



FACULTE DE TECHNOLOGIE Département De
Génie Electrique Et Electronique

MEMOIRE
Pour l'obtention du Diplôme de
Master en Electrotechnique
Option : Commande de Machine Electrique

Présenté par :
Souleymane BENZEGHADI
Mohammed Ilyas DJELLOULI

Thème
Etude et Simulation d'une éolienne
(Turbine+MADA) à vitesse variable suivant
les deux modes de fonctionnement
hypo et hyper-synchrone

Mémoire soutenu publiquement le 13/10/2013 devant le Jury composée de :

Président	Sidi Mohamed MELIANI	M.C.B	Univ. Tlemcen
Encadreur	Mohammed Amine BRIKCI NIGASSA	M.A.A	Univ. Tlemcen
Examineur	Mohammed Choukri BENHABIB	M.C.B	Univ. Tlemcen
Examineur	Abdelkader MECHERNENE	M.A.A	Univ. Tlemcen

Remerciements

Avant tous, il apparait opportun de commencer ce Mémoire par des remerciements à Allah puis à ceux qui nous ont beaucoup appris au cours de ce travail.

Nous tenons à exprimé notre sincère gratitude à *Monsieur MELIANI Sidi Mohamed* Maître de Conférence à la Faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen pour avoir accepté de présider et d'honoré de sa présence le Jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Nous tenons aussi à remercier Messieurs *BENHABIB Mohammed Choukri et Abdelkader MECHERNENE* pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à l'égard de ce travail par leurs nombreuses et enrichissantes remarques et observations. Enfin pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire au titre de membre de jury.

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre profonde gratitude à *Monsieur BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine*, Maître Assistant à la Faculté de Technologie de l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen pour avoir proposé, suivi et dirigé ce travail mais également pour sa disponibilité, et pour le respect dont nous fûmes témoins. Nous le remercions pour nous avoir fait profiter de son expérience ainsi que ses orientations constructives et ses encouragements qui nous ont été précieux, et nous ont permis de mener à bien ce travail.

Mohammed Ilyas DJELLOULI
Souleymane BENZEGHADI
Tlemcen, Octobre 2013

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- Aux êtres les plus chers à mon cœur, ma mère et mon père, qui m'ont beaucoup soutenu durant mon cursus d'étude et à qui je serai éternellement reconnaissant ;
- A mes chères sœurs ;
- A mes chers frères ;
- A mon cousin Redouane ;
- A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique ;
- A mes amis : Kamel, Said, Kaddour, Youcef, Mekeleche ;
- A mes camarades : Loucif, Chemidi ;
- Enfin à tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu.

Souleymane BENZEGHADI

Tlemcen, Octobre 2013

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

- A ma famille, mon père, ma mère, pour leurs soutient morale dans les moments les plus ardues ;
- A ma sœur et frères ;
- A mes grands parents, tentes et oncles ;
- A mon encadreur Monsieur M. A. Brikci Nigassa pour son amabilité et sa disponibilité ;
- A tous mes amis(es), tout particulièrement : M. Dellal et A. Asmaâ ;
- Aux deux promotions master 2, Electrotechnique, option Commande : cession 2012 et 2013 ;
- A tout ceux qui m'on aider à élaborer ce travail, principalement : O. Dehmani., M. Loucif, A. Chemmidi ;

Je tiens aussi à remercier Mr Farid pour sa contribution à la réussite de mon stage au sein de l'ENTP

Enfin, je remercie tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la mise en œuvre de ce travail.

Mohammed Ilyas DJELLOULI

Tlemcen, Octobre 2013

Table de matière

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Notations, Symboles, Abréviation et Acronymes

Introduction Générale

Chapitre I :

I	Etat de l'art des éoliennes	4
I.1	Introduction	8
I.2	Historique.....	9
I.3	Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne	9
I.4	Descriptif d'une éolienne	10
I.5	Différent type éoliennes	12
I.5.1	Eolienne à axe vertical	13
I.5.2	Eolienne à axe horizontal	13
I.6	Les avantages et inconvénient d'une éolienne	14
I.6.1	Avantage	14
I.6.2	Les inconvénients	15
I.7	Application des éoliennes	16
I.8	Taille des aérogénérateurs	16
I.9	L'énergie éolienne dans le monde	17
I.9.1	La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne	17
I.9.2	Projet en cours de réalisation en l'Algérie	20
I.10	Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable	20
I.11	Types de machines électriques	22
I.12	Les avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation	31
I.12.1	Inconvénients	31
I.12.2	Avantages	31
I.13	Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur	31
I.14	Conclusion	32

Chapitre II

II	Modélisation de la turbine	34
II.1	Introduction	38
II.2	Modélisation de la turbine	39
II.2.1	Considérations préliminaires	39
II.2.2	Le coefficient de puissance	42
II.2.3	Evolution des coefficients d'un aérogénérateur (C_p, λ, β).....	43
II.3	Production d'énergie mécanique	45
II.3.1	Equation dynamique de l'arbre	46
II.4	Stratégie de commande de la turbine éolienne	48
II.4.1	Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	48
II.4.2	Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation	51
II.4.3	Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation	59
II.4.4	Etude comparative	65
II.5	Conclusion	66

Chapitre III :

III	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	68
III.1	Introduction	73
III.2	Constitution de la machine asynchrone à rotor bobiné	74
III.3	Principe de fonctionnement de la MADA	74
III.4	Modes de fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation ...	76
III.4.1	Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	76
III.4.2	Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	77
III.4.3	Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone	78
III.4.4	Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone	78
III.5	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	79
III.5.1	Hypothèses simplificatrices	80
III.5.2	Modèle de la machine dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant	83
III.6	Modèle de machine asynchrone à double alimentation pour la commande en puissances	84
III.6.1	Choix du référentiel pour le modèle diphasé	86
III.6.2	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	88
III.7	Commande directe (Mode continu)	89
III.8	Modélisation de la commande coté MADA	90
III.8.1	L'onduleur	90
III.8.2	Modulation de Largeur d'Impulsions Sinus-triangle	92
III.9	Résultat de simulation de la MADA	94
III.9.1	Résultats de simulation avec régulateur PI	94
III.9.2	Résultat de simulation avec régulateur IP	95
III.10	Modélisation de la commande cotée réseau	110
III.11	Résultats de simulation	116
III.12	Résultats de simulation	118
III.13	Conclusion	134

Chapitre VI :

IV	Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »	135
IV.1	Introduction	137
IV.2	Profils du vent appliqué à l'entrée de la turbine	138
IV.3	Hypothèses	139
IV.4	Simulation et interprétations	142
IV.5	Résultats de simulation	143
IV.6	Conclusion	164
	Conclusion Générale	165

Annexes

Resumé

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I :

Figure I.1	Principe de la conversion d'énergie	6
Figure I.2	Principaux éléments constituant une éolienne	6
Figure I.3	Deux types des éoliennes	8
Figure I.4	Eolienne lente	9
Figure I.5	Eolienne rapide	9
Figure I.6	Evolution de la taille des éoliennes	12
Figure I.7	Capacité mondiale installé en (MW)	13
Figure I.8	Taux de croissance du marché mondial	13
Figure I.9	Les 10 premières capacités en (MW)	14
Figure I.10	Total des installations – Afrique (MW)	15
Figure I.11	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie	16
Figure I.12	Eolienne directement connecte au réseau	17
Figure I.13	Caractéristique puissance vitesse de la turbine pour différent vitesse du vent	17
Figure I.14	Machine synchrone connecté directement au réseau (Configuration inexistante)	19
Figure I.15	Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance	20
Figure I.16	Caractéristique couple-vitesse d'une machine Asynchrone à deux pairs de pole	21
Figure I.17	Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau	22
Figure I.18	Eolienne connecté au réseau par l'intermédiaire de Deux Convertisseurs de puissance	23
Figure I.19	Schéma de principe de fonctionnement de la machine asynchrone à Double alimentation	25
Figure I.20	Schéma de principe de fonctionnement d'une machine asynchrone à Double alimentation en cascade	25
Figure I.21	Schéma de principe de fonctionnement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation sans balais	26

CHAPITRE II :

Figure II.1	Profil du vent en (m/s).....	39
Figure II.2	Les forces appliquées à l'entrée de l'aérogénérateur	40
Figure II.3	Modèle mécanique simplifié de la turbine	40
Figure II.4	Schéma explicatif de la turbine éolienne	41
Figure II.5	Coefficient de puissance pour différents types d'aérogénérateurs	43
Figure II.6	Caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour cinq valeurs de β	44
Figure II.7	Caractéristique $C_p= f(\lambda)$ pour $\beta= 2^\circ$	45
Figure II.8	Modèle mécanique simplifié du multiplicateur	46
Figure II.9	Modèle de l'aérogénérateur	48
Figure II.10	Les quatre zones de fonctionnement de la turbine	49
Figure II.11	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	50
Figure II.12	Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation	51
Figure II.13	Modèle de la turbine avec asservissement de vitesse	53
Figure II.14	Profils du vent constant	53
Figure II.15	Evolution des paramètres de la turbine éolienne avec asservissement de vitesse (V_v : Constante) ; (a): $\lambda=f(t)$; (b): $C_p=f(t)$; (c): $P_{aer}=f(t)$; (d): $C_m=f(t)$; (e): $\Omega_m=f(t)$	54
Figure II.16	Profil du vent	55
Figure II.17	Bruit après filtrage	56
Figure II.18	Le profil du vent appliqué à l'entrée de l'éolienne	56
Figure II.19	Paramètre de la turbine éolienne avec asservissement de vitesse (V_v :Variable) : $\lambda=f(t)$; (b): $C_p=f(t)$; (c): $P_{aer}=f(t)$; (d) : $C_m=f(t)$; (e): $\Omega_m=f(t)$	57
Figure II.20	Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation	59
Figure II.21	Modèle de la turbine sans asservissement de vitesse	61
Figure II.22	Paramètre de la turbine éolienne sans asservissement de vitesse ($V_v=$ Constante): (a) : $\lambda=f(t)$; (b): $C_p=f(t)$; (c): $P_{aer}=f(t)$; (d): $C_m=f(t)$; (e): $\Omega_m=f(t)$	62
Figure II.23	Paramètre de la turbine éolienne sans asservissement de vitesse (V_v :Variable) : (a) : $\lambda=f(t)$; (b): $C_p=f(t)$; (c): $P_{aer}=f(t)$; (d): $C_m=f(t)$; (e): $\Omega_m=f(t)$	64
Figure II.24	Comparaison de la vitesse mécanique avec et sans asservissement de vitesse exprimé en rad/s	65
Figure II.25	comparaison des vitesses mécaniques avec les deux stratégies de commande à vitesse variable	66

CHAPITRE III :

Figure II.1	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	74
Figure II.2	Fonctionnement en moteur, mode hypo-synchrone	77
Figure II.3	Fonctionnement moteur en mode hyper-synchrone	77
Figure II.4	Fonctionnement générateur en mode hypo-synchrone	78
Figure II.5	Fonctionnement générateur en mode hyper-synchrone	78
Figure II.6	Chaine de conversion de l'éolienne	79
Figure II.7	Représentation simplifiée de la MADA	80
Figure II.8	Schéma bloque de la MADA	88
Figure II.9	Schéma bloc du système à régulé avec la commande directe	89
Figure II.10	Représentation de la MADA avec un onduleur de tension	90
Figure II.11	Onduleur triphasé à deux niveaux	90
Figure II.12	Principe de la commande MLI-ST	92
Figure II.13	Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), du couple électromagnétique T_e (N.m), avec régulateur PI	94
Figure II.14	Variation du courant statorique I_s , la vitesse ω_m (rad/s) avec régulateur PI	95
Figure II.15	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=2s$. (a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR) =f(t)$, (c) : $T_e(N.m) =f(t)$; (d): $I_s(A) =f(t)$, (e) : ω_m (rad/s) $=f(t)$	96
Figure II.16	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=4s$. (a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR) =f(t)$, (c): $T_e(N.m) =f(t)$; (d): $I_s (A) =f(t)$, (e): ω_m (rad/s) $=f(t)$	98
Figure II.17	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=6s$. (a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR) =f(t)$, (c): $T_e(N.m) =f(t)$; (d): $I_s(A) =f(t)$, (e): ω_m (rad/s) $=f(t)$	100
Figure II.18	Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), Le couple électromagnétique T_{em} (N.m) avec régulateur IP	102
Figure II.19	Variation du courant statorique $I_s(A)$, la vitesse ω_m (rad/s) avec régulateur IP	103
Figure II.20	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=2s$. (a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR) =f(t)$, (c) : $T_e(N.m) =f(t)$; (d): $I_s(A) =f(t)$, (e) : ω_m (rad/s) $=f(t)$	104
Figure II.21	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=4s$. (a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR) =f(t)$, (c): $T_e(N.m) =f(t)$; (d): $I_s (A) =f(t)$, (e): ω_m (rad/s) $=f(t)$	106
Figure II.22	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=6s$. (a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR) =f(t)$, (c): $T_e(N.m) =f(t)$; (d): $I_s(A) =f(t)$, (e): ω_m (rad/s) $=f(t)$	108
Figure II.23	Représentation de la MADA et son système d'alimentation au rotor	110
Figure II.24	Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension	111
Figure II.25	Modulateur MLI à bande hystérésis	112

Figure III.26	Commande en tension MLI à bande d'Hystérésis	113
Figure III.27	Représentation de l'angle θ_s de la PLL	114
Figure III.28	Schéma simplifié de la P.L.L classique	115
Figure III.29	Représentation de l'angle θ_s de la PLL en continu	116
Figure III.30	Représentation des signaux cosinus et sinus de la PLL	116
Figure III.31	Schéma bloc du système a régulé de la CCR	116
Figure III.32	Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), Le couple électromagnétique Tem (N.m) avec régulateur PI	118
Figure III.33	Variation du courant statorique I_s , la vitesse ω_m (rad/s) avec régulateur PI	119
Figure III.34	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à t=2s. (a) : P(W)=f(t), (b) : Q(VAR) =f(t), (c) : Te(N.m) =f(t); (d): Is(A) =f(t), (e) : ω_m (rad/s) =f(t)	120
Figure III.35	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à t=3s. (a) : P(W)=f(t), (b) : Q(VAR) =f(t), (c) : Te(N.m) =f(t); (d): Is(A) =f(t), (e) : ω_m (rad/s) =f(t)	122
Figure III.36	Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à t=2s. (a) : P(W)=f(t), (b) : Q(VAR) =f(t), (c) : Te(N.m) =f(t); (d): Is(A) =f(t), (e) : ω_m (rad/s) =f(t)	124
Figure III.37	Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), le couple électromagnétique Tem (N.m) avec régulateur IP	126
Figure III.38	Variation du courant statorique I_s , la vitesse ω_m (rad/s) avec régulateur IP	127
Figure III.39	Evolution des paramètres de la commande côté MADA à t=2s ; (a) : P(W)=f(t), (b) : Q(VAR) =f(t), (c) : Te(N.m) =f(t); (d): Is(A) =f(t), (e) : ω_m (rad/s) =f(t)	128
Figure III.40	Evolution des paramètres de la commande côté MADA à t=4s; (a):P(W)=f(t), (b): Q (VAR) =f(t), (c): Te (N.m) =f(t); (d):Is(A)=f(t); (e): ω_m (rad/s) =f(t)	130
Figure III.41	Evolution des paramètres de la commande côté MADA à t=6s ; (a):P(W)=f(t), (b):Q(VAR) =f(t), (c):Te(N.m) =f(t) ; (d): Is(A) =f(t), (e): ω_m (rad/s) =f(t)	132

CHAPITRE IV :

Figure VI.1	Modèle d'étude complet « Turbine + Multiplicateur + MADA »	137
Figure VI.2	Evolution de la vitesse du vent V_v (m/s)	138
Figure VI.3	V_v en fonction du temps avant et après application du limiteur	140
Figure IV.4	Vitesse du vent V_v qui sera appliqué à la turbine	140
Figure IV.5	Evolution de la vitesse de la turbine Ω_t en rad/s	141
Figure IV.6	Evolution de la vitesse mécanique Ω_m en rad/s.	141
Figure IV.7	Modèle de simulation de la turbine + MADA	143
Figure IV.8	Variation de la puissance active P (W), la puissance réactive Q (VAR), le couple électromagnétique Tem (N.m) avec régulateur PI	144
Figure IV.9	Variation des courants rotorique I_r (A), la vitesse ω_m (rad/s), tension du bus continue V_{dc} (Volt) avec régulateur PI	145

Figure V.10	Variation de la puissance active P (W), la puissance réactive Q (VAR), Le couple électromagnétique Tem (N.m) avec régulateur IP.....	148
Figure IV.11	Variation des courants rotorique Ir (A), la vitesse ω_m (rad/s), Tension du bus continue Vdc (Volt) avec régulateur IP	149
Figure IV.12	Evolution des paramètres (a) : P(W), (b) : Q(VAR), (c) : Tem(N.m) à t=2s avec régulateur PI	151
Figure IV.13	Evolution des paramètres (a') : P(W), (b') : Q(VAR), (c') : Tem(N.m) à t=2s avec régulateur IP	151
Figure IV.14	Evolution des paramètres(d): Ir (A), (e) (e'): ω_m (rad/s) à t=2s avec régulateur PI.....	152
Figure IV.15	Courant rotorique en fonction de temps (d'): Ir (A) à t=2s avec régulateur IP	152
Figure IV.16	Evolution des paramètres(a) : P(W), (b) : Q(VAR), (c) : Tem(N.m) à t=4s avec régulateur PI	154
Figure IV.17	Evolution des paramètres (a') : P(W), (b') : Q(VAR), (c') : Tem(N.m) à t=4s avec régulateur IP	154
Figure IV.18	Evolution des paramètres(d): Ir (A), (e) (e'): ω_m (rad/s) à t=4s avec régulateur PI	155
Figure IV.19	Evolution des paramètres(d'): Ir (A) à t=4s avec régulateur IP	155
Figure IV.20	Evolution des paramètres(a) : P(W), (b) : Q(VAR), (c) : Tem(N.m) à t=10s avec reguleteur PI	157
Figure IV.21	Evolution des paramètres(a') : P(W), (b') : Q(VAR), (c') : Tem(N.m) à t=10s avec reguleteur IP	157
Figure IV.22	Evolution des paramètres(d): Ir (A), (e) (e'): ω_m (rad/s) à t=10s avec régulateur PI	58
Figure IV.23	Courant rotorique en fonction de temps (d'): Ir (A) à t=2s avec reguleteur IP	58
Figure IV.24	Evolution des paramètres(a) : P(W), (b) : Q(VAR), (c) : Tem(N.m) à t=15s avec reguleteur PI	160
Figure IV.25	Evolution des paramètres (a') : P(W), (b') : Q(VAR), (c') : Tem(N.m) à t=15s avec régulateur IP	160
Figure IV.26	Evolution des paramètres(d): Ir (A), (e) (e'): ω_m (rad/s) à t=15s avec régulateur PI	161
Figure IV.27	Courant rotorique en fonction de temps (d'): Ir (A) à t=2s avec reguleteur IP	161
Figure IV.28	Evolution des paramètres(a) : P(W), (b) : Q(VAR), (c) : Tem(N.m) à t=26s avec reguleteur PI	162
Figure IV.29	Evolution des paramètres(a) : P(W), (b) : Q(VAR), (c) : Tem(N.m) à t=26s avec régulateur IP	162
Figure IV.30	Evolution des paramètres(d): Ir (A), (e) (e'): ω_m (rad/s) à t=15s avec régulateur PI	163
Figure IV.31	Courant rotorique en fonction de temps (d'): Ir (A) à t=2s avec régulateur IP	163

LISTE DES TABLEAU :

CHAPITRE I :

Tableau I.1	Classification des turbines éoliennes à rotor bobiné	12
Tableaux I.2	Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur	32

CHAPITRE II :

Tableau II.1	Détermination des différents optimaux	25
Tableau II.2	Intervalles de temps de la vitesse du vent	27
Tableau II.3	Paramètres de la turbine sans asservissement	33

CHAPITRE III :

Tableau III.1	Détermination des différents optimaux	93
Tableau III.2	Intervalles de temps de la vitesse du vent	27
Tableau III.3	Paramètres de la turbine sans asservissement	33

Chapitre IV :

Tableau VI.1	Variation de V_v en fonction du temps	139
--------------	---	-----

*Notations, Symboles,
Abréviation et Acronymes*

NOTATIONS, SYMBOLES, ABREVIATION ET ACRONYMES

Turbine :

Symbole	Signification	Unité
V_v	: Vitesse du vent.	m/s
V_{v-est}	: L'estimation de la vitesse du vent.	m/s
R	: Rayon de la turbine éolienne.	m
S	: Surface balayée par l'hélice.	m ²
ρ	: La densité de l'air.	Kg/m ³
v	: Volume limité par les ailes	m ³
l	: Epaisseur de la pale.	m
E_{ct}	: Energie cinétique avant multiplicateur.	joule
E_{cm}	: Energie cinétique après multiplicateur.	joule
Ω_m	: Vitesse mécanique de l'arbre d'entraînement après multiplicateur.	Rad/s
Ω_{m-ref}	: Vitesse mécanique de référence de l'arbre d'entraînement après multiplicateur.	Rad/s
Ω_t	: Vitesse de l'aérogénérateur avant multiplicateur.	Rad/s
Ω_{t-est}	: Vitesse estimée de l'aérogénérateur.	Rad/s
P_t	: La puissance maximale extraite.	W
P_v	: Puissance du vent récupérable.	W
C_m	: Couple mécanique de l'arbre d'entraînement en sortie.	N.m
C_t	: Couple avant le multiplicateur.	N.m
C_{t-est}	: Couple de la turbine estimé.	N.m
C_{em}	: Couple électromagnétique.	N.m
C_{em-ref}	: Le couple électromagnétique de référence.	N.m
J	: Moment d'inertie globale.	Kg.m ²
J_t	: Inertie de la turbine avant le multiplicateur.	Kg.m ²
J_m	: Inertie de la turbine après le multiplicateur.	Kg.m ²
F_1, F_2, F_3	: Forces appliquées sur chaque pale.	N
G	: Gain de multiplicateur.	/

Notations, Symboles, Abréviation et Acronymes

C_p	: Coefficient de puissance.	/
β	: Angle de calage de la pale en degré	°
λ_{opt}	: Lambda optimal.	/
f_v	: Coefficient de frottement visqueux.(N.m.s/rad)	N.m.s/rad
BRICS	: Brazil, Russia, India, China, South Africa	/
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.	/
CCM	: Convertisseur coté MADA	/
MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation.	/
Reg	: Régulateur.	/
PI	: Proportionnel-Intégral.	/
k	: Constant.	/

Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

Symbole	Signification	Unité
MADA	: Machine asynchrone à double alimentation	/
E_r	: La f.e.m de rotor de la machine	V
E_s	: La f.e.m de stator de la machine.	V
N_r	: Nombre de spires des bobinages rotoriques.	/
N_s	: Nombre de spires des bobinages statoriques.	/
w_s	: Vitesse angulaire de rotation du champ tournant	Rad/s
w_{mec}	: Vitesse angulaire de rotation du rotor	Rad/s
g	: Glissement.	/
i_r	: Courants rotorique de la machine	A
i_s	: Courant statorique de la machine.	A
P_{res}	: Puissance de réseau.	W
P_{mes}	: Puissance mesuré.	W
V_{abcs}	: Tensions simple triphasées au stator de la machine.	V
V_{abcr}	: Tensions simples triphasées au rotor de la machine.	V
i_{abcs}	: Courants statorique de la machine.	A
i_{abcr}	: Courants rotorique de la machine.	A
\emptyset_{abcs}	: Flux statorique de la machine.	Wb
\emptyset_{abcr}	: Flux rotorique de la machine.	Wb
R_s	: Résistance des enroulements statorique.	Ω
R_r	: Résistance des enroulements rotoriques	Ω
L_s	: Inductance cyclique de stator.	H
L_r	: Inductance cyclique de Rotor.	H
M_{rs}	: La valeur maximal de l'inductance mutuelle entre une phase rotorique et une phase statorique	H
M_{sr}	: La valeur maximal de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique	H
l_s	: Inductance propre des enroulements statorique.	H
l_r	: Inductance propre des enroulements rotoriques	H
m_s	: Inductance mutuelle des enroulements statorique.	H

Notations, Symboles, Abréviation et Acronymes

m_r	: Inductance mutuelle des enroulements rotorique	H
M_{\max}	: Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle	H
C_e	: Couple électromagnétique.	N.m
C_r	: Couple résistant.	N.m
f_v	: Coefficient de frottement visqueux de la MADA	N.m.s/rad
M_p	: Matrice de Park.	H
$[M_p]^{-1}$: La matrice d'inverse de Park.	H
M	: Inductance Mutuelle	H
p	: Nombre de pair de pole	/
P_r	: Puissance active transmise par le rotor de la machine électrique.	W
P_s	: Puissance active transmise par le stator de la machine électrique.	W
Q_s	: Puissance réactive transmise par le stator de la machine électrique.	VAR
Q_r	: Puissance réactive transmise par le rotor de la machine électrique.	VAR
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsions	/
PI	: Proportionnel-Intégrale.	/
IP	: Intégrale-Proportionnel	/
FTBO	: Fonction de Transfer en Boucle Ouverte.	/
FTBF	: Fonction de Transfer en Boucle Fermée.	/
K_p, K_i	: Paramètres des régulateurs PI et IP	/

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, la production d'énergie mondiale atteint les 10 milliards de tonnes équivalent de pétrole chaque année. Elle est assurée essentiellement par du pétrole, du gaz et du charbon, de façon très inégalitaire au niveau de la planète. Les scénarios énergétiques prévoient une augmentation de 50 à 300% de la production mondiale d'énergie d'ici 2050. Il est d'ores et déjà évident qu'une telle augmentation ne pourra se faire sur le modèle actuel, basé sur les énergies fossiles, dont les réserves sont limitées.

Ainsi, au fil des années et des sommets écologiques, les énergies dites «propres» ont été mises en valeur. Il s'agit d'énergies fournies par le soleil ou qui en découlent, comme le vent, les chutes d'eau, les végétaux, les marées. C'est ce qu'on appelle des énergies renouvelables.

Parmi des ces énergie l'énergie éolienne. Le mot éolien vient du Grec (Éole) qui est le dieu des vents. Les éoliennes utilisent l'énergie du vent de façon à la transformer en énergie électrique. Leurs pales sont actionnées par le vent. Elles sont reliées à un axe qui entraîné par leur mouvement actionne un moteur permettant ainsi de créer de l'énergie électrique.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de

variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Pour ce qui est de la donne Algérienne : sachant que la puissance maximale appelée enregistrée sur le réseau interconnecté nord Algérien a atteint durant l'été 10 GW, en évolution de près de 7% par rapport à l'été 2012. Le contexte de croissance forte de la demande exige en permanence la mise en service de nouveaux moyens de production, soit près de 2 GW par an pendant dix ans et 2,5 à 3 milliards de dollars d'investissements chaque année. La Sonelgaz projette sur les cinq prochaines années la réalisation de centrales dont la puissance est largement supérieure à la puissance installée en Algérie en près de 50 ans. Le plan de développement 2013 – 2017 consiste en la mobilisation d'une capacité totale de l'ordre de 18 GW, soit une moyenne 3 GW par an en intégrant, des centrales photovoltaïques (400 MW) et la capacité disponible sur les réseaux isolés du sud (Renouvelable ou hybride) sera portée à 651 MW grâce à la mise en service en 2014 de près de 238 MW dont 80 MW à Tindouf, 40 MW à Tamanrasset, 20 MW à El Goléa, 20 MW à Beni Abbes et 78 autres MW. L'adoption du programme national des énergies renouvelables permet d'avoir une vision stratégique vers des voies durables et sûres au profit des générations futures.

Malgré la projection de l'Algérie d'installer des fermes éolienne, le manque flagrant d'expert pose problème. Le manque d'expertise national en la matière a fait que nous nous sommes intéressés au principe de fonctionnement d'une éolienne en tenant compte de sa turbine associé à une machine dans un souci de mieux connaître la machine et son process.

A cet effet, On s'est fixé comme objectif de faire une étude d'une éolienne intégrant : une turbine, un multiplicateur, une machine asynchrone à double alimentation où on aura à intégrer une commande MPPT pour extraire le maximum de puissance pour des vitesses de vents variables pour une plage de fonctionnement de notre machine intégrant à la fois le mode hypo et hyper-synchrone.

Chapitre 1

Etat de l'art des Eoliennes

Bibliographie

- [1] M^{elle} AGGOUN GHANIA, « Etude qualitative de l'association convertisseur machine pour l'entraînement électrique d'un système de génération éolienne », mémoire de magister, université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou.

- [2] N. HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices éoliennes »; mémoire de magister en électrotechnique, université de Constantine, 24/01/2008.

- [3] M. S. ABDOULAZIZ, « Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2007.

- [4] RANDEE HOLMES et SUSAN EDWARDS, « L'ABC des technologies de l'énergie renouvelable », [http ://www.pollutionprobe.org](http://www.pollutionprobe.org), septembre 2003.

- [5] G. ABDELKADER, R. M. ILYAS, « Commande par modes glissants d'une éolienne basé sur machine asynchrone à double alimentation », mémoire de master en automatique, octobre 2011.

- [6] « Rapport Mondial 2010 sur l'énergie Eolienne », 10th. world wind energy conference & renewable energy exhibition, 31 oct. au 2 nov. 2011.

- [7] « Baromètre éolien Wind power baromètre », euroobserver'ER , journal de l'éolien n°12 – février 2013

- [8] M. AHMED, « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne », mémoire de magister en électrotechnique université Ferhat Abbas- Setif, 07/06/2011.

- [9] B. ABDELHAKIM, « Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) », mémoire de doctorat en électrotechnique, université de Batna, 10/02/2010.

- [10] FREDERIC POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.

Chapitre 1 : Etat de l'art des Eoliennes

- [11] L. ABDELHAMID, « Contribution à l'étude des performances des générateurs électromagnétiques utilisés dans les systèmes éoliens », thèse de magister, université de Batna, 2008.
- [12] H. CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, soutenue le 18/12/2003.
- [13] M. NAÏMA, « Contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée », mémoire de magister en maîtrise d'énergie et énergies renouvelables, université de Batna, 2004.
- [14] BOUARAKI MOULOUD, « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : application sur site à Tindouf », mémoire de magister équipement électrique industriel, université M'Hamed Bougera Boumer, 2012.
- [15] N. K. MERZOUK, « Quel avenir pour l'énergie éolienne en Algérie ? », Bul. Ene. Ren, CDER, N°14, Dec 2008, p.6-7.

Table de matière

I	Etat de l'art des éoliennes	4
I.1	Introduction	8
I.2	Historique	9
I.3	Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne	9
I.4	Descriptif d'une éolienne	10
I.5	Différent type éoliennes	12
I.5.1	Eolienne à axe vertical	13
I.5.2	Eolienne à axe horizontal	13
I.6	Les avantages et inconvénient d'une éolienne	14
I.6.1	Avantage	14
I.6.2	inconvénients	15
I.7	Application des éoliennes	16
I.8	Taille des aérogénérateurs	16
I .9	L'énergie éolienne dans le monde	18
I.9.1	La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne	18
I.9.2	Projet en cours de réalisation en l'Algérie	21
I.10	Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable	21
I.11	Types de machines électriques	23
I.11.1	Générateur synchrone	23
I.11.2	Générateur asynchrone	25
I.12	Les avantages et l'inconvénient de la machine asynchrone à double alimentation	32
I.12.1	Inconvénients	32
I.12.2	Avantage	32
I.13	Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur	32
I.14	Conclusion	33

Chapitre 1

Etat de l'art des éoliennes

I.1 Introduction :

Le soleil, le vent, l'air et l'énergie thermique du sol, sont des énergies naturelles et disponibles à souhait. En parallèle, l'énergie des marées obtenue par hydro-accumulation (barrages hydrauliques) est aussi renouvelable par les cycles naturels. Autre caractéristique de l'énergie renouvelable, c'est qu'elle ne produit pas de déchets et de pollution.[1]

Dans ce chapitre, nous traiterons en particulier l'énergie fournie par le vent : « l'énergie éolienne ». Qui peut être exploitée de deux manières : directe ou indirecte.

Conservation de l'énergie mécanique : le vent peut être utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin, ...

Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

I.2 Historique :

Durant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu étant le moulin à vent utilisé par le meunier pour transformer le blé en farine.

Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique. La maîtrise du stockage d'énergie par batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser sans présence de vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 [2] d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde.

I.3 Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne :

L'éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur.

L'énergie éolienne est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

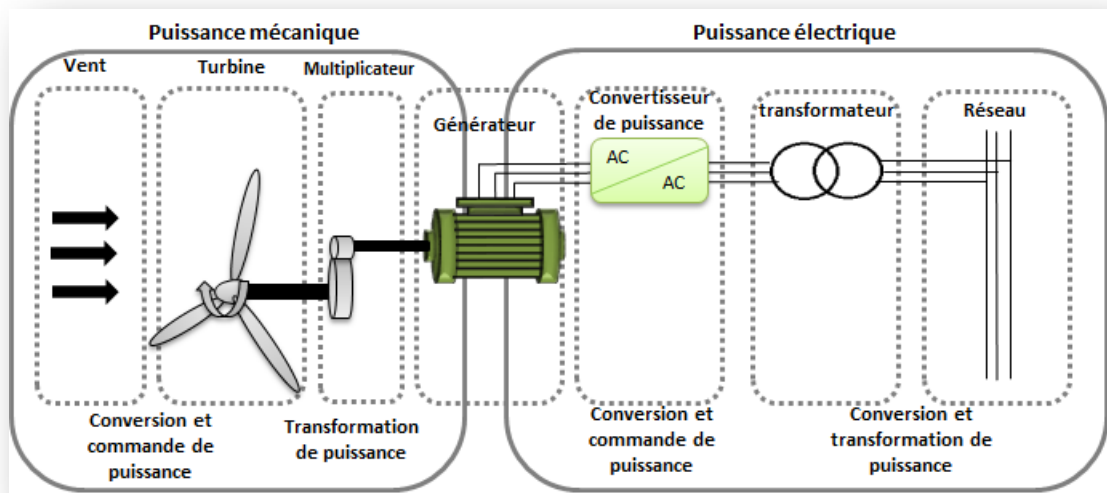


Figure I.1 : principe de la conversion d'énergie

I.4 Descriptif d'une éolienne [3] :

L'éolienne est composée de deux parties : une partie mobile « le rotor » et une partie fixe « le stator », permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Une éolienne « classique » est généralement constituée de :

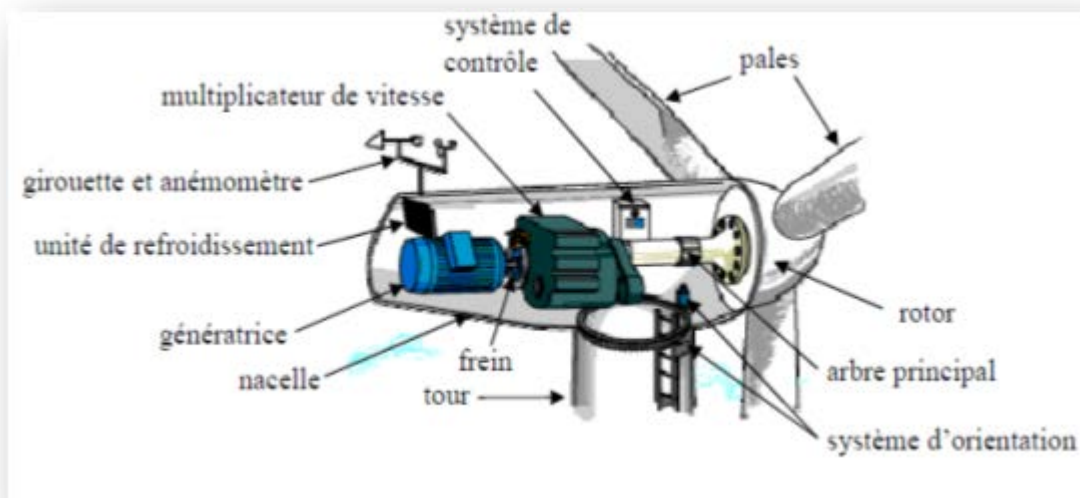


Figure I.2 : Principaux éléments constituant une éolienne [4]

1. **Le mat ou la tour** : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

2. **La nacelle** : regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

3. **Le multiplicateur de vitesse** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique

4. **L'unité de refroidissement** : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

5. **La génératrice** : c'est l'élément principal de la conversion mécano électrique qui est généralement une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre 600 kW et 2.5 MW

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

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

8. **Un système d'orientation des pâles**: qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/mn.

I.5 Différent type éoliennes :

Le tableau ci-dessous présente une classification des turbines :

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40 KW
Moyenne	12m à 45m	De 40kW à 1Mw
Grand	46m et plus	1Mw et plus

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes [2][4].

Les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de Turbines éoliennes :

- Turbines à axe vertical.
- Turbines à axe horizontal.

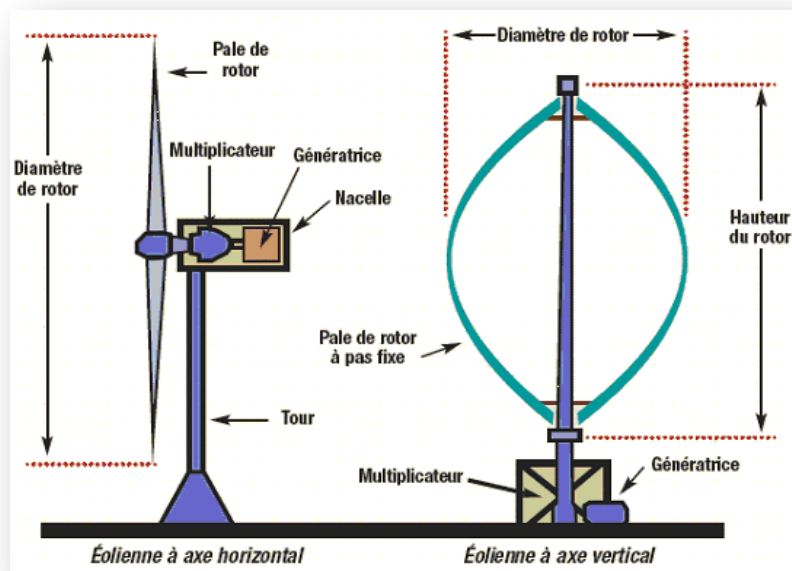


Figure I.3 : deux types des éoliennes [6]

I.5.1 Eolienne à axe vertical [7]:

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite l'accessibilité de dépannage en cas de disfonctionnement.

Néanmoins, elles restent marginales et peu utilisées voir abandonnées actuellement à cause de sa faible vitesse, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie situé au près du sol, et de la surface importante qu'elles occupent au sol pour les éoliennes de grande puissance.

I.5.2 Eolienne à axe horizontal [7]:

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion ces éoliennes peuvent être classifiées en deux catégories :



Figure I.4 : Eolienne lente [2]



Figure I.5 : Eolienne rapide [5]

a- Eoliennes lentes : sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40). Les pales couvrent presque toute la surface de la roue.

Elles servent généralement au pompage pour alimenter en eau le bétail dans les vastes plaines, elles sont adaptées aux vents de faible vitesse.

La puissance maximale obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante :

$$P = 0,15 \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (I.1)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

b-éoliennes rapides : Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement.

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal :

$$P = 0,2 \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (I.2)$$

I.6 Les avantages et inconvénient d'une éolienne :

I.6.1 Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols.

- Cette source d'énergie est peut être intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation pour des faibles puissances dans un contexte de faible puissance d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à un coût relativement faible pour réalisation des objectifs que s'est fixée par exemple l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (*éolienne et autres*) dans la consommation globale d'énergie.

- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole (dans le contexte des pays de lowisphère nord).

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

I.6.2 Les inconvénients:

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.

- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit.

- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement

I.7 Application des éoliennes :

Une éolienne est un dispositif capable de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie sera transformée en énergie mécanique de rotation en tenant compte du rendement de la machine. Ce dernier peut être exploité de deux manières.

- Directement pour entraîner une pompe,
- Pour entraîner une génératrice électrique,

Dans le cas de production d'énergie électrique deux cas d'énergie se présentent :

- Utilisé directe sur réseau de distribution,
- Utilisé directe dans une habitation avec accumulateur.

L'énergie éolienne sert d'un coté de complément aux moyens traditionnels de production, d'un autre coté à la production pour alimenter les sites non raccordés.

I.8 Taille des aérogénérateurs :

Les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes donc plus grandes, (figure I.6) afin d'utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum, pour cela les éoliennes sont très haute perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

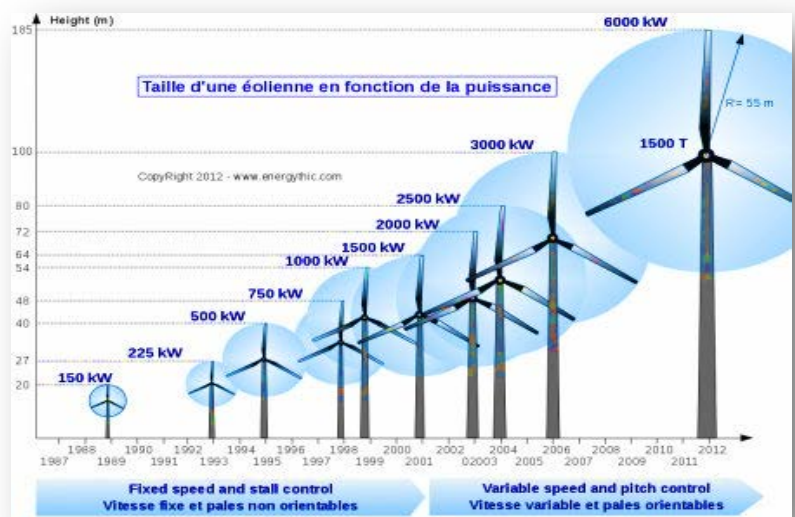


Figure I.6 : Evolution de la taille des éoliennes

I .9 L'énergie éolienne dans le monde :

I.9.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne :

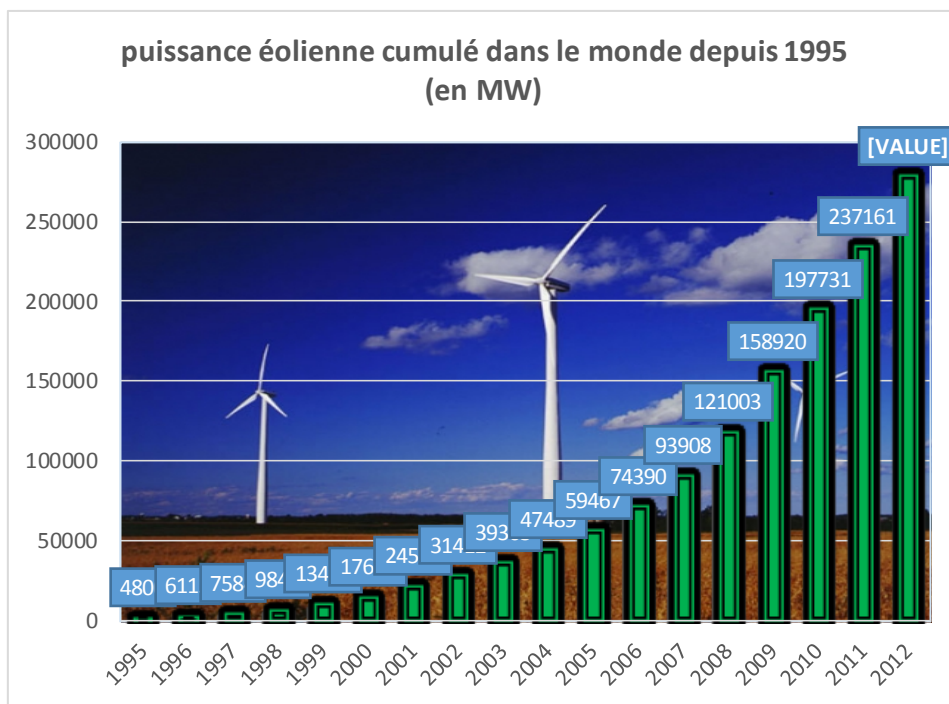


Figure I.7: Capacité mondiale installé en MW [8]

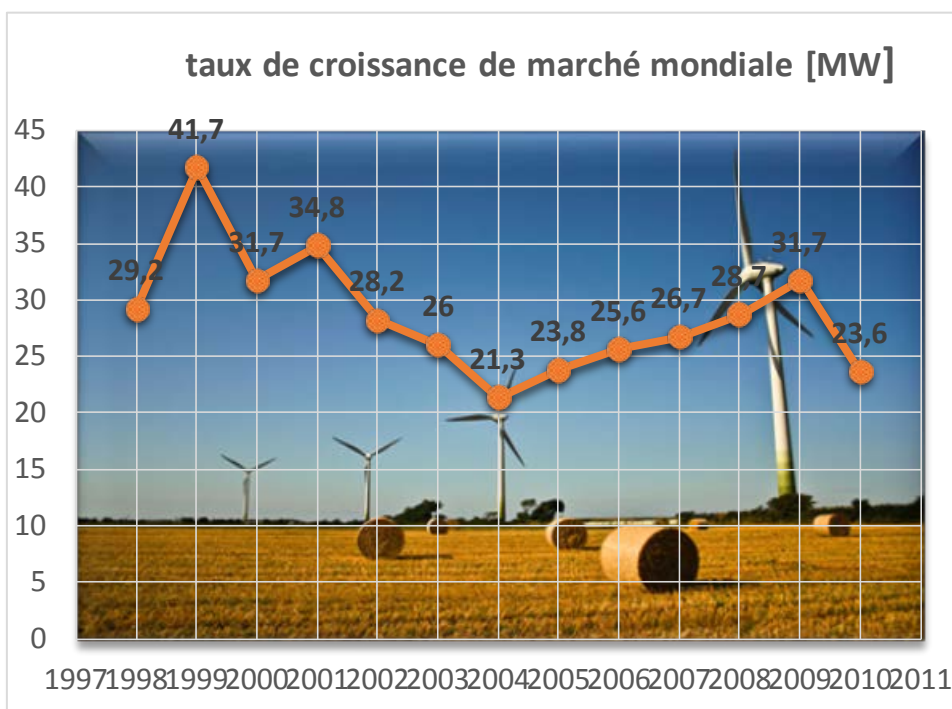


Figure I.8: Taux de croissance du marché mondial [9]



Figure I.9 : Les 10 premières capacités en [MW] [9]

Avant 2010, le taux de croissance annuel n'avait cessé de croître depuis 2004, culminant à 31.7% en 2009, la plus forte valeur depuis 2001. Le plus fort taux de croissance de 2010 se trouve en Roumanie, qui a multiplié sa capacité par 40. La seconde région au taux de croissance de plus de 100% est la Bulgarie (+112%). En 2009, quatre marchés avaient plus que doublé leur capacité éolienne : Chine, Mexique, Turquie et Maroc. Après la Chine, les plus fortes croissances se situent en Europe de l'Est et en Europe du Sud Est : Roumanie, Bulgarie, Turquie, Lituanie, Pologne, Hongrie, Croatie, Chypre et Belgique.

