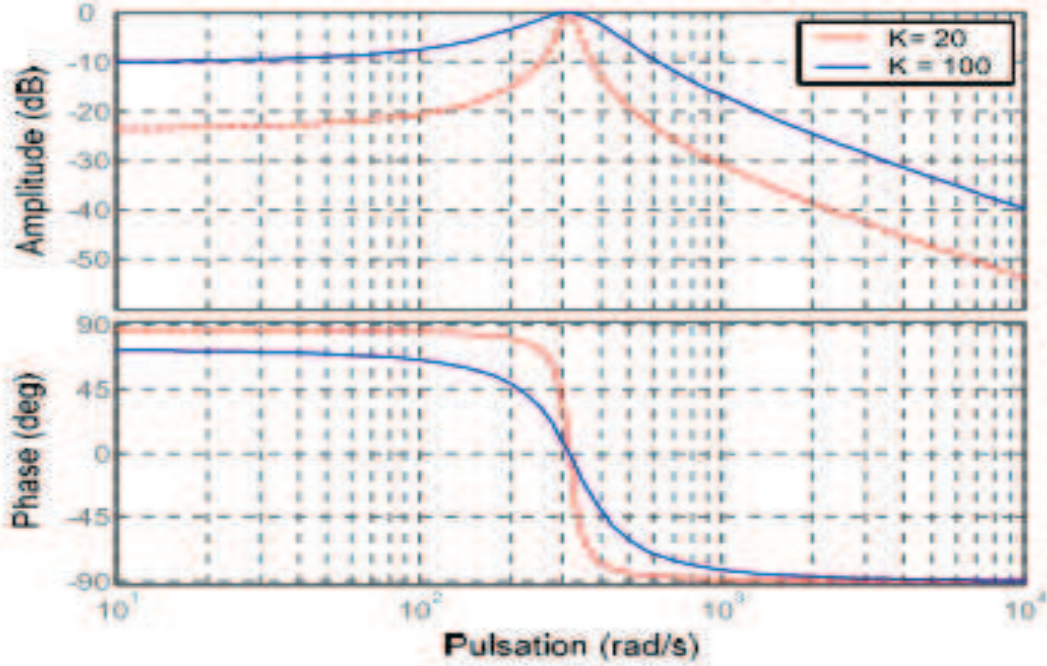


Figure IV. 12: Diagramme de Bode du filtre sélectif [149]

Ceci est très intéressant, car ce filtre permet d'extraire le fondamental (à 50 Hz) des tensions sans introduire de retard et ainsi directement utiliser les signaux de sortie du filtre pour se synchroniser sur le réseau [147],[149].

On exprime alors les composantes fondamentales $\hat{x}_\alpha$ et $\hat{x}_\beta$ en fonction x_α et x_β :

$$\hat{x}_\alpha(P) = \frac{k}{p} \cdot [x_\alpha(P) - \hat{x}_\alpha(P)] - \frac{\omega_c}{P} \cdot \hat{x}_\beta(P) \quad (\text{IV. 23})$$

$$\hat{x}_\beta(P) = \frac{k}{p} \cdot [x_\beta(P) - \hat{x}_\beta(P)] + \frac{\omega_c}{P} \cdot \hat{x}_\alpha(P) \quad (\text{IV. 24})$$

Ainsi, le filtre sélectif est utilisé pour extraire un harmonique particulier de l'ordre de $(k \pm \epsilon)$ avec $\epsilon = \pm 1$.

Si on extrait un courant harmonique direct ou inverse, les équations (IV.16) et (IV.17) se transforment en [152] :

$$\hat{x}_{\alpha(6k \pm \epsilon)}(P) = \frac{k}{p} \cdot [x_\alpha(P) - \hat{x}_{\alpha(6k \pm \epsilon)}(P)] - \epsilon \frac{\omega_c(6k \pm \epsilon)}{P} \cdot \hat{x}_{\beta(6k \pm \epsilon)}(P) \quad (\text{IV. 25})$$

$$\hat{x}_{\beta(6k \pm \epsilon)}(P) = \frac{k}{p} \cdot [x_\beta(P) - \hat{x}_{\beta(6k \pm \epsilon)}(P)] + \epsilon \frac{\omega_c(6k \pm \epsilon)}{P} \cdot \hat{x}_{\alpha(6k \pm \epsilon)}(P) \quad (\text{IV. 26})$$

Ces équations permettent d'établir le schéma du filtre sélectif présenté par la Figure IV. 13[149],[150].

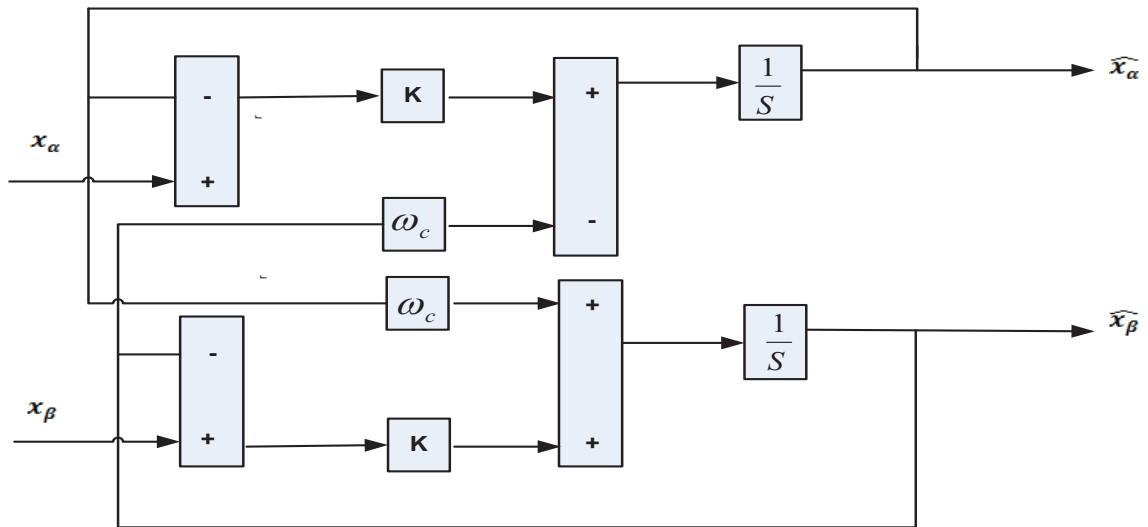


Figure IV. 13 : Schéma du filtre sélectif multi variable[150],[151]

IV.5.3 Résultats de simulation

Les performances cette structure du système hybride (éolien-filtre actif) avec une charge non linéaire polluante (redresseur triphasé à thyristors), sont testées pour les mêmes paramètres de simulation, avec et sans compensation de la puissance réactive.

IV.5.3.1 Filtrage actif sans compensation de la puissance réactive

La Figure IV. 14, montre les résultats de simulation obtenus par le système hybride (éolien-filtre actif), en utilisant le stator de la MADA et le convertisseur coté réseau pour compenser les courants harmoniques absorbés par la charge polluante (redresseur triphasé à thyristors).

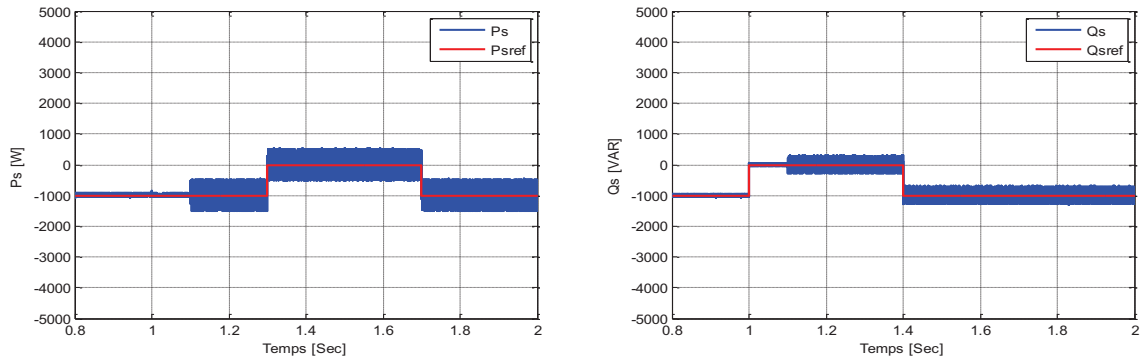
De la Figure IV. 14 (a), on remarque que les puissances active et réactive fournies par le stator de la MADA au réseau suivent leurs références avec des ondulations de puissance, après l'application de filtrage des harmoniques 5 et 7 à l'instant ($t=1.1s$).

Le courant du réseau est montré par la Figure IV. 14 (b), on constate l'amélioration successive de la qualité de signal après l'instant ($t=1.1s$) de filtrage des harmoniques 5 et 7 par le stator de la MADA et l'instant ($t=1,1s$) de filtrage du reste des harmoniques par le convertisseur côté réseau.