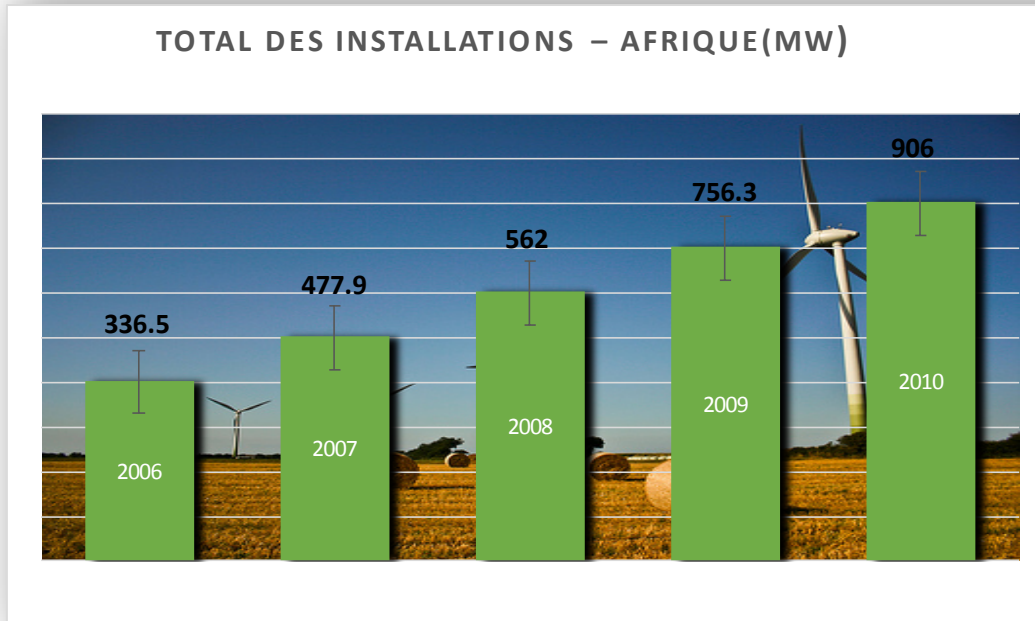


Figure I.10 : Total des installations – Afrique (MW) [9]

L'Algérie présente un potentiel éolien qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar [10]. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER (laboratoire de l'énergie éolienne) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [11].

Le potentiel éolien, technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007.

Les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an [11].

La figure I.10 présente la carte des vents en Algérie

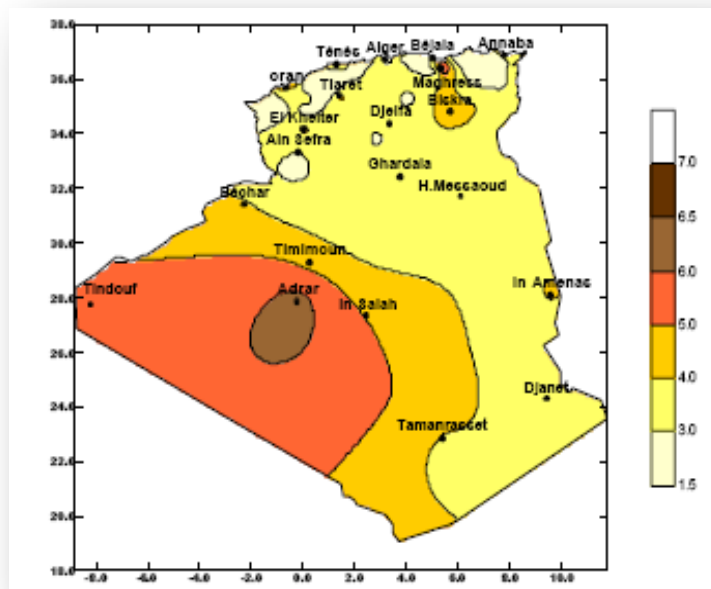


Figure I.11: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.

I.9.2 Projet en cours de réalisation en l'Algérie :

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW à Adrar (sud-ouest) est cours de réalisation depuis 21/01/2010.

I.10 Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse fixe et à vitesse variable :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice (Figure I.12). Elle possède les caractéristiques suivantes :

- Système électrique plus simple
- Plus grande fiabilité
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne

- Pas besoin de système électronique de commande
- Moins cher.

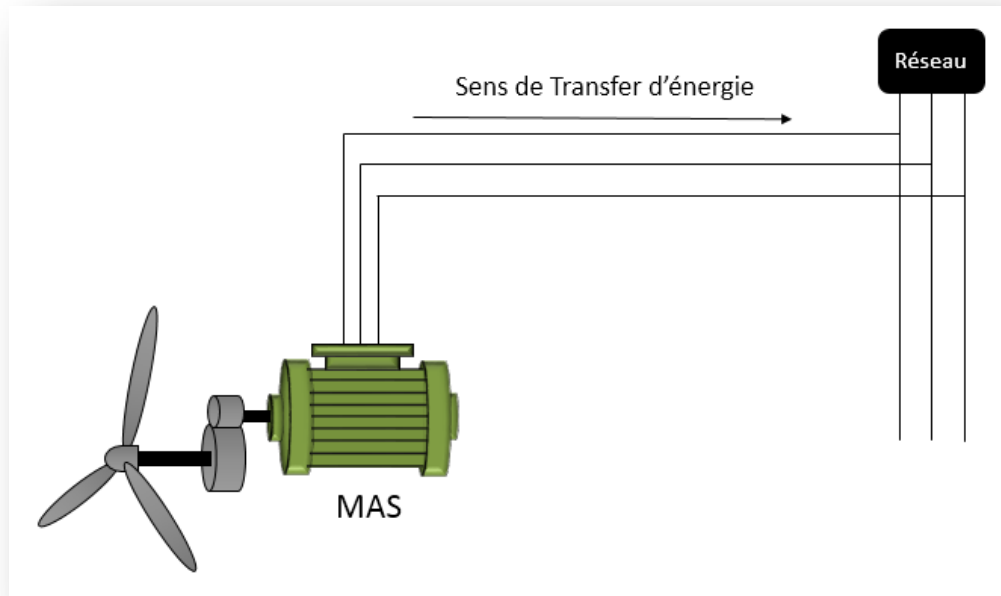


Figure I.12 : Eolienne directement connecte au réseau

Une éolienne à vitesse variable a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique avec un rendement optimisé. Par conséquent, les différents éléments du système éolien sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La figure I.13 présente la caractéristique de la puissance maximale captée en fonction de la vitesse de la turbine pour des différentes vitesses du vent, dans le cas où l'orientation des pales est parfaitement réalisée.

Dans le système éolien de production de l'énergie électrique à vitesse variable, il existe une solution nouvelle et originale utilisant la machine asynchrone à rotor bobiné. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où la variation de vitesse du vent sont limitée autour de celle de synchronisme dont l'objectif est d'avoir un convertisseur de puissance dimensionné à une fraction de 20 - 30% de toute la

puissance de système, et ce qui permet de minimiser les pertes et réduit le coût de celui-ci.

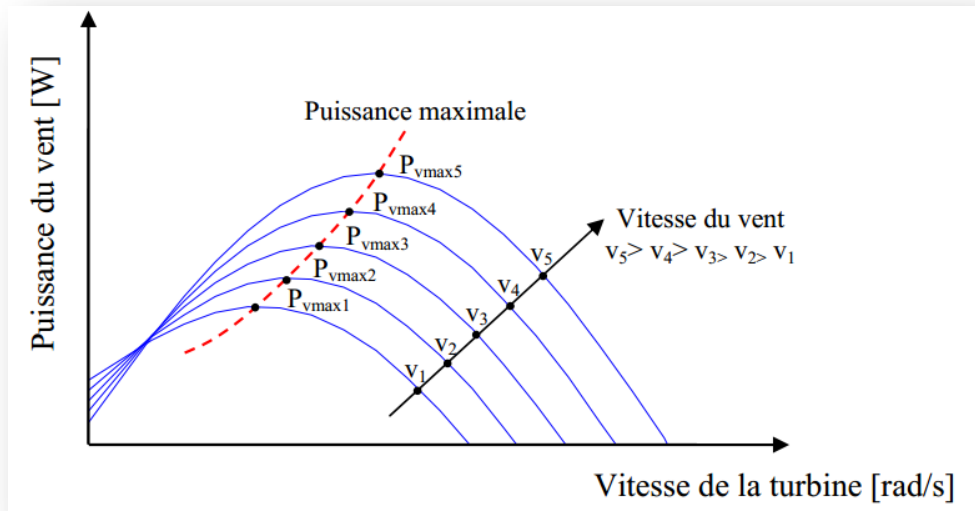


Figure I.13 : Caractéristique puissance vitesse de la turbine pour différent vitesse du vent [12]

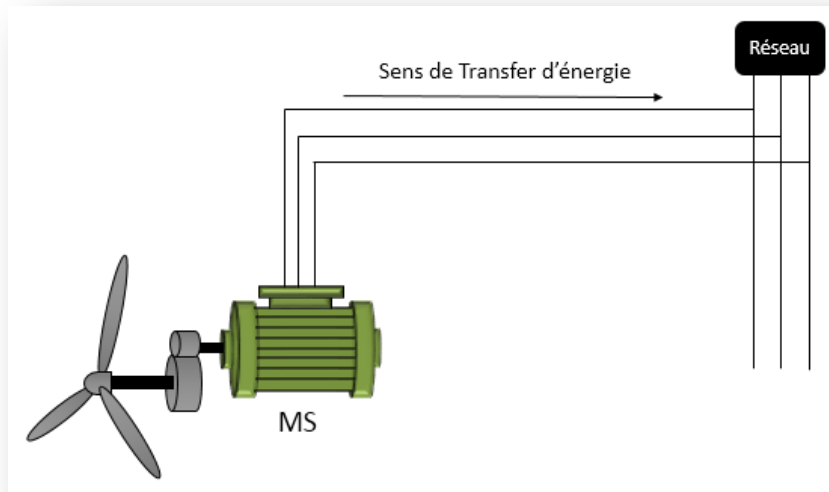
I.11 Types de machines électriques :

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.11.1 Générateur synchrone [5]:

Ce type de machine est utilisé dans les centrales de très grande puissance comme les centrales thermiques, hydrauliques et nucléaires. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau (Figure I.14), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par

l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.



**Figure I.14 : Machine synchrone connecté directement au réseau
(Configuration inexistante)**

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (Figure I.15). Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance. Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aérogénérateur. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance [2][13].

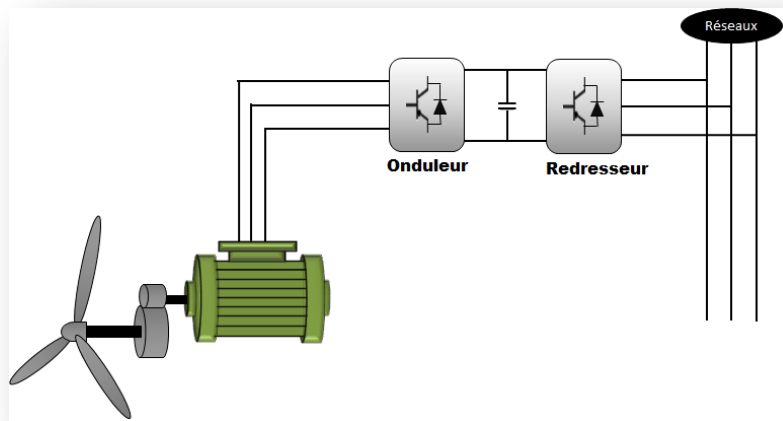


Figure I.15 : Machine synchronisée connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

I.11.2 Générateur asynchrone :

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionner autonome.

Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné

- **a. Machine asynchrone à cage d'écureuil :**

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchronisé est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Ainsi pour 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.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes. A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure I.16 [14].

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique couple-vitesse, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min.

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure I.17).

La machine à un nombre de pair de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités tel que représentées sur la figure I.17 qui deviennent la

seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

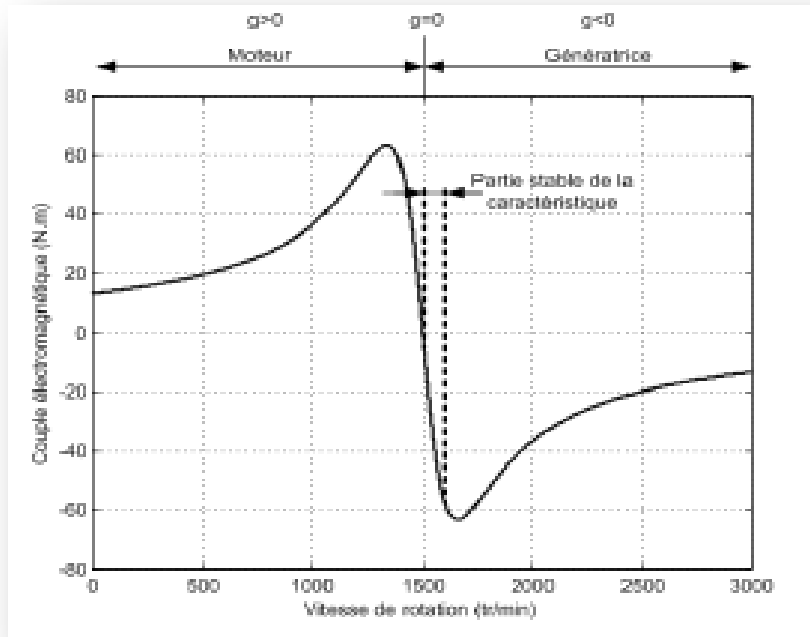


Figure I.16 : Caractéristique couple-vitesse d'une machine Asynchrone à deux paires de pole [4][5]

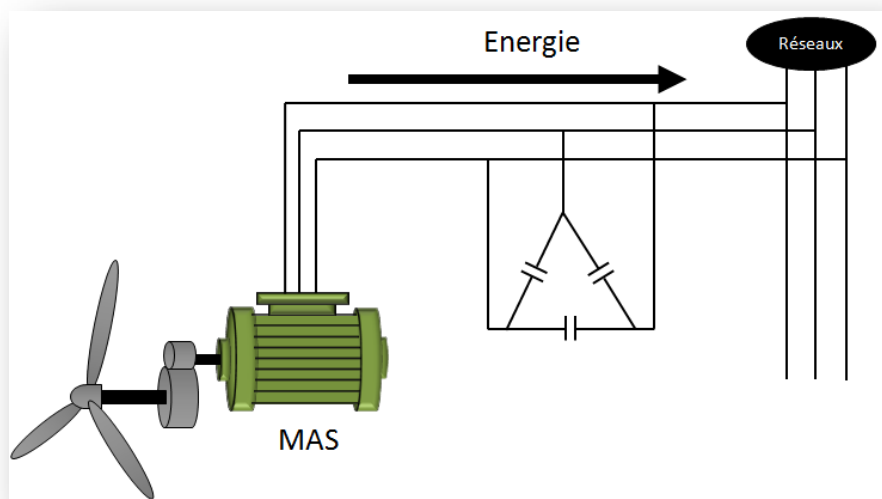


Figure I.17 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (figure I.18). L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée [15].

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

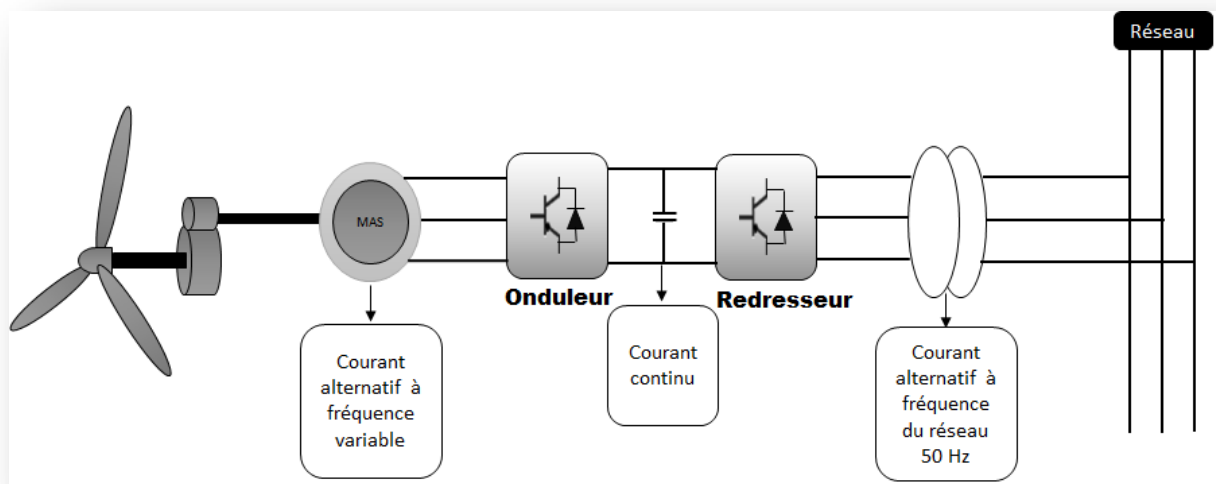


Figure I.18: Eolienne connecté au réseau par l'intermédiaire de Deux Convertisseurs de puissance [5]

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsqu'elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de

synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

- **b. Machine asynchrone à double alimentation :**

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle cette génératrice est largement employée pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice.

Il existe plusieurs types de machines asynchrones à double alimentation que nous allons décrire ci-dessous.

- **b.1. Machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné [12] :**

C'est une machine asynchrone constitué d'un stator alimenté directement par le réseau et occupée par un système balais-bague qui alimente l'enroulement du rotor à partir d'un convertisseur AC/AC.

La figure I.19 illustre le principe de fonctionnement de ce type de machine.

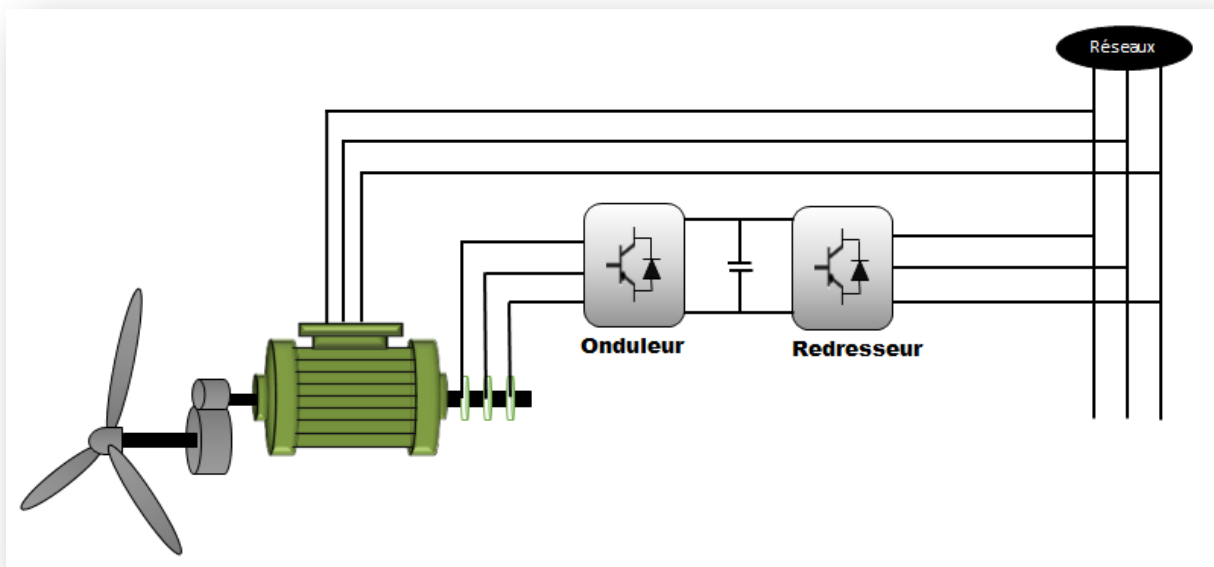


Figure I.19 : schéma de principe de fonctionnement de la machine asynchrone à Double alimentation à rotor bobiné.

- **b.2.Machine asynchrone à double alimentation en cascade [12]:**

Est constitué de deux machines asynchrones à rotor bobiné connecté électriquement et mécaniquement. Le stator de l'un des deux alimenté directement par le réseau, donc l'autre alimenté par le convertisseur AC/AC comme il est montré dans la figure I.20.

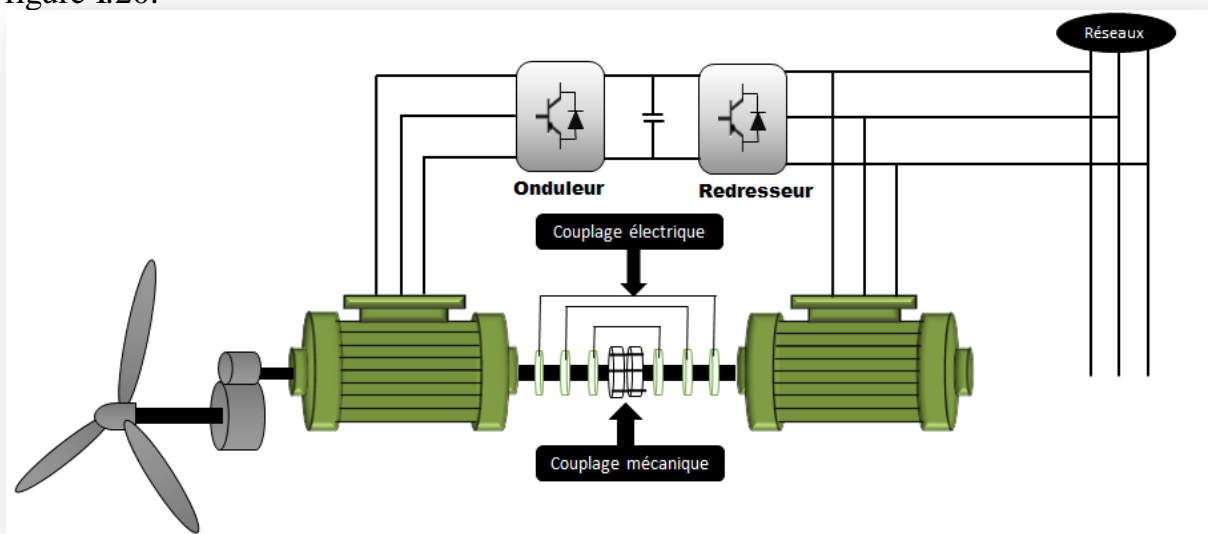


Figure I.20 : schéma de principe de fonctionnement d'une machine asynchrone à Double alimentation en cascade.

En peut combiner deux machines asynchrones à rotor bobiné dans une seule machine avec un comportement identique de celle de machine asynchrone à double alimentation en cascade.

- **b.3.Machine asynchrone à double alimentation sans balais [12]:**

C'est une machine avec deux enroulement ayant des nombre de pair de pole différentes logé dans la même armature du stator, l'un des deux enroulements est alimenté directement au réseau et l'autre alimenté au moyenne d'un convertisseur AC/AC. Le rotor de cette machine possède un nombre de pair de pôle égal à la somme des deux nombre de pair de pôle des deux enroulements statorique (figure I.21).

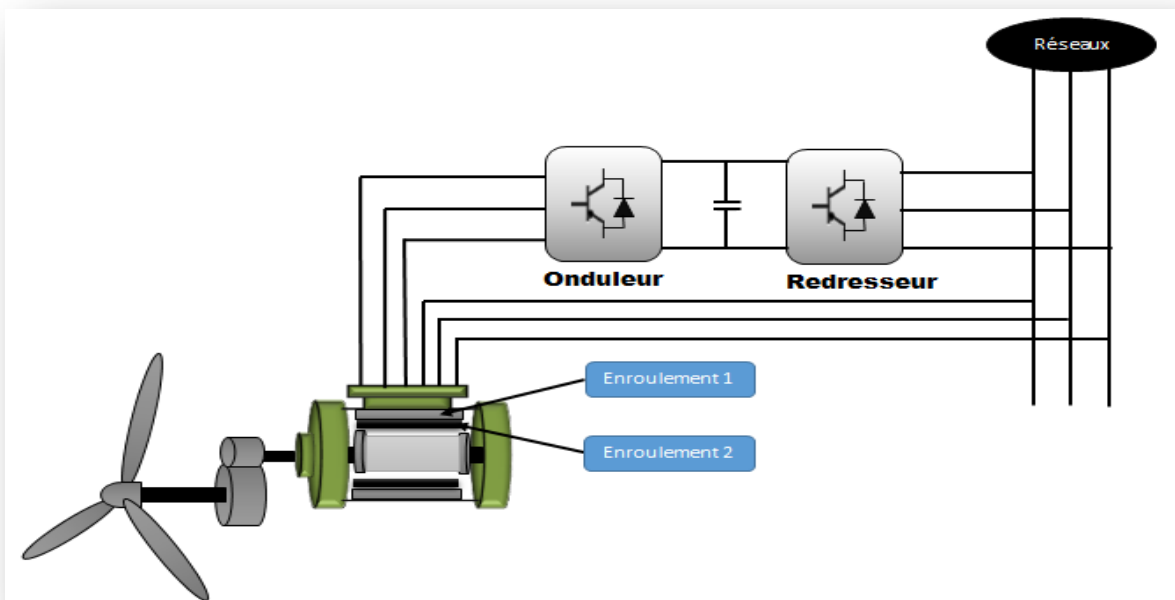


Figure I.21 : Schéma de principe de fonctionnement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation sans balais

I.12 Les avantages et l'inconvénient de la machine asynchrone à double alimentation :

I.12.1 Inconvénients :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à cause des balais
- Le coût total de la machine asservis est plus élevé
- L'utilisation de deux convertisseurs au lieu d'un seul convertisseur.

I.12.2 Avantages :

- La puissance massique et plus élevée que les autres machines asynchrones à grande puissance
- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor, réduisent les pertes fer de la machine et augmentent son rendement

I.13 Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur :

Les composants semi-conducteurs de puissance sont des éléments essentiels pour la conversion d'énergie statique d'énergie. Basés essentiellement sur le silicium, ils sont employés en commutation :

- soit à l'état bloqué (idéalement un interrupteur ouvert) où ils doivent supporter une tension élevée (celle de la source, voire une tension supérieure),

- soit à l'état passant, saturé (idéalement un interrupteur fermé) où ils doivent admettre un courant important sans occasionner une chute de tension trop importante.

	Type d'interrupteur à semi-conducteur				
	GTO	IGCT	BJT	MOSFET	IGBT
Tension max(V)	6000	6000	1700	1000	6000
Courant max(A)	4000	2000	1000	28	1200
Intervalle de la fréquence de commutation(KHz)	0.2-1	1-3	0.5-5	5-100	2-20
Technique de commande	Haute	Base	Moyenne	Basse	Basse
Domaine d'application	Très fortes puissance	Fortes puissance	Moyenne et fortes puissance	Faibles puissance	Moyenne et fortes puissance

Tableaux I.2 : Caractéristiques d'interrupteur à semi-conducteur [12]

I.14 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs constitutions et leurs différents types. Après quoi, on a présenté leurs avantages et inconvénients. En fin de ce chapitre, on a présenté les différents types des machines employées dans les éoliennes ainsi que la description de la machine asynchrone à double alimentation.

Un modèle mathématique de la turbine a été établi à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse.

Chapitre 2

Modélisation de la turbine

Bibliographie

- [16] F.POITIERS, Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne -Machine asynchrone à cage autonome –Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [17] S.EL AIMANI, modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension) thèse de doctorat, L2EP de l'école centrale de Lille, 2004.
- [18] A.GAILLAR, Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service, Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010
- [19] TOUAL Belkacem, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », mémoire de Magister En Electrotechnique, Université de Batna,17/10/2010.
- [20] G.DJAMEL et A .A.SAMIR .Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire d'ingénieur Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2007.
- [21] L. Xu and C. Wei, « Torque and Reactive Power Control of a Doubly Fed Induction Machine by Position Sensorless Scheme». IEEE Trans, Industry Application, vol. 31, no. 3, pp. 636-642, May/June 1995.
- [22] S. HEIER, Grid Integration of Wind Energy, Conversion Systems. New-York: John Wiley & Sons Ltd (1998).
- [23] Sanae Rechka, Gilles Roy, Sebastien Denetiere Et Jean Mahseredjian " Modélisation de Système Electromécaniques Multi-masses à Base de Machines Asynchrones, à l'aide des Outils Matlab et EMTP, avec application aux éoliennes "Département de Génie Electrique, Section Energie Electrique Ecole Polytechnique de Montréal EPM-RT-2004.

Chapitre II : Modélisation de la turbine

- [24] NESMAT ABU-TABAK " Stabilité Dynamique des Systèmes Electriques Multi machines : Modélisation, Commande, Observation et simulation " Thèse de doctorat de l'école Centrale de Lyon 19 Novembre 2008.

- [25] MEKKAOUI NAÏMA "Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée " Mémoire de Magister Laboratoire des systèmes Propulsion –Induction Electromagnétiques LSP-IE Batna 2004.

- [26] Z. Chen and F. Blaabjerg, "Wind Turbines—A Cost Effective Power Source", *Przeglad Elektrotechniczny* R. 80 NR 5/2004 pp 464-469 (Journal, ISSN 0033-2097).

Table de matière

II	Modélisation de la turbine	34
II.1	Introduction	38
II.2	Modélisation de la turbine	39
II.2.1	Considérations préliminaires	39
II.2.2	Le coefficient de puissance	42
II.2.3	Evolution des coefficients d'un aérogénérateur (C_p , λ , β).....	43
II.3	Production d'énergie mécanique	45
II.3.1	Equation dynamique de l'arbre	46
II.4	Stratégie de commande de la turbine éolienne	48
II.4.1	Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	48
II.4.2	Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation	51
II.4.2.1	Simulation et interprétation	52
II.4.3	Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation	59
II.4.3.1	Simulation et interprétation	60
II.4.4	Etude comparative	65
II.5	Conclusion	66

Chapitre 2

Modélisation de la turbine

II.1 Introduction :

Les premières applications relatives à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ont vu le jour à travers les moulins à vent. De nos jours, cette énergie cinétique est transformée en énergie électrique à travers les aérogénérateurs.

La croissance à la fois de la démographie de la population mondiale ainsi que l'industrialisation galopante des pays émergents (BRICS) a eu comme conséquence une augmentation brusque de la demande en énergie électrique.

Étant donné que les réserves à base d'énergies fossiles sont limitées et non renouvelables, ce qui a eu comme conséquence la recherche de nouvelles alternatives (énergies primaires) pour la production d'énergie électrique tel que les énergies renouvelables. L'emploi d'aérogénérateurs en tant que solution alternative présente des avantages avérés en matière de sauvegarde de l'environnement (sans combustibles fossiles).

Dans ce chapitre, on se propose de valider le modèle de la turbine de notre éolienne pour des vents constants et variables en utilisant une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec et sans asservissement de vitesse dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine.

II.2. Modélisation de la turbine: [16][17][18][19]

Les propriétés dynamiques du vent permettent d'effectuer une étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance du vent P_v est une fonction à un coefficient près au cube de la vitesse du vent.

« La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe horizontal a une énorme importance du point de vue de la voilure éolienne car elle est vue par sa surface active. Par simplification, la vectrice vitesse évolue dans le plan horizontal. »¹

La vitesse du vent peut être considérée comme une fonction qui évolue dans le temps $V_v = f(t)$, voir figure II.1:

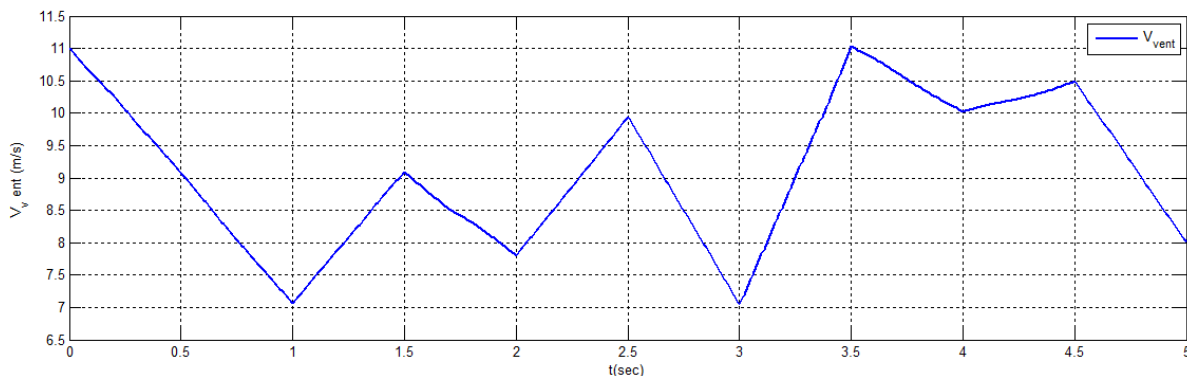


Figure II.1 : Profil du vent en (m/s)

II.2.1 Considérations préliminaires:

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_r , ce dernier est relié à un deuxième arbre en sortie à travers un multiplicateur de gain G .

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc le même moment d'inertie J_{pale} , et chacune d'elles reçoit une force F_1, F_2, F_3 qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée. (Figure II.2)

¹F.POITIERS, Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.

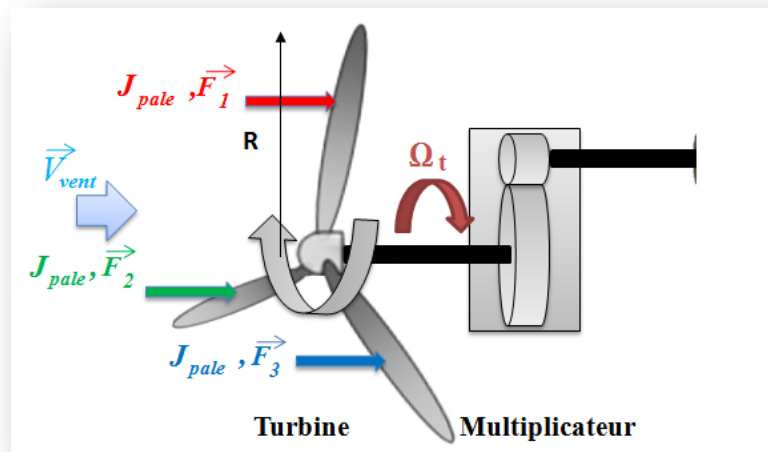


Figure II.2 : Les forces appliquées à l'entrée de l'aérogénérateur.

- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par son moment d'inertie J_t .
- L'arbre d'entraînement en sortie transmet un couple mécanique C_m , tourne à une vitesse Ω_m et possède un moment d'inertie J_m .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($F_1=F_2=F_3$) alors on peut ramener l'ensemble des trois pales à une seule et le système mécanique résultant sera caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques, comme illustré dans la figure II.3 [17] [20][21]

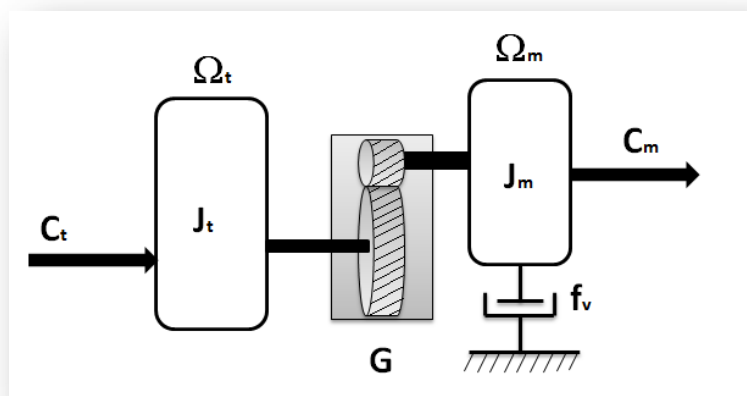


Figure II.3 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

Chapitre II : Modélisation de la turbine

Sachant que le dispositif étudié est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse, de gain G , (Figure II.4)

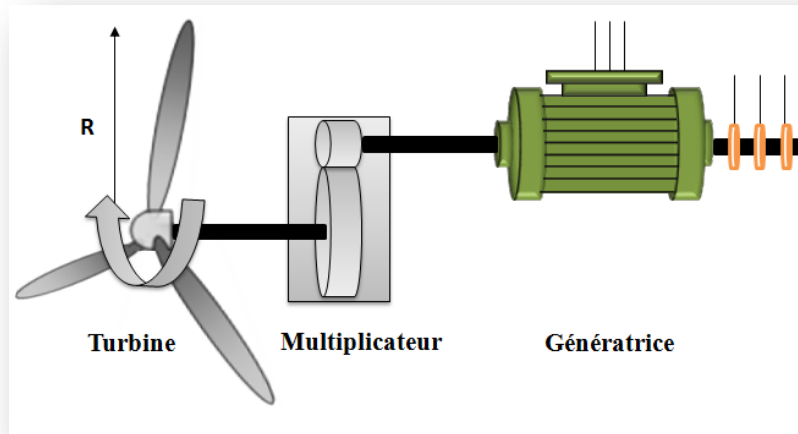


Figure II.4: Schéma explicatif de la turbine éolienne.

L'énergie cinétique du vent E_{cv} s'écrit par définition :

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \quad (II.1)$$

Avec :

$$m = \rho \cdot v \Rightarrow E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot V_v^2 \quad (II.2)$$

Alors:

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot l \cdot V_v^2 \quad (II.3)$$

Et l'expression de la puissance du vent sera donnée par :

$$P_v = \frac{d}{dt} \cdot E_{cv} \quad (II.4)$$

$$\text{Donc : } \begin{cases} P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{dl}{dt} \cdot V_v^2 \\ \frac{dl}{dt} = V_v \end{cases} \Rightarrow P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (II.5)$$

Avec:

V_v	: Vitesse du vent (en m/s).
v	: Volume limité par les ailes (en m ³).
ρ	: la densité de l'air m ² .
S	: Surface balayée par l'hélice (en m ²).
P_v	: Puissance du vent récupérable (en watts).
L	: Epaisseur de la pale (m).

II.2.2 Le coefficient de puissance :

Selon la loi de Betz, cette puissance (puissance du vent) ne pourra jamais être extraite dans sa totalité autrement dit, la puissance maximale P_t pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz.

On définit alors la formule du coefficient de puissance $C_{p - \max}$ comme étant le rapport la puissance maximale extraite P_t sur la puissance théorique fournie par le vent P_v . Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent: [17] [16] [21]

$$P_t = \frac{16}{27} . P_v \Rightarrow P_t = 0.59 . P_v \quad (II.6)$$

A partir de l'équation (II.6) on peut déduire que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59 % de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique C_p est défini par: [10] [21][22]

$$C_{p - \max} = \frac{P_t}{P_v} = \frac{16}{27} \Rightarrow C_{p - \max} = 0.59 \quad (II.7)$$

A ce jour, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale P_m peut être exploitée par les différents aérogénérateurs. [16] [17]

Chaque aérogénérateur est défini par son propre coefficient de puissance C_p exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales $R.\Omega_t$ de l'aérogénérateur et la vitesse instantanée du vent soit:

$$\lambda = \frac{R.\Omega_t}{V_v} \quad (II.8)$$

La figure II.5 met en évidence la variation des coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ et ce pour différents types d'aérogénérateurs. [16]

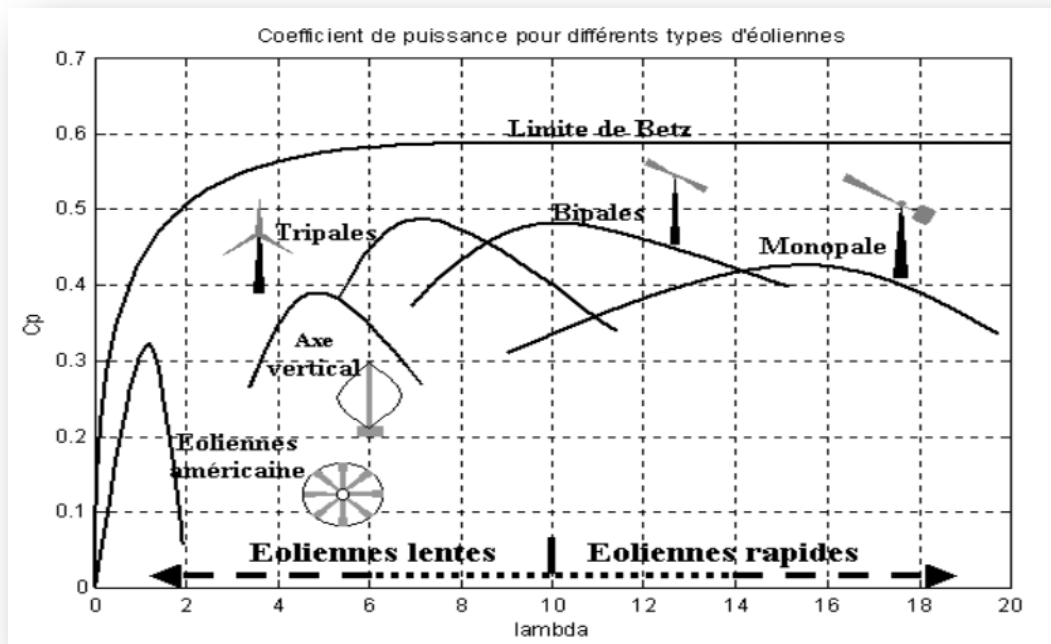


Figure II.5: Coefficient de puissance pour différents types d'aérogénérateurs

II.2.3 Evolution des coefficients d'un aérogénérateur (C_p, λ, β):

Il existe plusieurs formules pour calculer le coefficient de puissance C_p nous situons quatre différent expressions sont présenter si dessus : [17][23][24] [25]

$$C_p(\lambda, \beta) = 7.95633 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17.37510^{-4} \cdot \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9.410^{-3} \cdot \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda + 0.001 \quad (II.9)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda}} \quad (II.10)$$

$$\text{et: } \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta + 1}$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14.8 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (II.11)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(C_2 \cdot \left(\frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta + 1} \right) C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(-C_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta + 1} \right)\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (II.12)$$

$$C_1 = 0.5109 \quad C_2 = 116 \quad C_3 = 0.4 \quad C_4 = 5 \quad C_5 = 21 \quad C_6 = 0.0068$$

Dans le cadre de ce mémoire et pour notre exemple d'aérogénérateur nous utiliserons l'expression (II. 11)

La figure II.6 illustre l'évolution de coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse relative λ ($C_p=f(\lambda)$) pour différentes valeurs de β , tel que $\beta= [2\ 4\ 6\ 8\ 10]$.