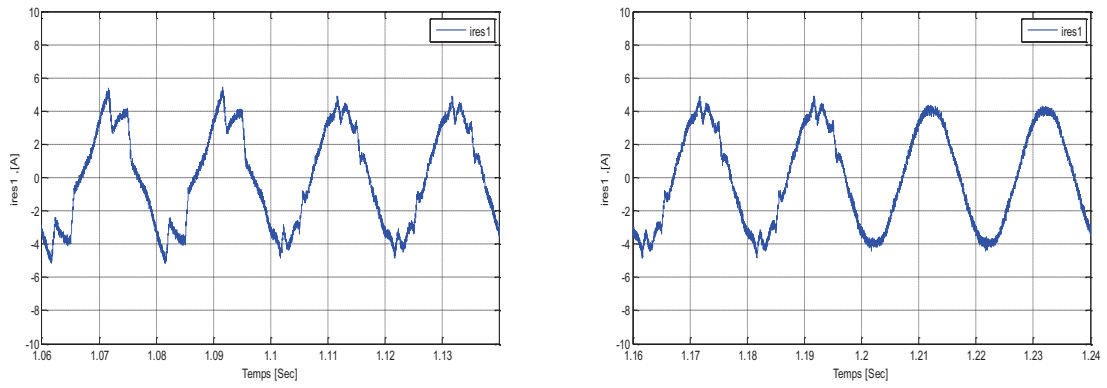
On constate sur la Figure IV. 14 (c), la présence des harmoniques 5 et 7 à l'instant ($t=1.1s$) dans le courant débité par le stator de la MADA et la présence de reste des harmoniques dans le courant fourni par le convertisseur côté réseau.

De la Figure IV. 14 (d), on observe que le courant statorique et celui du convertisseur côté réseau suivent bien leurs références dans le fonctionnement hybride (éolien-filtre actif). La

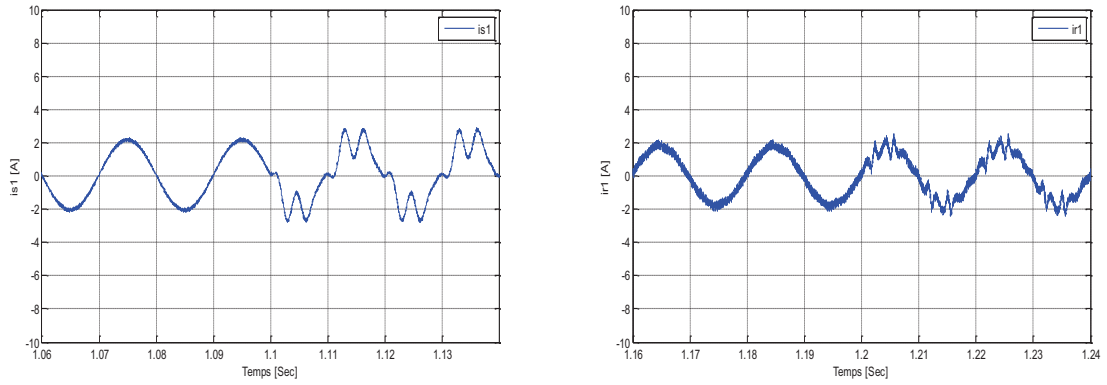
régulation de la tension du bus continu à la valeur désirée $V_{dc_ref}=600V$ avant et après la compensation des courants harmoniques est montrée par la Figure IV. 14 (e).



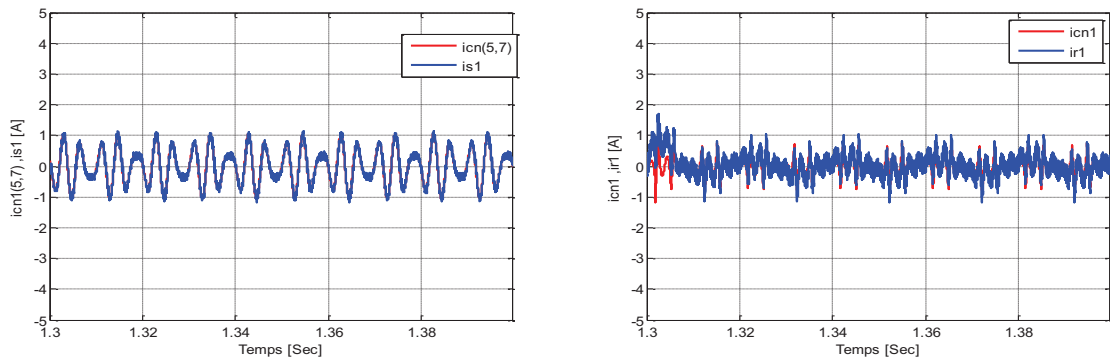
a) Puissance active et réactive statorique



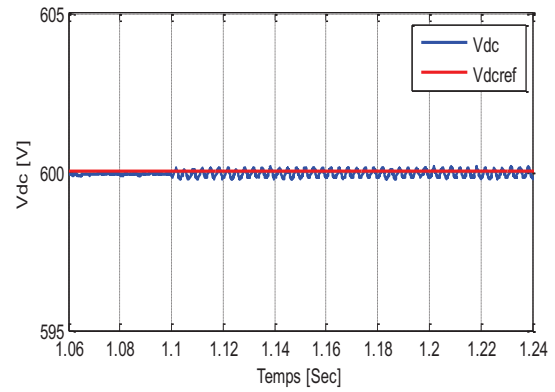
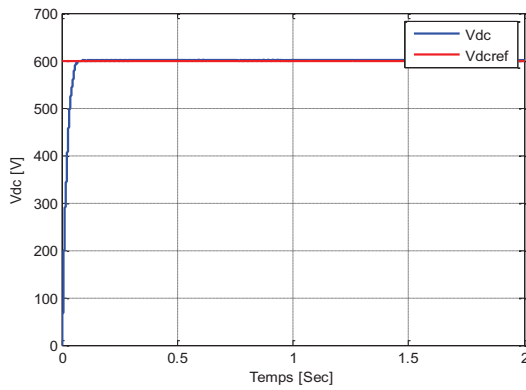
b) Courant du reseau i_{res1}



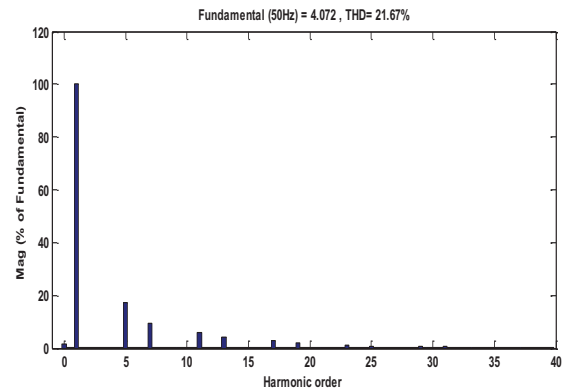
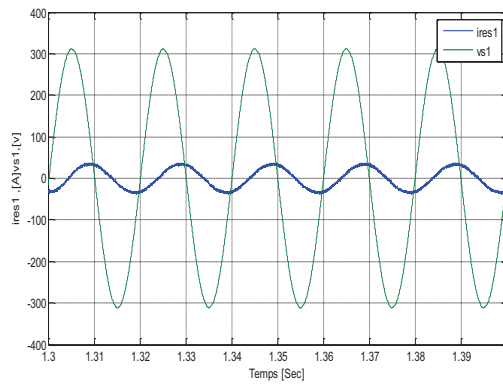
c) Courant statorique i_{s1} et du convertisseur coté reseau i_{r1}



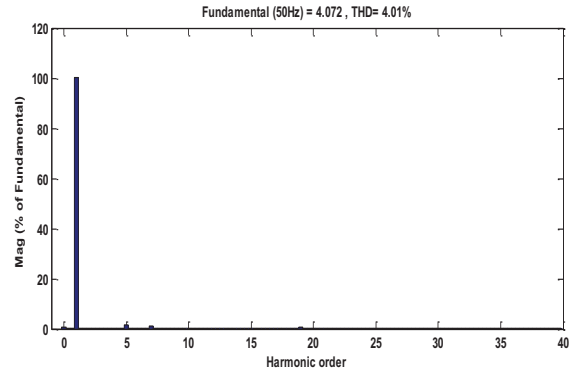
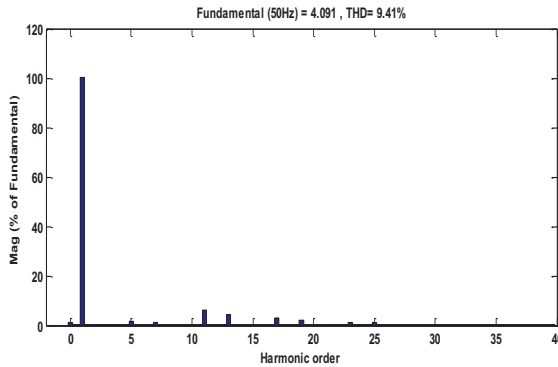
d) Courant statorique i_{s1} et du convertisseur coté réseau i_{r1} avec ses references



e) Tension du bus continu avec un zoom



f) Tension v_{s1} et le courant du réseau ($i_{res1} \times 10$) ; Spectres harmonique du courant de réseau

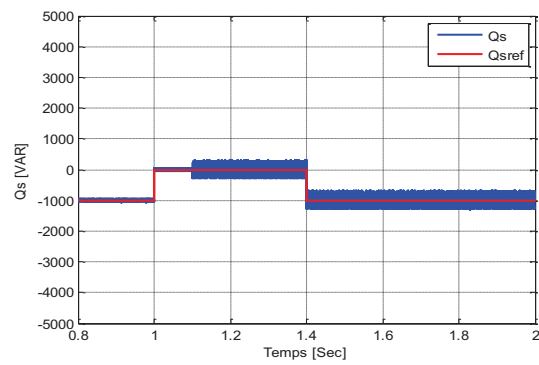
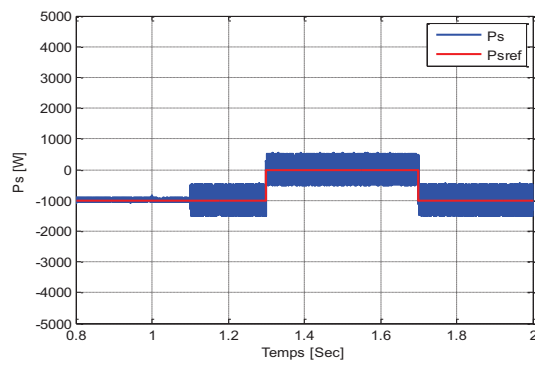


g) Spectres harmoniques du courant de réseau i_{res} après filtrage actif

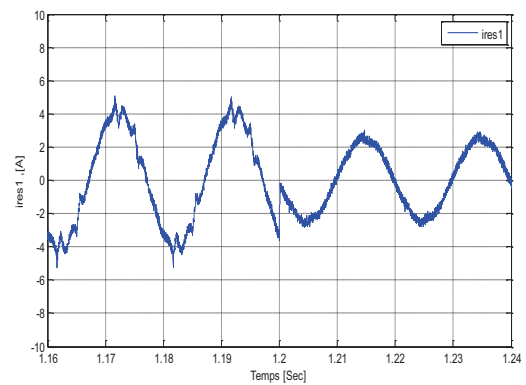
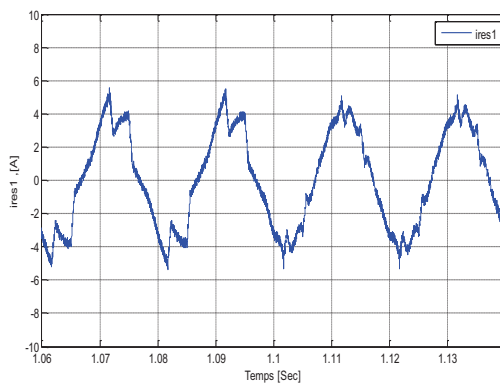
Figure IV. 14 : Résultats de simulation du filtrage actif par le convertisseur coté réseau et le stator de la MADA (a,b,c,d,e,f,g) sans compensation de la puissance réactive.

Sur la Figure IV. 14 (f), on note que le déphasage (en avance de phase) entre le courant et la tension de réseau, s'explique par le fait que la charge polluante (redresseur triphasé à thyristors) absorbe la puissance réactive et le système hybride assure alors seulement la compensation des courants harmoniques. Le THD obtenu côté courant du réseau (cf. Figure IV. 14(g)), par cette structure montre l'efficacité et la robustesse pour la compensation des courants harmoniques.

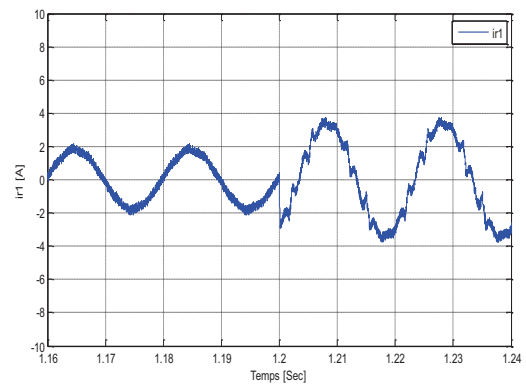
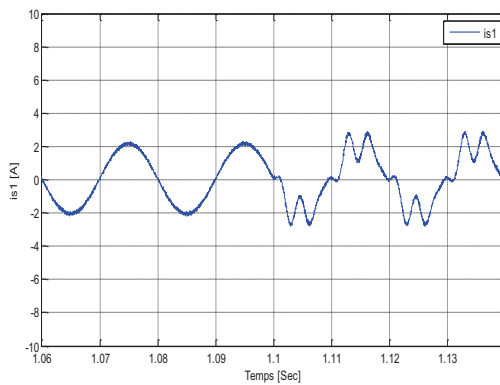
IV.5.3.2 Filtrage actif avec compensation de la puissance réactive



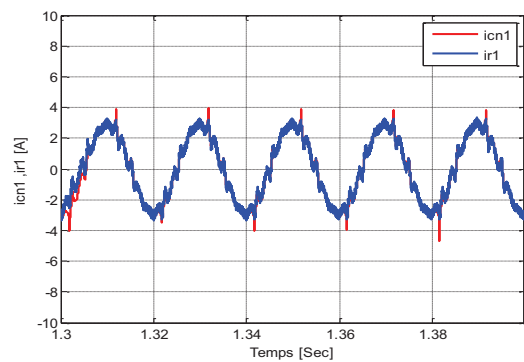
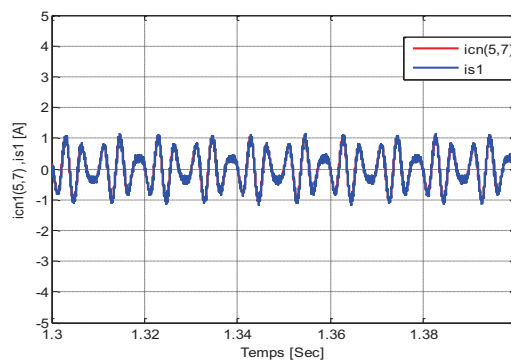
a) Puissance active et réactive statorique



b) Courant du reseau i_{res1}



c) Courant statorique i_{s1} et du convertisseur coté reseau i_{r1}



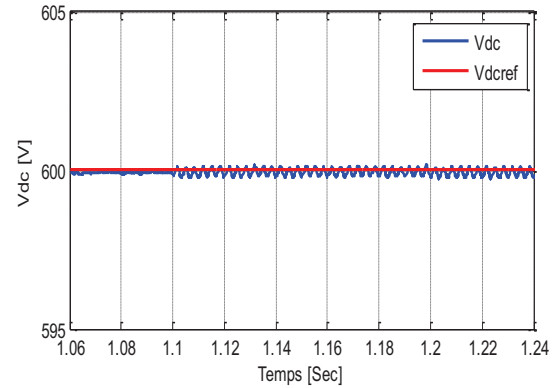
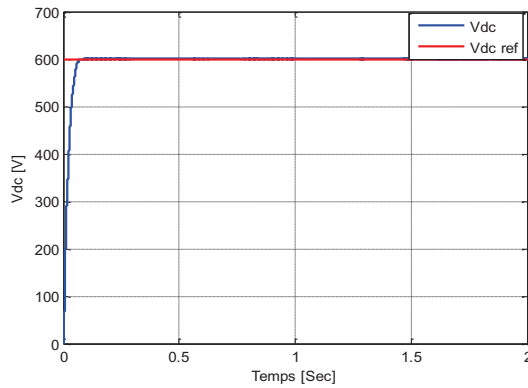
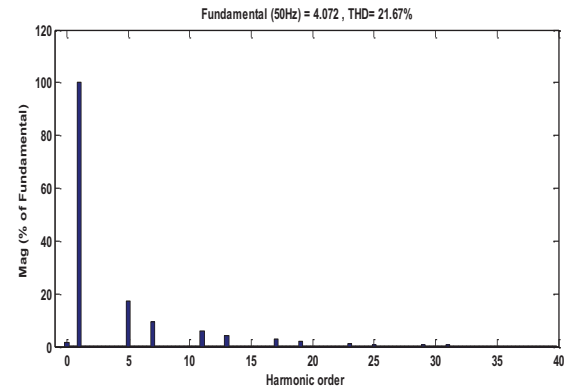
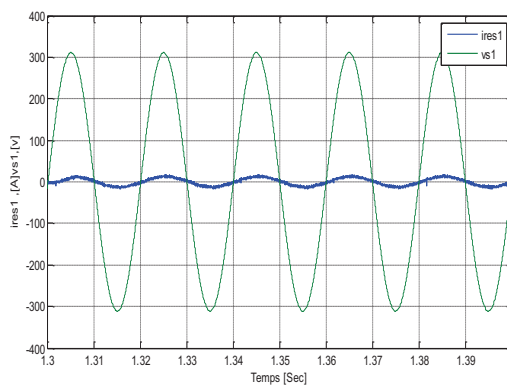
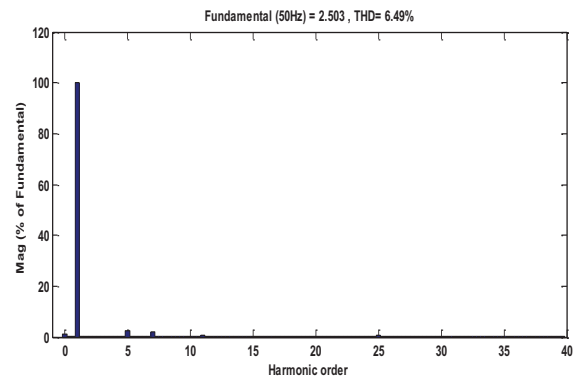
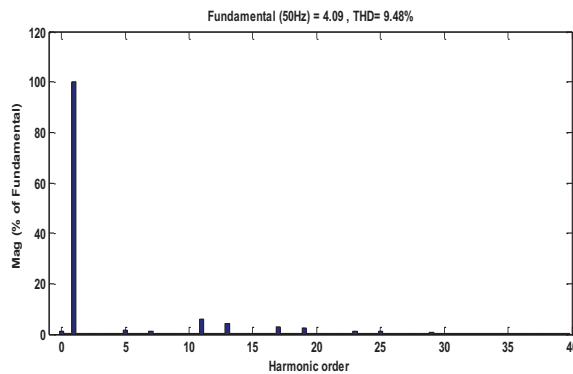
d) Courant statorique i_{s1} et du convertisseur coté réseau i_{r1} avec ses references**e) Tension du bus continu avec un zoom****f) Tension v_{s1} et le courant i_{res1} ($i_{res1} \times 10$) ; Spectres harmonique du courant de réseau****g) Spectres harmoniques du courant du réseau i_{res} après filtrage actif**

Figure IV. 15 : Résultats de simulation du filtrage actif par le convertisseur coté réseau et le stator de la MADA (a,b,c,d,e,f,g) avec compensation de la puissance réactive.