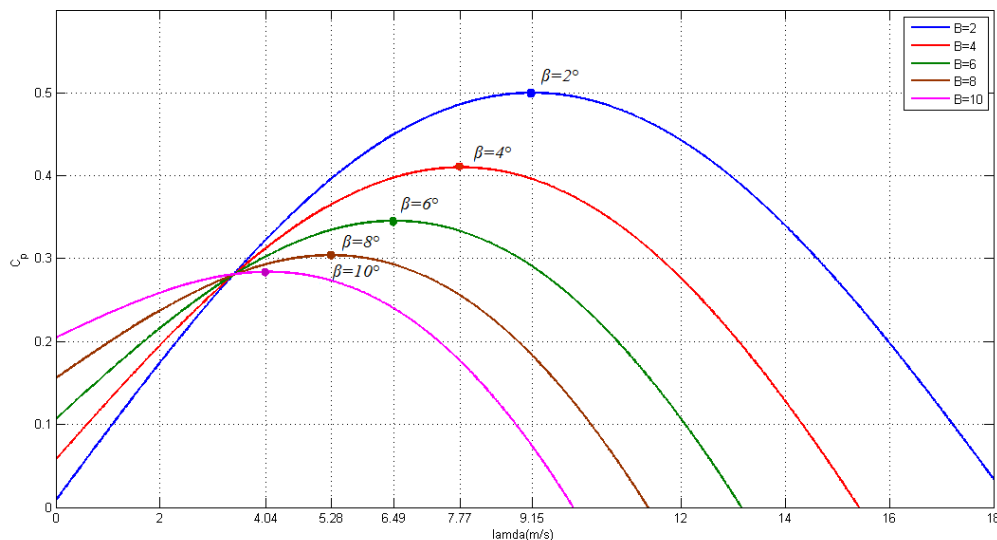


Figure II.6 : Caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour cinq valeurs de β

La détermination des différents λ optimums est déduite graphiquement de la courbe ci-dessus tel que :

L'angle β	$\beta = 2^\circ$	$\beta = 4^\circ$	$\beta = 6^\circ$	$\beta = 8^\circ$	$\beta = 10^\circ$
λ_{opt}	9.15	7.77	6.49	5.28	4.04
C_p	0.5	0.41	0.34	0.3	0.28

Tableau II.1 : Détermination des différents optimaux

Remarque:

Il est à noter que pour modifier la puissance captée, il suffit de varier l'angle de calage des pales β dans une plage de vitesse de vent prédéfinie (par le constructeur).

Pour une vitesse du vent donnée, on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, pour cela, après avoir callé les pales suivant un angle β , la valeur maximale

du coefficient de puissance C_p est obtenue à partir de l'équation $C_p=f(\lambda)$ pour une vitesse relative λ optimale lui correspondant, conformément à la figure II.7.

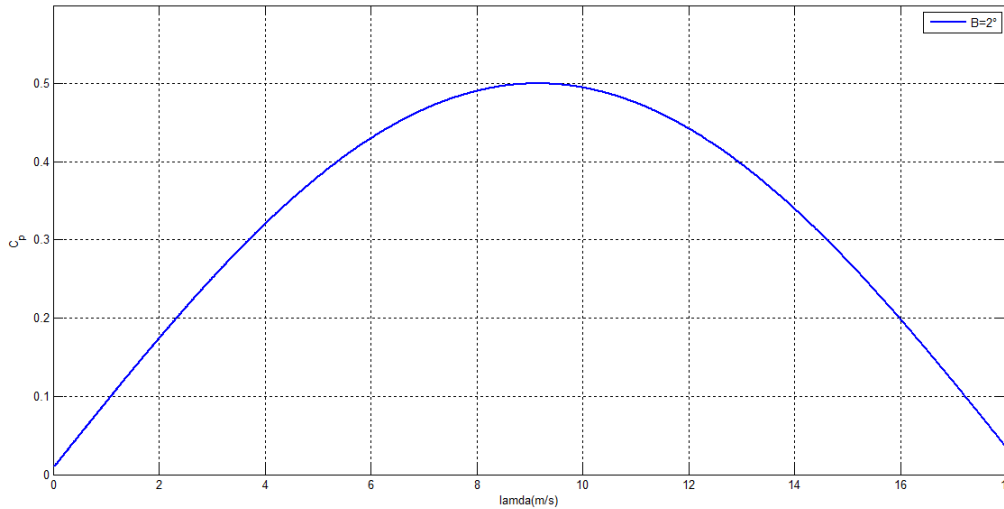


Figure II.7 : Caractéristique $C_p=f(\lambda)$ pour $\beta= 2^\circ$

II.3 Production d'énergie mécanique:

Conformément à l'équation II.7, on a:

$$C_p = \frac{P_t}{P_v}$$

Et on multiplie le numérateur et le dénominateur respectivement par P_m par P_v en trouve:

$$P_t = \left(\frac{P_v}{P_v}\right) \cdot P_t = \left(\frac{P_t}{P_v}\right) \cdot P_v = C_p \cdot P_v \quad (II.13)$$

A partir de équation(II.5)la puissance maximal extraite par la turbine P_t disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime par :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_v^3 \quad (II.14)$$

avec: $S = \pi.R^2$

II.3.1 Equation dynamique de l'arbre :

Le modèle mécanique est illustré par :

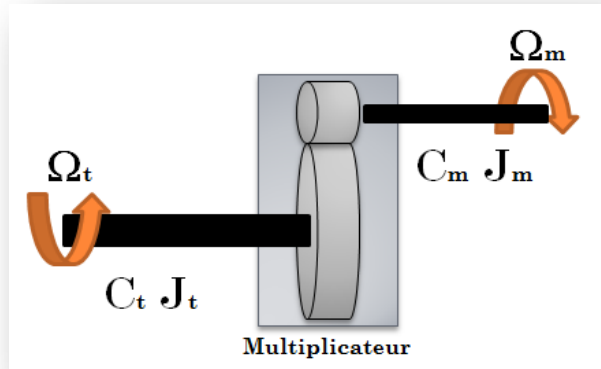


Figure II.8 : Modèle mécanique simplifié du multiplicateur

Sachant que :

$$\frac{1}{2}.J_t.\Omega_t^2 = \frac{1}{2}.J_m.\Omega_m^2 \quad (II.15)$$

$$\Omega_m = G.\Omega_t \quad \text{et} \quad C_m = \frac{C_t}{G} \quad (II.16)$$

En remplace l'équation II.16 dans l'équation dynamique II.15, le moment d'inertie après le multiplicateur G est donné par:

$$J_m = \frac{J_t}{G^2} \quad (II.17)$$

Le modèle mécanique proposé, considère l'inertie totale « J », constituée de l'inertie de la turbine reporté sur le rotor de la génératrice (de la turbine après le multiplicateur), et l'inertie de la turbine après le multiplicateur « J_m »:[17]

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_m \quad (II.18)$$

Chapitre II : Modélisation de la turbine

A partir des équations II.8 et II.14, le couple appliqué à l'arbre en sortie de la turbine C_t avant le multiplicateur de l'aérogénérateur peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2.\lambda} . C_p(\lambda, \beta) . \rho . \pi . R^3 . V_v^2 \quad (II. 19)$$

avec:

J_t : Inertie de la turbine avant le multiplicateur.

J_m : Inertie de la turbine après le multiplicateur.

C_t : Couple avant le multiplicateur.

G : Gain de multiplicateur.

Ω_m : Vitesse mécanique après multiplicateur.

Ω_t : Vitesse de l'aérogénérateur avant multiplicateur.

Il est à noter que l'inertie du rotor d'une machine connectée après le multiplicateur est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.[17]

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique C_m qui sera appliquée au rotor :

$$J . \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m \quad (II. 20)$$

avec :

$$C_m - C_{em} = J . \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v . \Omega_m \quad (II. 21)$$

tel que:

C_{em} : couple électromagnétique.

C_m : couple mécanique de la turbine.

J : moment d'inertie globale.

f_v : Coefficient de frottement visqueux.

En remplace l'équation II. 18 dans l'équation II. 21, on obtient alors:

$$C_m - C_{em} = \left(\frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m \quad (II.22)$$

En appliquant la transformation de Laplace, l'équation II. 21 s'écrira:

$$C_m - C_{em} = (J \cdot s + f_v) \cdot \Omega_m \quad (II.23)$$

A partir de ce qui précède, on aboutit au schéma bloc ci-dessous de notre aérogénérateur :

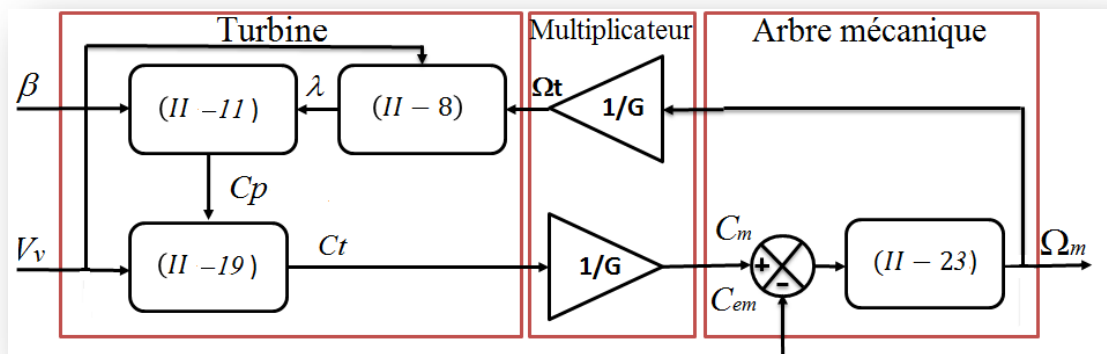


Figure II.9 : Modèle de l'aérogénérateur

II.4 Stratégie de commande de la turbine éolienne :

II.4.1 Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable:

A travers de la recherche bibliographique, nous avons identifié deux méthodes d'identification des zones de fonctionnement:

1^{ère} Méthode : [17][16]

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon quatre zones, comme l'illustre la Figure II.10, de $P_{elc} = f(\Omega_{mec})$

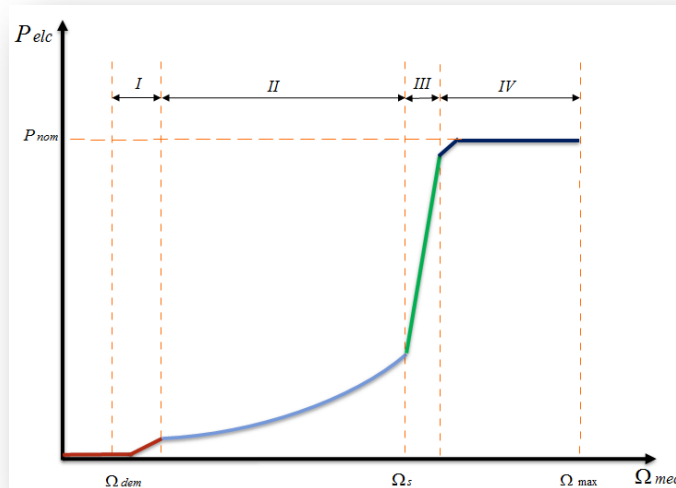


Figure II.10 : Les quatre zones de fonctionnement de la turbine [17] [26]

Zone I La phase de démarrage de la machine. La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne. La production électrique commence lorsque la vitesse mécanique atteint environ 70% de la vitesse de synchronisme de la génératrice. La puissance électrique reste assez faible. [16]

Zone II Dans cette zone, l'angle de calage des pales est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est-à-dire $\beta = 2^\circ$ pour extraire le maximum de puissance.

Zone III La vitesse de l'éolienne est constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} . (atteint des Valeurs plus importantes) [17]

Zone IV Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale $V_{v_{max}}$, une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

2^{ème} Méthode : [18][19]

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre la Figure II.11 : $(\Omega_m, P_m) = f(V_v)$ (conditions idéales)

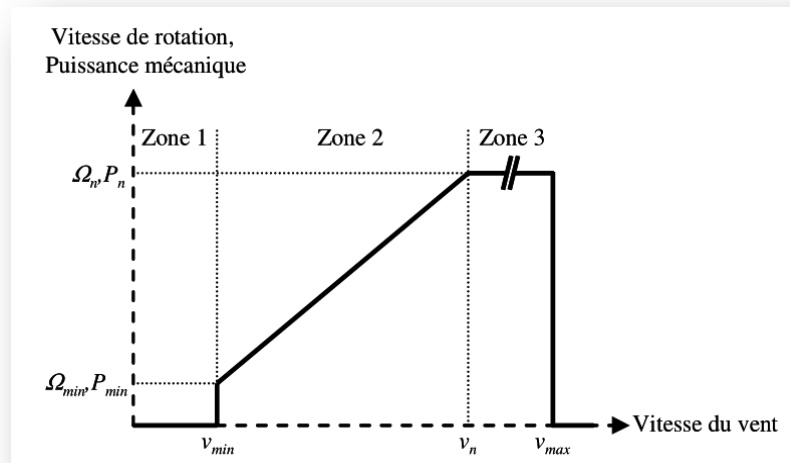


Figure II.11 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [27]

Zone I La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à 0.

Zone II Le vent atteint une vitesse minimale v_{min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n .

Zone III Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale v_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

A partir des deux méthodes, on voit bien que les zones II sont identiques et dépendent exactement à notre cas d'étude (pour des angles β constant).

Pour cette zone il existe différentes stratégies de commande [17] pour contrôler le couple électromagnétique appliqué au rotor de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), de manière à régler la vitesse de rotation pour maximiser la puissance électrique produite. Cette stratégie est connue sous la terminologie MPPT (maximum power point tracking). On peut distinguer deux modes de contrôle:

- Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

II.4.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation :

Il suffit de régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la machine de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de l'arbre de la machine doit être effectué.

Le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne avec asservissement de la vitesse de rotation est représenté sur la figure II.12.

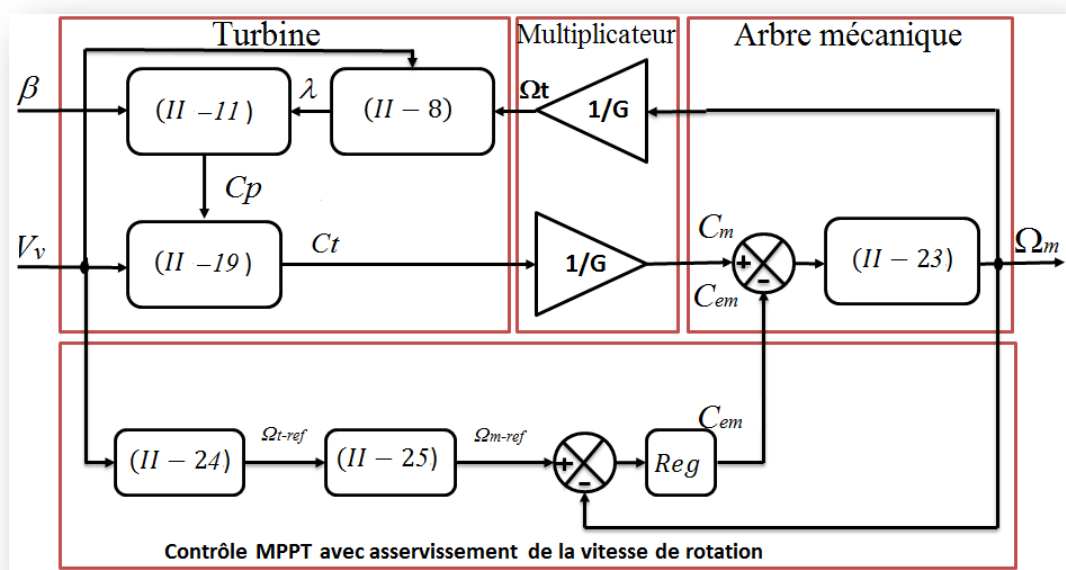


Figure II.12: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation

Le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} généré par le bloc de contrôle MPPT (figure II.12) au travers d'un régulateur de type Proportionnel Intégral (PI). Ce qui nous a permis d'effectuer un asservissement de vitesse de rotation Ω_m et d'atténuer ainsi l'effet du couple mécanique C_m considéré comme une perturbation.

A partir de l'équation II.8 on peut exprimer la vitesse de rotation Ω_{t-ref} de référence comme suit :

$$\Omega_{t-ref} = \frac{\lambda_{opt}.V_v}{R} \quad (II.24)$$

En tenant compte du gain du multiplicateur G , la vitesse de rotation Ω_{m-ref} s'exprime par :

$$\Omega_{m-ref} = G.\Omega_{t-ref} \quad (II.25)$$

II.4.2.1 Simulation et interprétation :

Afin de valider le modèle de notre turbine avec asservissement de vitesse, nous nous proposons d'effectuer des simulations sous environnement Matlab / Simpower Systems.

Nous considérons que le système éolien est en régime permanent et qu'il fonctionne dans la zone de fonctionnement optimal (Zone II), c'est-à-dire qu'il produit le maximum de puissance en fonction de la vitesse du vent. Le modèle de notre simulation est illustré dans la figure II.13.

Nous nous proposons de faire fonctionner notre turbine avec l'Algorithme de commande MPPT avec vitesse du vent constante et variable, suit à quoi on pourra valider notre model.

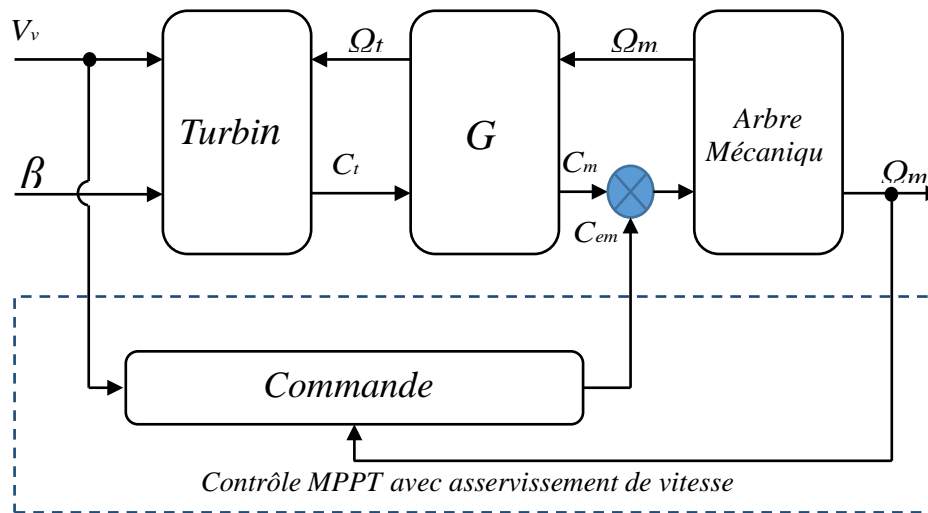


Figure II.13 : Modèle de la turbine avec asservissement de vitesse

- 1^{er} Cas d'étude : Vitesse du vent constante : ($V_v = Constante$)

Profil du vent appliqué a l'entrée de la turbine:

Dans un premier temps, nous appliquons une vitesse de vent constante de 4,5m/s à l'entrée de la turbine d'éolienne comme illustré sur la figure II.14

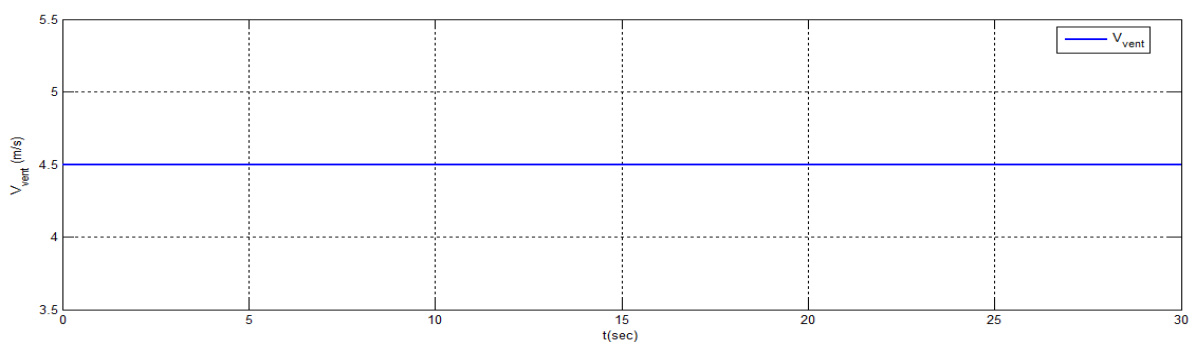


Figure II.14 : Profils du vent constant

Les résultats de simulation de cet algorithme de commande avec un profil du vent constant (Figure II.14) sont montrés sur les figures ci-dessous (figure II.15).

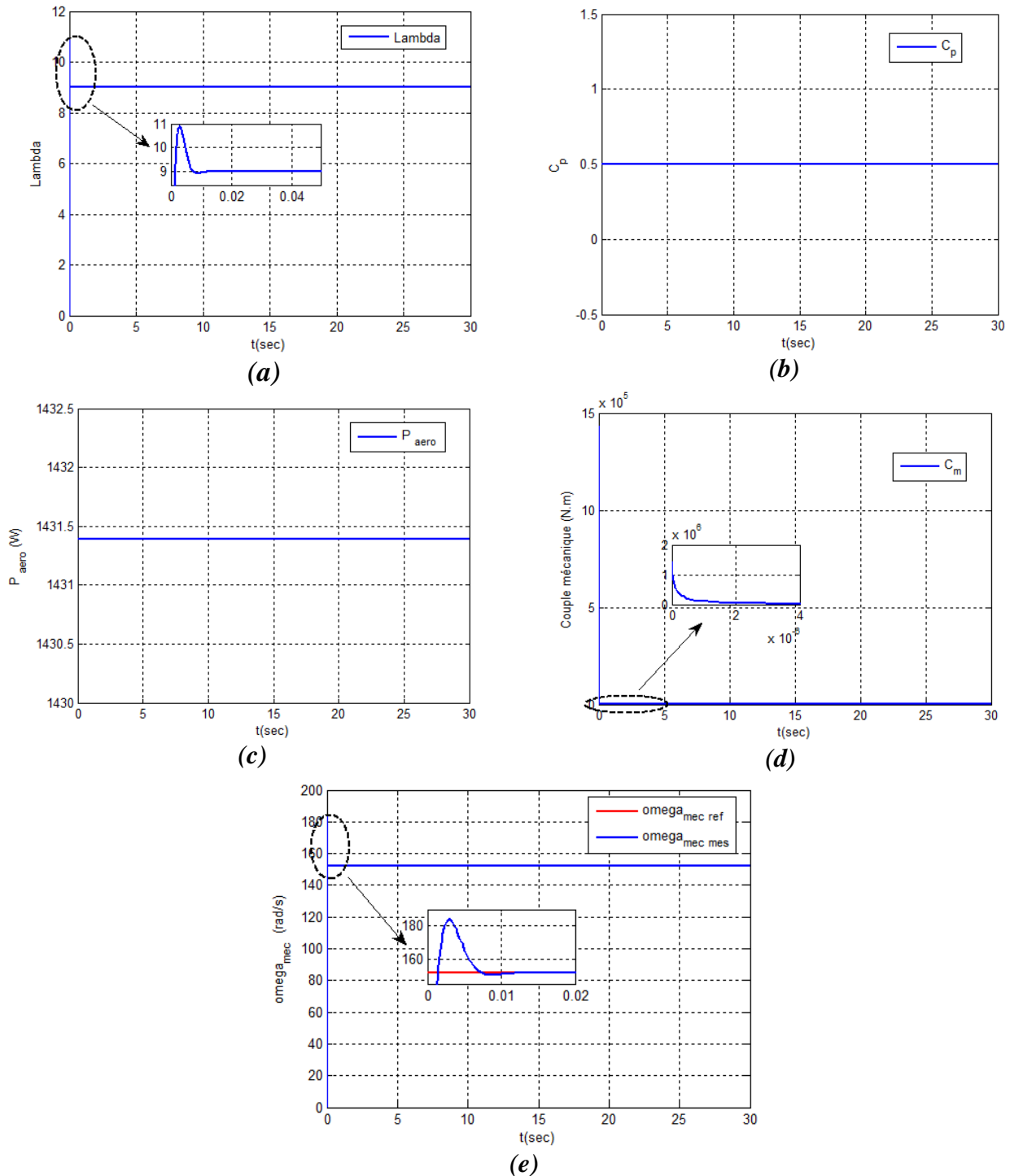


Figure II.15 : Evolution des paramètres de la turbine éolienne avec asservissement de vitesse ($V_v=cste$): $\Lambda=f(t)$; (b) : $C_p=f(t)$; (c) : $P_{aer}=f(t)$; (d) : $C_m=f(t)$; (e) : $\Omega_m=f(t)$.

La figure II.15.a montre que la vitesse relative λ est égale à sa valeur optimale ($\lambda=\lambda_{opt}$) et cela pour $\beta=2^\circ$. Dans la même figure λ présente un dépassement de 19%, elle prend une valeur maximale $\lambda_{max}=10,89$ à $t=3.10^{-3}s$ et après un temps $t=0,01s$ elle se stabilise à $\lambda=\lambda_{opt}=9,15$. Pour ce qui de la figure II.15.b, le coefficient de puissance C_p prend une valeur maximale de 0,5 pour une valeur de $\beta=2^\circ$ afin d'extraire le maximum de puissance. De la figure II.15.c il est prélevé la valeur de la puissance aérodynamique pour être maximale et constante ($P_{aer}=1431,4\text{ W}$) pour une vitesse du vent fixe (4,5 m/s). Au niveau de la figure II.15.d, le couple mécanique de la turbine est de $C_m=1,43.10^6\text{ N.m}$ à $t=0s$, après un temps $t=4,10^{-5}s$; le couple prend la valeur $C_m=150\text{ N m}$. Dans la figure II.15.e on voit bien que la vitesse mécanique de la turbine présente un dépassement de 26% à $t=2,6.10^{-3}s$, elle atteint la valeur maximale de $\Omega_m=183,6\text{ rad/s}$ pour ensuite suivre la consigne après un $t=0,01s$ pour revenir à la valeur désirée $\Omega_m=151,7\text{ rad/s}$ (point de fonctionnement de la génératrice en mode hypo-synchrone).

- **2^{ème} Cas d'étude : Vitesse du vent variable : ($V_v = \text{Variable}$)**

Profil du vent appliqué à l'entrée de la turbine:

Ces deux structures de commandes ont été simulées en considérant un profil de vent en moyenne autour de 4,5 m/s, comme la montre la figure II.16.

Le vent étant une grandeur de nature aléatoire, par conséquent son profil a été choisi d'une manière à prendre en considération les deux modes de fonctionnements hyper-synchrone et hypo-synchrone pour le cas d'un couplage avec MADA.

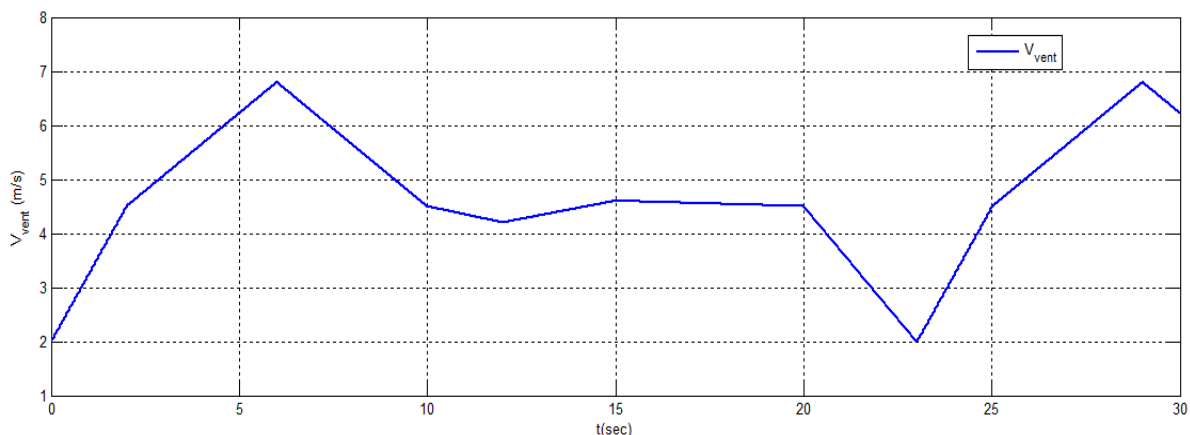


Figure II.16: Profil du vent

La figure II.16 montre l'évolution de la vitesse du vent que nous avons imposé à travers sept intervalles de temps (Tableau II.3).

$t(s)$	0	2	6	10	12	15	20
$V_v(m/s)$	2	4,5	6,8	4,5	4,2	4,6	4,5

Tableau II.2 : Intervalles de temps de la vitesse du vent.

Pour les besoins de notre simulation, nous considérons que la vitesse du vent se présente de façon cyclique durant tout les 23 s.

La figure II.17 présente le signal du bruit qui doit s'ajouter au signal de la vitesse du vent pour se rapprocher le plus possible d'un fonctionnement réel.

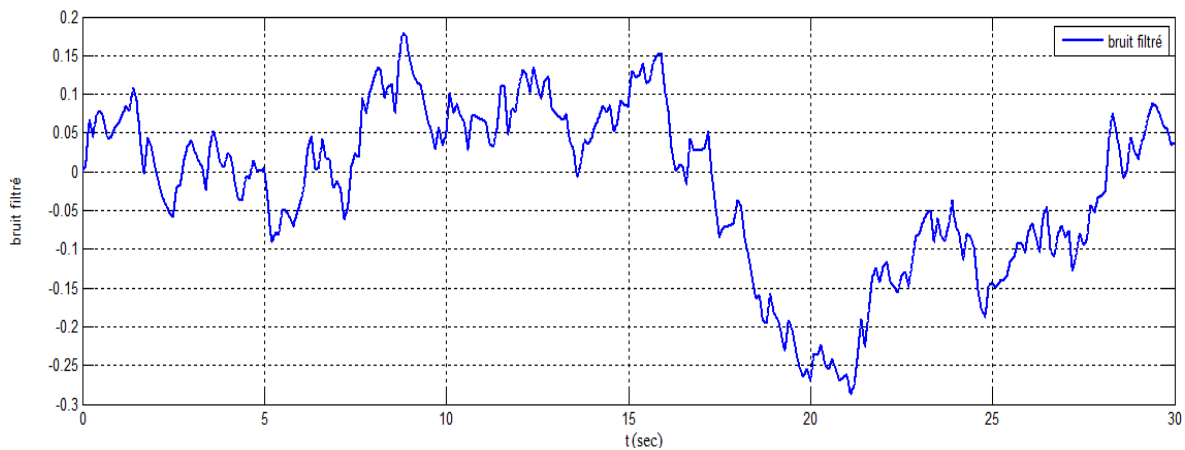


Figure II.17: Bruit après filtrage

Pour aboutir à une vitesse variable perturbée (Figure II.18), on a été obligé d'additionné ce bruit (Figure II.17) au profil du vent qu'on défini (Figure II.16).

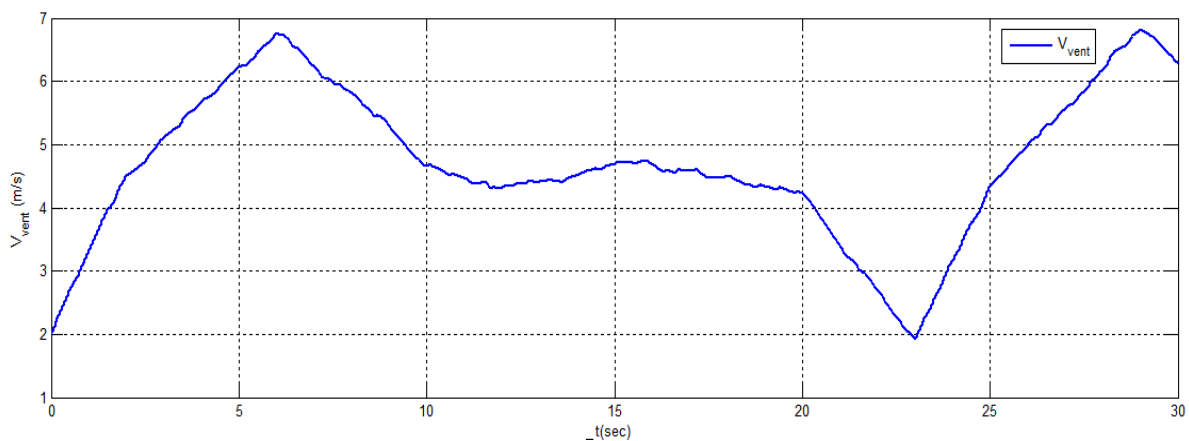


Figure II.18 : Le profil du vent appliqué à l'entrée de l'éolienne

Chapitre II : Modélisation de la turbine

Dans la suite de notre travail en applique cette vitesse à l'entrée de la turbine pour les deux stratégies de commande MPPT (avec et sans asservissement de vitesse).

Les résultats de simulation de cet algorithme de commande avec le même profil de vent (figure II.18) sont montrés sur la figure ci-dessous (figure II.19) en représentant l'évolution des différents paramètres du système en fonction de temps.

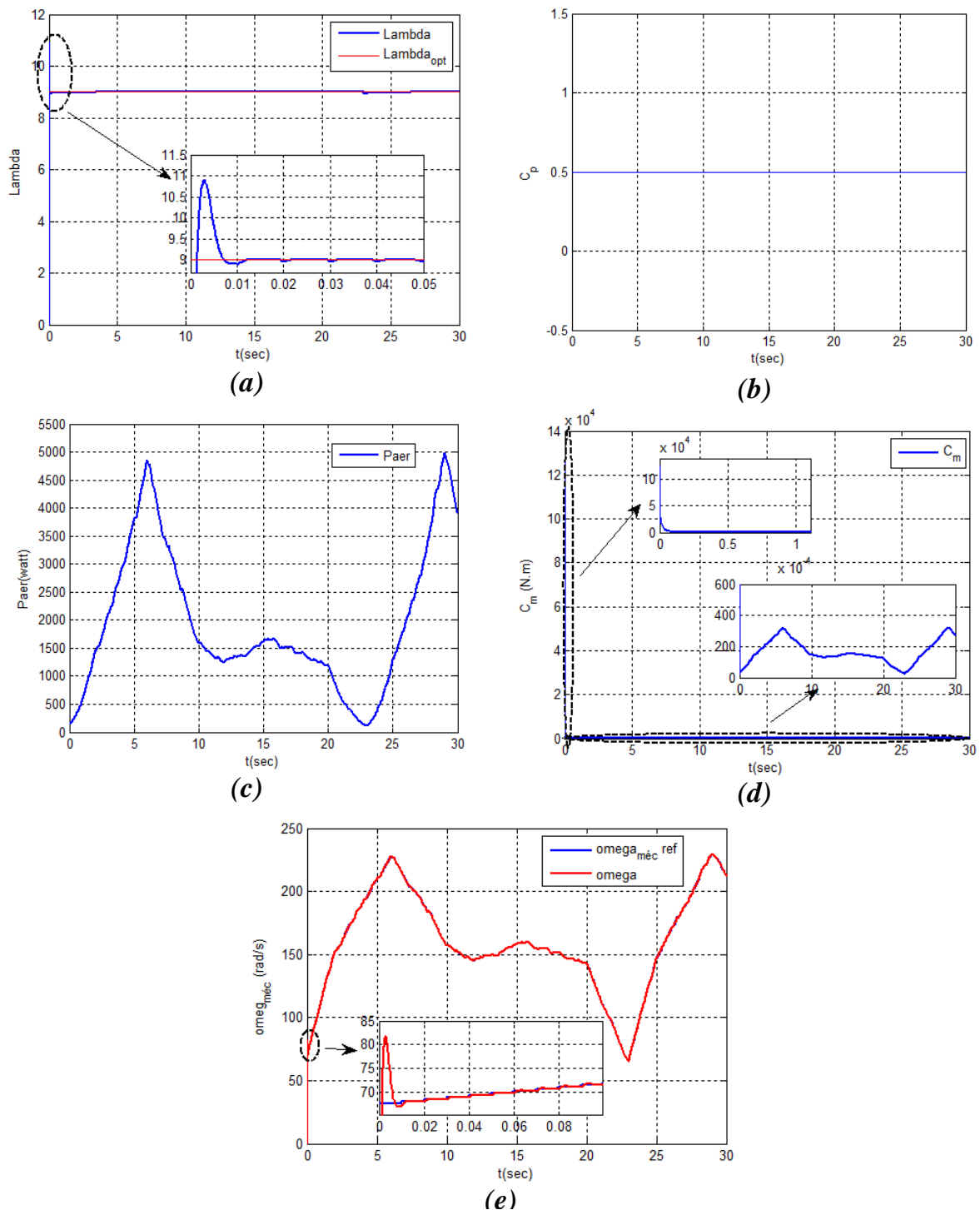


Figure II.19 : Paramètre de la turbine éolienne avec asservissement de vitesse (variable)
 (a) : $\Lambda = f(t)$; (b) : $C_p = f(t)$; (c) : $P_{aer} = f(t)$; (d) : $C_m = f(t)$; (e) : $\Omega_m = f(t)$

Chapitre II : Modélisation de la turbine

La figure II.19.a présente un régime transitoire d'une durée de 0.015s, avec un dépassement de 21%, suite à quoi, λ suit $\lambda_{\text{optimale}}$ autour de la valeur de 9,15. La figure II.19.c qui représente la puissance aérodynamique qui prend des valeurs optimum à chaque variation de la vitesse du vent. Au niveau de la figure II.19.d Le couple mécanique de la turbine est de $C_m = 1,43 \cdot 10^6$ N.m à $t=0$ s, après un temps $t_1 = 4,10^{-5}$ s ; le couple prend la valeur $C_m = 150$ N.m.

Dans la figure II.15.e on voit bien que la vitesse mécanique de la turbine présente un dépassement de 26% à $t = 2,6 \cdot 10^{-3}$ s, elle atteint la valeur maximale de $\Omega_m = 183,6$ rad/s pour ensuite suivre la consigne après un $t = 0,01$ s pour revenir à la valeur désirée $\Omega_m = 151,7$ rad/s (point de fonctionnement de la génératrice en mode hypo-synchrone).

Dans la figure II.19.e on voit bien, la vitesse mécanique suit sa référence on remarque que ces deux vitesses sont identiques en plus la représentation de l'évolution de la vitesse mécanique est à l'image de la variation du vent imposé.

La vitesse mécanique Ω_m présente un dépassement de 20%, avec une vitesse de 2m/s elle prend la valeur maximale $\Omega_m \text{ max} = 81,8$ rad/s à $t = 2,9 \cdot 10^{-3}$, on remarque un suivi de la vitesse à $t = 0,012$ s.

Conclusion

Dans la première partie du chapitre 2, on a bien vu que le modèle proposé de la turbine nous a permis d'avoir de très bons résultats en sortie où la vitesse de rotation mécanique est bel et bien l'image du profil de la puissance de notre aérogénérateur.

Ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu. Ce contrôle est très dynamique et la puissance obtenue est donc plus importante.

II.4.3 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation :

La vitesse du vent varie très peu en régime permanent, cette hypothèse implique que le couple d'accélération ($C_m - C_{em}$) de la turbine peut être considéré comme nul (appliqué à l'équation II.22). De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ($f_v \cdot \Omega_m = 0$) par rapport au couple mécanique C_m , nous pouvons alors écrire :

$$C_m - C_{em} = \left(\frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = 0 \quad (II.26)$$

Le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation est représenté sur la figure II.18 : [16] [17]

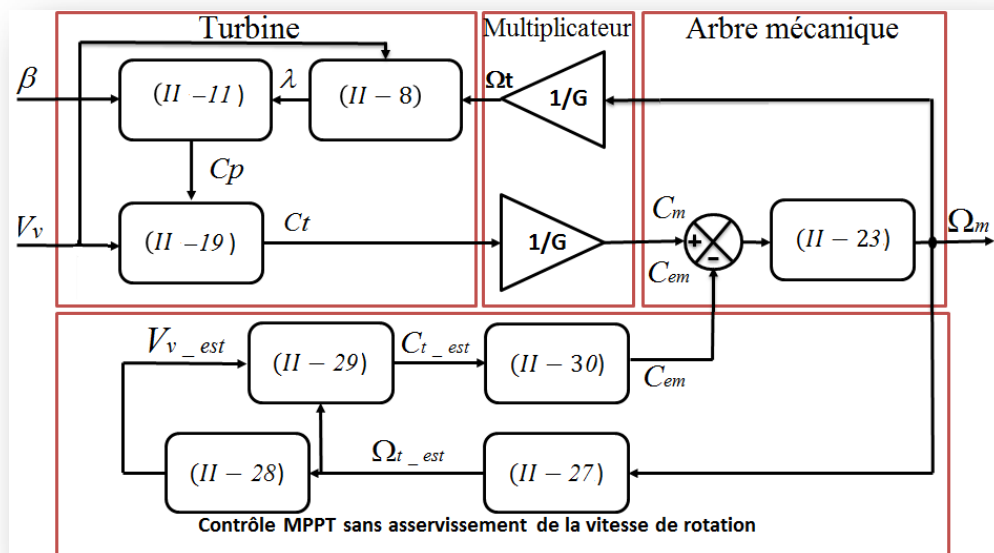


Figure II.20 : Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

A partir de la mesure de la vitesse de rotation de l'arbre de la MADA, on obtient une estimation de la vitesse de rotation de la turbine Ω_{t-est} :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_m}{G} \quad (II.27)$$

Chapitre II : Modélisation de la turbine

Une estimation de la vitesse du vent, notée (V_{v-est}) est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine :

$$V_{v-est} = \frac{\Omega_{t-est-ref} \cdot R}{\lambda} \quad (II.28)$$

En s'appuyant sur les estimations précédente (la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine), le couple de la turbine éolienne s'exprimera par :

$$C_{t-est} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{t-est}} \cdot V_{v-est}^3 \quad (II.29)$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne, tel que :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{t-est}}{G} \quad (II.30)$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale λ_{opt} de sorte à avoir le coefficient de puissance maximum C_{pmax} . Le couple électromagnétique de référence s'exprimera alors par :

$$C_{em-ref} = k \cdot \Omega_m^2 \quad (II.31)$$

Où k est une constante définie par [6]:

$$k = \frac{C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3 \cdot \lambda_{opt}} \quad (II.32)$$

Pour la zone de fonctionnement étudiée (*Zone II*) et dans le cas du contrôle MPPT, le couple électromagnétique de référence est donc proportionnel au carré de la vitesse de rotation de l'arbre de la MADA.

II.4.3.1 Simulation et interprétation :

De la même façon que précédemment, notre objectif sera de valider le modèle de notre turbine sans asservissement de vitesse, à cet effet, nous nous proposons d'effectuer la simulation du modèle suivant (Figure II.21)

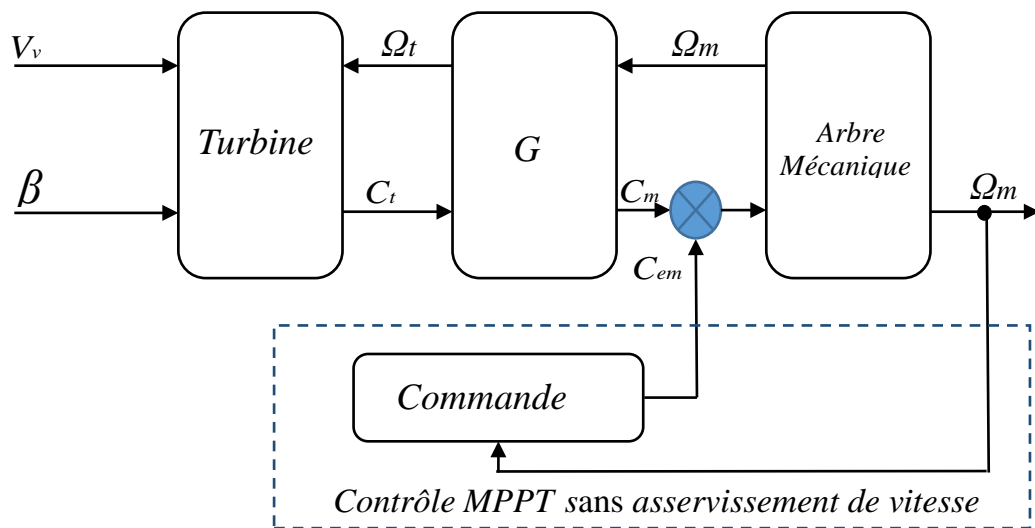


Figure II.21 : Modèle de la turbine sans asservissement de vitesse

Paramètres de simulation :

<i>Vitesse du vent</i>	V_v	4.5 m/s
<i>Angle de calage</i>	β	2°
<i>Gho</i>	ρ	1.25
<i>Gain de multiplicateur</i>	G	15
<i>Rayon des pales</i>	R	4
<i>Inertie globale</i>	J	1,6
<i>Inertie de la turbine</i>	J_t	315
<i>Inertie de l'arbre mécanique</i>	J_m	0.2
<i>Coefficient de frottement visqueux</i>	f_v	0.0024
<i>Epsilon</i>	ζ	0.7

Tableau II.3 : Paramètres de la turbine sans asservissement de vitesse

- **Vitesse du vent constante :**

On applique le même profil du vent qui est présenté dans la figure II.8 avec une vitesse de 4,5 m/s.

Les résultats obtenus avec cette stratégie de commande à vitesse du vent constante sont présentés dans les figures ci-dessous Figure II.22.

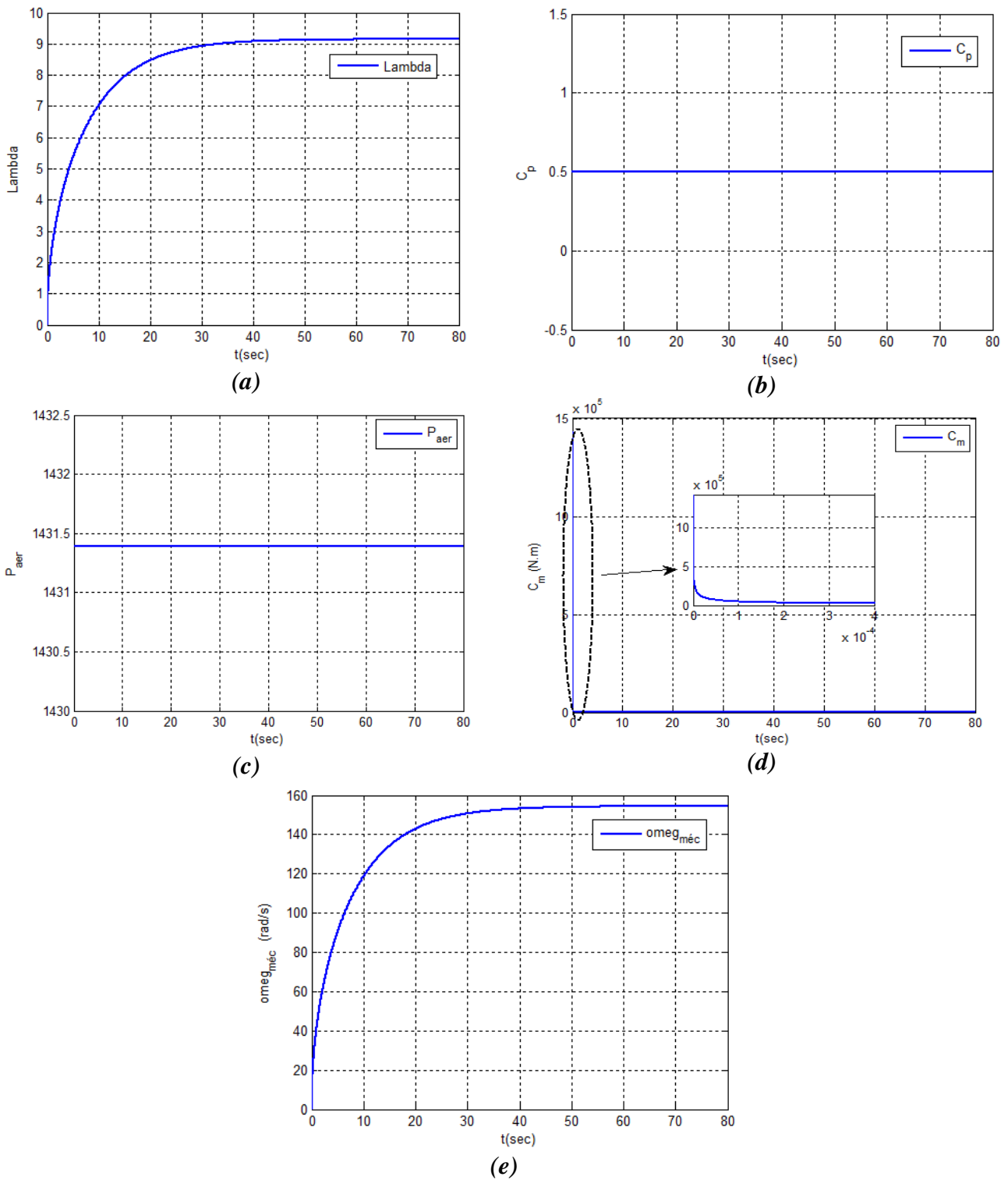


Figure II.22 : Paramètre de la turbine éolienne sans asservissement de vitesse ($V_v = \text{Constante}$): $\Lambda = f(t)$; (b) : $C_p = f(t)$; (c) : $P_{aer} = f(t)$ (a)(d) ; $C_m = f(t)$, (e) ; $\Omega_m = f(t)$

La figure II.22.a met en évidence la vitesse relative λ qui n'atteint pas le régime établie. Elle nécessite un temps de $t=58$ s pour atteindre la valeur optimale $\lambda_{opt}=9.15$. a travers la figure II.22.b, on constate que le coefficient de puissance C_p prend une valeur maximale de 0,5 pour la valeur de $\beta=2^\circ$ correspondant à l'extraction d'un maximum de puissance. La figure II.22.c nous permet de prélever la valeur maximal de la puissance aérodynamique et constante ($P_{aer}= 1431,4$ W) pour une vitesse du vent fixe (4,5 m/s). A travers la figure II.22.e , il est clairement mit en évidence l'apport de la MPPT où la puissance reste constante de sorte que l'évolution de la vitesse mécanique Ω_m à la sortie de la turbine éolienne n'est pas une image de l'évolution de la vitesse du vent (Figure II.14)

- **Vitesse du vent variable :**

On utilise le même profil du vent qui est illustré dans la figure II.18 pour l'appliqué aux pales de notre aérogénérateur.

Les résultats obtenus pour un profil de vent variable avec bruit et sans asservissement de vitesse sont illustrés dans la figure II.23.

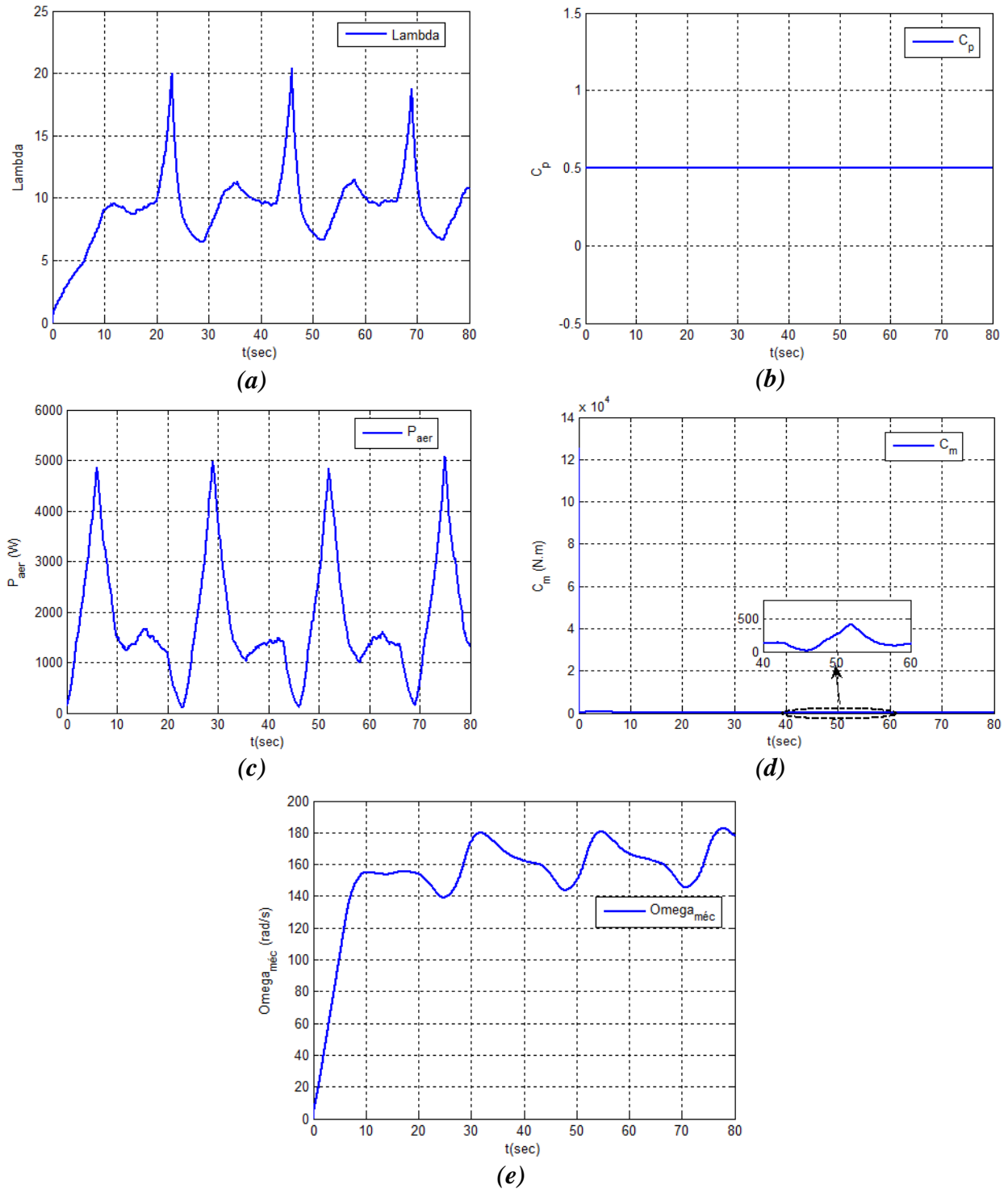


Figure II.23 : Paramètre de la turbine éolienne sans asservissement de vitesse (Variable)

(a) : $\Lambda = f(t)$, (b) : $C_p = f(t)$, (c) : $P_{aer} = f(t)$

(d) : $C_m = f(t)$, (e) : $\Omega_m = f(t)$

Figure II.23.a : λ dépend de la variation de la vitesse du vent, elle évolue de façon à atteindre un maximum après $t=20$ d'une valeur maximale de $\lambda=20$ et une valeur minimale $\lambda=6$. Figure II.23.b : Le coefficient de puissance C_p n'atteint pas la valeur de Betz qui est de 0.59. Figure II.23.c : La puissance aérodynamique évolue de façon cyclique de $t=0$ à $t=80$ s atteignant une valeur maximale de 5000 et une valeur minimale de 100. Figure II.23.d : Le couple mécanique C_m a une valeur importante au démarrage de la turbine, il atteint une valeur maximale de 13.10^4 N.m. Figure II.23.e : il est de même pour la vitesse mécanique, elle évolue de façon cyclique à l'âge de la courbe de puissance atteignant une valeur maximale de 180 rd/s et une valeur minimale de 140 rad/s.

II.4.4. Etude Comparative :

- **Vitesse du vent constante :**

Afin de résumer ces résultats obtenus avec les deux stratégies de contrôle de la vitesse (avec et sans asservissement) la figure II.24 présente la vitesse mécanique avec asservissement ainsi que la référence obtenue et la vitesse obtenue sans asservissement. Figure II.24, on constate que la commande avec asservissement est plus performante et possède des temps de réponse plus faible.

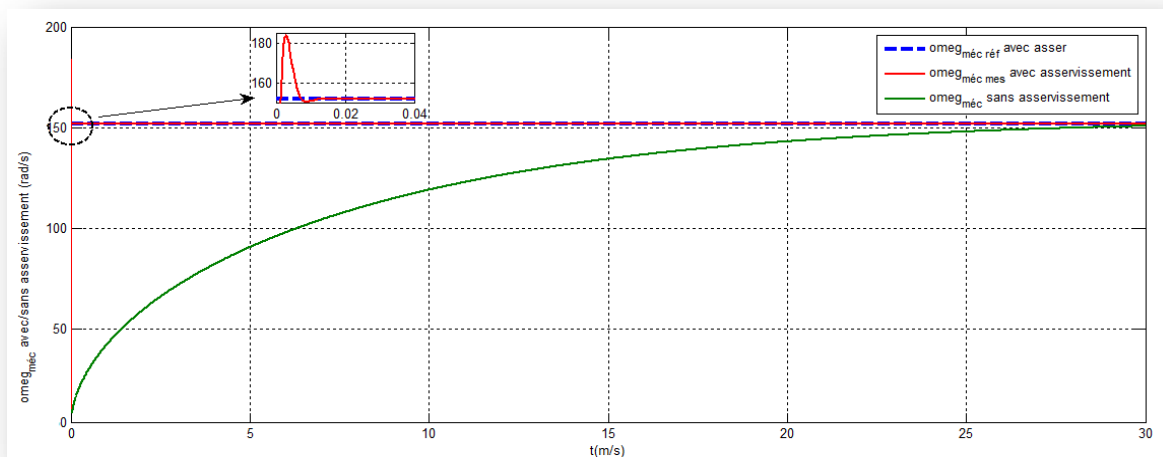


Figure II.24: Comparaison de la vitesse mécanique avec et sans asservissement de vitesse exprimé en rad/s

- **Vitesse du vent variable :**

Afin de résumer ces résultats obtenus avec l'une ou l'autre stratégie de contrôle de la vitesse (avec et sans asservissement) la figure II.25 présente la vitesse mécanique avec asservissement ainsi que sa référence, la vitesse obtenue sans asservissement et la vitesse du vent appliqué à la turbine éolienne (cette dernière est amplifiée à 20 fois sa valeur pour mieux mettre en évidence son évolution Figure II.25)

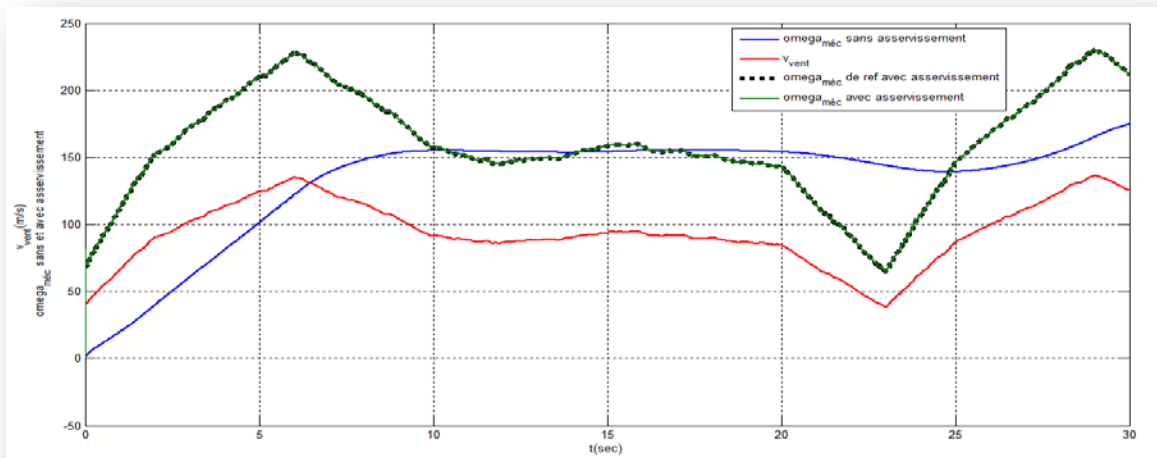


Figure II.25 : Comparaison des vitesses mécaniques avec les deux stratégies de commande à vitesse variable

Dans ce qui suit, notre intérêt est porté au contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.

II.5 Conclusion :

Dans cette seconde partie du chapitre, nous avons décrit les différents éléments d'une éolienne utilisant un multiplicateur. Puis nous avons établi un modèle d'éolienne existante, à savoir l'éolienne à vitesse fixe et l'éolienne à vitesse variable.

A partir de ce modèle, nous nous sommes intéressés aux éoliennes à vitesse variable. Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement, nous avons détaillé la zone particulière (Zone II), où la maximisation de l'énergie extraite du vent a été effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple

Chapitre II : Modélisation de la turbine

électromagnétique généré. Pour ce faire, différentes techniques de maximisation de la puissance extraite de la turbine ont été explicitées.

Ces algorithmes ont été validés par des résultats de simulation, qui ont montré leurs inconvénients et leurs avantages.

Chapitre 3

Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

Bibliographie

- [8] M .AHMED. « Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne » ; mémoire de magister en électrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF, 07/06/2011

- [10] G.DJAMEL et A .A.SAMIR .Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire d'ingénieur Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2007.

- [17] S.EL AIMANI, modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension) thèse de doctorat, L2EP de l'école centrale de Lille, 2004

- [19] TOUAL Belkacem, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », mémoire de Magister En Electrotechnique, Université de Batna,17/10/2010

- [27] F.MERRAHI, Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation, Application à l'énergie éolienne, Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique ENP d'Alger ,2007.

- [28] S. E. BEN ELGHALI, « Modélisation et Commande d'une hydrolienne Equipée d'une génératrice Asynchrone Double Alimentation », JGGE'08, 16-17 Décembre 2008, Lyon (France).

- [29] K. GHEDAMSI, Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine

- asynchrone, Thèse de Doctorat, ENP Alger (Algérie), 2008.
- [30] M.MESSAOUD, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [31] N.GHEDBANE ET A.MEDJADI, Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation à base d'un régulateur RST, Mémoire d'ingénieur université Med Boudiaf de M'silla, 2005
- [32] A.BOYETTE, contrôle et commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne, thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [33] X. YAO, C. YI, D. YING, J. GUO and L. YANG, « The grid-side PWM Converter of the Wind Power Generation System Based on Fuzzy Sliding Mode Control », Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE 2008, Xian (Chine).
- [34] MICHAŁKNAPCZYK, KRZYSZTOF PIENKOWSKI, «analysis of pulse width modulation techniques for ac/dc line-side converters» article Nr 26 sortie en 2006
- [35] F. KENDOULI, K. NABTI, K. ABED ET H. BENALLA, « modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation », revue des énergies renouvelables vol. 14 n°1 (2011) 109 – 120, université Mentouri, Constantine.
- [36] XAVIER P., « Production de l'énergie électrique par les énergies renouvelables, éolienne, ... », Mémoire, diplôme d'ingénieur c.n.a.m. conservatoire national des arts et métiers centre régional de Nancy, 04 avril 2006.
- [37] C. BENHABIB. « A new robust Experimentally Validated phase locked loop for power electronic control ». EPE2005.

Table de matière

III	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	68
III.1	Introduction	73
III.2	Constitution de la machine asynchrone à rotor bobiné	74
III.3	Principe de fonctionnement de la MADA	74
III.4	Modes de fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation	76
III.4.1	Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	76
III.4.2	Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	77
III.4.3	Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone	78
III.4.4	Fonctionnement en mode génératrice hyper-synchrone	78
III.5	Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	79
III.5.1	Hypothèses simplificatrices	80
III.5.2	Modèle de la machine dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant	83
III.6	Modèle de machine asynchrone à double alimentation pour la commande en puissances	84
III.6.1	Choix du référentiel pour le modèle diphasé	86
III.6.2	Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques	88
III.7	Commande directe (Mode continu)	89
III.8	Modélisation de la commande coté MADA	90

Chapitre III: Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

III.8.1	L'onduleur	90
III.8.2	Modulation de Largeur d'Impulsions Sinus-triangle	92
III.9	Résultat de simulation de la MADA	94
III.9.1	Résultats de simulation avec régulateur PI	94
III.9.2	Résultat de simulation avec régulateur IP	95
III.10	Modélisation de la commande cotée réseau	110
III.10.1	Redresseur à MLI de tension	110
III.10.2	Techniques de commande MLI	111
III.10.3	La boucle à verrouillage de phase PLL	114
III.11	Résultats de simulation	116
III.11.1	Résultats de simulation avec de régulateur	116
III.11.2	Interprétation des résultats	117
III.12	Résultats de simulation	118
III.12.1	Résultats de simulation avec le régulateur PI	118
III.12.2	Interprétation des résultats	120
III.12.3	Résultats de simulation avec de régulateur IP	125
III.12.3	Interprétation des résultats	128
III.13	Conclusion	134

Chapitre III

Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

III.1. Introduction:

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator analogue à celui des machines triphasées classique et un rotor contenant trois bobinages connectés en étoile accessible par trois bagues munies de contacts glissants [27].

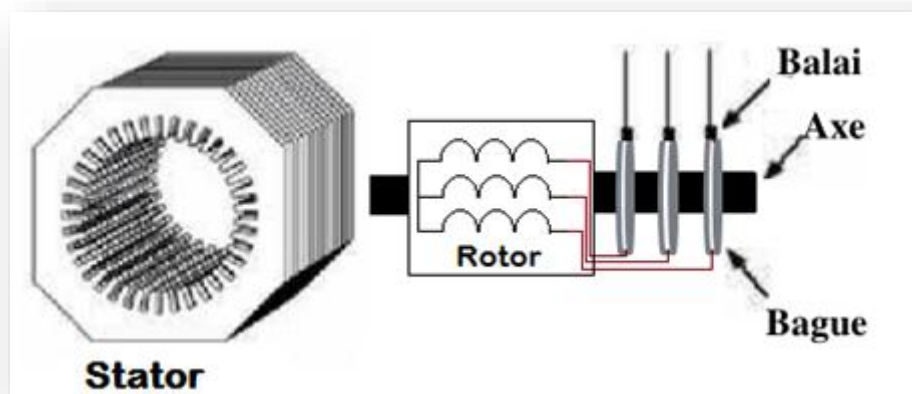
Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et le rotor relie aux réseaux par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance.

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun le besoin d'un multiplicateur de vitesse.[28] Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que le monde de l'industrie utilise ce type de machines.

Dans ce chapitre, on se propose de valider notre modèle de machine asynchrone à double alimentation connectée directement aux réseaux par le stator et alimentée au rotor par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/AC fonctionnant en MLI.

III.2. Constitution de la machine asynchrone à rotor bobiné :[28]

La machine asynchrone à rotor bobiné présente un stator identique à celui d'une machine triphasée classiques constituée le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur par l'intermédiaire de bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais (Figure III.1)



Figures III.1: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [29]

III.3.Principe de fonctionnement de la MADA :

Pour expliquer le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation, on se propose d'imposer certaines hypothèses simplificatrices de façon à négliger toutes les pertes.

- la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer, une partie de cette puissance fournie est mécanique $[(1-g).P]$ et le reste est électrique $[g.P]$ sort par les balais, ces grandeurs de fréquence variable sont transformées en énergie ayant la

même fréquence que le réseau électrique et y sera réinjectée une puissance $[(1+g).P]$ par l'intermédiaire du deuxième convertisseur (onduleur). [17]

- Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs.

- Une fois connecté au réseau le flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique et le nombre de spires dans le bobinage de stator et donc du courant statorique. [30] [31]

- Le flux magnétique généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m créée au rotor et au stator est tel que :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{\omega_s - \omega_{mec}}{\omega_s} \quad (III.1)$$

N_r : Nombre de spires des bobinages rotoriques.

N_s : Nombre de spires des bobinages statoriques.

ω_s : Pulsation de synchronisme de la machine.

ω_m : Pulsation de synchronisme mécanique de la machine.

E_r : f.e.m de rotor de la machine.

E_s : f.e.m de stator de la machine.

Sachant que le glissement est définie par:

$$g = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (III.2)$$

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot g \quad (III.3)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis par :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (III.4)$$

Donc, le rapport entre la puissance rotorique P_r et la puissance statorique P_s devient:

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (III.5)$$

Avec :

i_r : Courant rotorique de la machine.

i_s : Courants statorique de la machine.

P_r : Puissance rotorique de la machine de la machine électrique.

P_s : Puissance statorique de la machine de la machine électrique.

La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g . [16]

III.4. Modes de fonctionnement d'une MADA:

Il a noté que la machine asynchrone à double alimentation « MADA » peut fonctionner à la fois en mode moteur ou génératrice. C'est la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ($0 < g < 1$) ou génératrice ($-1 < g < 0$).

L'avantage de la MADA est qu'il suffit de commandé les courant rotoriques permettant de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine pour avoir la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

III.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [32]:

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau. La vitesse de rotation est inférieure à la vitesse synchronisme ($g > 0$).
- La machine asynchrone à cage peut fonctionnée ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

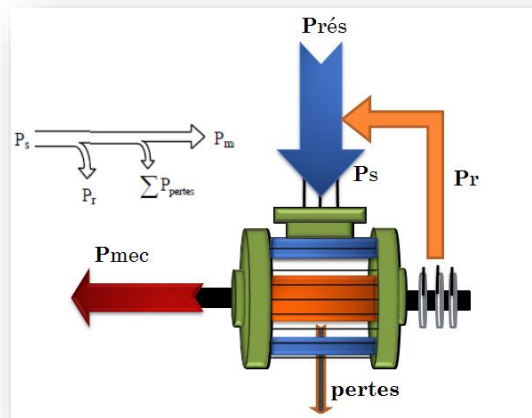


Figure III.2 : Fonctionnement en moteur, mode hypo-synchrone

Avec :

- P_{res} : Puissance de réseau.
- P_{mes} : Puissance mécanique.
- P_r : Puissance de rotor.
- P_s : Puissance de stator.

III.4.2. Fonctionnement moteur en mode hyper-synchrone [30]:

- La puissance fournie par le réseau alimente à la fois le rotor et le stator.
- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme ($g < 0$).

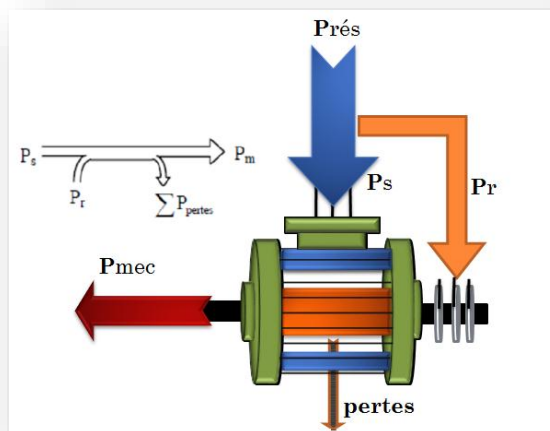


Figure III.3 : Fonctionnement moteur en mode hyper-synchrone

III.4.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo-synchrone [32]:

- La puissance est fournie au réseau par le stator ;
- Une partie de la puissance du réseau est absorbée par le rotor ;
- La vitesse de rotation est en dessous de la vitesse de synchronisme ($g > 0$).

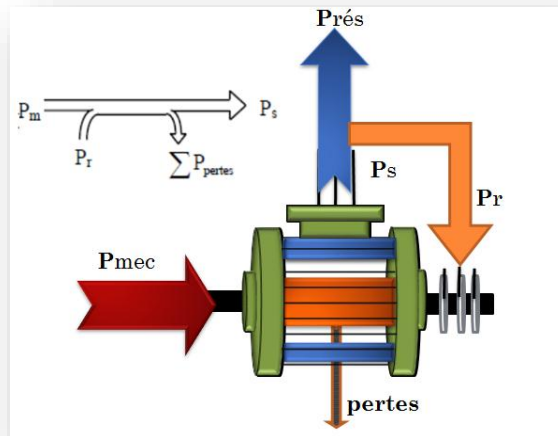


Figure III.4 : Fonctionnement générateur en mode hypo-synchrone

III.4.4. Fonctionnement génératrice en mode hyper-synchrone [16]:

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme ($g < 0$).

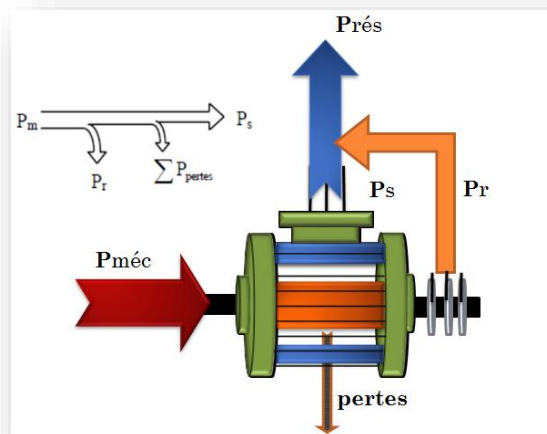


Figure III.5 : Fonctionnement générateur en mode hyper-synchrone

III.5 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

Dans cette partie, on modélise la MADA directement connectée au réseau de distribution par le stator, et alimentée par le rotor par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.

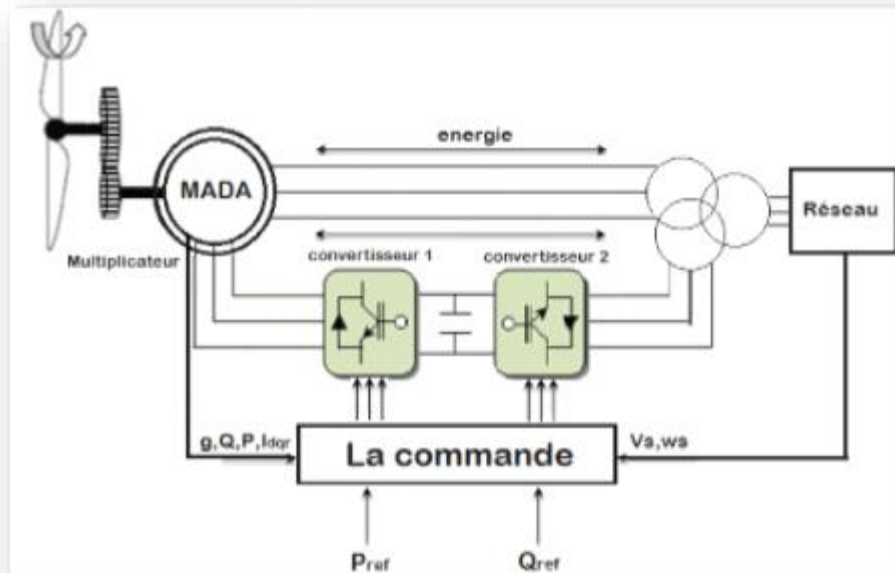


Figure III.6 : Chaîne de conversion de l'éolienne

III.5.1 : Hypothèses simplificatrices [17][20]:

- L'entrefer constant ;
- L'effet des encoches négligé ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte ;
- Le circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- Les Pertes ferromagnétiques négligeables.

- La machine asynchrone à double alimentation comporte :
 - trois bobines statoriques (S_a, S_b, S_c) décalées entre elles de 120° .
 - trois bobines rotoriques identiques de répartition similaire à celles du stator (R_a, R_b, R_c).

La figure (III.7) représente la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre « p » de paires de pôles par phase).

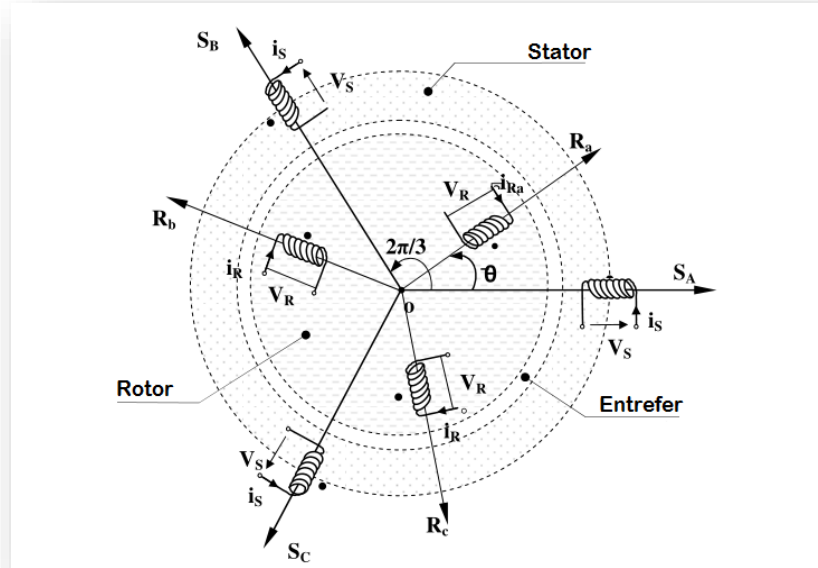


Figure III.7: Représentation simplifiée de la MADA

a) Equation électriques de la MADA :[33]

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent:

- Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

- Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

Avec :

$[V_{abcs}]$: Tensions simples triphasées au stator de la machine.

$[V_{abcr}]$: Tensions simples triphasées au rotor de la machine.

$[i_{abcs}]$: Courants statoriques de la machine.

- $[i_{abcr}]$: Courants rotoriques de la machine.
- $[\Phi_{abcs}]$: Flux statoriques de la machine.
- $[\Phi_{abcr}]$: Flux rotoriques de la machine.
- R_S : Résistance des enroulements statoriques.
- R_r : Résistance des enroulements rotoriques.

b) Equation magnétiques :

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{abcs} \\ \Phi_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_S & M_{sr} \\ M_{rs} & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

Avec:

$$[L_S] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$M_{sr} = M_{rs} = M_{max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

Avec :

- L_S : Inductance cyclique du stator.
- L_r : Inductance cyclique du Rotor.
- l_s : Inductance propre des enroulements statoriques.
- l_r : Inductance propre des enroulements rotoriques.
- m_s : Inductance mutuelle des enroulements statoriques.

- m_r : Inductance mutuelle des enroulements rotorique.
 M_{max} : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle Stator-Rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

c) Equation magnétique :

Le couple électromagnétique de la machine peut s'exprimer sous la forme :

$$C_e - C_r = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + f_v \cdot \omega_m \quad (III. 11)$$

Avec :

- C_e : Couple électromagnétique.
 C_r : Couple résistant.
 F : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.
 J : Inertie des parties tournantes.
 ω_m : Vitesse de rotation de l'axe de la MADA.

d) Transformation de Park :

La transformation de Park permet de passer d'un système triphasé (abc) à un système biphasé (dq) ce qui nous permettra de créer un découplage similaire à celui de la machine à courant continu constitué d'un couple et d'un flux. La matrice de Park est donnée par :

$$[M_p] = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III. 12)$$

- Pour les grandeurs statoriques: $\theta = \theta_s$
- Et pour les grandeurs rotorique: $\theta = (\theta_s - \theta_m)$

$$[M_p]^{-1} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III. 13)$$

$[M_p]$: Matrice de Park

$[M_p]^{-1}$: Matrice inverse de Park.

Le changement de variables relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation (III-14) :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [M_p] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (III. 14)$$

Avec :

x : Tension, courant ou flux.

d : Indice de l'axe direct.

q : Indice de l'axe en quadrature.

o : Indice de l'axe homopolaire

III.5.2 Modèle de la machine dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant :

Après l'application de la transformation de Park, on obtient le système des équations (III.15) qui représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d, q) lié au champ tournant [16][31].

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{cases} \quad (III. 15)$$

- Pour les grandeurs statoriques :

$$\theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (III. 16)$$

- Et pour les grandeurs rotorique :

$$\theta = \theta_s - \theta_m \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_s - \omega_m \quad (III. 17)$$

La composante homopolaire du système (III.15) est nulle pour un système équilibré.

• **Transformation de Park du flux:**

On applique la transformation de Park pour établir les relations entre les flux suivant les axes (d.q.o) et ceux des axes (a.b.c), on obtiendra : [31][34]

$$\begin{cases} [\Phi_{dqos}] = [M_p] \cdot [\Phi_{abcs}] \\ [\Phi_{dqor}] = [M_p] \cdot [\Phi_{abcr}] \end{cases} \quad (III. 18)$$

• Tel que:

$$\begin{cases} L_s = l_s - m_s \\ L_r = l_r - m_r \end{cases} \quad (III. 19)$$

Dans ce qui suit, on notera : $M = \frac{3}{2} \cdot M_{max}$

Si on élimine la composante harmonique du système (III.19), on obtiendra alors l'expression de flux, tel que :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (III. 20)$$

III.6. Modèle de MADA pour la commande en puissances:

• **Equations électriques :**

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (III. 21)$$

• **Equation de flux :**

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (III. 22)$$

- **Equations électromagnétiques :**

$$C_{em} = -P \cdot \frac{M}{L_s} (I_{dr} \cdot \Phi_{qs} - I_{qr} \cdot \Phi_{ds}) \quad (III.23)$$

III.6.1 Choix du référentiel pour le modèle diphasé :

En choisissant un référentiel lié au champ tournant statorique et en alignant le vecteur flux statorique Φ_s avec l'axe (d), on peut écrire :

$$(\Phi_{ds} = \Phi_s \text{ et } \Phi_{qs} = 0) \quad (III.24)$$

- L'équation (III.23) devient alors :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} (I_{qr} \cdot \Phi_{ds}) \quad (III.25)$$

- La tension statorique dans le repère (a,b,c) s'écrit :

$$V_{sn} = R_s \cdot I_{sn} + \frac{d\Phi_{sn}}{dt} \quad (III.26)$$

Pour les machines de moyenne et de forte puissance utilisées dans l'énergie éolienne, on néglige la résistance du bobinage statorique ($R_s=0$) [16]

$$V_s = \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (III.27)$$

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$V_{ds} = 0 \text{ et } V_{qs} = V_s \quad (III.28)$$

Nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statorique comme suit:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (III.29)$$

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.30)$$

A partir de l'équation (III.30), on écrit les équations liant les courants statorique aux courants rotorique :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.31)$$

III.6.2 Relations entre puissances statorique et courants rotorique :

Les puissances active et réactives statorique d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (III.32)$$

A partir de l'équation (III.28), on écrit les équations des puissances active et réactive statorique ($V_{ds} = 0$) et ($V_s = V_{qs}$) : [7] [10]

$$\begin{cases} P = V_s \cdot I_{qs} \\ Q = V_s \cdot I_{ds} \end{cases} \quad (III.33)$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} par leurs expressions données dans l'équation (III.31), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q = V_s \frac{\Phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (III.34)$$

En approximant Φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$, l'expression de la puissance réactive « Q » devient alors :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_s \cdot \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \quad (III.35)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites et si l'on considère l'inductance magnétisante M comme constante, le système obtenu lie de façon proportionnelle la puissance active au courant rotorique d'axe (q) et la puissance

réactive au courant rotorique d'axe (d) à une constante près $\left(\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}\right)$ imposée par le réseau. [16]

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (III.36)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (III.21). Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot \frac{dI_{dr}}{dt} - g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot \frac{dI_{qr}}{dt} + g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (III.37)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pourrions alors écrire :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} - g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + g \cdot \omega_s \cdot \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} + g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \end{cases} \quad (III.38)$$

Les équations (III.37) et (III.34) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (Figure III.8) :

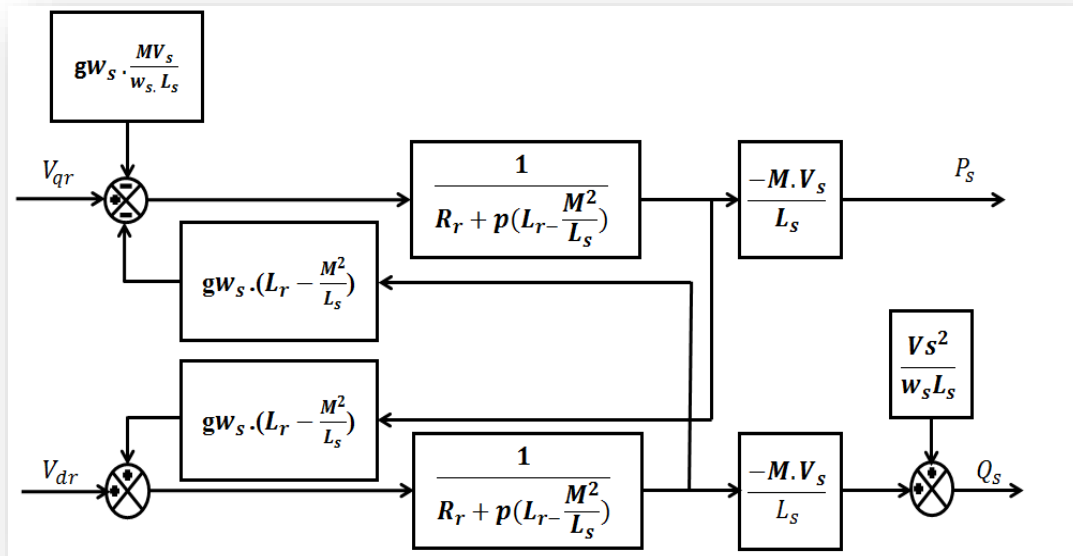


Figure III.8 : Schéma bloqué de la MADA

Les tensions V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotorique de la machine afin d'obtenir les courants rotoriques voulus, L'influence des termes de couplage entre les deux axes $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$ est minime.

Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser. En revanche, le terme $(g \cdot \omega_s \cdot \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s})$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur. [16]

La figure (III.7) fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statorique. Elle montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle vue que chaque axe peut être commandé indépendamment en intégrant à chacun d'entre eux un régulateur.

Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront la puissance active suivant l'axe « q » rotorique et la puissance active suivant l'axe « d » rotorique.