La Figure IV. 15, représente les résultats de simulation obtenus par le système hybride (éolien-filtre actif), en utilisant le stator de la MADA et le convertisseur côté réseau pour la compensation des courants harmoniques, ainsi que la puissance réactive absorbée par la charge non linéaire.

On remarque, sur la [Figure IV. 15\(a\)](#), la poursuite des consignes pour les puissances active et réactive statoriques de la MADA avec des ondulations après l'application du filtrage actif des harmoniques 5 et 7.

De la [Figure IV. 15\(f\)](#), on constate que le courant et la tension du réseau sont en phase, cela signifie que le système hybride (éolien-filtre actif) est en mesure d'assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. Le THD du courant du réseau est donné par la [Figure IV. 15\(g\)](#), on note que le THD s'est amélioré ; il est de 21.67% avant l'utilisation du filtrage actif, mais après la compensation des harmoniques, il est réduit à environ 6.49%, donc une nette amélioration avec un courant quasi-sinusoïdale.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est beaucoup intéressé à la compensation des courants harmoniques générés par une charge non linéaire. Au vu de la souplesse du système éolien à base de la MADA, on s'est fixé à l'intégration du filtrage actif des courants harmoniques, la compensation de puissance réactive et les courants déséquilibrés dans le fonctionnement de ce système. Ainsi, on a proposé trois différentes structures du système hybride éolien-filtre actif (filtrage par le convertisseur côté réseau, filtrage par le stator de la MADA, filtrage par le stator de la MADA et le convertisseur côté réseau).

Pour vérifier les performances de ces trois structures, plusieurs simulations numériques ont réalisées. Compte tenu des résultats obtenus, on note que l'utilisation du système éolien pour la compensation des courants harmoniques et de puissance réactive absorbée par une charge polluante est très intéressante, car elle ne modifie que la commande de la MADA et n'entraîne donc pas de modification de la partie puissance du système éolien. En plus, cette hybridation n'influe pas la fonction principale de la MADA, à savoir la génération des puissances active et réactive.

Par ailleurs, les résultats de simulation obtenus confirment non seulement le bon contrôle des puissances active et réactive fournies par le stator de la MADA, mais aussi le fait d'avoir un courant du réseau quasi sinusoïdal et un fonctionnement à facteur de puissance unitaire.

Conclusion Générale et Perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse concernent l'étude et la modélisation d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne à base de la MADA en mode connectée au réseau et en mode îloté. Un état de l'art sur les énergies renouvelables, l'évaluation des potentialités de chaque structure et la proposition de solutions aux contraintes imposées aux aérogénérateurs en termes de qualité de stockage de l'énergie électrique fournie ont été les premiers objectifs effectués.

Les machines asynchrones à double alimentation apportent une solution intéressante pour l'utilisation des énergies renouvelables. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques notamment une production de puissance élevée, un fonctionnement à vitesse variable et une réduction du dimensionnement des convertisseurs statiques. La structure de la MADA à intégrer dans la chaîne de conversion éolienne a été modélisée.

Pour le stockage des énergies renouvelables, différentes solutions ont été abordées. L'intégration des batteries Li-ion, dans la chaîne de conversion éolienne, s'avère intéressante. Ces batteries ont l'avantage d'avoir une énergie spécifique élevée ($\approx 140 \text{ Wh/kg}$), meilleur durée de vie et une puissance spécifique importante pour assurer le fonctionnement à puissance lissée du système éolien à base de la MADA. Un modèle de stockage de l'énergie éolienne par batterie Li-ion a été développé.

Cette chaîne est composée d'un ensemble convertisseurs-machine et d'un système de stockage électrochimique basée sur des batteries Li-ion en vue du lissage de la production de l'énergie électrique. De plus, nouvelles structures du système hybride éolien-filtre actif ont été proposées pour la dépollution des harmoniques de courant produits par une charge non linéaire.

La commande vectorielle de la MADA, permettant de découpler et réguler les puissances active et réactive injectées dans le réseau électrique, la commande du convertisseur coté réseau, assurant le réglage de tension du bus continu, et le contrôle à puissance lissée des batteries Li-ion, ont été détaillés.

Le modèle, de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec tous ses éléments, en mode de fonctionnement connectée au réseau a été présenté.

Les résultats des simulations réalisées à partir du système proposé montrent clairement la validité des modèles choisis et les performances des stratégies de contrôle proposées.

Pour le mode de fonctionnement îloté, le modèle de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec tous ses éléments (MADA, MSAP et batterie) a été présenté. La commande vectorielle de la MADA, permettant de garder l'amplitude et la fréquence de tensions statoriques constantes, et celle de la MSAP, assurant le réglage de la tension du bus continu, ont été établies.

Les résultats des simulations réalisées à partir du système proposé montrent clairement la validité des modèles choisis et les performances des stratégies de contrôle proposées. L'utilisation des batteries Li-ion, dans un système éolien totalement autonome, en complémentarité avec les stratégies de contrôle proposées semble le plus approprié pour assurer une alimentation électrique continue et stable.

Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique produite et résoudre la problématique des perturbations harmoniques générées par des charges non linéaires connectées au réseau électrique, un système hybride éolien-filtre actif est proposé.

Trois structures différentes du système hybride éolien-filtre actif (filtrage par le convertisseur coté réseau, filtrage par le stator de la MADA, filtrage par le stator de la MADA et le convertisseur coté réseau) et leurs commandes ont été détaillées.

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants harmoniques et déséquilibrés, a été choisie.

Les résultats des simulations réalisées à partir des systèmes proposés confirment clairement la validité du contrôle par la méthode des puissances active et réactive, l'obtention d'un courant de réseau quasi sinusoïdal à une faible valeur de la THD et la possibilité de réglage du facteur de puissance à une valeur proche de l'unité.

Les travaux de cette thèse peuvent être poursuivis et complétés par des perspectives, pouvant contribuer à l'enrichissement de l'ensemble du système de production de l'énergie éolienne. Parmi les perspectives envisageables :

- La validation expérimentale des structures proposées ;
- La validation expérimentale des stratégies de contrôle développé ;
- L'utilisation de convertisseurs statiques de niveaux supérieurs;
- L'intégration du stockage hybride (les super condensateurs, les volants d'inertie, les piles à combustibles) ;
- L'élaboration des algorithmes basés sur l'intelligence artificielle pour la gestion de l'énergie éolienne et supervision centralisée des fermes ;
- L'établissement d'un modèle de la MADA et MSAP prenant en compte la saturation magnétique ;
- Le développement des nouvelles stratégies de contrôle du système hybride éolien-filtre actif pour résoudre les problèmes de déséquilibre de la tension, des chutes de fréquence, des creux de tension et des fluctuations.

Références Bibliographiques

- [1] J. Percebois and C. Mandil, “Rapport énergies 2050,” Rapport énergies 2050, Ministère français de l’économie et des finances et de l’industrie, 2012.
- [2] Y. Steiner, “Impacts de la voiture électrique sur les émissions de CO₂ liées à la mobilité individuelle, Le cas de l’agglomération franco-valdo-genevoise,” Master of science in geography, Université de Lausanne, 2010.
- [3] A. Mirecki, “Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance,” Thèse de doctorat, Institute national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [4] B. Aline and A. DE Montety, “Effet de serre et changements de climat : Pourquoi, comment et que pouvons-nous y faire ?,” Rapport d’étude, Université catholique de Louvain, 2010.
- [5] N. Abddallah, “Etude et développement d’un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable,” Thèse de doctorat, Université de technologie de Belfort- Montbéliard, 2009.
- [6] “Prix du pétrole en euros (et en diverses monnaies) - janvier 2014 - Le blog sérendipique et disruptif des Aerobar Films.” [Online]. Available: <http://aerobarfilms.over-blog.com/article-prix-du-petrole-en-euros-et-en-diverses-monnaies-janvier-2014-122371709.html>. [Accessed: 07-Mar-2015].
- [7] G. Alix, “Comparaison de concepts de moteur diesel en vue de leur hybridation bilan des émissions de CO₂ suivant l’usage en véhicule,” Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2008.
- [8] R. Sadoun, “Intérêt d’une Source d’Energie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain – dimensionnement et tests de cyclage,” Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2013.
- [9] “IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.” [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/index.htm>. [Accessed: 01-Apr-2015].
- [10] “IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.” [Online]. Available: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml. [Accessed: 18-Aug-2014].
- [11] S. Marniesse and E. Filipiak, “Lutte contre l’ effet de serre Enjeux & Débats,” Rapport technique , Agence Française de Développement, 2003.
- [12] M. T. Demaze, “Les conventions internationales sur l’environnement: état des ratifications et des engagements des pays développés et des pays en développement,” *Inf. Geogr.*, vol. 3, no. 73, pp. 84–99, 2009.
- [13] “SDEC Energie - Syndicat départemental d’énergies du Calvados - Le SDEC Energie.” [Online]. Available: <http://www.sdec-energie.fr/LeSDECenergie.aspx>. [Accessed: 22-Dec-2014].
- [14] M. T. Demaze, “Le protocole de Kyoto, le clivage Nord-Sud et le défi du développement durable,” in *L’espace géographique*, 2012, pp. 139–156.
- [15] “Climate Change Newsroom from the UNFCCC.” [Online]. Available: <http://newsroom.unfccc.int/>. [Accessed: 18-Aug-2014].