III.7. Commande directe (Mode continu) :

Le schéma bloc en mode continu de la commande directe en puissance est représenté par la figure III.9 :

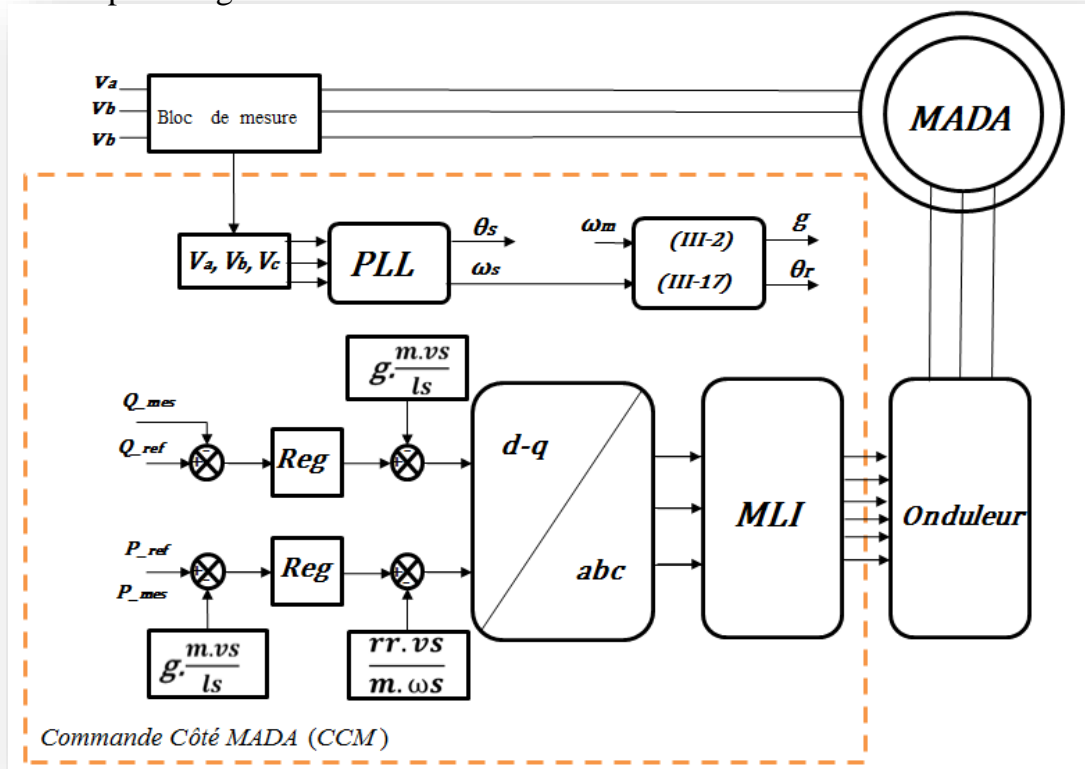


Figure III.9 : Schéma bloc du système à régulé avec la commande directe

Le principe de la commande directe des puissances est possible en captant les tensions et courants du réseau afin d'avoir une mesure direct des puissances actives et réactive.

Cette méthode consiste à compenser les termes de couplage et contrôler les tensions rotorique. La figure III.9 fait clairement apparaître ces termes entre les deux axes d et q. En compensant ces termes de couplage et en établissant un schéma bloc simplifié, nous verrons comment chaque axe pourra être contrôlé indépendamment avec son propre régulateur tel que l'axe q pour la commande de la puissance active et l'axe d pour la commande de la puissance réactive, c'est à dire réaliser directement un asservissement des puissances fournies par la MADA en utilisant les puissances active et réactive mesurées au stator de la machine.

III.8 Modélisation de la commande cotée MADA :

La figure III.10 représente un machine asynchrone à double alimentation, dont le stator est alimenté directement par le réseau et le rotor relié avec un onduleur de tension, ce dernier est alimenté par une source continue.

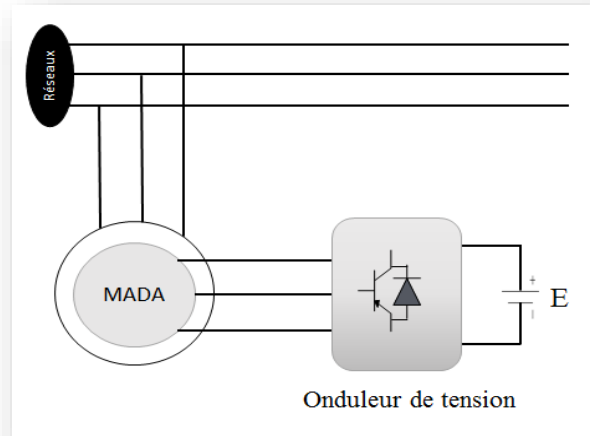


Figure III.10 : Représentation de la MADA avec un onduleur de tension

III.8.1 L'onduleur [20] :

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de convertisseur de puissance qui sont constitués de composants IGBT et de DIODE montés en antiparallèles. Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et la tension de sortie de l'onduleur.

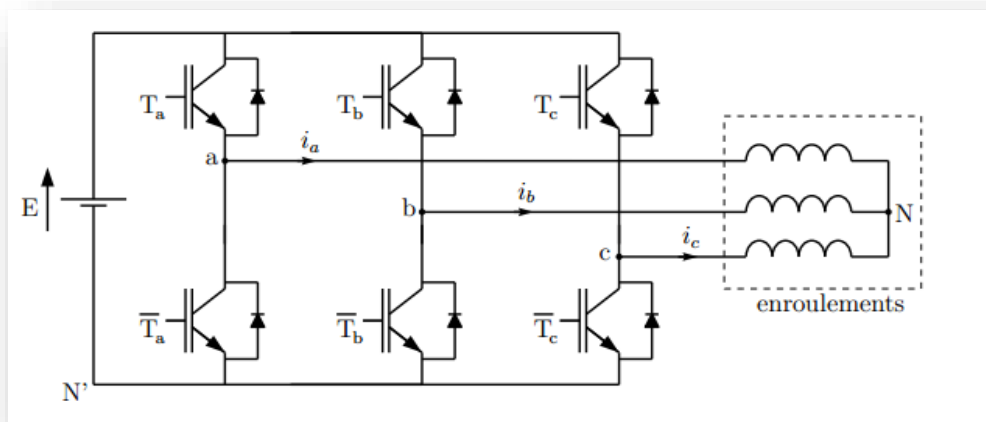


Figure III.11 : Onduleur triphasé à deux niveaux [31]

Chapitre III: Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

On note que $T_{a,b,c}$ recevront les ordres de commande pour les interrupteurs du haut des cellules. Par définition, la propriété des ordres de commutation est la suivante:

$T_i = 1 \Rightarrow$ l'interrupteur est fermé (passant)

$T_i = 0 \Rightarrow$ l'interrupteur est ouvert (bloqué)

Avec $i = a, b,$ ou c .

Dans un premier temps, on néglige l'influence des temps morts. On considère alors que les ordres de commande des interrupteurs d'une même cellule sont parfaitement complémentaires. On a alors les tensions suivantes :

On note :

$$\begin{cases} V_{aN} = V_a \\ V_{bN} = V_b \\ V_{cN} = V_c \end{cases} \quad (III.39)$$

De plus, la loi des mailles donne :

$$\begin{cases} V_{aN'} - V_{bN'} = V_a - V_b \\ V_{bN'} - V_{cN'} = V_b - V_c \\ V_{cN'} - V_{aN'} = V_c - V_a \end{cases} \quad (III.40)$$

Ensuite, étant donné que le neutre des enroulements n'est pas relié, on a :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (III.41)$$

De plus, si la charge en sortie est équilibrée, on aura en valeur moyenne:

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (III.42)$$

La résolution des équations III.40 et III.42 permet d'écrire :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aN'} \\ V_{bN'} \\ V_{cN'} \end{bmatrix} \quad (III.43)$$

III.8.2 Modulation de Largeur d'Impulsions Sinus-triangle [35] :

Le principe de modulation de largeur d'impulsion repose sur l'intersection d'une onde modulante à faible fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse à fréquence élevée de forme généralement triangulaire présenté dans la figure III.12. A partir des points d'intersection de ces deux signaux on va générer un signal pour commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Deux paramètres caractérisent cette commande :

- L'indice de modulation « m » qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence tel que $m = f_p / f_r$.
- Le taux de modulation « r » (rapport cyclique) qui donne le rapport des amplitudes de la modulante V_r à la valeur crête sur la porteuse V_p , tel que: $r = V_r / V_p$.

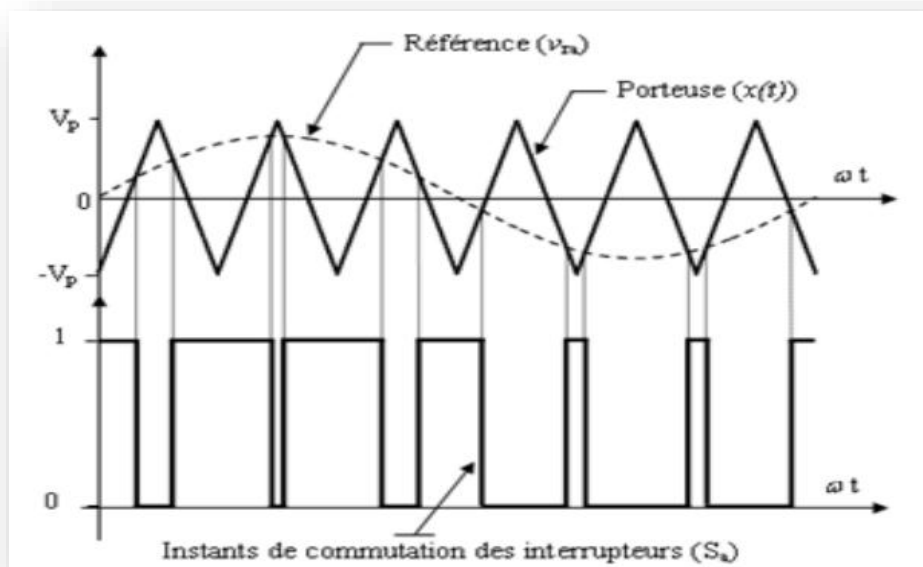


Figure III.12 : Principe de la commande MLI-ST

Paramètre de simulation : (voire ANNEXE B)

III.9 Résultat de simulation de la MADA

III.9.1 Résultat de simulation avec régulateur PI :

Les résultats de simulations montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une MADA de puissance 5Kw.

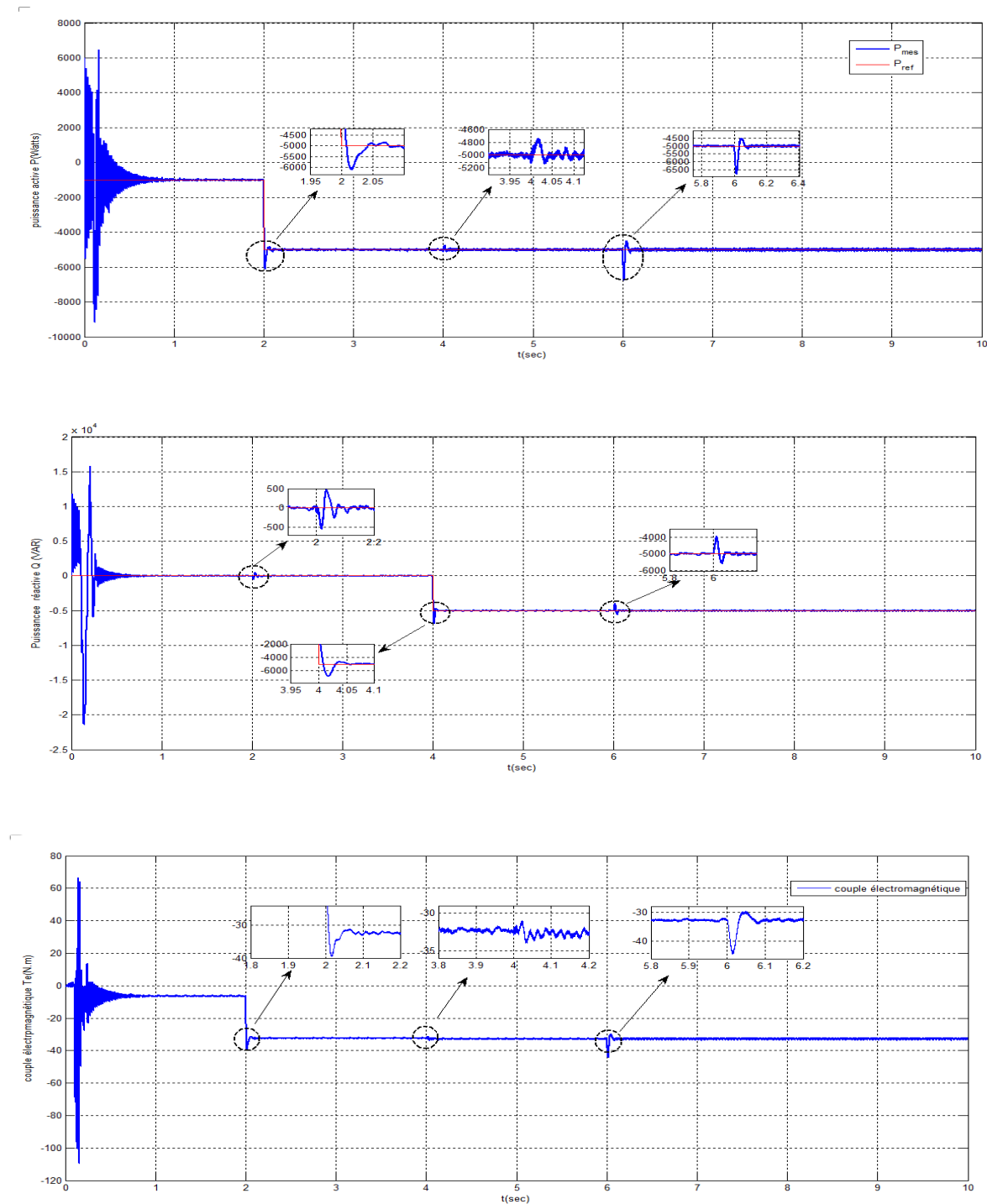


Figure III.13: Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), du couple électromagnétique T_e (N.m), avec régulateur PI

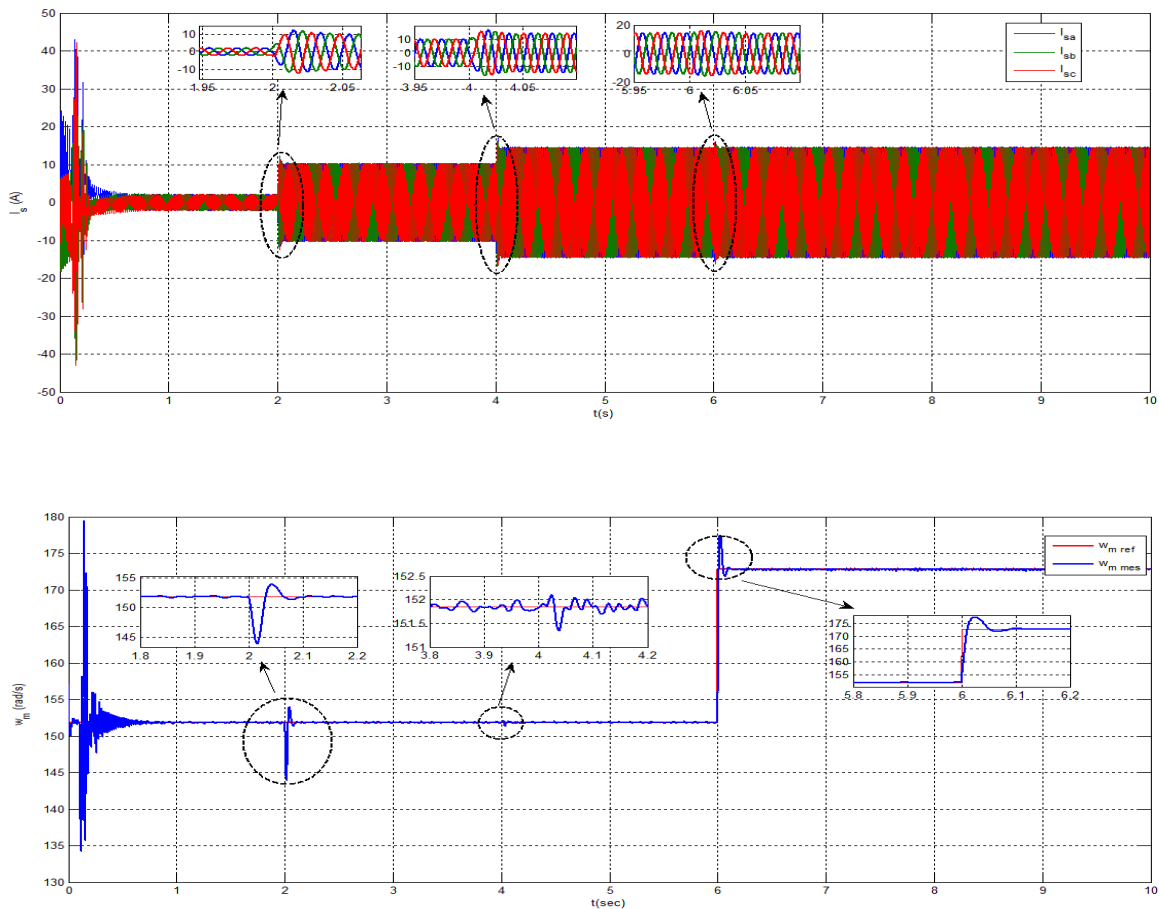


Figure III.14 : Variation du courant statorique I_s , la vitesse ω_m (rad/s) avec régulateur PI

III.9.2 Interprétations des résultats :

Les résultats de simulation de la commande côté MADA « CCM » sont représentées sur les figures III.13 et III.14, et mettent en évidence l'évolution des paramètres suivant la puissance active et la puissance réactive, le couple électromagnétique, les composantes des courants statoriques et la vitesse de rotation de notre génératrice en fonction du temps.

Il est à noter que les performances des régulateurs de puissance PI devront apparaître sur les courbes de puissance active et réactive après l'application de deux

échelons à 2s et 4s respectivement à « P » et « Q » ainsi qu'un troisième régulateur PI pour la vitesse à t=6s.

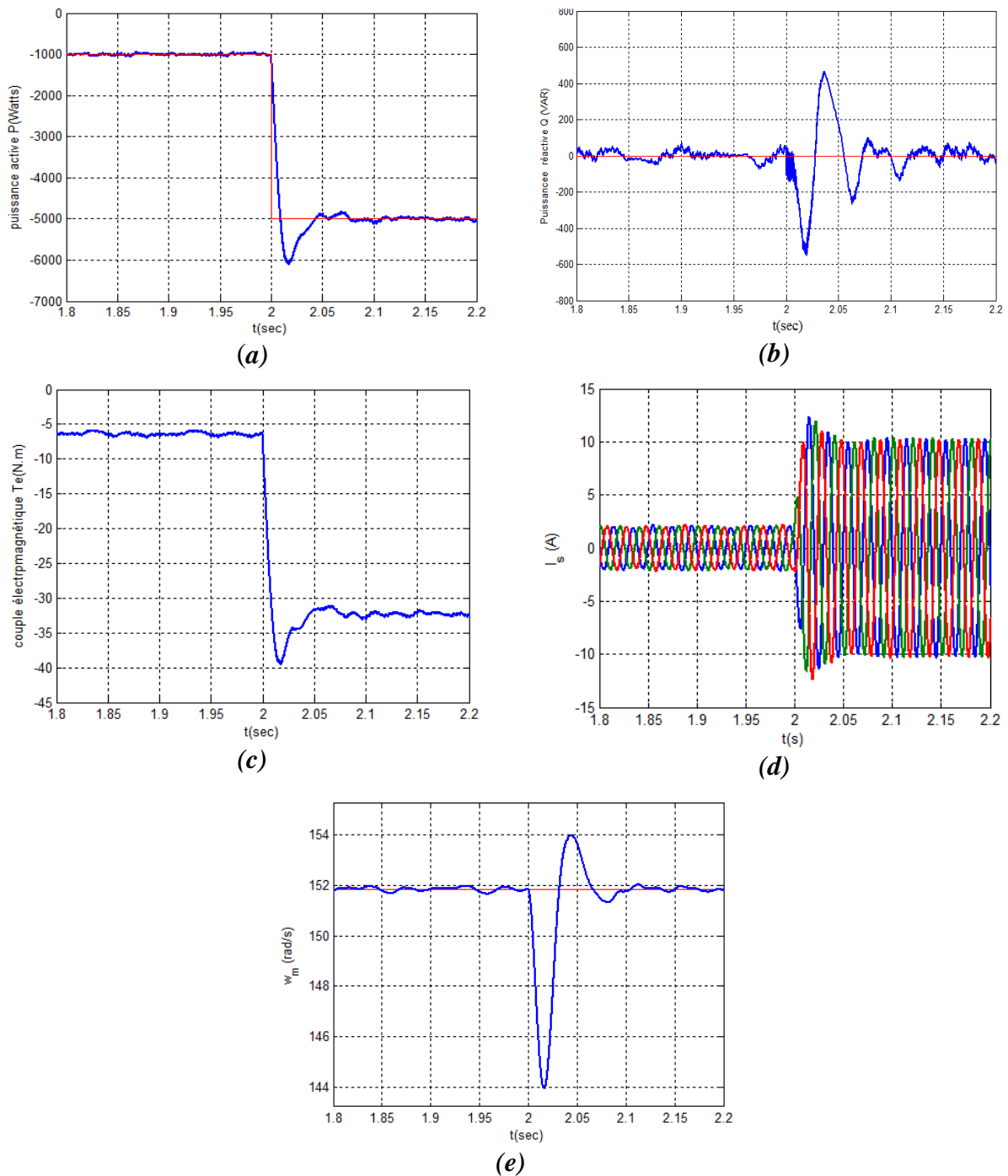


Figure III.15 : Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à t=2s.

(a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR) =f(t)$, (c) : $T_e(N.m) =f(t)$

(d) : $I_s(A) =f(t)$, (e) : $w_m(rad/s) =f(t)$

Figure III.15.a : La puissance active passe de -1000 à -5000 Watt, Il y a un dépassement de 25 % de la puissance active à l'application de l'échelon à $t=2s$, après le temps $t=2.1s$ elle se stabilise au tour de la référence.

Figure III .15.b : La puissance réactive présent un régime transitoire à $t=2s$, atteignant un maximum de $Q_{max}= -480 VAR$ et un minimum de $Q_{min}= -520 VAR$. Ce régime durée 0.1s provoqué par la variation de la puissance active.

Figure III .15.c : la variation de la puissance active à $t=2s$ a provoquer un régime transitoire où le couple atteint une valeur maximal de 38 N.m pour se stabiliser à la valeur de 32N.m.à $t=2.1s$.

Figure III.15.d : Au démarrage de la machine les courants statorique $I_s(A)$ prennent des valeurs importantes, et après le régime permanant sont stabilisent au tour de $I_s =2A$ jusqu'à l'application de la consigne de la puissance active à $t=2s$. Après ce temps remarquant un dépassement d'une période de 0.05s dû à cette dernière, et à partir de $t=2.05s$ ils sont stabilise au tour de la valeur de $I_s=15A$.

Figure III.15.e : l'application de la puissance active à $t=2s$ provoque une forte variation de la vitesse de rotation avec une valeur maximale de 154 rad/s et une valeur minimale de 144 rad/s, cette variation durée d'un temps court de 0.1s.

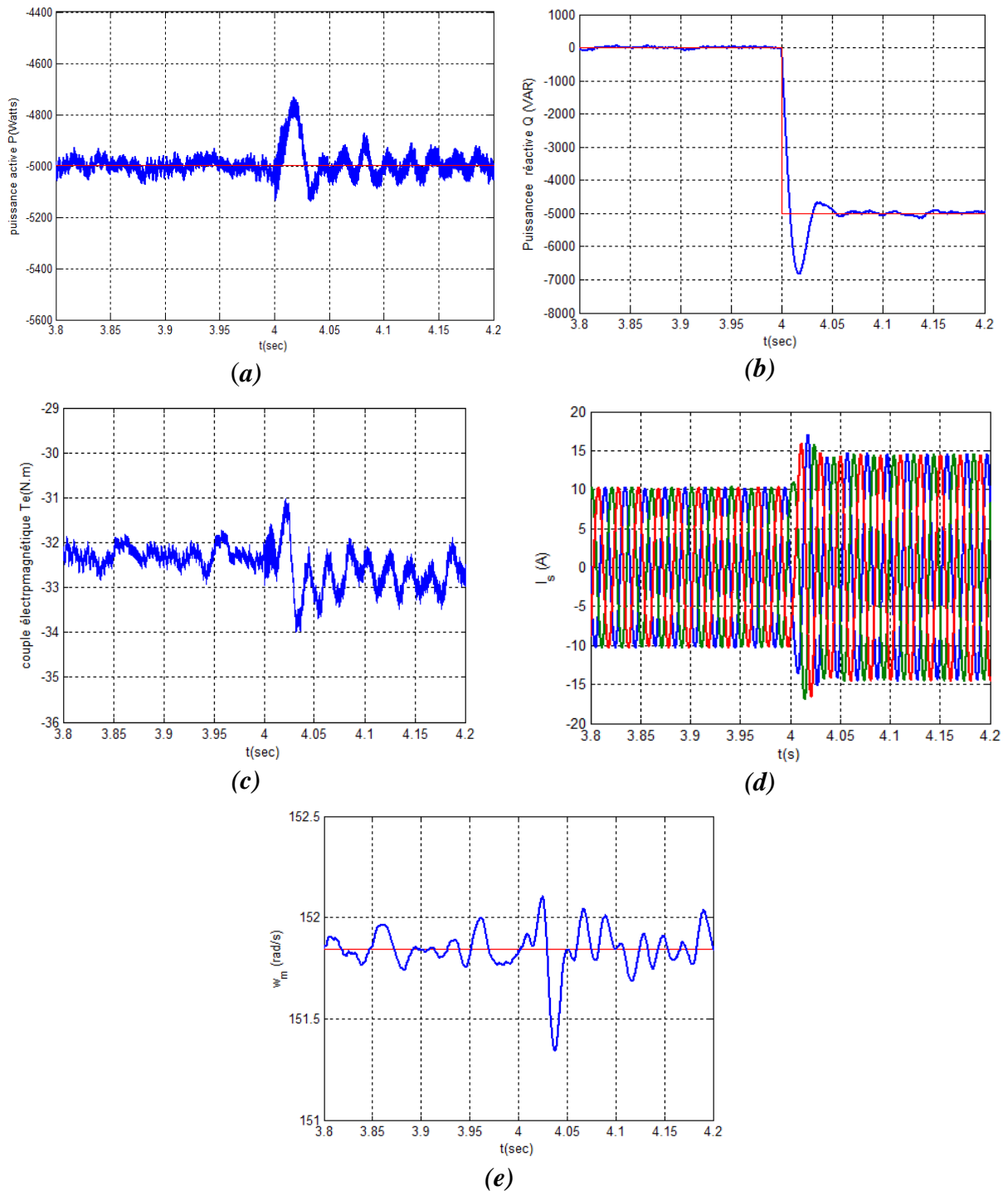


Figure III.16 : Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=4s$.

(a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR) =f(t)$, (c): $T_e(N.m) =f(t)$

(d): $I_s (A) =f(t)$, (e): $w_m(rad/s) =f(t)$

Figure III.16.a : l'application d'un échelon de la puissance réactive à $t=4s$ incite une variation de la puissance active avec une valeur max de 400. Après un temps $t=4.05s$ elle suit la consigne.

Figure III.16.b : La puissance réactive passe de 0 à -5000 VAR à $t=4s$, en émettant un dépassement de 36 %. Après le temps $t=4.05s$ elle suit la consigne.

Figure III.16.c : Le couple électromagnétique varie au tour de la valeur de $T_e=32.5$ N.m sauf une perturbation dû à l'application de la consigne de la puissance réactive à $t=4s$

Figure III.16.d : Les courants statoriques passent de 10A à 15A à l'application d'un échelon de la puissance réactive à $t=4s$, avec une valeur max de 17A et une valeur minimale de -17A

De $t=2s$ à $t=4s$ les courants statoriques prennent une valeur maximale de $I_s = 10A$, et à l'application d'un échelon de la puissance réactive à $t=4s$ les courants statoriques augmentent jusqu'à 17A, et après $t=4.05$ ils se stabilisent et prennent la valeur de 15A.

Figure III.16.e : La vitesse de rotation de la machine varie au tour de la valeur de 151.7 rad/s. remarquant une perturbation à l'application de la consigne de la puissance réactive à $t=4s$.

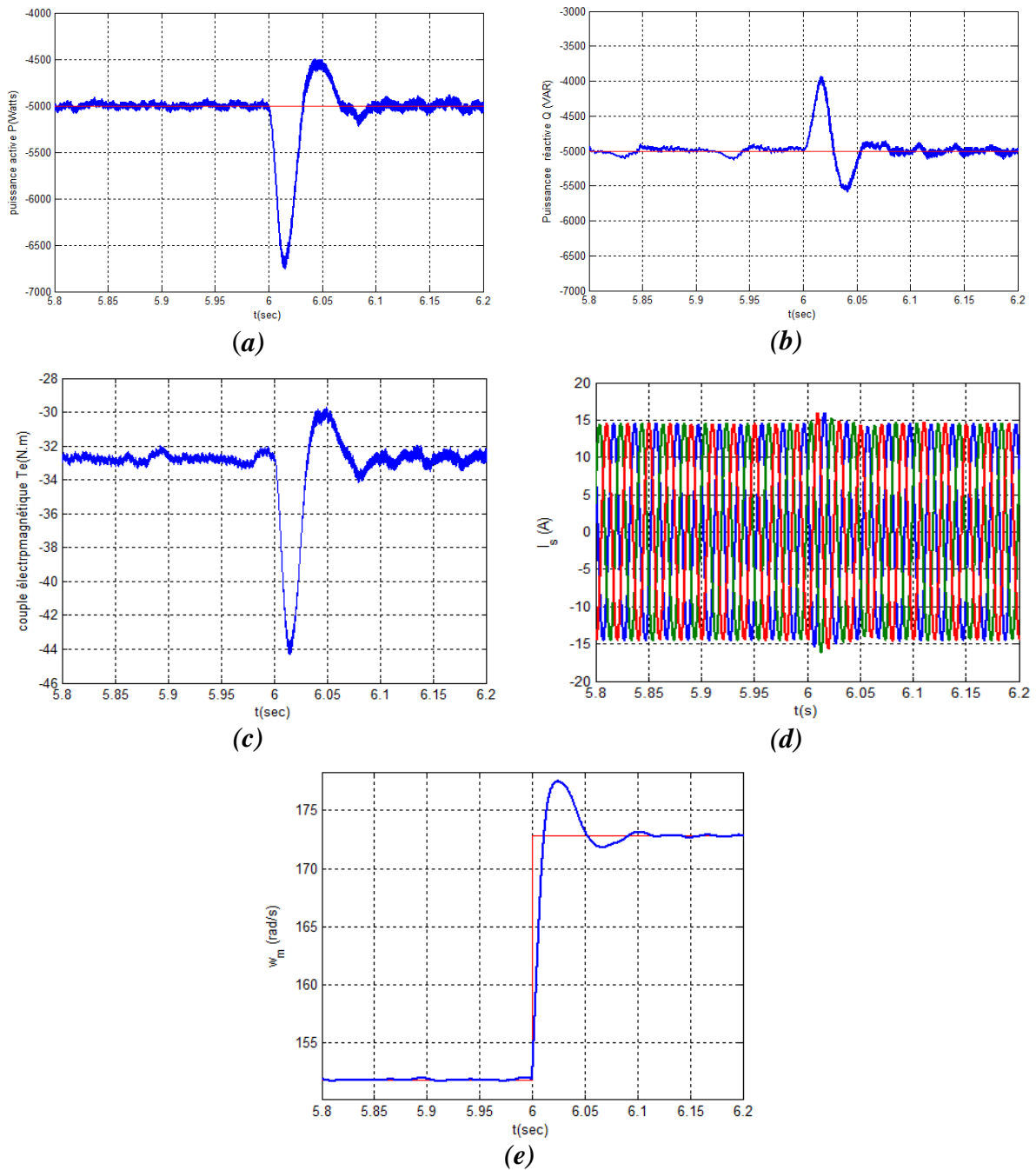


Figure III.17 : Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=6s$.

(a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR) =f(t)$, (c): $T_e(N.m) =f(t)$

(d): $I_s(A) =f(t)$, (e): $w_m(rad/s) =f(t)$

Chapitre III: Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

A l'intervalle de temps ($t=0$ à $t=6s$) la machine est en mode de fonctionnement hypo-synchrone lorsque la machine tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme $\Omega_s > \Omega_r$ (avec $\Omega_s = 1500 \text{tr/min}$ soit 157 rad/s) c-à-dire le glissement $g > 0$, et à l'application de l'échelon à $t=6s$ lorsque la vitesse passe de 151.7 rad/s à 172.7 rad/s la machine est en mode de fonctionnement hyper-synchrone lorsque le glissement $g < 0$ et la vitesse de rotation de la machine soit supérieure à la vitesse de synchronisme.

La vitesse de rotation de la machine (Figure III.e) passe de 151.7 rad/s à $172,7 \text{ rad/s}$ et cette variation de vitesse a un effet sur la puissance active, puissance réactive, le couple électromagnétique et les courants statorique.

Figure III.17.a : La puissance active diverge, elle a un de passement de 35% et des pics maximum ($P_{\max} = 6750 \text{ W}$ et $P_{\min} = 4500 \text{ W}$) et à partir de $t=6.1s$ elle se stabilise au tour de la valeur de $P = 5000 \text{ W}$.

Figure III.17.b : de même pour la puissance réactive, Le changement de la vitesse de la machine à $t=6s$ à un effet pour cette puissance réactive, elle diverge aussi avec des pics ($Q_{\max} = 5500 \text{ VAR}$ et $Q_{\min} = 4000 \text{ VAR}$). Après un temps environ de 6.05 elle suit la consigne ($Q = 5000 \text{ VAR}$).

Figure III.17.c : Le couple électromagnétique est à l'image de la puissance active, il est autour de la valeur de 32.5 N.m avec des pics ($T_{e \max} = 44 \text{ N.m}$ et $T_{e \min} = 30 \text{ N.m}$), à partir de $t=6,1s$ retourne à sa valeur $T_e = 2.5 \text{ N.m}$.

Figure III.17.d : Les courants statorique sont d'une valeur de $I_s = 15A$ sauf une perturbation due à l'application de l'échelon de la vitesse de rotation de la machine à $t=6s$. Après un temps environ de $t=6.1s$, ils se stabilisent à la valeur maximale de $I_s = 15A$.

III.9.2 Résultat de simulation avec régulateur IP :

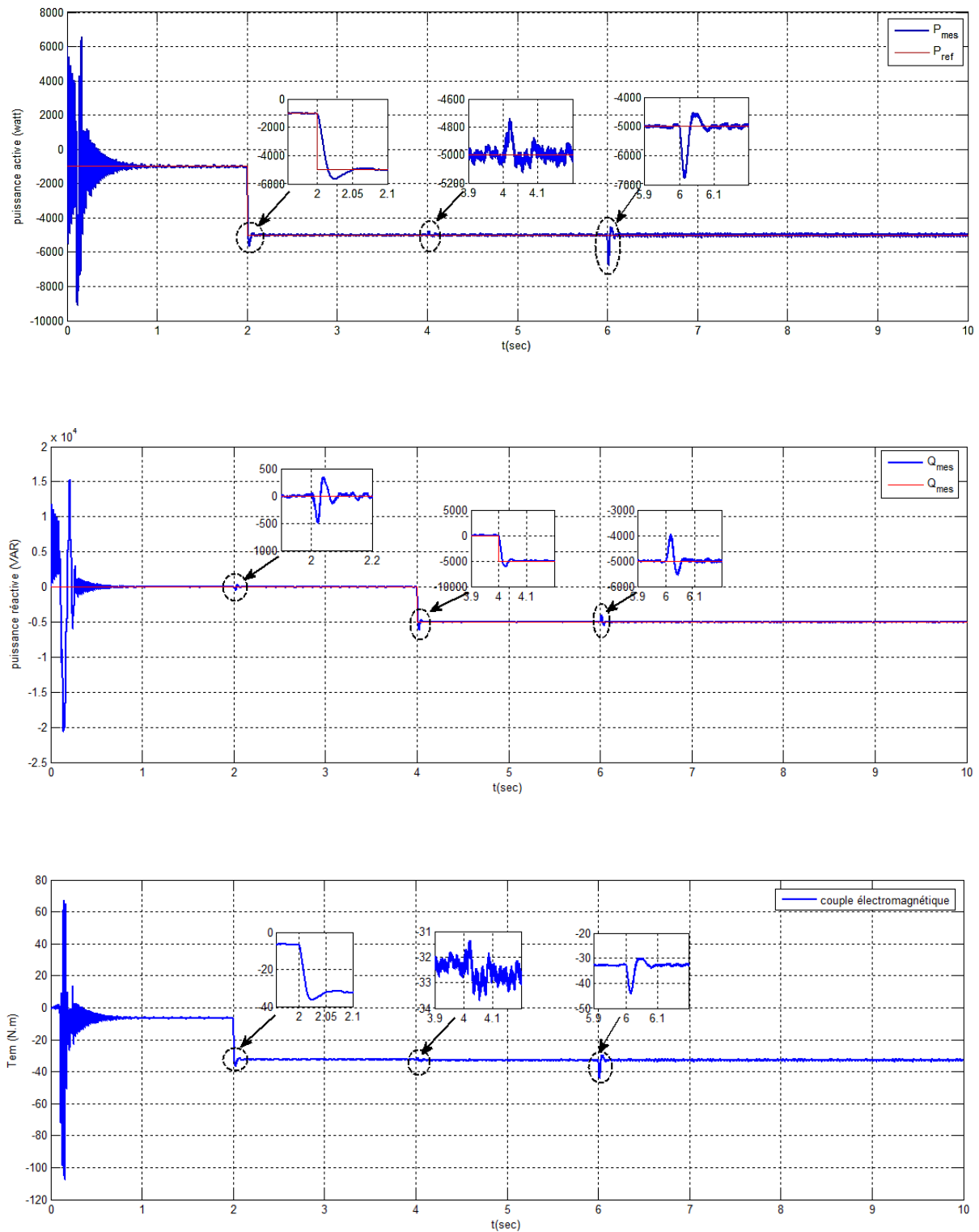


Figure III.18 : Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), Le couple électromagnétique T_{em} (N.m) avec régulateur IP

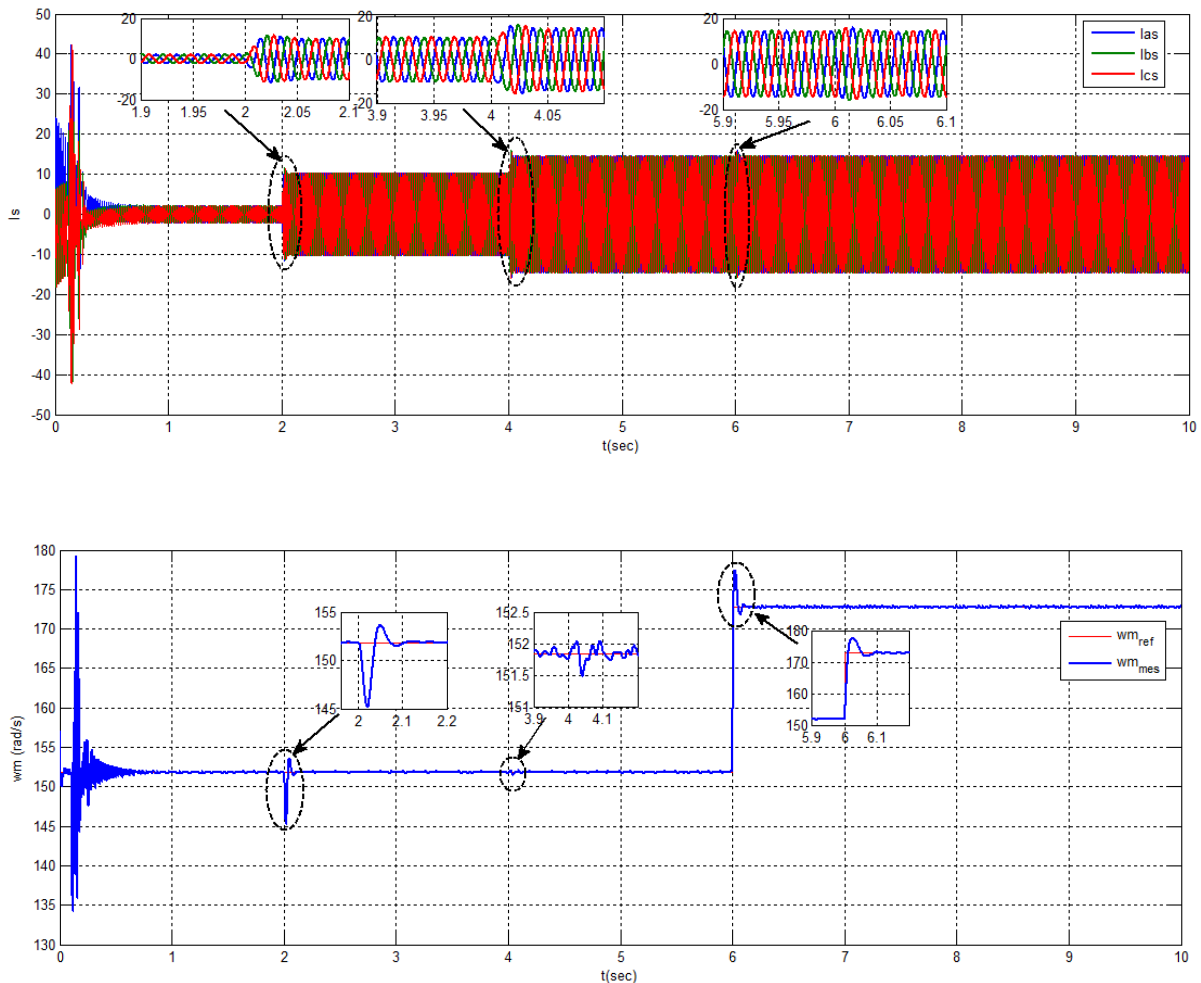


Figure III.19 : Variation du courant statorique $I_s(A)$, la vitesse ω_m (rad/s) avec régulateur IP

La figure III.18 représente la variation de la puissance active P (Watt), la puissance réactive Q (VAR), le couple électromagnétique (T_{em}) et La figure III.19 représente le courant statorique I_s et la vitesse ω_m avec régulateur IP. On remarque que les échelons de la puissance dans la simulation avec régulateur IP sont bien suivis par la génératrice et que le courants statorique I_s est sinusoïdales, il change sont amplitude pour chaque variation de la puissance active et réactive.

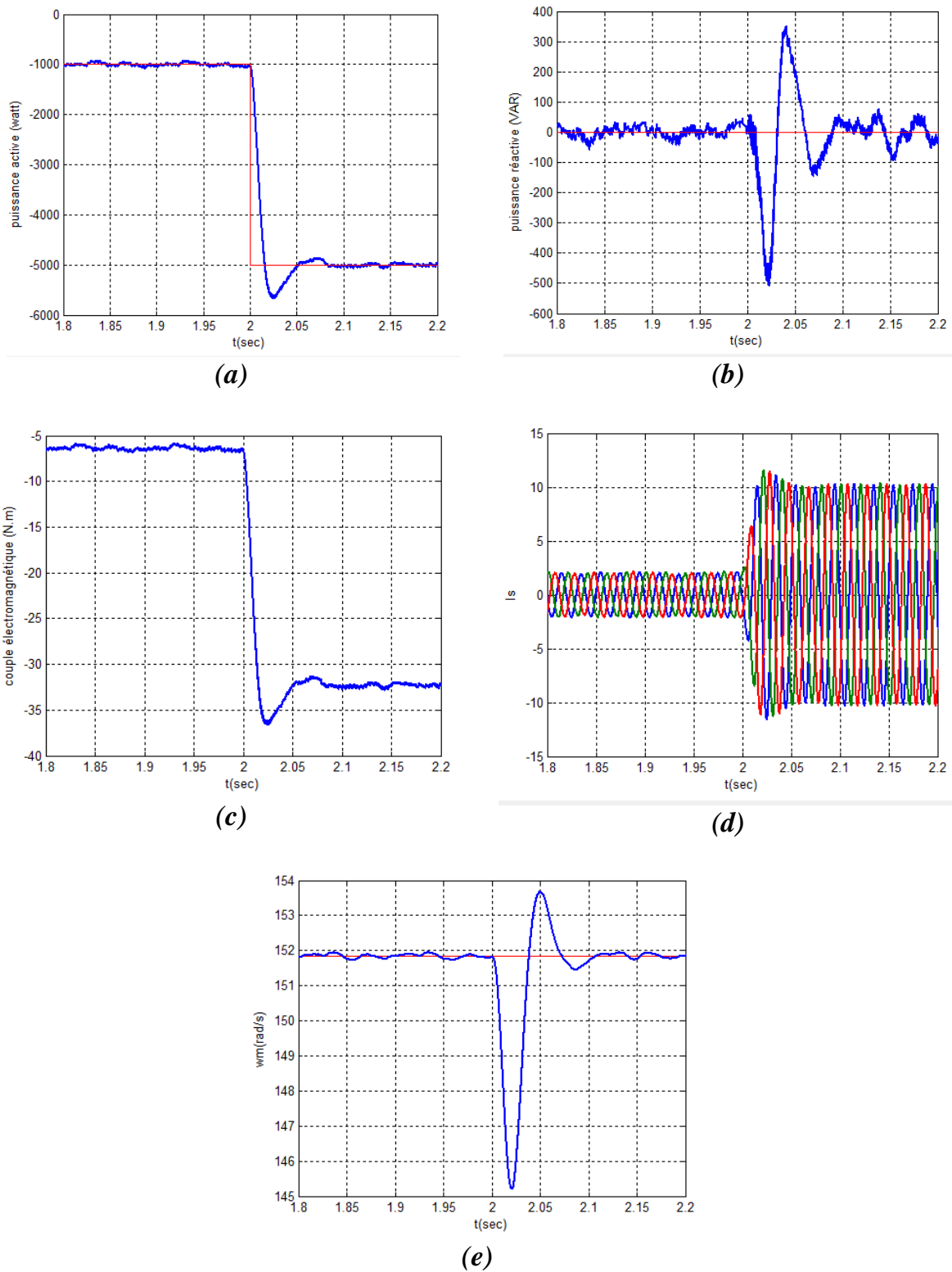


Figure III.20 : Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=2s$.

(a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR) =f(t)$, (c) : $T_e(N.m) =f(t)$

(d): $I_s(A) =f(t)$, (e) : $w_m(rad/s) =f(t)$

Figure III.20.a : A la application de la consigne à $t=2s$ la puissance active présente un dépassement de 13%, à partir de $t=2.1s$ la puissance mesuré suivie sa référence.

Figure III.20.b : La puissance réactive présente un régime transitoire à l'instant $t=2s$, atteignant un maximum de $Q_{max}= 380 \text{ VAR}$ et un minimum de $Q_{min}= -500 \text{ VAR}$. Ce régime durée 0.1s provoqué par la variation de la puissance active.

Figure III.20.c: On remarque que le couple électromagnétique est de la même allure que celle de la puissance active et on voit que le changement de la puissance active à $t=2s$ a provoquer un régime transitoire où le couple atteint de une valeur maximal -36 N.m pour se stabiliser à la valeur de 32 N.m à $t=2s$.

Figure III.20.d : On voit que le courant statorique est sinusoïdale, et à l'application d'échelon de la puissance active le courant I_s change son amplitude.

Figure III.20.e : A cause de la variation de la puissance active à l'instant $t=2s$ on voit un régime transitoire sur la vitesse ω_m qui présent un pic minimal de 145.2 rad/s et un pic maximal de 153.8 rad/s après l'instant $t=2.1s$ la vitesse se stabilise.

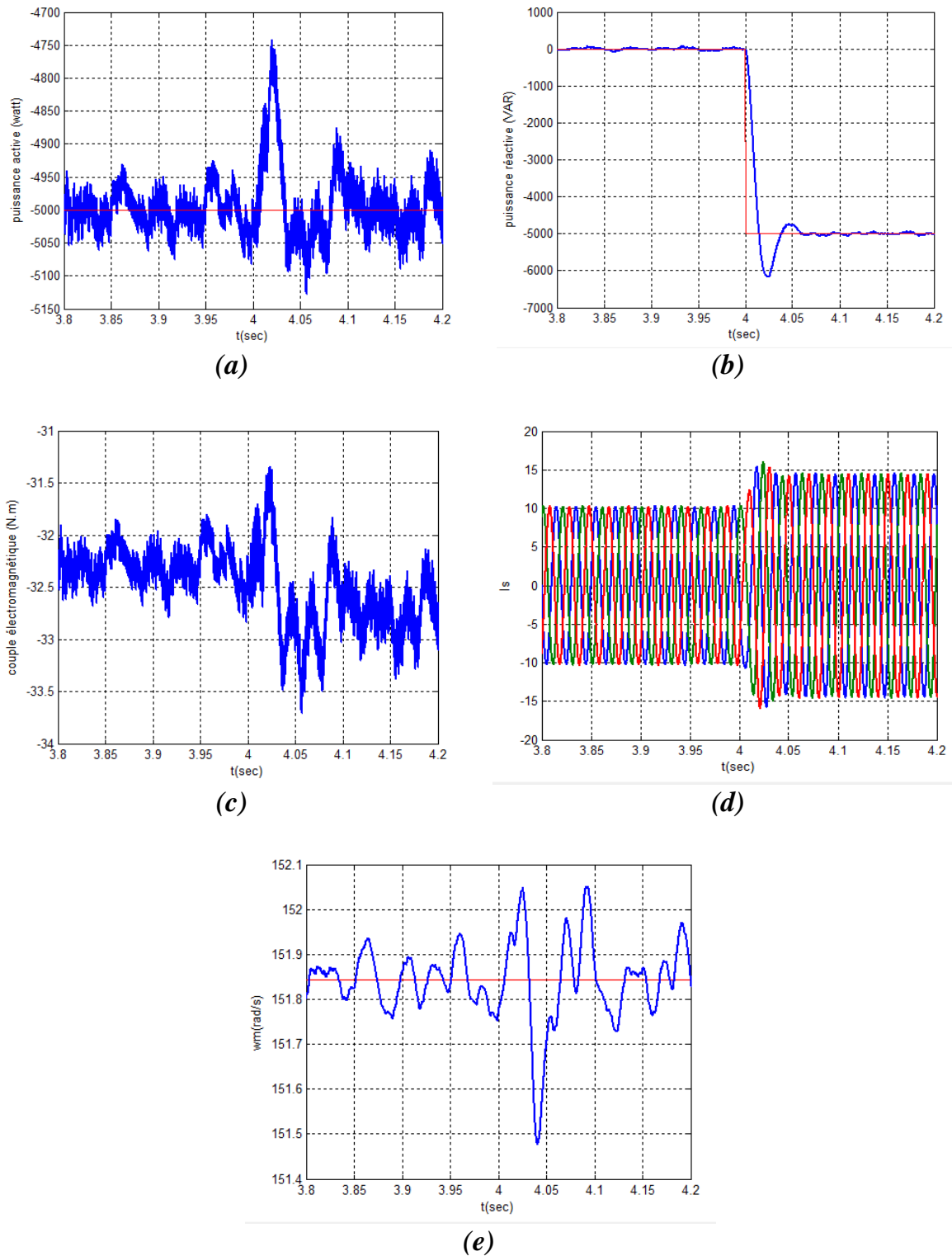


Figure III.21: Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=4s$.

(a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR)=f(t)$, (c): $T_e(N.m)=f(t)$

(d): $I_s(A)=f(t)$, (e): $w_m(rad/s)=f(t)$.

Figure III.21.a : On remarque un régime transitoire sur La puissance active, à l'instant $t=4s$ la puissance présente un pic maximal de -4750 W a cause de changement de la puissance réactive

Figure III.21.b : A l'application de l'échelon à l'instant $t=4s$ on voit un dépassement de 20% sur la puissance réactive, après le temps $t= 4.1s$ la puissance suive sa référence.

Figure III.21.c : On voit que le couple électromagnétique varie au tour de la valeur de $T_{em}=32.5$ N.m sauf une perturbation dû à l'application de la consigne de la puissance réactive à $t=4s$

Figure III.21.d : On voit que le courant statorique est sous la forme sinusoidale, a l'application de la consigne de la puissance réactive à $t=4s$ le courant change son amplitude.

Figure III.21.e : La vitesse de rotation de la machine varie au tour de la valeur de 151.7 rad/s. on voit une perturbation à l'application de la consigne de la puissance réactive à $t=4s$.

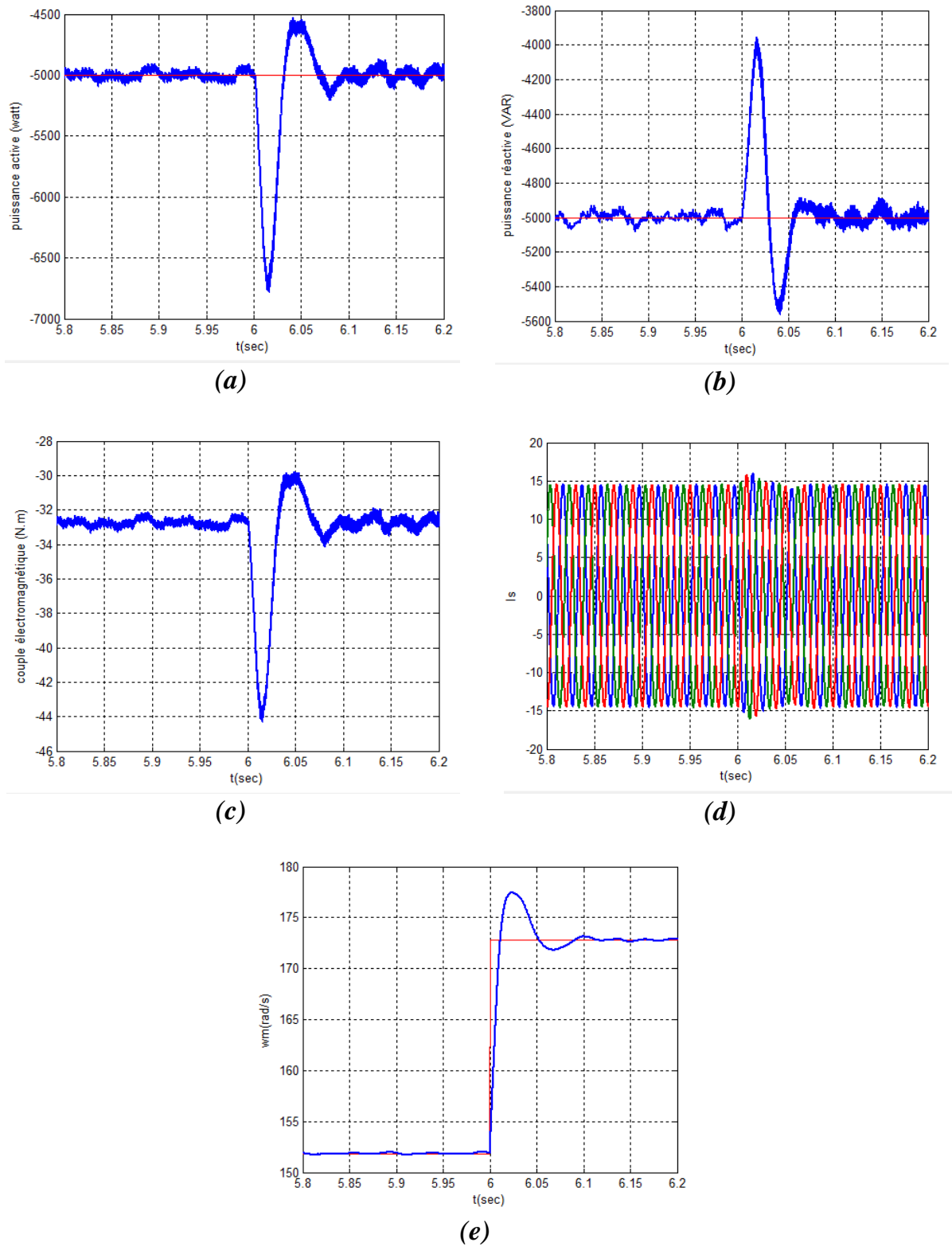


Figure III.22: Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=6s$.

(a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR)=f(t)$, (c): $T_e(N.m)=f(t)$

(d): $I_s(A)=f(t)$, (e): $w_m(rad/s)=f(t)$.

Figure III.22.a : A l'instant $t=6s$ la vitesse change sa valeur de 1450tr/min à 1650tr/min. cette variation influe sur la puissance active est présent un pic minimal de -6750 W et un pic maximal de -4500 W, puis à l'instant $t=6.1s$ la puissance se stabiliser

Figure III.22.b : On voit que la puissance réactive suive sa consigne mais à l'instant $t=6s$ la puissance présent un régime transitoire où la puissance atteint une valeur maximale de -4000 VAR et un valeur minimal de -5550 VAR, après à l'instant $t=6.1s$ la puissance suivre la référence.

Figure III.22.c : On remarque que l'allure de couple électromagnétique présent un régime transitoire à l'instant $t=6s$ qui prend un valeur minimal de -44 N.m et un valeur maximal de -30 N.m.

Figure III.22.d : On voit que le courant statorique est sinusoïdale est présent un pic à l'instant $t=6s$ à cause de la variation de la vitesse.

Figure III.22.e : A la application de l'échelon de La vitesse à l'instant $t=6s$ on voit que la vitesse augmente de 151.7 rad/s à 172.7 rad/s est présent un dépassement de 15%, puis se stabilise à l'instant 6.1s.

III.10 Modélisation de la commande cotée réseau :

Comme l'indique la figure (III.23), le stator de la génératrice est directement connecté au réseau alors que son rotor est alimenté par le réseau via un convertisseur statique permettant le redressement et l'ondulation de la tension.

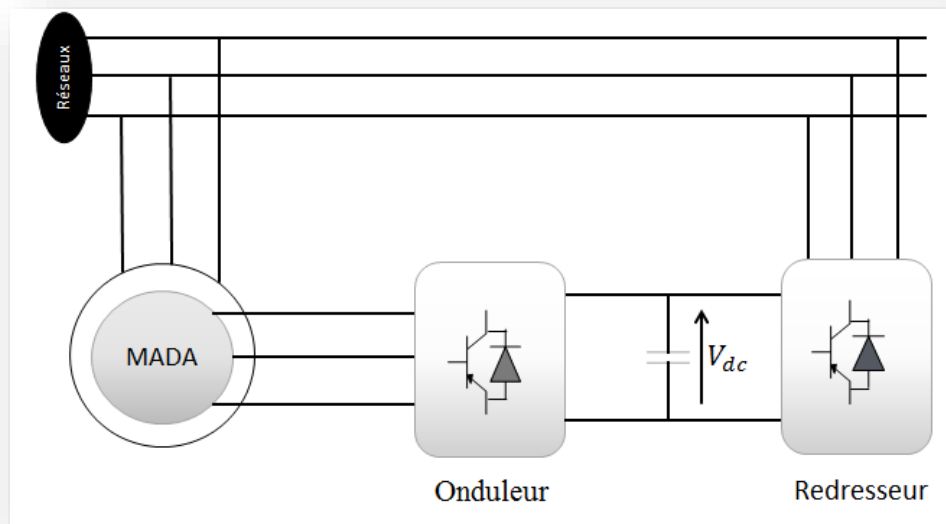


Figure III.23 : Représentation de la MADA et son système d'alimentation au rotor [19]

III.10.1 Redresseur à MLI de tension : [36]

Le redresseur à MLI de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représentée sur la figure III.24. Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur de par sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement en phase avec la tension du réseau correspondante. Ce redresseur à MLI permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité, régler via la commande, la direction du flux de l'énergie réactive : absorbée ou fournie.

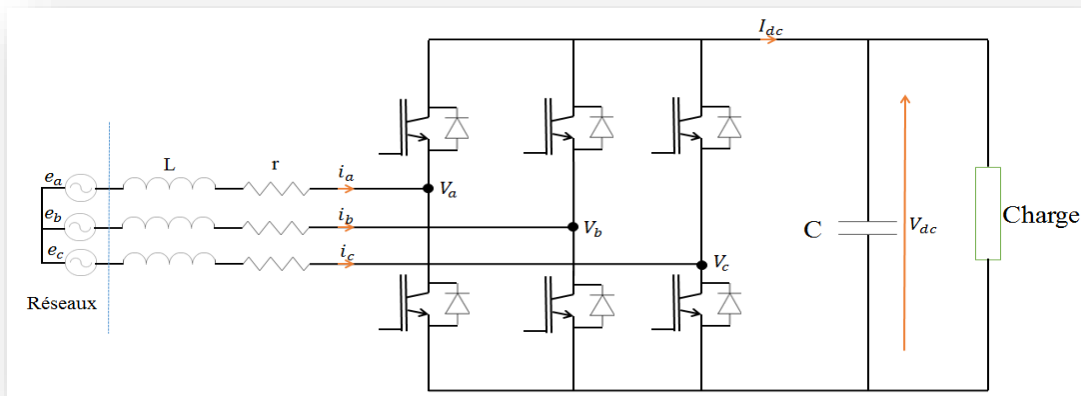


Figure III.24 : Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension [36]

III.10.2 Techniques de commande MLI

Il existe plusieurs technique de commande MLI, on citera trois :

- MLI a bande d'hystérésis ;
- MLI à échantillonnage périodique ;
- MLI à porteuse triangulaire.

Dans notre travail, on utilise la première à cause de sa simplicité

III.10.2.1 MLI à Bande d'hystérésis :

La méthode de la bande hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la figure III.25 :

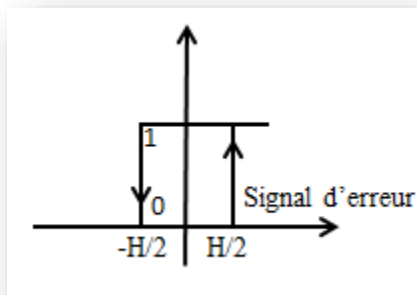


Figure III.25 : Modulateur MLI à bande hystérésis

L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, et il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur de la bande) hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c'est-à-dire, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [37].

III.10.2.2 Méthode de contrôle [16]:

L'hystérésis de modulation de largeur d'impulsion, appelée aussi « bang-bang » (forçage de contrôle de tension) consiste à diriger le flux de courant de ligne en fonction de la référence de courant. Ce type de la modulation est effectué dans un circuit de commande non linéaire avec des relais à hystérésis. La figure III.26 présente son principe de fonctionnement.

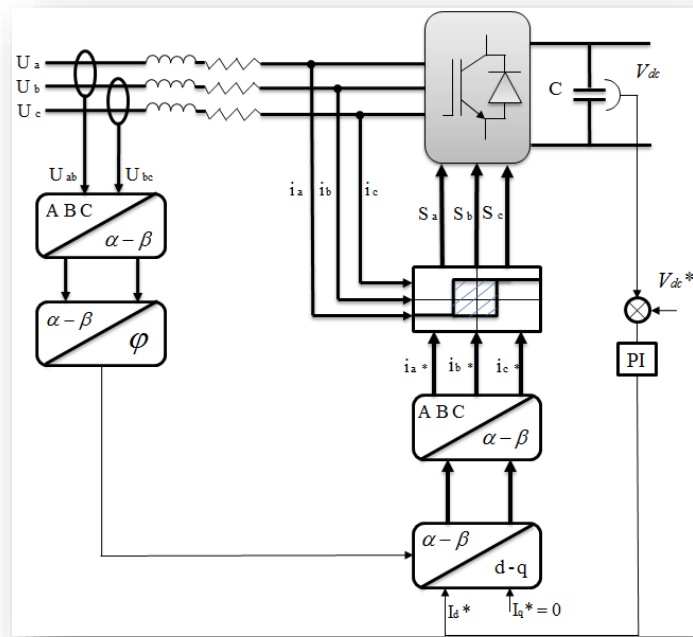


Figure III.26 : Commande en tension MLI à bande d'Hystérésis

Son principe qui consiste à déterminé dans un premier temps le signal d'erreur, obtenue par la différence entre la valeur instantanée du courant de référence et le courant de ligne du réseau et cela pour les trois phases, cette erreur est ensuite comparée à la bande d'hystérésis (H) afin d'établir les ordres de commande des interrupteurs.

$\Delta i_a \leq -\frac{H}{2} \rightarrow S_a = 0$	$\Delta i_a \geq \frac{H}{2} \rightarrow S_a = 1$
$\Delta i_b \leq -\frac{H}{2} \rightarrow S_b = 0$	$\Delta i_b \geq \frac{H}{2} \rightarrow S_b = 1$
$\Delta i_c \leq -\frac{H}{2} \rightarrow S_c = 0$	$\Delta i_c \geq \frac{H}{2} \rightarrow S_c = 1$

tel que : $\Delta i = i - i^*$ représente l'erreur.

III.10.3 La boucle à verrouillage de phase PLL :[37]

Les boucles à verrouillage de phase sont des circuits intégrés très utilisés en électronique. Il s'agit donc comme leur nom l'indique d'un asservissement de phase dont le rôle est d'asservir la phase d'un oscillateur local à celle d'un signal extérieur.

Les boucles à verrouillage de phase sont au cœur de nombreux matériels électroniques: synthétiseurs de fréquence, récepteurs de télévision, téléphones cellulaires,

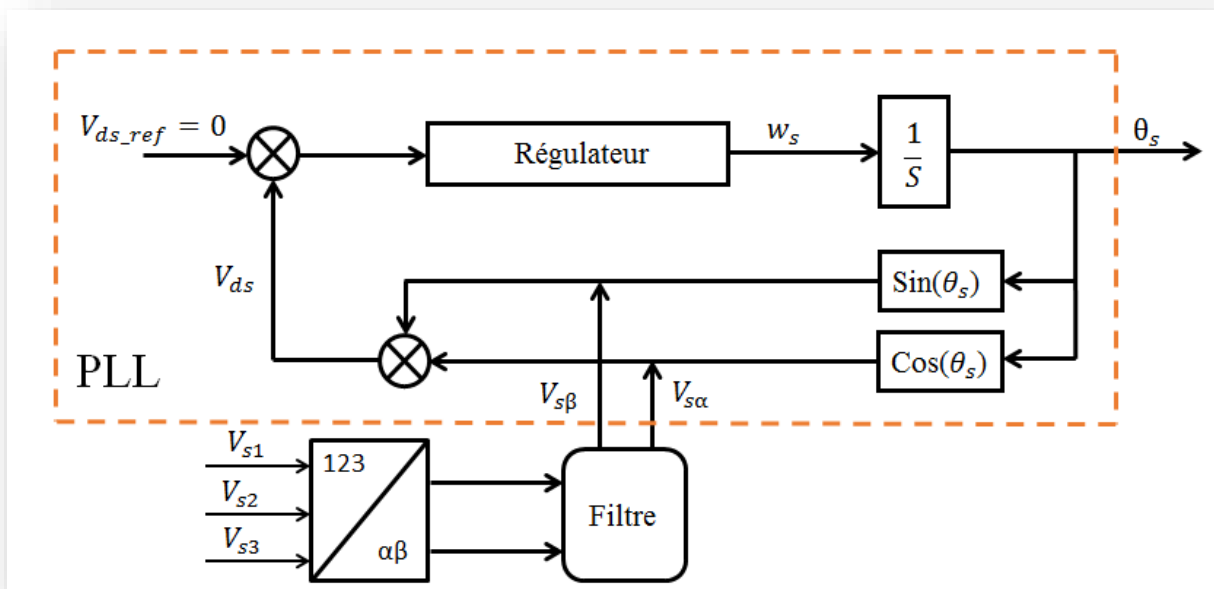


Figure III.27 : Représentation de l'angle θ_s de la PLL

Supposons que les trois tensions du réseau électrique sont sinusoïdales :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{2}V_m \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (III.44)$$

Après application de la transformation de Concordia, nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}V_m \sin(\omega t) \\ -\sqrt{3}V_m \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (III.45)$$

Dans le repère de Park :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \hat{\theta} & \sin \hat{\theta} \\ -\sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (III.46)$$

Nous obtenons :

$$V_d = \sqrt{3}V_m \sin(\theta - \hat{\theta}) \quad (III.47)$$

En supposant que $(\theta - \hat{\theta})$ soit petit, alors, l'expression (III.14) peut être réécrite comme :

$$V_d = \sqrt{3}V_m(\theta - \hat{\theta}) \quad (III.48)$$

La pulsation angulaire $\hat{\omega}$ de la figure II.11, est égale à :

$$\hat{\omega} = F_r(s)\sqrt{3}V_m(\theta - \hat{\theta}) \quad (III.49)$$

Avec $F_r(s)$ la fonction de transfert du correcteur PI, donnée par l'expression suivante :

$$F_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(\frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s} \right) \quad (III.50)$$

Ainsi, la position angulaire a pour expression :

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (III.51)$$

Nous obtenons donc le modèle simplifié de la P.L.L, illustré sur la figure suivante :

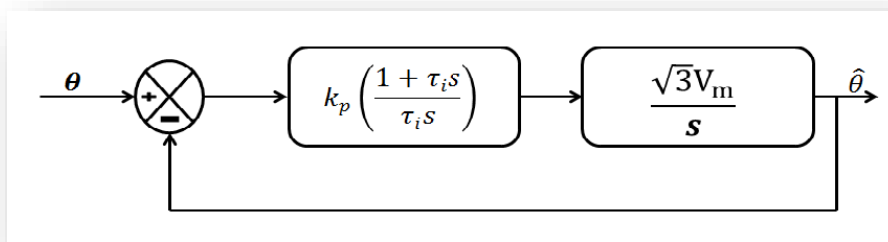


Figure III.28 : Schéma simplifié de la P.L.L classique

La fonction de transfert de ce système est donnée par :

$$\frac{\hat{\theta}}{\theta} = \frac{\sqrt{3}V_m K_p \left(\frac{1 + \tau_i s}{\tau_i} \right) \frac{1}{s}}{1 + \sqrt{3}V_m K_p \left(\frac{1 + \tau_i s}{\tau_i} \right) \frac{1}{s}} \quad (III.52)$$

Il s'agit d'un second ordre identifiable à :

$$F(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{III.53})$$

Ce qui nous permet d'en déterminer :

$$K_p = \frac{2\xi\omega_n}{\sqrt{3}V_m} \quad \text{et} \quad \tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n}$$

Les résultats de simulation obtenus de la PLL sous environnement MATLAB / SimPower System en mode continu, nous ont donnée :

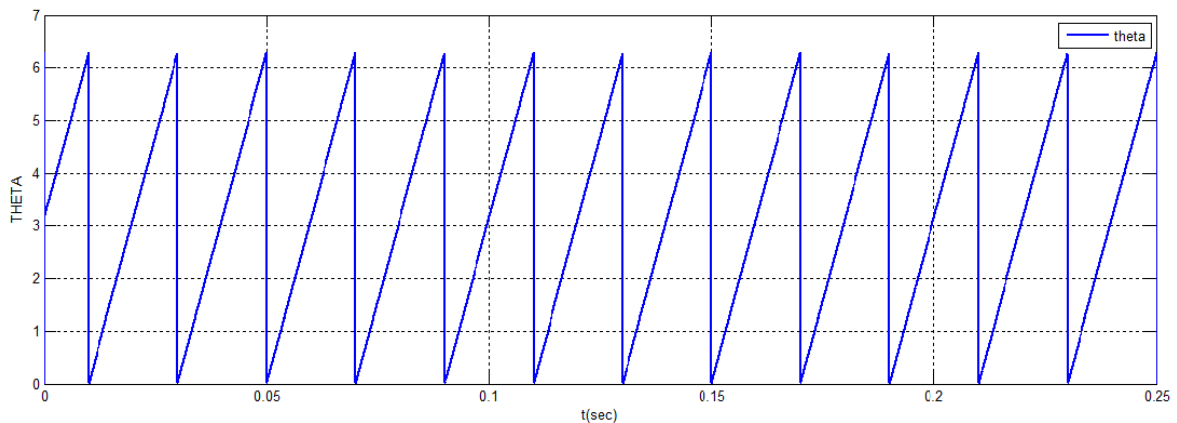


Figure III.29 : Représentation de l'angle θ_s de la PLL en continu

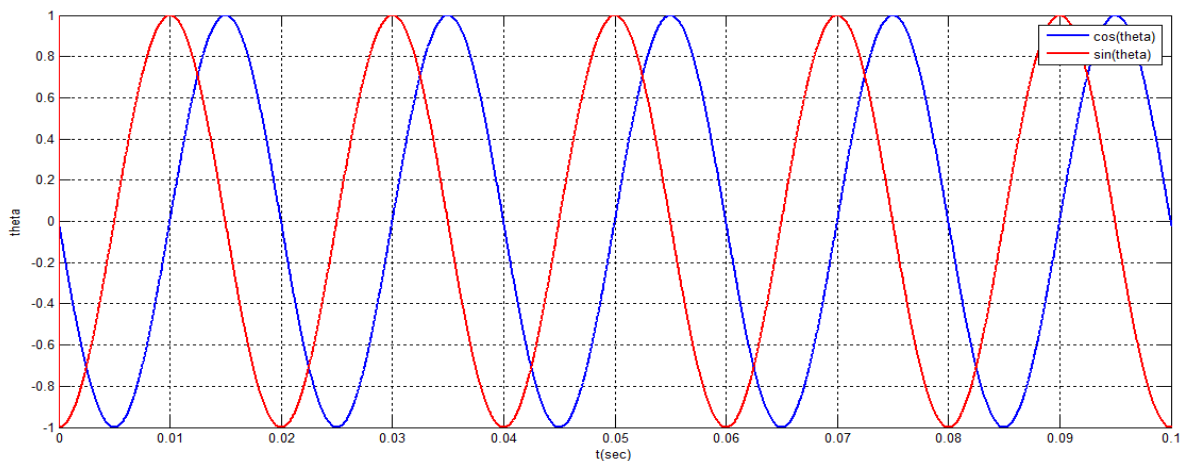


Figure III.30 : Représentation des signaux cosinus et sinus de la PLL

III.11. Simulation de la commande cotée Réseau « CCR » :

III.11.1 Hypothèses simplifié:

La modélisation de la machine et de la commande directe a été implantée sous environnement MATLAB/SimPower System afin d'effectuer des tests de la régulation.

Nous avons donc soumis notre système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation.

III.11.2. Modèle de simulation de la CCR :

Dans cette partie et à partir de la CCM, les simulations sont toutes faites en mode continu avec la commande directe. La figure III.3 représente le schéma bloc de la commande côté réseau CCR.

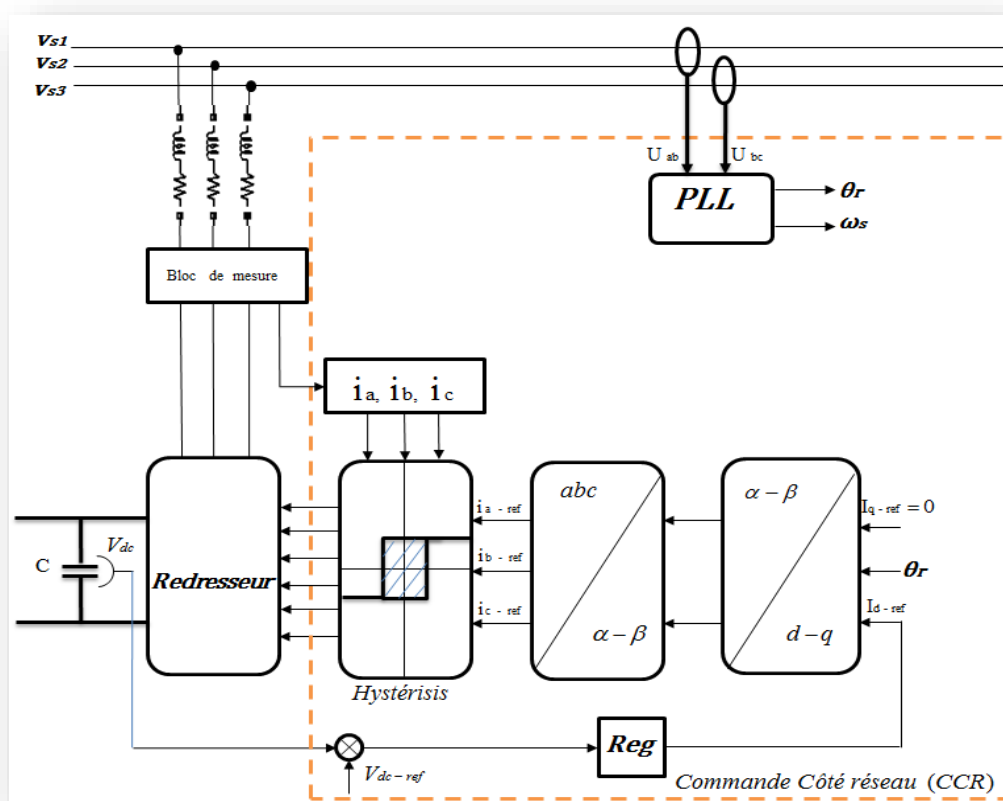


Figure III.31 : Schéma bloc du système à réglé de la CCR

Paramètres de simulation : (Voire ANNEXE B)

III.12. Résultats de simulation :

III.12.1. Résultats de simulation avec de régulateur PI :

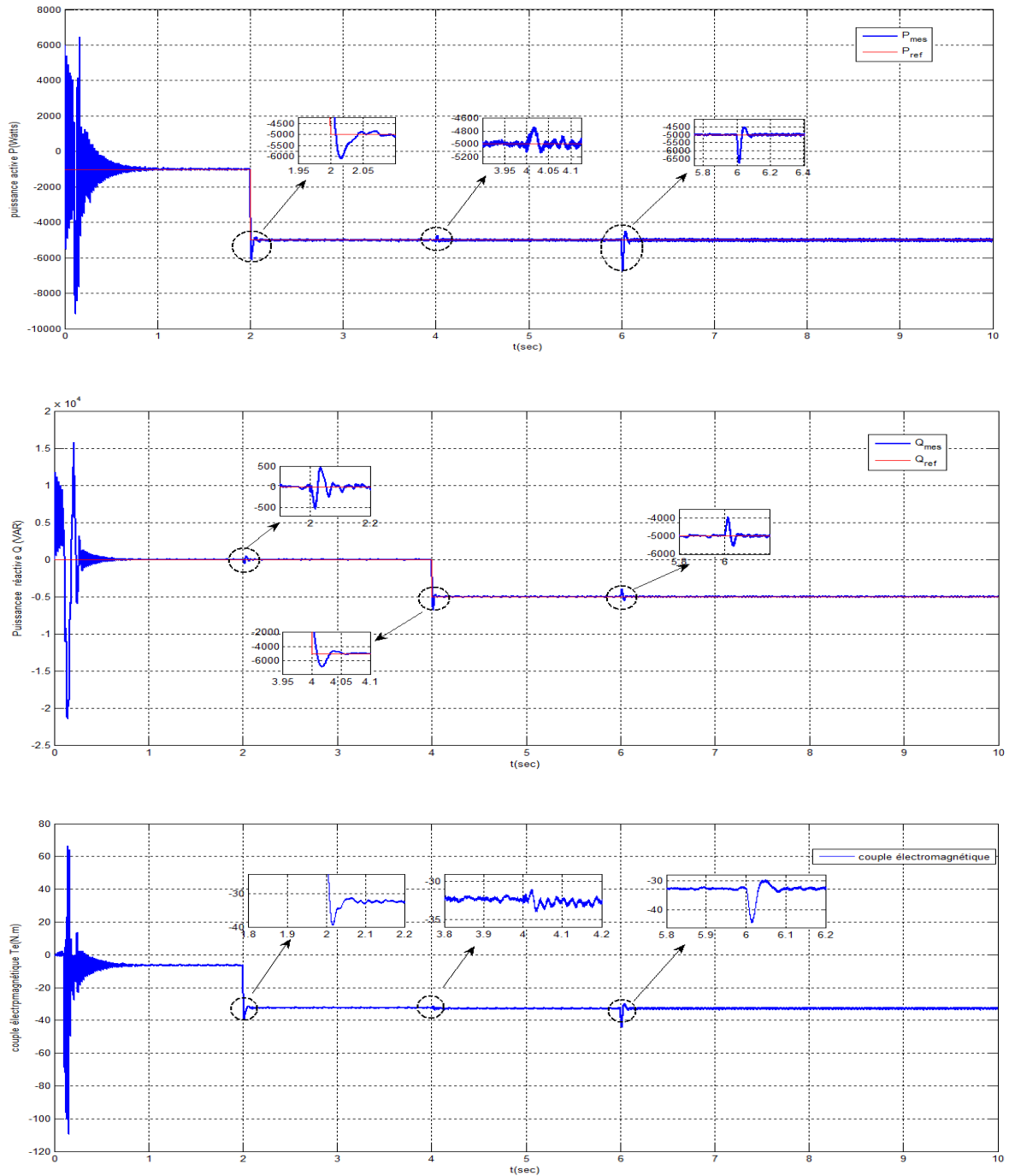


Figure III.32: Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), Le couple électromagnétique T_{em} (N.m) avec régulateur PI

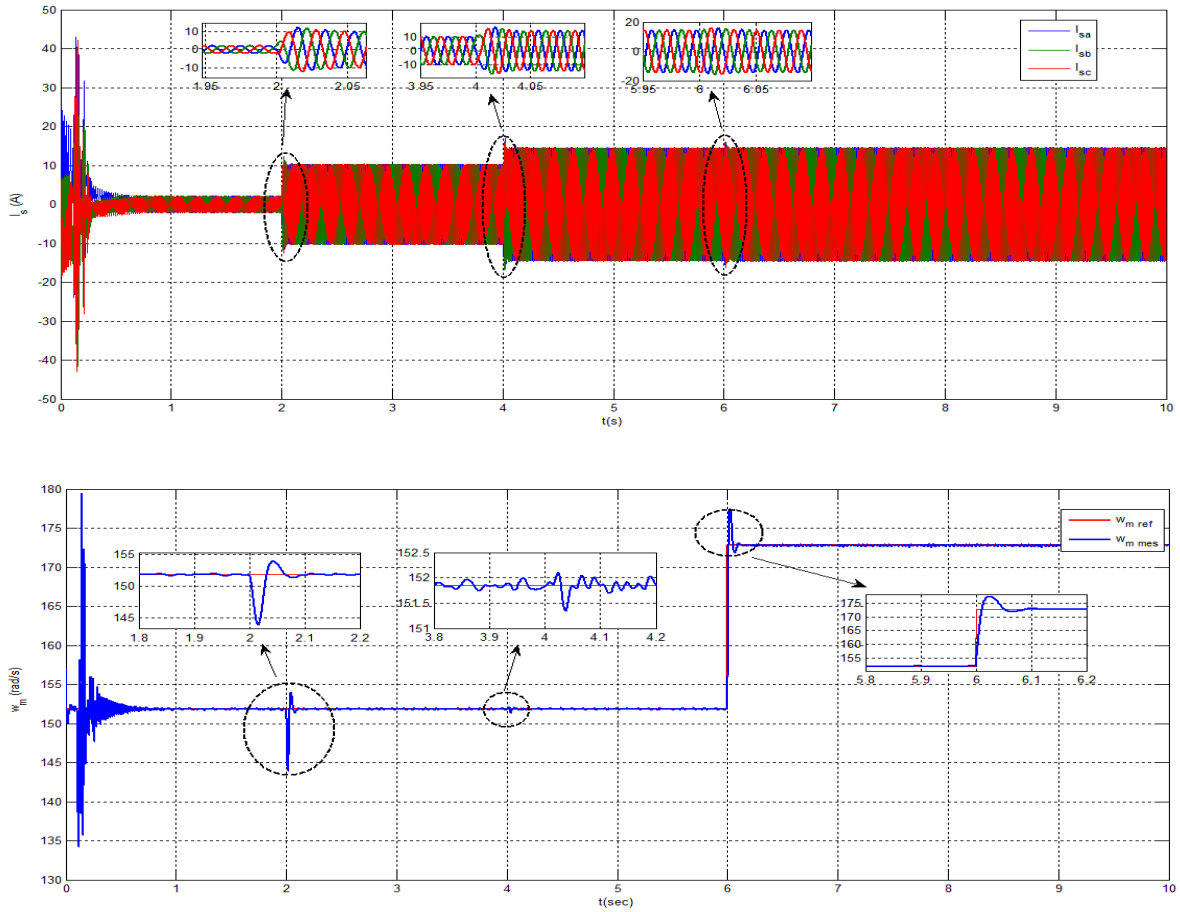


Figure III.33: Variation du courant statorique I_s , la vitesse w_m (rad/s) avec régulateur PI

III.12.2. Interprétation des résultats:

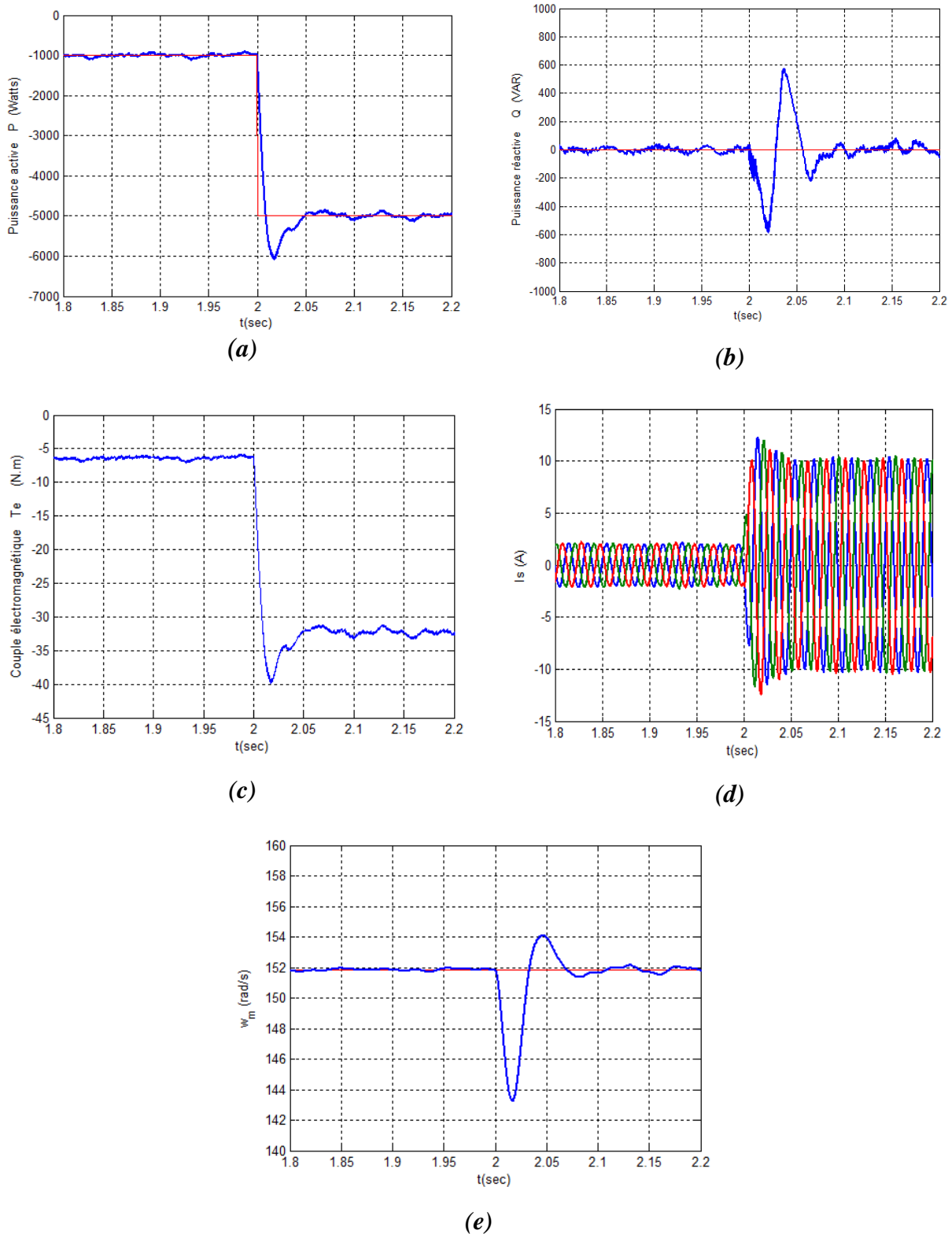


Figure III.34: Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=2s$.