- [16] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables," Thèse de doctorat, Université de Corse Pasquale Paoli, 2011.
- [17] "L'hydroélectricité, les barrages hydroélectriques - notre-planete.info." [Online]. Available: <http://www.notre-planete.info/ecologie/energie/hydroelectricite.php#>. [Accessed: 10-Jan-2015].
- [18] I. Laouini, "La gestion des centrales hydroélectriques en série par balancement des réservoirs," Thèse de doctorat, Université de Montréal, 2011.
- [19] M. Nasser, "Supervision de sources de production d'électricité hybrides éolien/hydraulique dans les réseaux d'énergie interconnectés ou isolés," Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [20] "Inconvénients et risques - TPE Barrages et Energie Hydroélectrique." [Online]. Available: <http://tpe.tdcc.fr/inconvenient-et-risques.html>. [Accessed: 07-Mar-2015].
- [21] "Énergie NB." [Online]. Available: https://www.nbpower.com/html/fr/safety_learning/learning/electricity_generated/hydro/hydro.html. [Accessed: 01-Apr-2015].
- [22] C. Joubert-garnaud, "Les énergies renouvelables dans l'agriculture de la Charente-Maritime : l'émergence en milieu rural d'un nouveau moteur du développement économique et social non dépourvu d'incidences sur l'environnement local," Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 2010.
- [23] A. Ricaud, "Modules et systèmes photovoltaïques," http://www.cythelia.fr/images/file/Systemes%20PV_Alain%20Ricaud_Sept-08.pdf, 2008.
- [24] "Boom du photovoltaïque en 2014 - Energies Renouvelables - L'EXPANSION - LA CHAÎNE ENERGIE," 10-Jan-2014. [Online]. Available: http://energie.lexpansion.com/energies-renouvelables/boom-du-photovoltaïque-en-2014_a-33-7969.html. [Accessed: 10-Jan-2015].
- [25] E. Fourmond, "Contribution au photovoltaïque de première génération : du matériau silicium aux couches diélectriques," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard LYON I, 2011.
- [26] "Schema principe panneau photovoltaïque." [Online]. Available: <http://www.bougepourtaplanete.fr/schema-principe-panneau-photovoltaïque.html>. [Accessed: 01-Apr-2015].
- [27] P. Pardo, "Développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique," Thèse de doctorat, University de Toulouse, 2013.
- [28] "L'énergie solaire thermique | energies-renouvelables.fr." [Online]. Available: <http://www.energies-renouvelables.fr/energie-solaire-thermique.php>. [Accessed: 10-Jan-2015].
- [29] E. Kabanshi, "Etude et conception d'un système de régulation automatique de la fréquence et de la tension de sortie d'une hydrolienne en fonction de la vitesse de la roue (cas du projet d'électrification décentralisée de la ferme Benjin Agriculture),"

- Thèse de doctorat, Université de Lubumbashi, 2007.
- [30] F. Sinama, "Etude de la production d'électricité à partir de l'Energie Thermique des Mers à l'île de La Réunion : Modélisation et optimisation du procédé," Thèse de doctorat, Université de la Reunion, 2013.
 - [31] J. Nou, "Gestion optimale de l' énergie thermique dans un procédé hybride : solaire / géothermie pour le chauffage de bâtiments," Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia, 2011.
 - [32] T. Luong Le, "Analyses dynamiques du réseau de distribution en présence des productions décentralisées," Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2008.
 - [33] "Géothermie | Le blog ecoCO2." [Online]. Available: <http://www.ecoco2.com/blog/geothermie>. [Accessed: 08-Mar-2015].
 - [34] I. Carlesi, "Etude d'un procédé de gazéification de biomasse en ambiance plasma sur bain de verre," Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2012.
 - [35] F. Mancini, "Traitement des déchets issus de la biomasse pour la génération d'énergie," Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2006.
 - [36] "La biomasse - Les Energies Renouvelables." [Online]. Available: http://generation.2077.over-blog.net/pages/La_biomasse-365732.html. [Accessed: 01-Apr-2015].
 - [37] J. Aubry, "Optimisation du dimensionnement d'une chaîne de conversion électrique directe incluant un système de lissage de production par supercondensateurs. Application au houlogénérateur SEAREV," Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, 2012.
 - [38] "Les énergies marines - EDF Site jeunes." [Online]. Available: <http://jeunes.edf.com/article/les-energies-marines,306>. [Accessed: 08-Mar-2015].
 - [39] B. Mustapha and T. Mohamed, "Filtrage actif par l'éolienne," Mémoire, Ecole nationale supérieure polytechnique Alger, 2009.
 - [40] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur Soutenu," Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2002.
 - [41] P. Frédéric, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne," Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2003.
 - [42] L. Abdelhamid, "Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens," Université de Batna, 2008.
 - [43] F. Kendouli, "Etat de l'art et modélisation des microcentrales," Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, 2007.
 - [44] Z. Nadjat, "Conception , modélisation et commande d' une éolienne à axe vertical," Mémoire de magister, Ecole nationale supérieure polytechnique Alger, 2008.

- [45] 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.
- [46] M. Abbas and M. Mouhamed, "Modélisation et Commande d'une MADA Alimentée Par une Cascade à Trois Niveaux Application à l'Energie Eolienne," Mémoire, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2006.
- [47] Y. A. Bencherif, "Modélisation et commande d ' une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l ' énergie éolienne," Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2008.
- [48] A. Davigny, "Participation aux services système de fermes d ' éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d ' énergie," Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [49] P. Lobo, Poza Javier, "Modélisation, Conception et Commande d'uneMachine Asynchrone sans Balais Doublement Alimentéepour la Génération à Vitesse Variable," Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
- [50] M. Naidji and B. Abderrahmane, "Conception et Réalisation d'un Système d'Acquisition pour une Eolienne de Petite Puissance," Mémoire, Ecole nationale polytechnique Alger, 2010.
- [51] K. Laid, "Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Electrique Double Alimentée," Mémoire de magister, Université de Batna, 2007.
- [52] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [53] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [54] F. Merahi, "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)," Mémoire de magister, Ecole nationale polytechnique Alger, 2007.
- [55] H. Ibrahim and D. Mariya, "Générateur éolien-diesel avec stockage d'énergie : critères de choix du système de stockage," *CIFQ2011 / ÉnergRenouv01 20-22 juin 2011, Saguenay*, pp. 1–6, 2011.
- [56] S. Trieste, "Modélisation et optimisation technico-économique d'une chaîne de conversion et de stockage d'énergie d'un navire électrique zéro émission," Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2013.
- [57] L. Tuline, "Le stockage stationnaire de l ' énergie," Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives France, 2012.
- [58] D. Paire, "Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entrainements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie," Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.

- [59] H. Ahmed, B. Multon, N. Bernard, and C. Kerzreho, "Le stockage inertiel électromécanique," *Rev. 3EI*, vol. 48, pp. 18–29, 2007.
- [60] "Le véhicule à air comprimé : à propos d'une « nouveauté »... vieille de plus de 150 ans et de quelques autres considérations du même ordre." [Online]. Available: <http://depris.cephes.free.fr/presscom/2002/060-02.htm>. [Accessed: 09-Mar-2015].
- [61] "CAES, stockage par air comprimé." [Online]. Available: <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/caes-stockage-par-air-comprime>. [Accessed: 09-Mar-2015].
- [62] "Stocker les énergies renouvelables grâce à l'hydrogène solide | Contrepoints." [Online]. Available: <http://www.contrepoints.org/2014/03/10/159061-stocker-les-energies-renouvelables-grace-a-lhydrogene-solide>. [Accessed: 09-Mar-2015].
- [63] B. Multon and J. Peter, "Le stockage de l'énergie électrique moyens et applications," *Rev. 3E.I*, vol. 6, pp. 59–64, 1996.
- [64] P. KRECZANIK, "Étude de la fiabilité et du vieillissement d'un système de stockage par supercondensateurs pour l'alimentation partielle et ponctuelle d'un trolleybus grâce à la récupération de l'énergie de freinage. Approche du composant au système de stockage," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2011.
- [65] A. Payman, "Contribution à la Gestion de l'Énergie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [66] D. Guillaume, "Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours," Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2004.
- [67] Q. Badey, "Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile," Thèse de doctorat, Université Paris Sud, 2012.
- [68] L. Croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs," Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2006.
- [69] V. Schwarz, "Le stockage électrochimique," Directrice opérationnelle déléguée Énergie, Air, Bruit – ADEME, 2005.
- [70] D. B. Loukakou, "Modélisation, Conception et Expérimentation d'un véhicule hybride léger pour usages urbains," Thèse de doctorat, Université de Franche-comté, 2012.
- [71] A. Devie, "Caractérisation de l'usage des batteries Lithium-ion dans les véhicules électriques et hybrides. Application à l'étude du vieillissement et de la fiabilité," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [72] D. V. Do, "Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées Table des matières," Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2010.
- [73] R. Saisset, "Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire," Thèse de doctorat, Université de