(a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR) =f(t)$, (c) : $T_e(N.m) =f(t)$

(d): $I_s(A) =f(t)$, (e) : $w_m(rad/s) =f(t)$

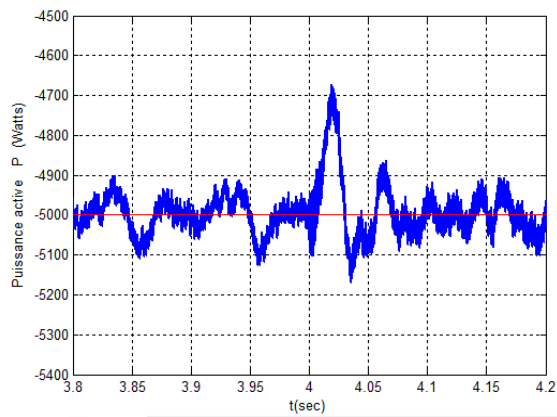
Figure III.34.a : A la application de la consigne à $t=2s$ la puissance active présente un dépassement de 20%, à partir de $t=2.05s$ la puissance se stabilise.

Figure III.34.b : On voit un régime transitoire sur La puissance réactive à l'instant $t=2s$, atteignant un maximum de $Q_{\max}= 590 \text{ VAR}$ et un minimum de $Q_{\min}= -600 \text{ VAR}$. Ce régime durée 0.1s provoqué par la variation de la puissance active.

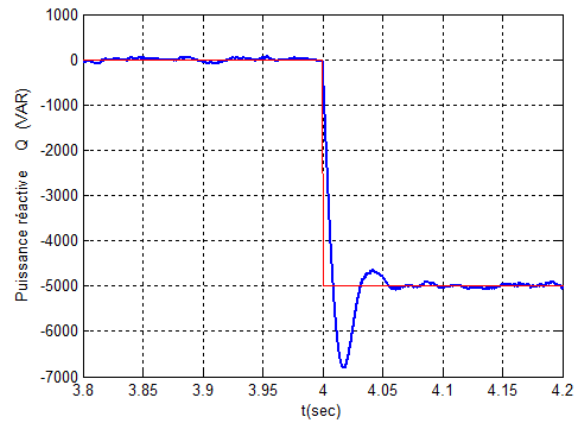
Figure III.34.c : On voit que la variation de la puissance active à $t=2s$ à provoquer un régime transitoire où le couple atteint d'une valeur maximal -40 N.m pour se stabiliser à la valeur de 32 N.m à $t=2s$.

Figure III.34.d : On voit que la forme du courant statorique est sinusoïdale, et à l'application d'échelon de la puissance active le courant I_s change son amplitude.

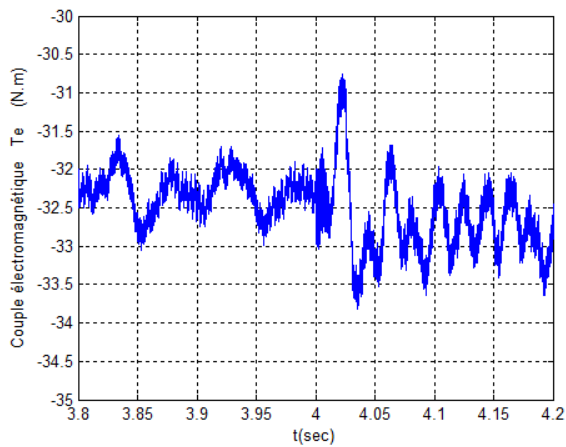
Figure III.34.e : A cause de la variation de la puissance active à l'instant $t=2 \text{ s}$, on voit un régime transitoire sur la vitesse ω_m qui présent un pic minimal de 143rad/s et un pic maximal de 153 rad/s, puis l'instant $t=2.1s$ la vitesse se stabilise.



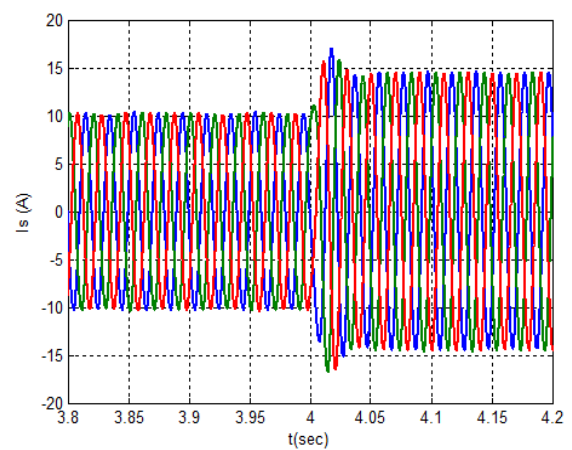
(a)



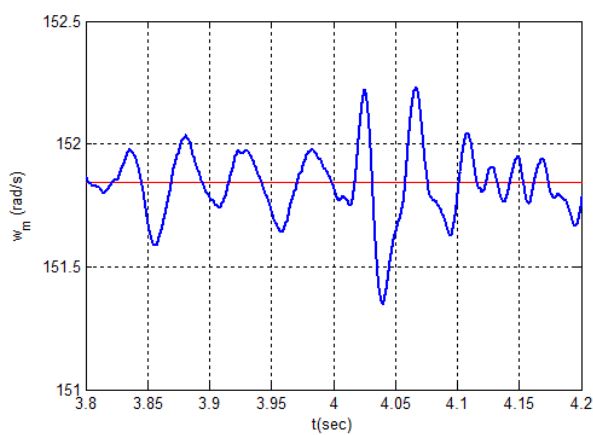
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure III.35 : Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=3s$.

(a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR) =f(t)$, (c) : $T_e(N.m) =f(t)$

(d): $I_s(A) =f(t)$, (e) : $w_m(rad/s) =f(t)$

Figure III.35.a : On voit un régime transitoire sur La puissance active, à l'instant $t=4s$ la puissance présente un pic maximal de -4750 W à cause de variation de la puissance réactive.

Figure III.35.b : A l'application den consigne à l'instant $t=4s$ on voit un dépassement de 36% sur la puissance réactive, après le temps $t= 4.06s$ la puissance suive sa référence.

Figure III.35.c : Le couple électromagnétique est au tour de la valeur 32 N.m avec des petites variations à l'instant $t=4s$ dû à l'application de la puissance réactive.

Figure III.35.d : On voit que le courant statorique est sinusoïdale, et à l'application de l'échelon de la puissance réactive à $t=4s$, l'amplitude du courant change.

Figure III.35 : La vitesse de rotation de la MADA à $t=4s$ est au tour de la valeur de 151.7 rad/s , remarquant une faible oscillation dû à l'application de la puissance réactive et après un temps environ $t=4.1s$ elle se stabilisée.

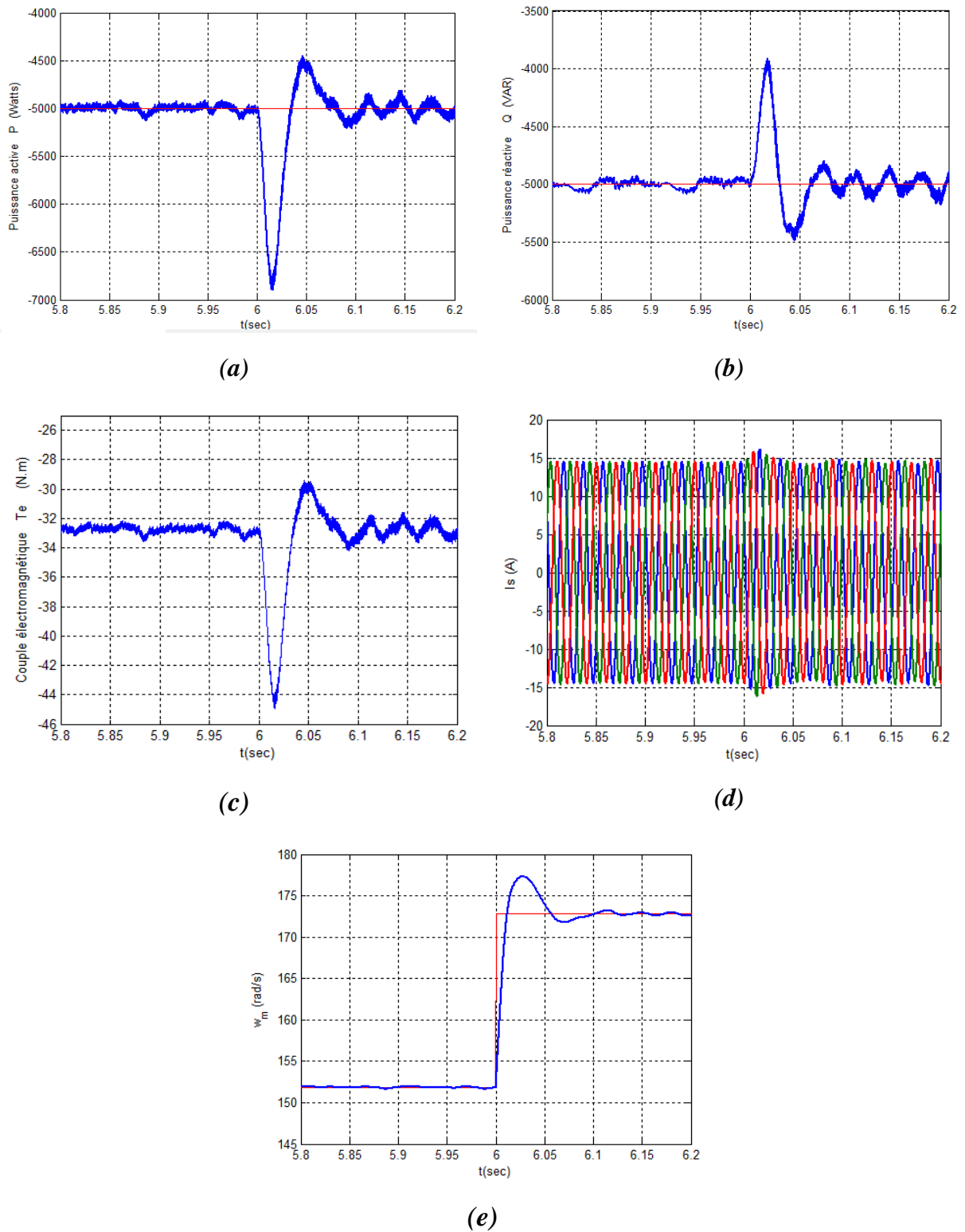


Figure III.36 : Evolution des paramètres de la commande côté MADA (CCM) à $t=2s$.

(a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR)=f(t)$, (c) : $T_e(N.m)=f(t)$

(d) : $I_s(A)=f(t)$, (e) : $w_m(rad/s)=f(t)$

Figure III.36.a : A l' instant $t=6s$ la vitesse varier de 1450tr/min à 1650tr/min. cette variation influe sur la puissance active est présent un pic minimal de -6800 W et un pic maximal de -4500 W, puis à l' instant $t=6.08 s$ la puissance se stabiliser.

Figure III.36.b : On voit que la puissance réactive suivre sa référence mais à l' instant $t=6s$ la puissance présent un régime transitoire où la puissance atteint une valeur maximale de -3900 VAR et une valeur minimal de -5550 VAR.

Figure III.36.c : On voit que l'allure de couple électromagnétique présent un régime transitoire à l' instant $t=6s$ qui prend un valeur minimal de -45 N.m et un valeur maximal de -30 N.m.

Figure III.36.d : On voit que l'allure de courant statorique est sinusoïdale est présent un pic à l' instant $t=6s$ à cause de la variation de la vitesse.

Figure III.36.e : A la application du signale de référence de La vitesse à l' instant $t=6s$ on voit que la vitesse augmente de 151.7 rad/s à 172.7 rad/s est présent un dépassement de 19%, puis se stabilise à l' instant 6.1s.

III.12.3. Résultats de simulation avec de régulateur IP :

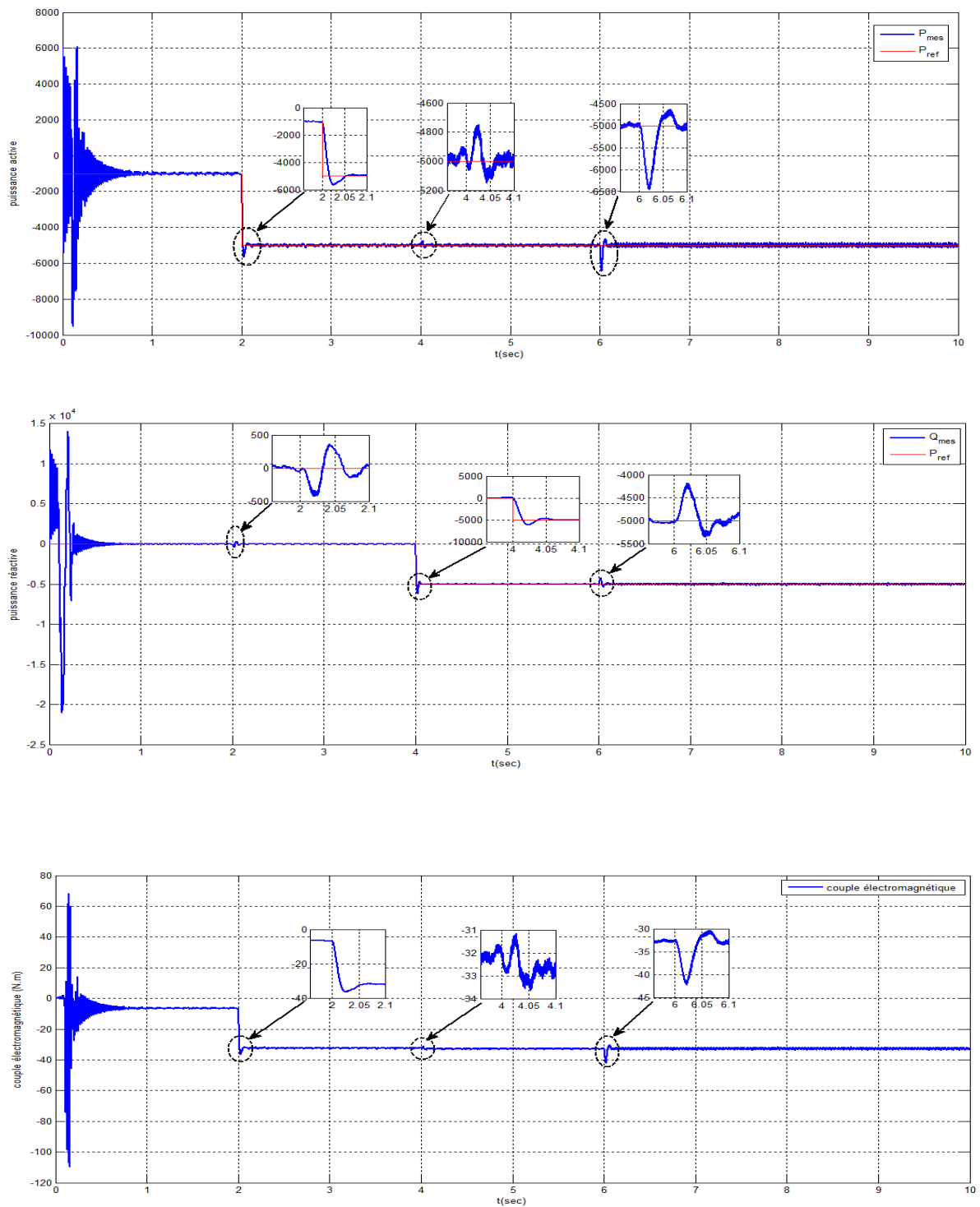


Figure III.37: Variation de la puissance active P (watt), la puissance réactive Q (VAR), le couple électromagnétique T_{em} (N.m) avec régulateur IP

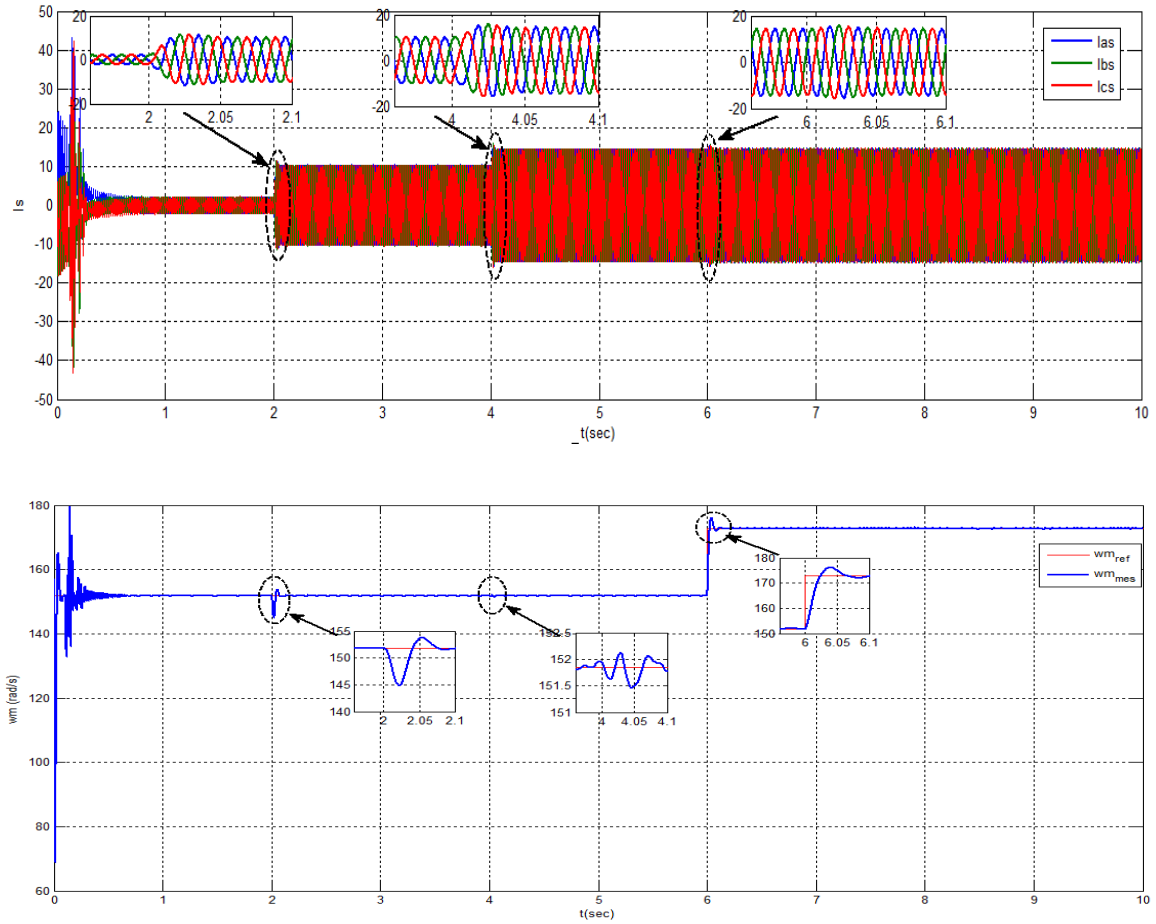


Figure III.38: Variation du courant statorique I_s , la vitesse w_m (rad/s) avec régulateur IP

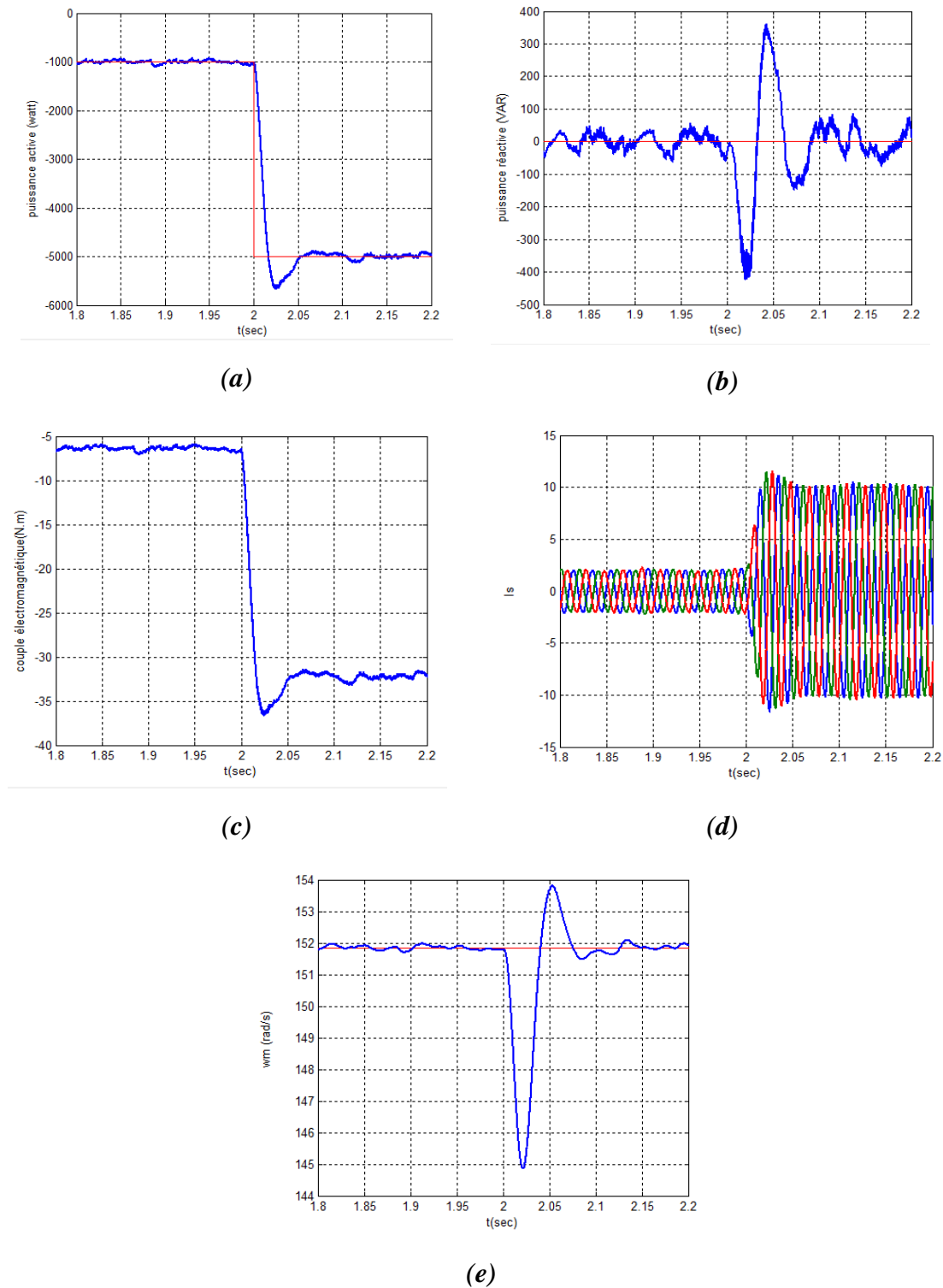


Figure III.39: Evolution des paramètres de la commande côté MADA à $t=2$ s.

(a) : $P(W)=f(t)$, (b) : $Q(VAR) =f(t)$, (c) : $T_e(N.m) =f(t)$

(d): $I_s(A) =f(t)$, (e) : $w_m(rad/s) =f(t)$

Figure III.39.a : A la application de la consigne à $t=2s$ la puissance active présente un dépassement de 13%, à partir de $t=2.05s$ la puissance mesuré suive sa référence.

Figure III.39.b : On voit un régime transitoire sur la puissance réactive à l'instant $t = 2 s$, atteignant un maximum de $Q_{\max} = 350 \text{ VAR}$ et un minimum de $Q_{\min} = -400 \text{ VAR}$. Ce régime durée $0.1s$ provoqué par la variation de la puissance active.

Figure III.39.c : On voit que le changement de la puissance active à $t=2s$ à provoquer un régime transitoire où le couple atteint d'une valeur maximal -36 N.m pour se stabiliser à la valeur de 32 N.m à $t=2s$.

Figure III.39.d : On voit que la forme du courant statorique est sinusoïdale, et à l'application d'échelon de la puissance active le courant I_s change son amplitude.

Figure III.39.e : A cause de la variation de la puissance active à l'instant $t=2s$ on voit un régime transitoire sur la vitesse ω_m qui présent un pic minimal de 145 rad/s et un pic maximal de 153.8 rad/s , puis l'instant $t=2.1s$ la vitesse se stabilise.

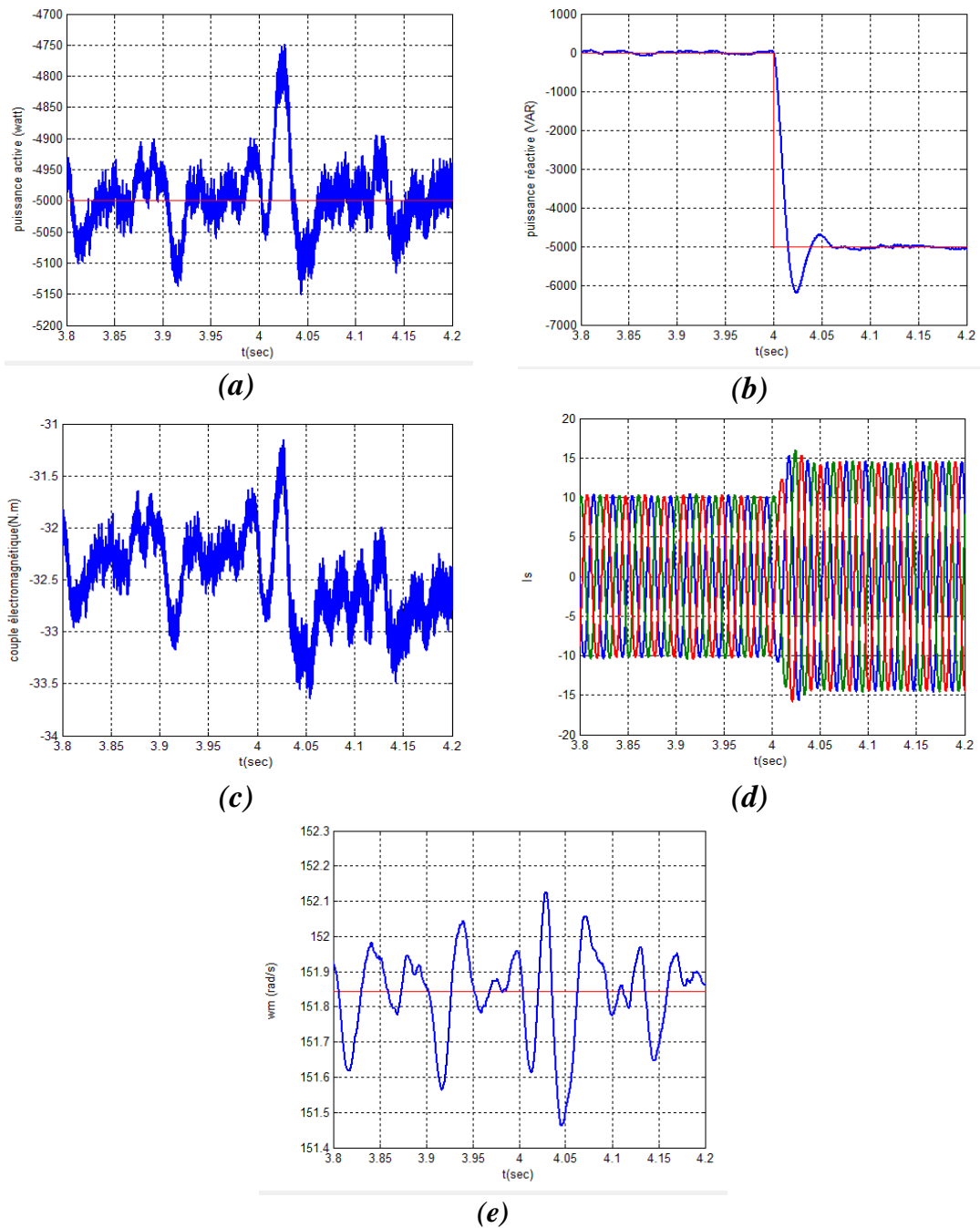


Figure III.36: Evolution des paramètres de la commande côté MADA à $t=4s$.

(a): $P (W)=f(t)$, (b): $Q (VAR) =f(t)$, (c): $T_e (N.m) =f(t)$

(d): $I_s (A) =f(t)$, (e): $w_m(rad/s) =f(t)$

Figure III.40.a : On voit un régime transitoire sur La puissance active, à l'instant $t=4s$ la puissance présente un pic maximal de -4750 W à cause de variation de la puissance réactive.

Figure III.40.b : A l'application den consigne à l'instant $t=4s$ on voit un dépassement de 22% sur la puissance réactive, après le temps $t= 4.06s$ la puissance suive sa référence.

Figure III.40.c : on remarque un régime transitoire au tour de la valeur -32.5 N.m de couple électromagnétique à cause de changement de la puissance réactive.

Figure III.40.d : On voit que le courant statorique est sinusoïdale, et a l'application de l'échelon de la puissance réactive à $t=4s$ le courant change son valeur.

Figure III.40.e : on remarque sur la figure de la vitesse qui est présente des oscillations faible dû à l'application de la puissance réactive.

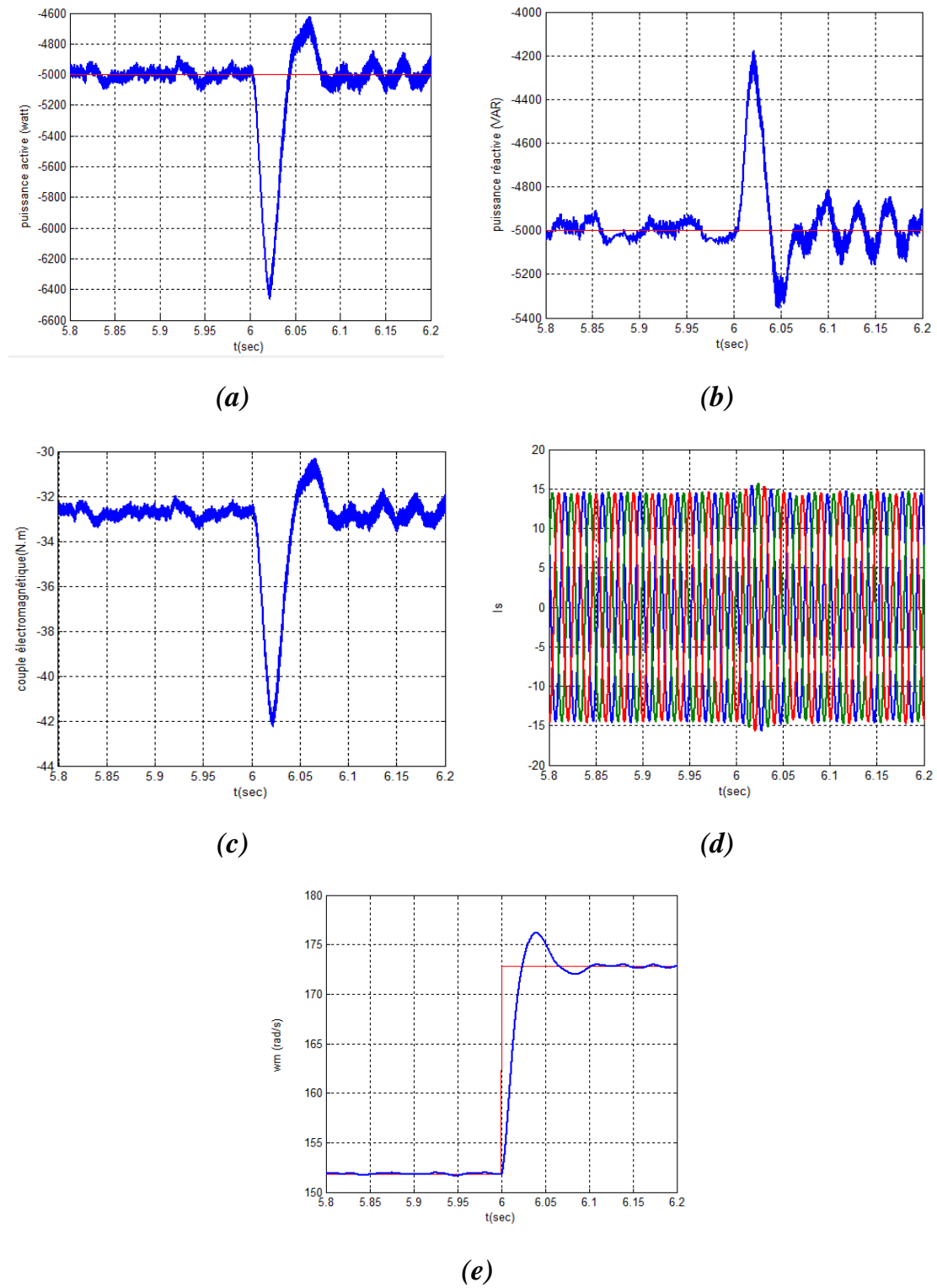


Figure III.37: Evolution des paramètres de la commande côté MADA à $t=6s$
 (a): $P(W)=f(t)$, (b): $Q(VAR)=f(t)$, (c): $T_e(N.m)=f(t)$
 (d): $I_s(A)=f(t)$, (e): $w_m(rad/s)=f(t)$

Figure III.41.a : A l'instant $t=6s$ la vitesse varie de 1450tr/min à 1650tr/min. cette variation influe sur la puissance active est présent un pic minimal de -6420 W et un pic maximal de -4600 W, puis à l'instant $t=6.08s$ la puissance se stabiliser.

Figure III.41.b : On voit que la puissance réactive suit le signal de référence mais à l'instant $t=6s$ la puissance présente un régime transitoire où la puissance atteint une valeur maximale de -4200 VAR et une valeur minimale de -5350 VAR.

Figure III.41.c : On remarque que l'allure de couple électromagnétique présente un régime transitoire à l'instant $t=6s$ qui prend une valeur minimale de -42 N.m et une valeur maximale de -30.8 N.m.

Figure III.41.d: On voit que le courant statorique est sinusoïdale est présent un pic à l'instant $t=6s$ à cause de la variation de la vitesse.

Figure III.41.e : A la application du signal de référence de La vitesse à l'instant $t=6s$ on voit que la vitesse augmente de 151.7 rad/s à 172.7 rad/s est présent un dépassement de 18%, puis se stabilise à l'instant 6.1s.

III.13.Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, ses différents modes de fonctionnement. Ensuite, on a modélisé le système d'alimentation qui comporte l'onduleur et redresseur. Pour ce dernier, on a appliqué la technique de la MLI à hystérésis pour le commander et à la fin on a présenté les résultats de simulation.

Chapitre IV

Etude des performances du Modèle combiné Turbine et MachineAsynchrone à Double Alimentation « MADA »

Table de matière

IV	Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »	135
IV.1	Introduction	137
IV.2	Profils du vent appliqué à l'entrée de la turbine	138
IV.3	Hypothèses	139
IV.4	Simulation et interprétations	142
IV.4.1	Modèle de simulation	142
IV.5	Résultats de simulation	143
IV.5.1	Avec régulateur PI	143
IV.5.2	Avec régulateur IP	147
IV.5.3	Etude comparative	151
IV.6	Conclusion	164

Chapitre IV

Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

IV.1 Introduction

Après avoir validé le modèle de la turbine au niveau de chapitre I et de même pour le chapitre II avec la validation du modèle de la MADA, nous nous proposons de travailler sur un modèle associant la turbine et la MADA afin pour reproduire le fonctionnement d'une éolienne constituer d'une turbine couplée à une génératrice asynchrone à double alimentation.

Nous procéderons à une série de simulation sous environnement Matlab/Simpower pour évaluer les performances de notre système soumis à des vitesses de vent variable dans les deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone, en insistant sur les caractéristiques courants rotorique, vitesse mécanique (glissement).

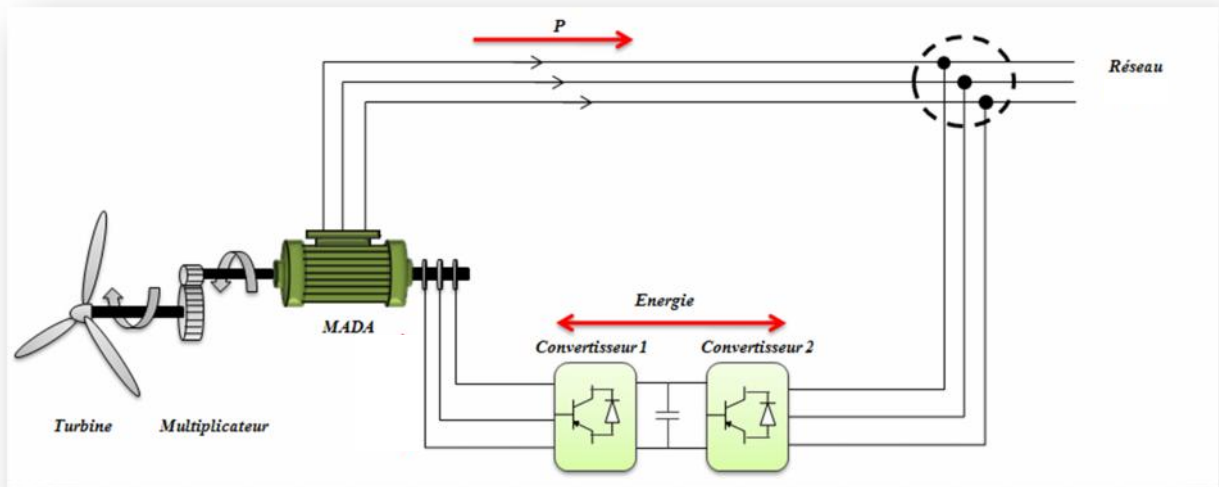


Figure VI.1 : Modèle d'étude complet « Turbine + Multiplicateur + MADA »

IV.2 Profils du vent appliqué à l'entrée de la turbine :

Après avoir validé le modèle de notre turbine avec asservissement de vitesse au niveau du chapitre II, nous nous proposons de choisir le profil du vent d'une manière à permettre à notre machine « MADA » de pouvoir fonctionner dans les modes hypo et hyper-synchrone (Figure VI.2).

Le profil du vent appliqué à l'entrée de la turbine est illustré dans la figure VI.2

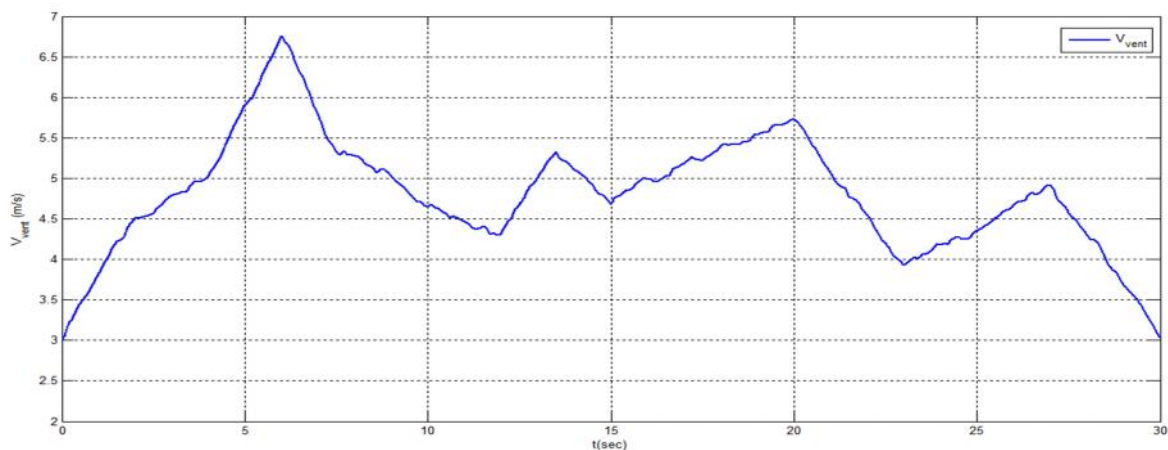


Figure VI.2 : Evolution de la vitesse du vent V_v (m/s).

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

La figure VI.2 montre l'évolution de la vitesse du vent que nous avons choisie, de sorte qu'elle soit étalée sur quatorze intervalles de temps comme présenté dans le tableau ci-dessous :

$t(s)$	0	2	4	6	7.5	10	12	13.5	15	20	23	25	27	30
$V_v(m/s)$	3	4,5	5	6,8	5,3	4,6	4,2	5,3	4,6	6	4	4,5	5	3

Tableau VI.1 : variation de V_v en fonction du temps

Nous considérons que le système éolien est en régime permanent et qu'il fonctionne dans la zone de fonctionnement optimal (Zone II), c'est-à-dire qu'il produit le maximum de puissance en fonction de la vitesse du vent. (chapitre II).

Nous nous proposons de faire fonctionner notre turbine connectée à une MADA sous ses deux modes de fonctionnement en intégrant un limiteur afin que la vitesse du vent évolue dans un intervalle souhaité pour assurer une plage de vitesse rotorique entre 1450 et 1550tr/mn autour de la vitesse de synchronisme(Figure VI.3).

Le fonctionnement en mode hypo-synchrone correspondra à la plage de vitesse du vent qui nous donnera un glissement supérieur à zéro, par contre le fonctionnement en mode hyper-synchrone pourra être obtenu lorsque la vitesse du rotor soit supérieure à la vitesse de synchronisme.

IV.3 Hypothèses :

1. On se propose de travailler avec une turbine dimensionnée et protégée (sécurisée) par le fabricant de sorte à pouvoir fonctionner dans la limite tolérée de vitesse (entre 2 à 8 mètres par seconde).
2. On s'est fixé comme objectif de faire fonctionner notre MADA dans une plage de vitesse comprise entre 1450 et 1550 tours par minute correspondant à des vitesses de vent comprise entre 4,5 et 4,8 m/s.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

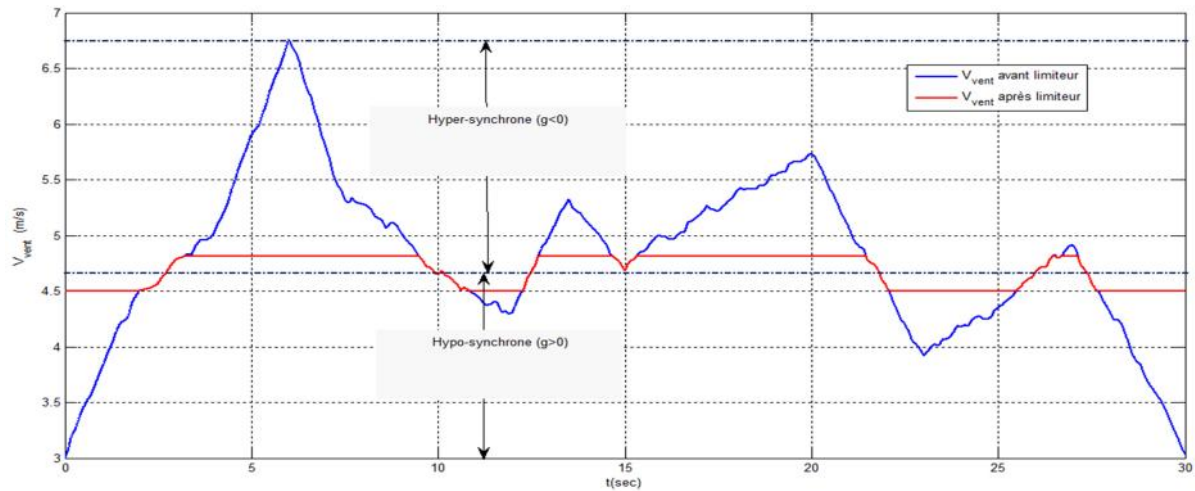


Figure VI.3 : V_v en fonction du temps avant et après application du limiteur

La figure VI.3 met en évidence la trajectoire de la vitesse du vent qui sera appliquée aux pâles de notre éolienne après avoir intégré un limiteur de vitesse répondant à nos hypothèses.