- Toulouse, 2004.
- [74] M. Montaru, “Contribution à l’évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages,” Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
 - [75] A. Eddahech, “Modélisation du vieillissement et détermination de l’état de sante de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride,” Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, 2013.
 - [76] F. Lamire, “La baisse rapide du prix des batteries Lithium Ion et la structuration de la filière,” 09-Dec-2014. [Online]. Available: http://www.themavision.fr/jcms/rw_438628/la-baisse-rapide-du-prix-des-batteries-lithium-ion-et-la-structuration-de-la-filiere. [Accessed: 26-Dec-2014].
 - [77] T. Ghennam, E. M. Berkouk, and B. Francois, “Modeling and control of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based Wind Conversion System,” in *2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2009, pp. 507–512.
 - [78] T. Mesbahi, T. Ghennam, and E. M. Berkouk, “Control of a Wind Energy Conversion System with active filtering function,” in *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 2011, no. May, pp. 1–6.
 - [79] T. Ghennam, E. M. Berkouk, and B. Francois, “DC-link voltage balancing algorithm using a space-vector hysteresis current control for three-level VSI applied for wind conversion system,” in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007, pp. 1–10.
 - [80] G. Salloum, “contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation,” Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de toulouse, 2007.
 - [81] O. Langlois, “Conception d ’ un réseau de secours électrique pour l ’ aéronautique,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique Toulouse, 2006.
 - [82] F. Merahi and E. M. Berkouk, “Back-to-back five-level converters for wind energy conversion system with DC-bus imbalance minimization,” *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 137–149, Dec. 2013.
 - [83] K. Ghedamsi, D. Aouzellag, and E. M. Berkouk, “Control of wind generator associated to a flywheel energy storage system,” *Renew. Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 2145–2156, Sep. 2008.
 - [84] Armand 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 1, 2006.
 - [85] T. Mesbahi, A. Ouari, T. Ghennam, E. M. Berkouk, and N. Mesbahi, “A hybrid wind energy conversion system/active filter for non linear conditions,” *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, Mar. 2014.
 - [86] N. Mendis, K. M. Muttaqi, and S. Perera, “Management of Low- and High-Frequency Power Components in Demand-Generation Fluctuations of a DFIG-Based Wind-Dominated RAPS System Using Hybrid Energy Storage,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 3, pp. 2258–2268, May 2014.

-
- [87] P. Thounthong, “Conception d’une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
 - [88] M. Andreica, Ana, “Optimisation énergétique de chaînes de conversion hydroliennes – modélisation, commandes et réalisations expérimentales,” Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
 - [89] H. Geng, C. Liu, and G. Yang, “LVRT Capability of DFIG-Based WECS Under Asymmetrical Grid Fault Condition,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 6, pp. 2495–2509, Jun. 2013.
 - [90] S. Belfedhal and E. Berkouk, “Modeling and Control of Wind Power Conversion System with a Flywheel Energy Storage System,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 43–52, 2011.
 - [91] L. Belhadji, “Commande Directe de Puissance Basée sur le Flux Virtuel d’un Convertisseur AC/DC Triphasé sans Capteur de Tension » Mémoire de magister, Ecole Militaire poly technique Alger, 2007.
 - [92] Z. Hu, D. Chen, B. Bai, and J. Yu, “Study on control system of the new type power transformer based on the PWM rectifier and current detecting circuit,” in *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition*, 2014, pp. 1116–1121.
 - [93] E. Barcenas, V. Cardenas, J. Arau, and R. Alvarez, “Practical considerations in the PWM rectifier with active filter function,” in *2008 11th IEEE International Power Electronics Congress*, 2008, pp. 56–62.
 - [94] A. Neffati, “Stratégies de gestion de l’énergie électrique d’un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride,” Thèse de doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2013.
 - [95] C. Grosjean, “Usages de batteries lithium-ion comme fonction de stockage d’électricité à la convergence des besoins énergétiques de l’habitat solaire et du transport électrique,” Thèse de doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, 2012.
 - [96] “Stockage de l’énergie électrique : les batteries lithium-ion | L’ENERGEEK : l’énergie facile en quelques clics !” [Online]. Available: <http://lenergeek.com/2013/06/12/stockage-de-lenergie-electrique-les-batteries-lithium-ion/>. [Accessed: 27-Mar-2015].
 - [97] E. Samadani, S. Farhad, W. Scott, M. Mastali, L. E. Gimenez, M. Fowler, and R. A. Fraser, “Empirical Modeling of Lithium-ion Batteries Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy Tests,” *Electrochim. Acta*, vol. 160, pp. 169–177, Apr. 2015.
 - [98] E. Prada, D. Di Domenico, Y. Creff, J. Bernard, V. Sauvant-Moynot, and F. Huet, “Simplified Electrochemical and Thermal Model of LiFePO₄-Graphite Li-Ion Batteries for Fast Charge Applications,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 159, no. 9, pp. A1508–A1519, Aug. 2012.
 - [99] S. De, P. W. C. Northrop, V. Ramadesigan, and V. R. Subramanian, “Model-based simultaneous optimization of multiple design parameters for lithium-ion batteries for maximization of energy density,” *J. Power Sources*, vol. 227, pp. 161–170, Apr. 2013.

- [100] S. Butterbach, “Stockage d ’ énergie électrique par association de batteries au plomb et de supercondensateurs pour véhicule lourd,” Thèse de doctorat, Université de Technologie de Compiègne, 2012.
- [101] A. Allegre, “Méthodologies de modélisation et de gestion de l ’ énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides,” Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2010.
- [102] O. Tremblay, L. Dessaint, and A. Dekkiche, “A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles,” in *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007, no. V, pp. 284–289.
- [103] T. Mesbahi, N. Rizoug, P. Bartholomeus, and P. Le Moigne, “Li-Ion Battery Emulator for Electric Vehicle Applications,” in *2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2013, pp. 1–8.
- [104] L. Gidwani, H. Tiwari, and R. C. Bansal, “Improving power quality of wind energy conversion system with unconventional power electronic interface,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 445–453, Jan. 2013.
- [105] F. Merahi, E. M. Berkouk, and S. Mekhilef, “New management structure of active and reactive power of a large wind farm based on multilevel converter,” *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 814–828, Aug. 2014.
- [106] T. Ghennam and E.-M. Berkouk, “Back-to-back three-level converter controlled by a novel space-vector hysteresis current control for wind conversion systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 4, pp. 444–455, Apr. 2010.
- [107] F. Akel, T. Ghennam, E. M. Berkouk, and M. Laour, “An improved sensorless decoupled power control scheme of grid connected variable speed wind turbine generator,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 584–594, Feb. 2014.
- [108] K. E. L. Khil, “Commande Vectorielle d ’ une Machine Asynchrone Doublement Alimentée,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique Toulouse, 2006.
- [109] M. Bouzidi and S. Barkat, “Commande par Orientation de la Tension d’un Redresseur PWM Utilisant la Commande Non Linéaire Adaptative,” *Prem. Séminaire Natl. sur le Génie Electr. Appliqué aux Energies Renouvelables, Chlef, Algeri*, 2010.
- [110] M. P. Kazmierkowski, “Control strategies for PWM rectifier/inverter-fed induction motors,” in *ISIE’2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.00TH8543)*, 2000, vol. 1, pp. TU15–TU23.
- [111] G. Joos, L. Moran, and P. Ziogas, “Performance analysis of a PWM inverter VAR compensator,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 6, no. 3, pp. 380–391, Jul. 1991.
- [112] A. W. Green and J. T. Boys, “Hysteresis current-forced three-phase voltage-sourced reversible rectifier,” vol. 136, no. 3. pp. 113–120, 1989.
- [113] H. Dennoun, “Contribution à l’étude des redresseurs à MLI à facteur de puissance unitaire,” Ecole Militaire poly technique (EMP), Alger, 2001.
- [114] N. R. Zargari and G. Joos, “Performance investigation of a current-controlled voltage-regulated PWM rectifier in rotating and stationary frames,” in *Proceedings of IECON*

- '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 1993, pp. 1193–1198.
- [115] M. Malinowski, M. Jasinski, and M. P. Kazmierkowski, “Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space-Vector Modulation (DPC-SVM),” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 2, pp. 447–454, Apr. 2004.
 - [116] R. Zhang, F. C. Lee, and D. Boroyevich, “Four-legged three-phase PFC rectifier with fault tolerant capability,” in *2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37018)*, 2000, vol. 1, pp. 359–364.
 - [117] O. Bouhali, B. Francois, C. Saudemont, and E. M. Berkouk, “Practical power control design of a NPC multilevel inverter for grid connection of a renewable energy plant based on a FESS and a Wind generator,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2, no. 1, pp. 4291–4296, 2006.
 - [118] M. Zandi, “Contribution au pilotage des sources hybrides d’énergie électrique,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
 - [119] S. A. Belfedhal, E. Berkouk, Y. Meslem, and Y. Soufi, “Modeling and Control of Wind Power Conversion System with a Flywheel Energy Storage System and Compensation of Reactive Power,” vol. 2, no. 3, 2012.
 - [120] W. Wang, B. Ge, D. Bi, and D. Sun, “Grid-connected wind farm power control using VRB-based energy storage system,” *2010 IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, pp. 3772–3777, Sep. 2010.
 - [121] T. Mesbahi, A. Ouari, T. Ghennam, E. M. Berkouk, N. Rizoug, N. Mesbahi, and M. Meradji, “A stand-alone wind power supply with a Li-ion battery energy storage system,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 204–213, Dec. 2014.
 - [122] T. Mesbahi, T. Ghennam, and E. M. Berkouk, “A Doubly Fed Induction Generator for wind stand-alone power applications (Simulation and experimental validation),” in *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, pp. 2028–2033.
 - [123] F. Khatounian, E. Monmasson, F. Berthereau, and J. P. Louis, “Design of an output LC filter for a doubly fed induction generator supplying non-linear loads for aircraft applications,” in *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2004, vol. 2, pp. 1093–1098 vol. 2.
 - [124] F. Khatounian, “Control of a Doubly Fed Induction Generator for Aircraft Application,” *IEEE IECON 2003, Roanoke, pp. 20711-2016 USA*, 2003.
 - [125] T. Mesbahi, T. Ghennam, and E. M. Berkouk, “Modeling and Control of a Stand-Alone Doubly Fed Induction Generator (DFIG) Based Wind Energy Conversion System,” in *International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, (EVER’11)*.
 - [126] B. Tounsi, “Etude comparative de groupes électrogènes embarqués à large gamme de vitesse variable associant machines à aimants permanents et conversion statique,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique Toulouse, 2007.
 - [127] M. O. Curi, E. L. van Emmerik, B. W. Franca, L. G. B. Rolim, and M. Aredes, “A novel topology for fuel cell stack generation with flywheel energy storage system and

- Z-source converter,” in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, pp. 1–6.
- [128] P. Tritzschler, “Optimisation de l’architecture électrique et gestion d’énergie pour un système à pile à combustible embarquée dédié à l’application agricole,” Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [129] D. P. Kaundinya, P. Balachandra, and N. H. Ravindranath, “Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power—A review of literature,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 2041–2050, Oct. 2009.
- [130] R. Zeng, H. Nian, Y. Quan, and J. Liu, “Improved load-adaptive control strategy for PMSG based stand-alone wind energy generation system,” *2009 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, pp. 1–6, Nov. 2009.
- [131] Y. Thiaux, “Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion,” Thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, 2010.
- [132] J.-F. Reynaud, “Recherches d’optimums d’énergies pour charge/décharge d’une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques,” Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2011.
- [133] A. González-Gil, R. Palacin, and P. Batty, “Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 374–388, Nov. 2013.
- [134] G. Wang, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, “Power Smoothing of Large Solar PV Plant Using Hybrid Energy Storage,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 834–842, Jul. 2014.
- [135] M. A. E. Alali, “Contribution à l’Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension,” Thèse de doctorat, l’Université Louis Pasteur – Strasbourg I, France, 2002.
- [136] N. Mesbahi, “Contribution à l’Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution,” Thèse de doctorat, Université d’Annaba, 2014.
- [137] M. Aissni, “Commande numérique d’un convertisseur triphasé à quatre bras par MLI vectorielle à trois dimensions (application au filtrage actif),” Ecole Militaire Poly technique Alger, 2009.
- [138] T. Ghennam, “Etude et Réalisation d’un Compensateur Actif de Puissance Commandé par DSP,” Mémoire de magister, Ecole Militaire Poly technique Alger, 2005.
- [139] F. Hamane, “Commande Robuste d’un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils,” Mémoire de magister, Université de Batna, 2008.
- [140] N. P. Gupta, P. Gupta, and D. Masand, “Power quality improvement using hybrid active power filter for a DFIG based wind energy conversion system,” in *2012 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE)*, 2012, pp. 1–6.
- [141] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Instantaneous Reactive Power Compensators

- Comprising Switching Devices without Energy Storage Components,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 3, pp. 625–630, May 1984.
- [142] H. Akagi, “The state-of-the-art of active filters for power conditioning,” in *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005, p. 15 pp.–P.15.
- [143] M. Benhabib, “Contribution à l’étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension: Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande,” Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.
- [144] S. Beaulieu, “Etude Et Mise Au Point D’un Filtre Actif D’harmoniques En Vue D’améliorer La Qualité De L’alimentation Électrique,” Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [145] H. Koura, “Application d’une Filtre Série au Tension au Contrôle de la Tension d’un Réseau Basse Tension,” Mémoire de magister, Université de Batna, 2006.
- [146] M. Kesraoui, A. Chaib, A. Meziane, and A. Boulezaz, “Using a DFIG based wind turbine for grid current harmonics filtering,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 968–975, Feb. 2014.
- [147] M. . Abdusalam, “Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales,” Thèse de doctorat, Université de Nancy, 2008.
- [148] M. Boutoubat, L. Mokrani, and M. Machmoum, “Control of a wind energy conversion system equipped by a DFIG for active power generation and power quality improvement,” *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 378–386, Feb. 2013.
- [149] 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.
- [150] N. Mesbahi, A. Ouari, D. Ould Abdeslam, T. Djamah, and A. Omeiri, “Direct power control of shunt active filter using high selectivity filter (HSF) under distorted or unbalanced conditions,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 108, pp. 113–123, Mar. 2014.
- [151] M. Abdusalam, P. Poure, and S. Saadate, “Study and experimental validation of harmonic isolation based on High Selectivity Filter for three-phase active filter,” in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 166–171.
- [152] M. Abdusalam, P. Poure, and S. Saadate, “Study and experimental validation of harmonic isolation based on High Selectivity Filter for three-phase active filter,” in *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp. 166–171.
- [153] “China on world’s ‘biggest push’ for wind power - BBC News.” [Online]. Available: <http://www.bbc.com/news/science-environment-25623400>. [Accessed: 23-Mar-2015].
- [154] “Algérie solidaire | Le CDER publie une nouvelle carte du gisement éolien algérien.” [Online]. Available: <http://algeriesolidaire.net/le-cder-publie-une-nouvelle-carte-du-gisement-eolien-algerien/>. [Accessed: 23-Mar-2015].
- [155] G. Dillenseger, “Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour

- batteries stationnaires de secours,” Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 2004.
- [156] T. Wang, “Commande robuste pour une gestion énergétique fonction de l ’ état de santé de la batterie au sein des véhicules hybrides,” Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2013.
- [157] M. . Pellicier, “Les perturbations,” Institut Schneider formation et l’approche pédagogique.

Annexes

Annexe A

Energie éolienne dans le monde

Ces dernières années, plusieurs pays se sont résolument dirigés vers l'énergie éolienne. Comme l'illustre la Figure A. 1, en 2014 la Chine est devenue le plus grand investisseur dans le domaine de l'énergie éolienne avec 26.7% de nouvelles installations de turbines éoliennes. Les Etats Unis, leader mondial de l'énergie renouvelable est classée deuxième avec 21.2% et une puissance éolienne installée de 60,15 MW. En Europe l'Allemagne, numéro trois mondialement avec 11.1% de nouvelles installations et une puissance 33MW suivie par l'Espagne avec 8.1% et une puissance installée de 24MW.

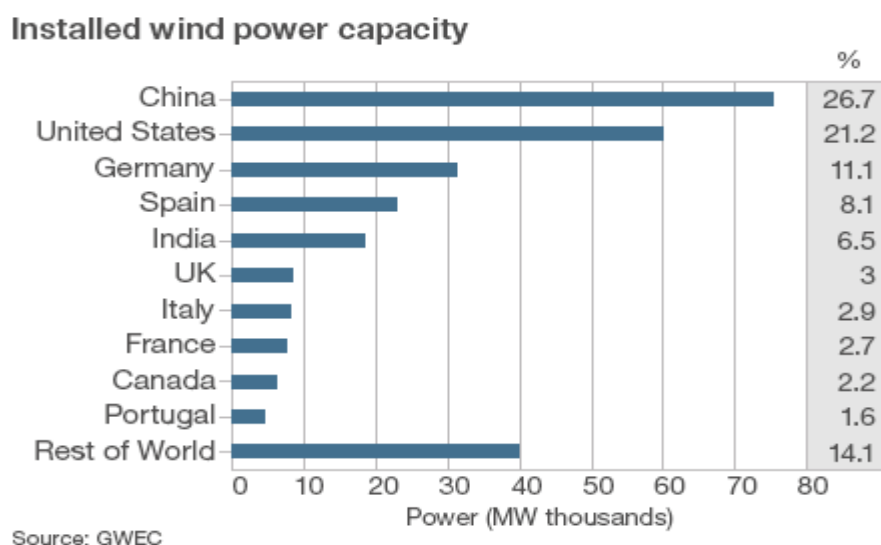


Figure A. 1 : Energie éolienne dans le monde[153]

Pour l'Algérie, le gisement éolien est très diversifié. Il varie en fonction des saisons et d'une zone à une autre. La carte de la Figure A. 2, montre que le Sud algérien est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que celles du Nord. Particulièrement, la contrée Sud-Ouest du pays avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent les 6 m/s dans la région d'Adrar[45]. Par contre, le Nord algérien caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, la vitesse moyenne du vent est globalement peu élevée[154].

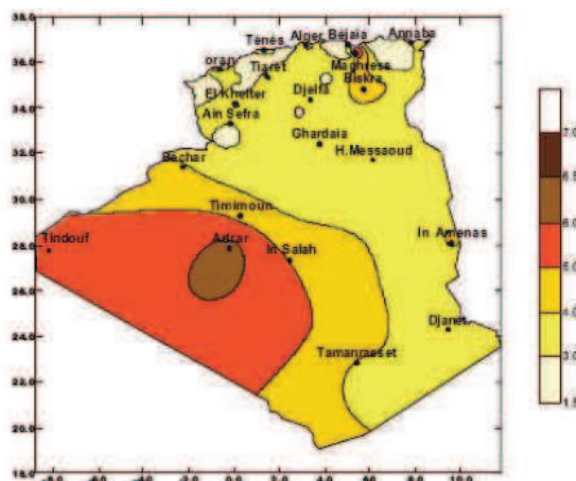


Figure A. 2 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s)[45].

Annexe B

Caracteristiques des machines

1) Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Les caractéristiques de la machine asynchrone à double alimentation utilisée dans ce travail sont:

Puissance (P)	7.5 KW
Résistance statorique (R_s)	0.455 Ω
Inductance statorique (L_s)	0.583 H
Résistance rotorique (R_r)	0.455 Ω
Inductance rotorique (L_r)	81mH
Inductance mutuelle (L_m)	78 mH
Nombre de paires de pole (p)	2
Inertie (J)	0.3125 kg.m ²
Coefficient de frottement (f_r)	0.00673 Nms /rad

Tableau B. 1: Caractéristique de la machine asynchrone à double alimentation

2) Paramètre de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La machine synchrone à aimant permanent utilisée dans ce travail possède les caractéristiques suivantes :

Puissance (P)	5.1KW
Résistance statorique (R_s)	2.43 Ω
Inductance statorique selon l'axe d (L_d)	30.6 mH
Inductance statorique selon l'axe q (L_q)	29.1 mH
Flux des aimants permanents (k_m)	0.16
Nombre de paires de pole (p)	5
Inertie (j)	0.0035 kg.m ²
Coefficient (Ke)	194

Tableau B. 2: Caractéristique de la machine synchrone à aimant permanent

Annexe C

Grandeurs caractéristiques des batteries Li-ion

Les grandeurs caractéristiques d'une batterie dans le domaine électrique sont :

1) La capacité

La capacité d'une batterie est la quantité de charge électrique, qu'elle est capable de restituer, après avoir reçu une charge complète, pour un courant de décharge constant, une température et un état de santé bien définies. La capacité est exprimée en ampères-heures (Ah). Elle correspond à :

$$C_{bat} = \int_{e_i}^{e_f} i \, dt \quad (C. 1)$$

Avec : i l'intensité de courant (A) ;

e_i et e_f l'état initial et final correspondant à des critères donnés, (de tension en général).

La capacité nominale d'une batterie est la capacité mesurée dans les conditions nominales. Ces conditions correspondent à un protocole précis, en particulier la température et le régime de charge / décharge définies, lorsque la batterie est neuve[67].

2) Régime de charge /décharge

Le cycle de charge/décharge d'une batterie est évalué en fonction du régime de décharge (C-Rate) qui représente l'intensité de courant nécessaire pour obtenir la capacité pendant un temps de $(1/\text{Rate})$ [75]. Il est considéré comme étant une norme de la capacité de la batterie. Par exemple, un régime de 3C pour une capacité de 40Ah signifie que la batterie sera complètement déchargée en 1heure/3 à un courant de 120 A. Pour la même capacité de 40Ah et un régime de 1/10C est obtenu avec un courant de décharge de 4A pendant dix heures. En général, les limites d'utilisation en courant d'une batterie sont spécifiées pour les régimes de charge et de décharge.

3) Résistance interne

La résistance interne correspond à la somme de la résistance électrique des matériaux constituant la batterie (électrodes, connexions, électrolyte) et celle liée aux réactions chimiques. Cette résistance dépend de nombreux paramètres dont : la composition chimique de l'électrolyte, la température, l'état de charge, la qualité de la connexion aux bornes de l'élément. En général, la résistance interne d'une batterie a tendance à augmenter avec son état de vieillissement et avec la dégradation de son état de santé. Il est, par contre, de prévoir l'évolution de la résistance interne en fonction de son état de charge (SOC).

4) Etat de charge

L'état de charge ou SOC (State Of Charge) d'une batterie est la quantité résiduelle de charge pouvant être restituée par rapport à la capacité nominale. Le SOC est exprimé en

pourcentage. Il est de 100% quand le courant de recharge ne varie pas pendant deux heures, pour une recharge à tension constante et température constante [155]. Cet indicateur est généralement calculé en intégrant le courant qui traverse la batterie et correspond à :

$$SOC = \frac{C_{actuelle}}{C_{totale}} = SOC(t_0) - \frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt \quad (C. 2)$$

Où :

- SOC (t_0) est l'état de charge initial,
- $i(t)$ le courant traversant la batterie.

5) Tension en circuit ouvert

La tension à vide ou en circuit ouvert OCV (*Open Circuit Voltage*) représente la tension continue d'une batterie en l'absence de charge ou de décharge et correspond à son potentiel d'équilibre. Cette tension dépend de l'état de charge de la batterie et de la température. La Figure C. 1, illustre l'évolution d'OCV en fonction de l'état de charge SOC.

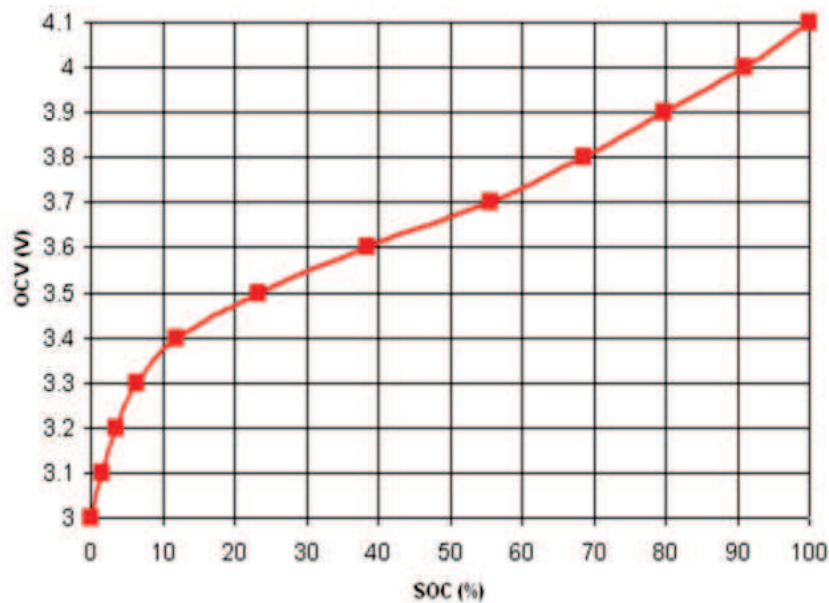


Figure C. 1: Tension à vide en fonction de SOC (Li-ion /NCA) [74].

6) État de santé

L'état de santé SOH (*State of Health*) de la batterie est un indicateur qui quantifie la réduction de la performance due à la dégradation de la capacité et l'augmentation de la résistance interne [75]. La gamme de variation du SOH est définie de 0% à 100% ; 100% signifie que la batterie est totalement neuve et 0% qu'elle a perdu toutes ses capacités de fonctionnement [156]. La capacité et la résistance interne peuvent être utilisées comme paramètres pour fournir une indication du SOH de la batterie. En général, cette grandeur est calculée par le rapport entre la capacité totale actuelle et la capacité de la batterie avant sa première utilisation, en maintenant la température stable pour l'évaluation du SOC [74]. La dégradation de l'état de santé de la batterie constitue ce que l'on appelle le vieillissement.

Annexe D

Normes et réglementations pour les perturbations harmoniques

Les harmoniques ont des effets néfastes sur les installations et les équipements électriques tels que : l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, des pertes supplémentaires de puissance dans les lignes et les transformateurs, le risque de résonance et les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques. Pour limiter ces effets, des normes de qualité de l'énergie électriques ont été imposées par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) principaux organismes de normalisation dans le domaine de l'électrotechnique.[135]. Ces deux organismes s'occupent des activités de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial, malgré qu'ils ont une approche différente des critères définissant les interactions entre le réseau et les charges connectées[136]. Les niveaux des courants et des tensions harmoniques sont fixés par la norme CEI 61000-3-2 pour les appareils raccordés au réseau public en basse tension consommant moins de 16 A par phase. La norme CEI 61000-2-2 définit des niveaux de compatibilité de tensions harmoniques pour les réseaux publics basse tension et CEI 61000-2-4 pour les installations industrielles basse et moyenne tension[157].

Le [Tableau D. 1](#), présente les détails de norme internationale CEI 61000-3-2 pour le domaine domestique.

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot 15/h$		

Tableau D. 1 : Limites des composantes harmoniques en courant CEI 61000-3-2[136].