La figure IV.4 présente un zoom de l'évolution du profil du vent qui sera appliquée à l'entrée de notre turbine.

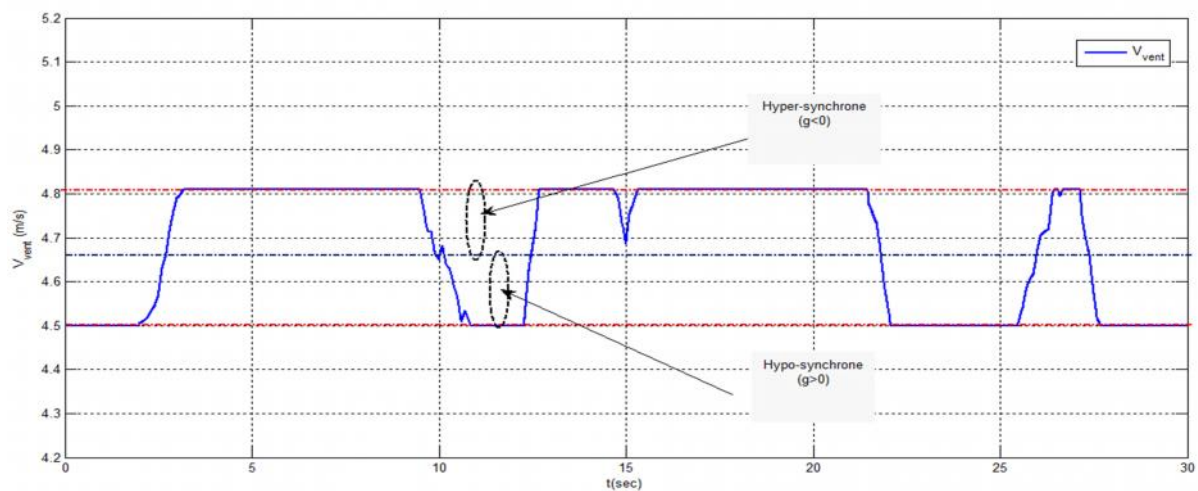


Figure IV.4 : Vitesse du vent V_v qui sera appliqué à la turbine

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

La simulation a été effectuée en utilisant le profil du vent montré sur la figure IV.4. La vitesse de la turbine et la vitesse mécanique de l'arbre sont illustrées respectivement sur la figure IV.5 et la figure IV.6. Il est à noter que pendant la durée de 30s le système éolien passe par les deux modes de fonctionnement hypo-synchrone et hyper-synchrone.

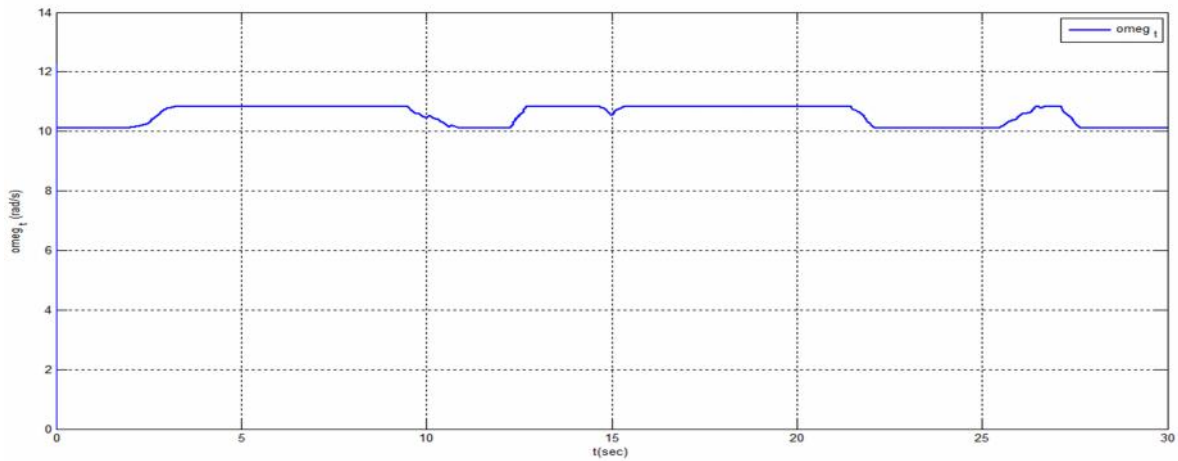


Figure IV.5 : Evolution de la vitesse de la turbine ω_t en rad/s

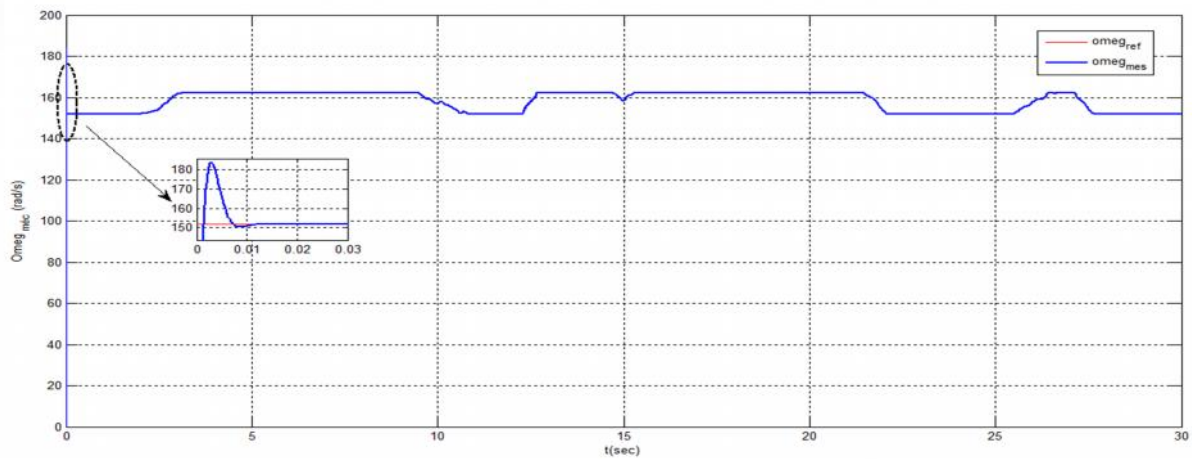


Figure IV.6 : Evolution de la vitesse mécanique ω_m en rad/s.

IV.4 Simulation et interprétations :

En se basant sur les deux modèles validés au niveau des deux chapitres précédent, nous procéderons à la simulation de notre modèle complet (turbine + MADA) soumis à des vitesses de vent variable sous environnement Matlab/Simpower (Figure. IV.7).

La vitesse du vent V_v , l'angle d'orientation des pales β , la tension du réseaux v_s constituent les entrées de notre système tandis que le couple à la sortie du multiplicateur C_m et la vitesse mécanique ω_m , la puissance active et réactive, les courant statoriques et le couple électromagnétique C_{em} fournis par la MADA seront les variables de sortie.

A travers les différentes simulations qui vont suivre, on cherchera à mettre en évidence les performances de nos régulateurs PI et IP sur le comportement des puissances actives et réactive, couple électromagnétique, courant rotoriques, vitesse mécanique ω_m , tension du bus continu. Un intérêt particulier sera donné aux variations de ses paramètres lors d'un passage d'un mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone et inversement.

IV.4.1 Modèle de simulation :

Après avoir implémenté notre modèle de simulation conformément à la figure IV.7, sous l'environnement Matlab/SimPower System, en utilisant la commande MPPT au niveau de la turbine pour l'asservissement de vitesse d'une part et la commande en puissance coté MADA dans lui permettre de fonctionnée en hypo et hyper-synchrone.

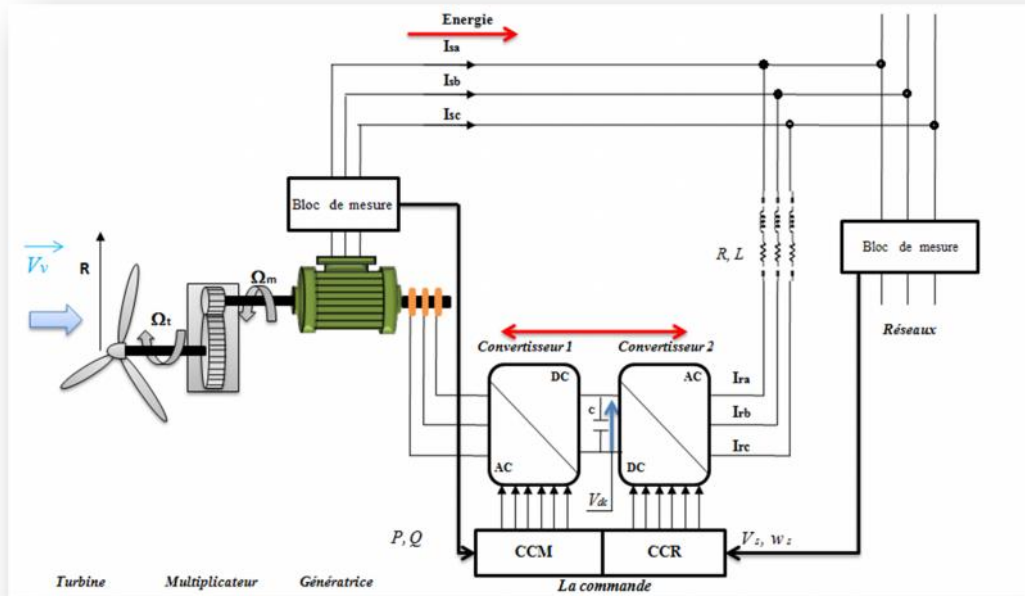


Figure IV.7 : Modèle de simulation de la turbine + MADA

IV.5 Résultats de simulation :

Les résultats obtenus lors de la simulation en commande directe en mode continue du modèle complet intégrant les deux types de régulateur PI et IP, sont illustrés comme suit :

IV.5 Avec régulateur PI:

Les résultats obtenus avec ce type de régulateur « PI » pour un profil du vent variable limité entre 4,5 m/s et 4,8 m/s (Figure IV.4) sont montrées dans les figures ci-dessous : Figure IV.7 et Figure IV.8, représentant ans l'évolution des paramètres $\{P, Q, T_e, I_r, m\}$ en fonction de temps.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

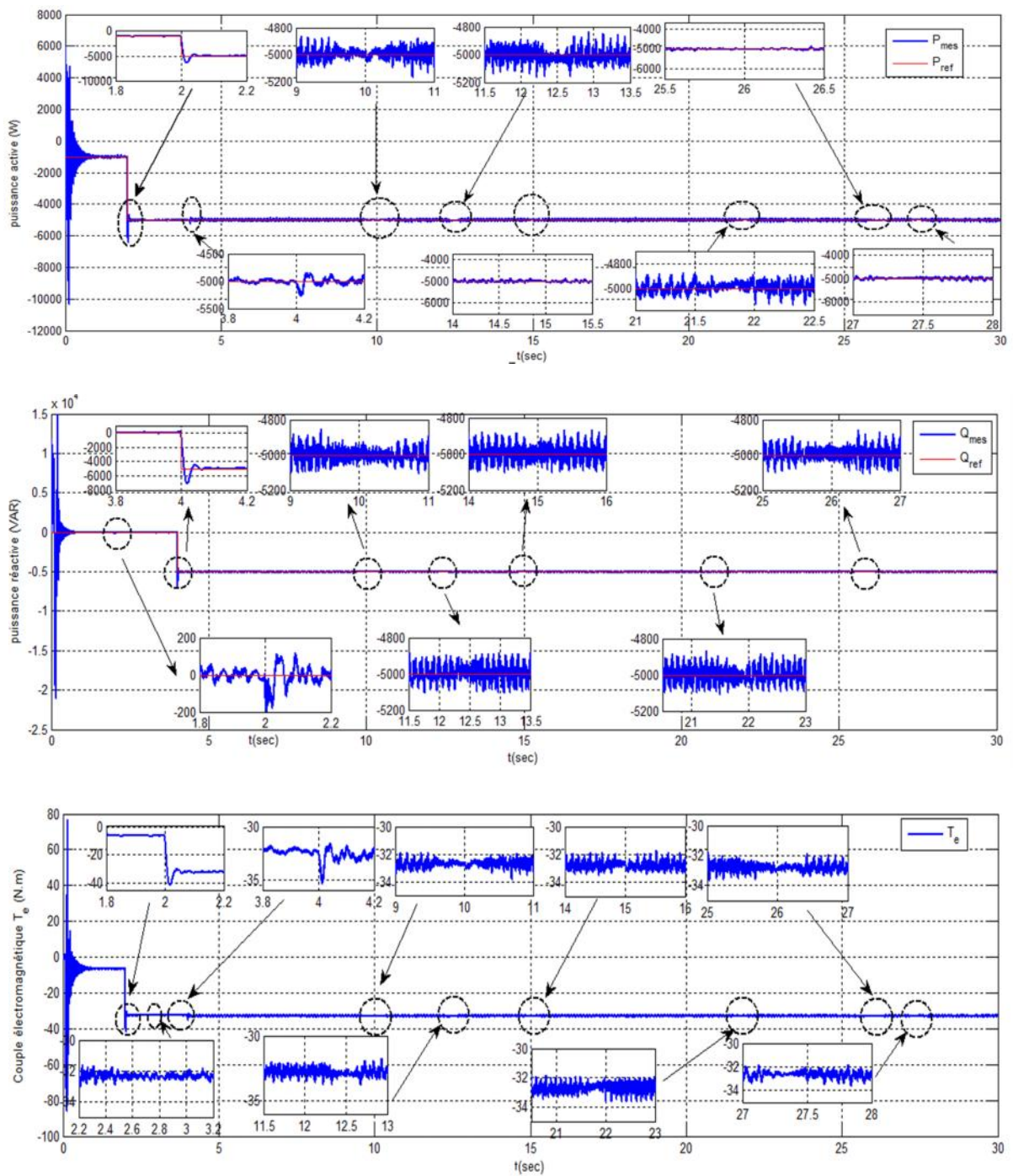


Figure IV.8 : Variation de la puissance active P (W), la puissance réactive Q (VAR), Le couple électromagnétique T_{em} (N.m) avec régulateur PI

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

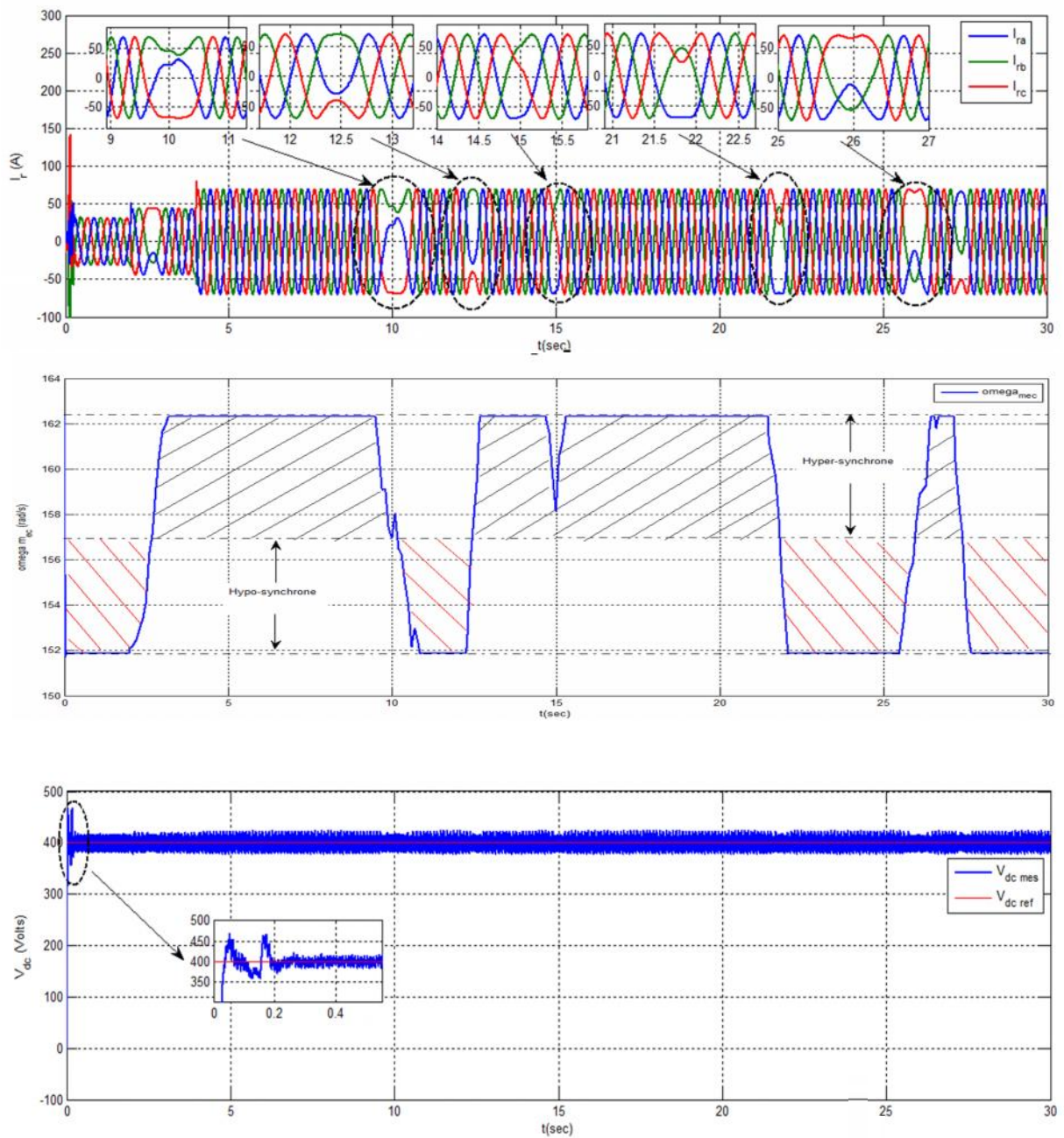


Figure IV.9 : Variation des courants rotorique I_r (A), la vitesse ω_n (rad/s), Tension du bus continue V_{dc} (Volt) avec régulateur PI

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

Nous remarquons que dans les résultats ci-dessus, les simulations avec régulateur PI pour la puissance active, présente un régime transitoire d'une durée de 1s avec une valeur maximale de $P_{max}=5000$ W et une valeur minimale de $P_{min}= -10000$ W.

A la suite de l'application d'un échelon de puissance réactive (perturbation) à $t=4$ s, une variation de puissance active avec des pics de -4830 W et -5300 W est survenue, suite à quoi notre puissance active rejoint sa consigne ($- 5 000$ W) après $0,15$ s soit à $t 4,15$ s.

Cependant l'application d'une variation de puissance active P , suite à l'application d'un échelon à $t=2$ s, induit une perturbation sur l'évolution de la puissance réactive Q par l'apparition d'un régime transitoire au tour de 0 VAR avec une valeur maximale de $Q_{max}= 100$ VAR et une valeur minimale de $Q_{min}=-200$ VAR. Un suivi de consigne à partir l'instant $t=2.15$ s de la puissance réactive est observé. La puissance réactive Q prend une valeur qui n'est pas nul de l'ordre de 500 VAR à l'instant $t=0$ s. On est à noter que la MADA a besoin d'une puissance réactive pour sa magnétisation.

L'influence entre les deux puissances ne s'effectue que de façon instantanée lors de leurs variations respectives. Notre découplage se fait correctement permettant ainsi de commander de façon autonome nos deux puissances (En est en présence d'un découplage de puissance active P et réactive Q)

Le couple électromagnétique T_{em} est à l'image de la puissance active, il présente un régime transitoire après l'instant $t=0,1$ s avec des valeurs $T_{e max}=78$ N.m et $T_{e min}=-89$ N.m, remarquant aussi une variation de la valeur de $-6,5$ N.m à l'application de consigne de la puissance active à $t=2$ s atteignant la valeur maximale de -42 N.m. Le couple électromagnétique atteint la valeur de $32,5$ N.m à partir de l'instant $t=2,15$ s.

La vitesse de rotation de la MADA α_m varie à la variation du vent appliquée à l'entrée de notre turbine, ce qui va imposer le mode de fonctionnement de notre génératrice : hypo-synchrone ou hyper-synchrone.

L'évolution de l'allure du courant rotorique I_r lors du passage d'un mode de fonctionnement à un autre (hypo vers hyper ou hyper vers hypo) présente un changement d'allure lié étroitement à l'évolution de l'allure de la vitesse mécanique α_m . Ce résultat confirme que la MADA peut fonctionner dans les deux régimes tout en permettant une transition douce.

La tension du bus continue V_{dc} a un très faible régime transitoire au démarrage de la machine atteignant une valeur maximale de 510 V et une valeur minimale de 351V avec un temps d'établissement de 0,3s pour se stabilisé autour de la référence (400 Volts) avec une fluctuation de l'ordre de ± 24 V.

IV.5.2 Avec régulateur IP:

Les mêmes conditions pour la régulation du modèle précédent seront appliqués pour le régulateur IP, les résultats obtenus avec ce type de régulateur pour le même profil du vent (Voir la figure IV.4) sont montrées dans les figures ci-dessous, (Figure IV.9 et figure IV.10) en représentant l'évolution des paramètres $\{ P, Q, T_e, I_r, V_{dc} \}$, en fonction de temps.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

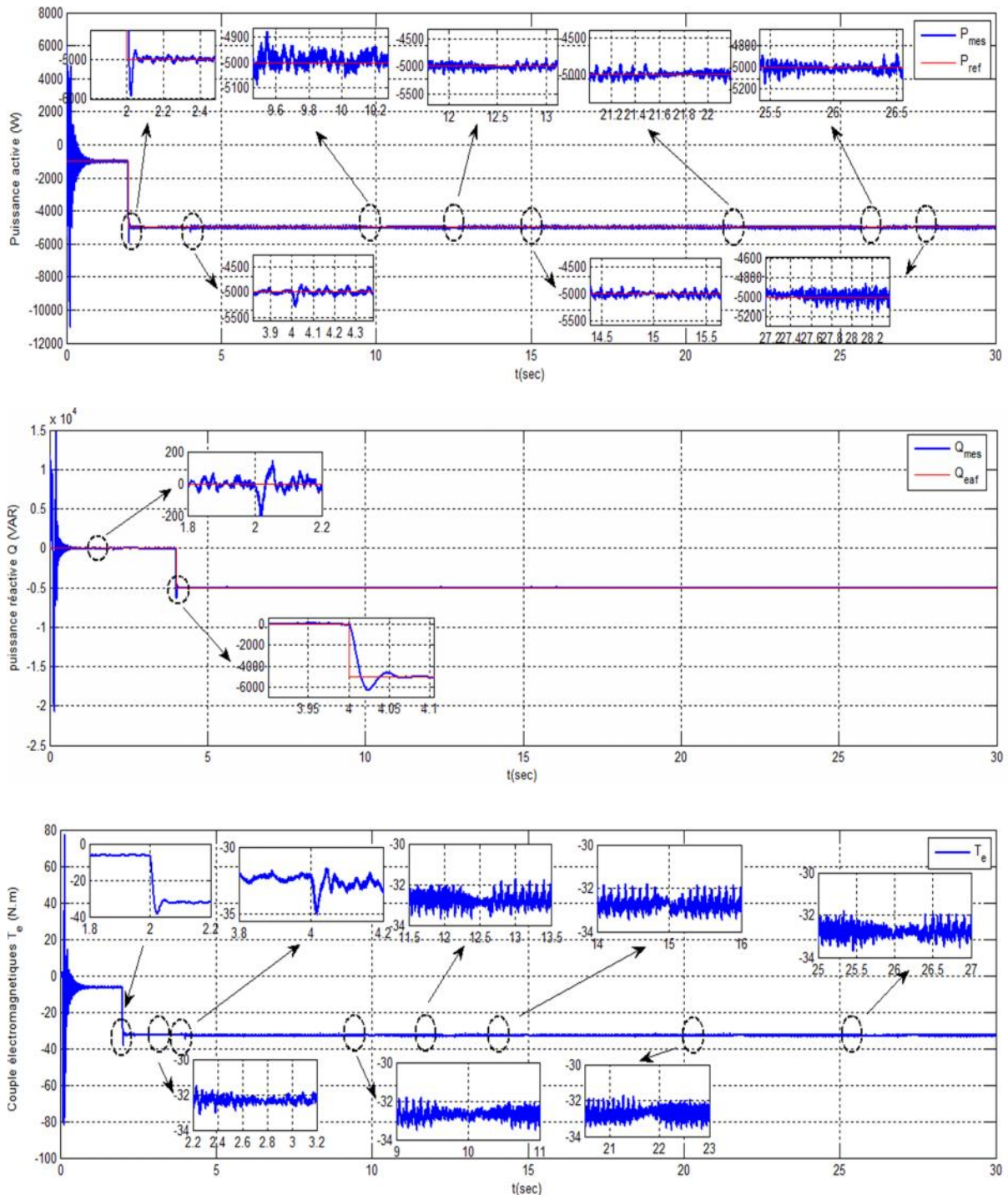


Figure IV.10 : Variation de la puissance active P (W), la puissance réactive Q (VAR), Le couple électromagnétique T_e (N.m) avec régulateur IP.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

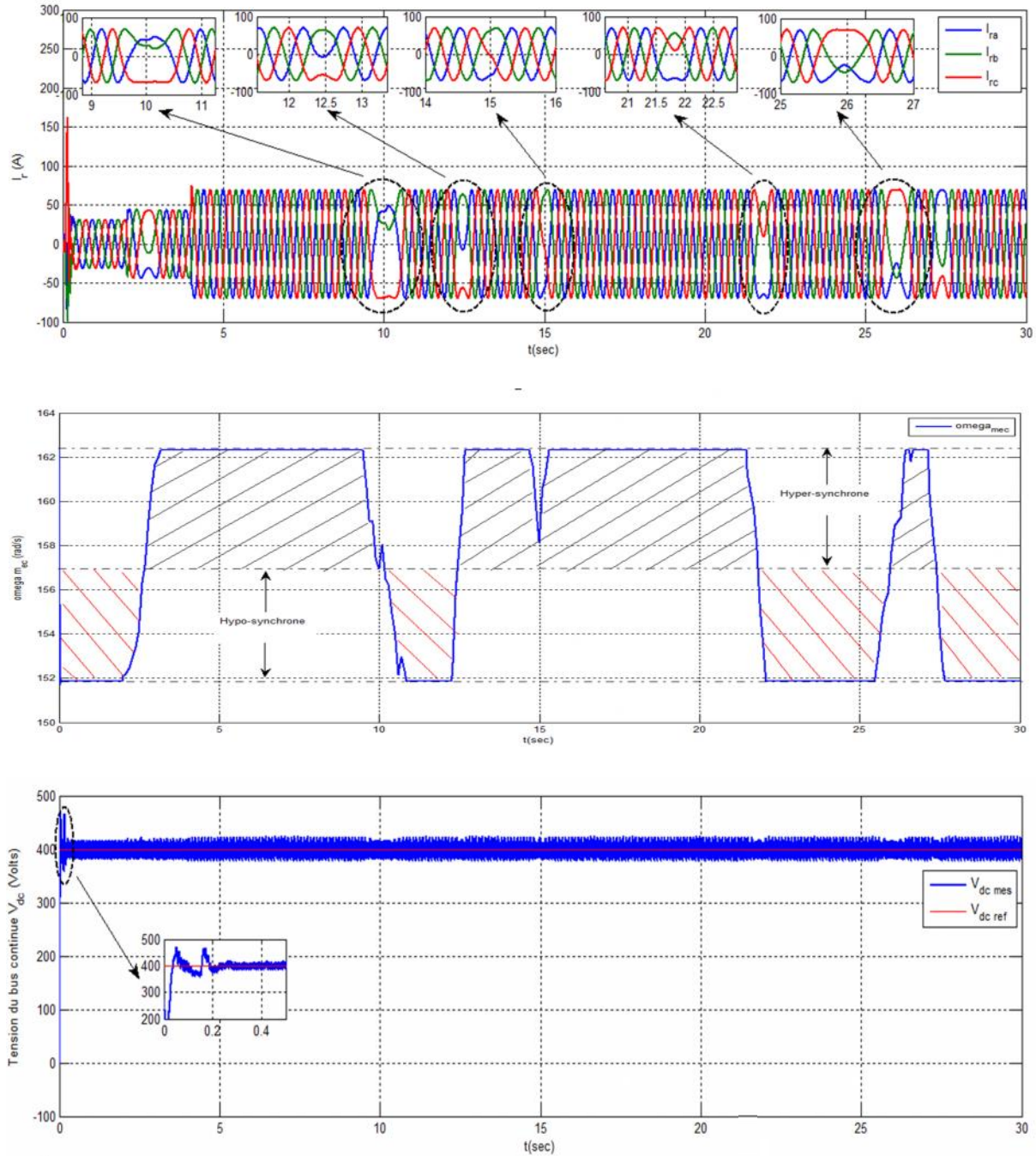


Figure IV.11 : Variation des courants rotorique I_r (A), la vitesse ω_n (rad/s), Tension du bus continue V_{dc} (Volt) avec régulateur IP

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

Nous remarquons que dans les résultats des simulations avec ce types de régulateur pour la puissance active (figure VI.10), elle présente un régime transitoire d'une durée de 1s avec une valeur maximale de $P_{max}=6000$ W et une valeur minimale de $P_{min}= -11000$ W. L'application de l'échelon à la puissance réactive au système à l'instant $t=4s$ provoque une perturbation sur la puissance active avec des pics de -4840 W et -5300 W.

Cependant l'application d'une variation de la puissance active à $t=2s$ a eu pour effet sur la puissance réactive, un faible régime transitoire autour de 0 VAR avec une valeur maximale de $Q_{max}= 110$ VAR et une valeur minimale de $Q_{min}=-180$ VAR.

De même pour le régulateur IP, la puissance réactive Q prend une valeur qui n'est pas nul de l'ordre de 550 VAR à l'instant $t=0s$. On constate que la MADA a besoin d'une puissance réactive pour sa magnétisation.

Le couple électromagnétique est de la même allure que celle de la puissance active, il présente un régime transitoire après l'instant $t=1s$ avec des valeurs $T_{e max}=78$ Nm et $T_{e min}= -82$ Nm. A cause de la variation de la puissance active à $t=2s$, il change sa valeur de $-6,5$ N.m atteignant la valeur maximale de $-38,5$ N.m. Le couple électromagnétique est autour de la valeur de 32,5 N.m à partir de l'instant $t=2,1s$.

IV.5.3 Etude comparative :

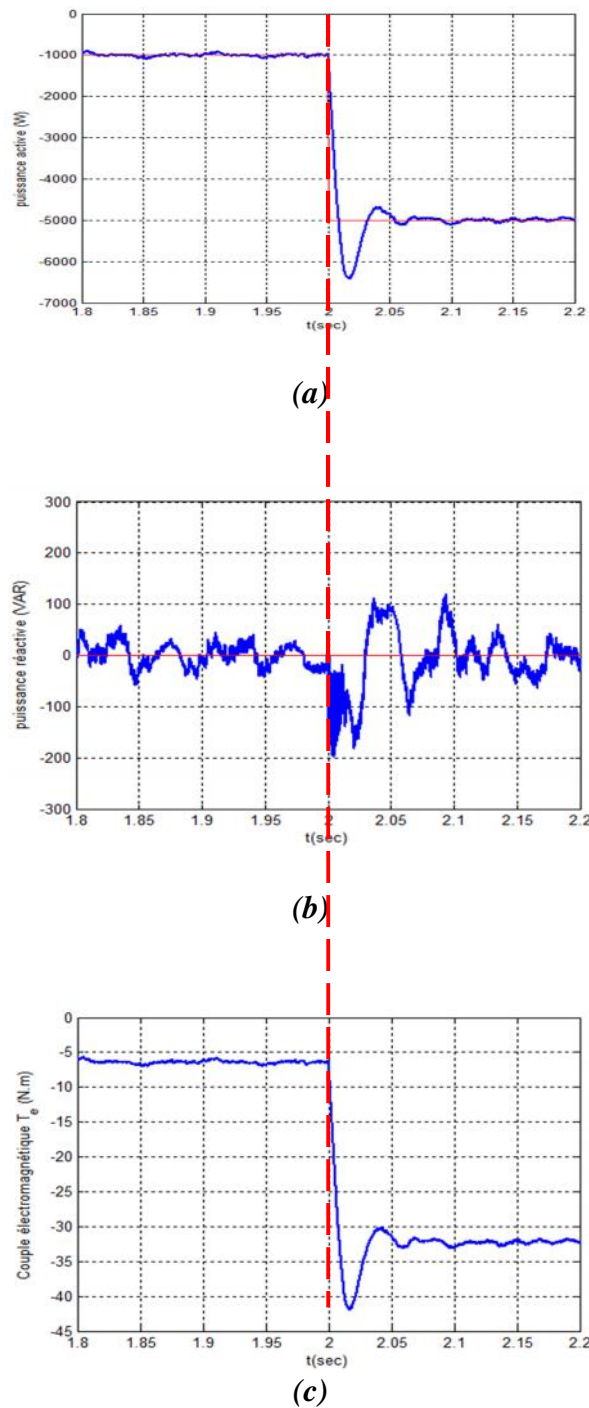


Figure IV.12 : Evolution des paramètres (a) : $P(W)$, (b) : $Q(VAR)$, (c) : $T_{em}(N.m)$ à $t=2s$ avec regulateur PI

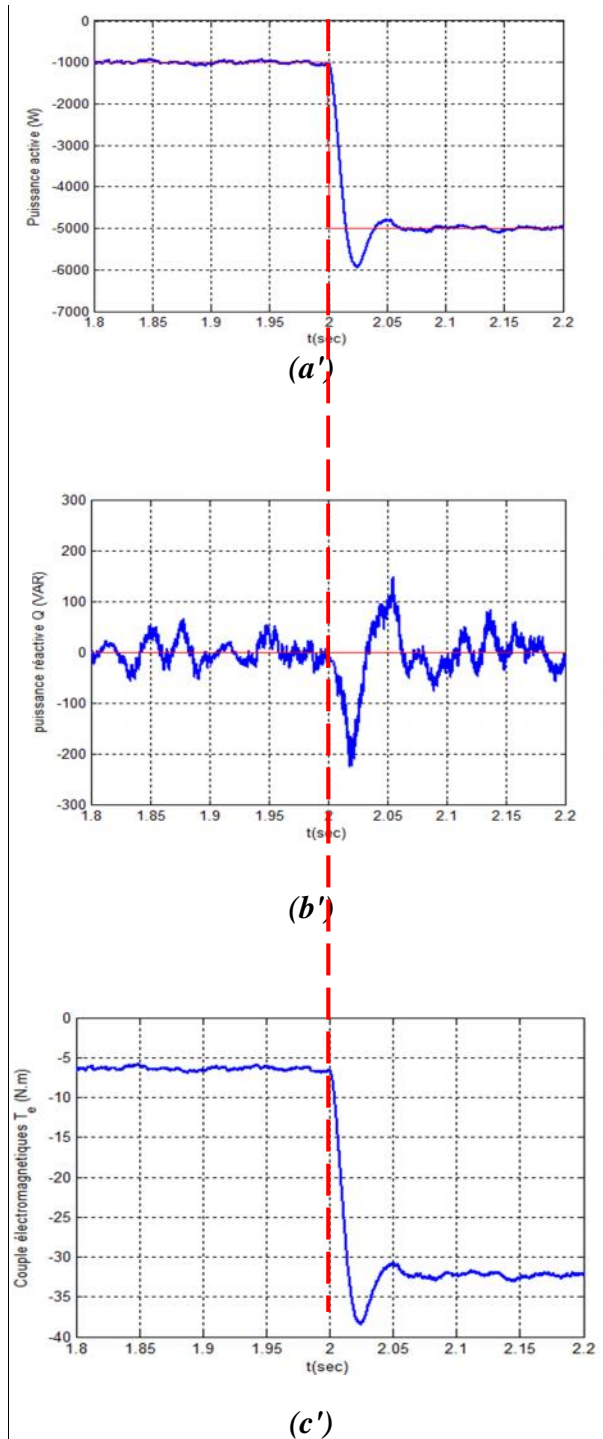
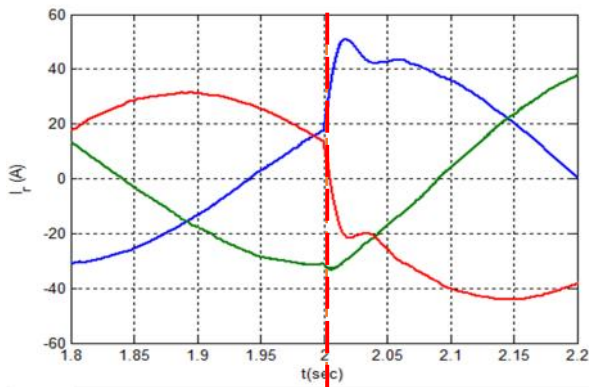
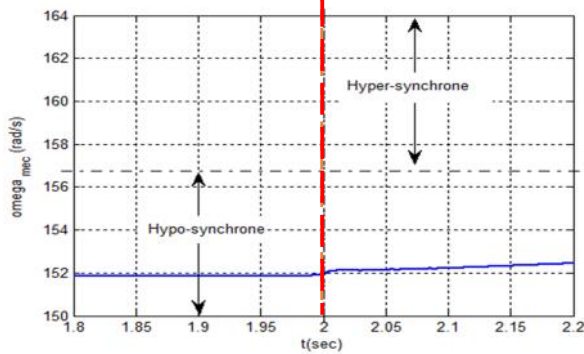


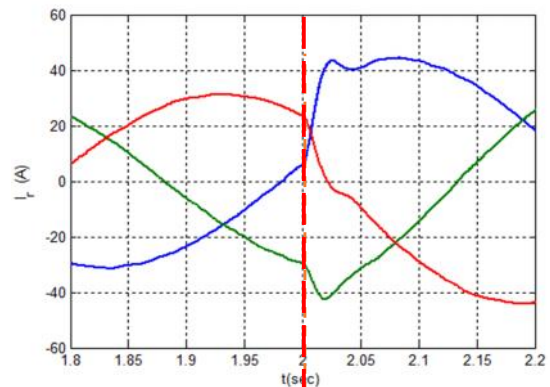
Figure IV.13 : Evolution des paramètres (a') : $P(W)$, (b') : $Q(VAR)$, (c') : $T_{em}(N.m)$ à $t=2s$ avec regulateur IP



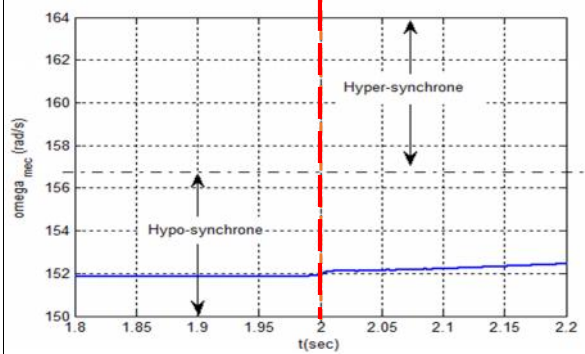
(d)



(e)



(d')



(e')

Figure IV.14 : Evolution des paramètres
(d): I_r (A), (e): ω_m (rad/s) à $t=2s$
avec régulateur PI

Figure IV.15 : courant rotorique en
fonction de temps (d'): I_r (A)
à $t=2s$ avec régulateur IP

L'emploi du régulateur IP a permis de constater que la puissance active présente un dépassement de 25% plus ou moins que celui du régulateur PI avec un dépassement de 37%, lors de l'application de notre échelon à $t=2s$. Cependant, il est important de signaler que le régulateur de type IP est le plus rapide est présente un faible dépassement.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

La puissance réactive présente un régime transitoire d'une durée environ 0,1s pour les deux régulateurs, la seule différents c'est la valeur maximale et minimale. Pour le PI, elle prend la valeur maximale de 102 VAR et la valeur minimale de -200VAR par contre pour le IP elle prend la valeur maximale de 99 VAR et une valeur minimale de -180 VAR).

Les résultats de simulation à $t=2s$ confirment bien que le couple est à l'image de la puissance active il présente un régime transitoire pour les deux régulateurs (Figure IV.12.c et Figure IV.13.c') mais il est à noter que du point de vue de leurs précisions le régulateur IP apporte une légère amélioration dans notre cas (Le dépassement avec le régulateur IP est de l'ordre de 20,75% par contre le dépassement est de l'ordre de 35,85% pour le PI).

Pour les courants rotorique et à l'application de consigne à l'instant $t=2s$ le régulateur IP nous présente une valeur maximale de $\pm 25A$ par contre le régulateur PI est de $\pm 20A$ pour une durée de 0,05s et après l'instant $t=2,05s$ les courants rotorique sont stabilisent et prennent la même valeur soit 50A.

Pour cet intervalle de temps, on peu dire que les différences entres les deux régulateurs (PI et IP) sont aussi larges. Pour le régulateur IP, on peut remarquer qu'il est très rapide par apport le régulateur PI , pas un grand de dépassement et l'erreur statique est presque nulle, mais dans la réponse (puissance active et réactive), il apparait de faibles oscillations

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

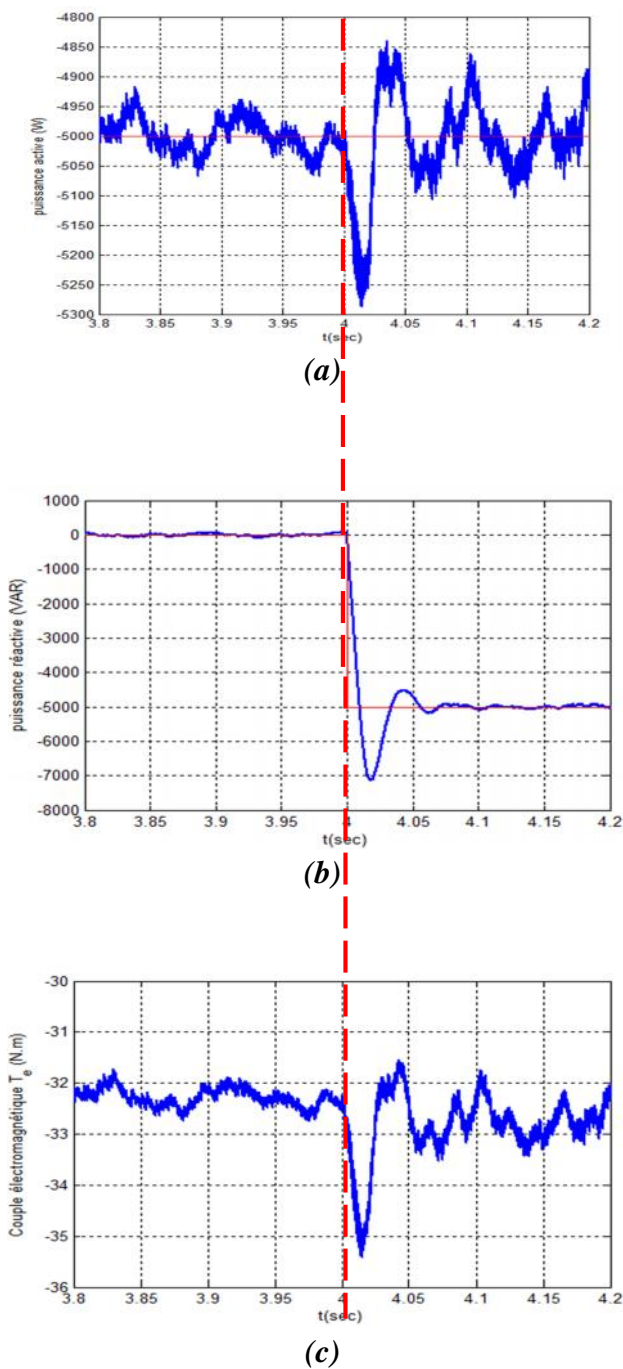


Figure IV.16 : Evolution des paramètres
(a) : $P(W)$, (b) : $Q(VAR)$, (c) : $T_{em}(N.m)$
à $t=4s$ avec régulateur PI

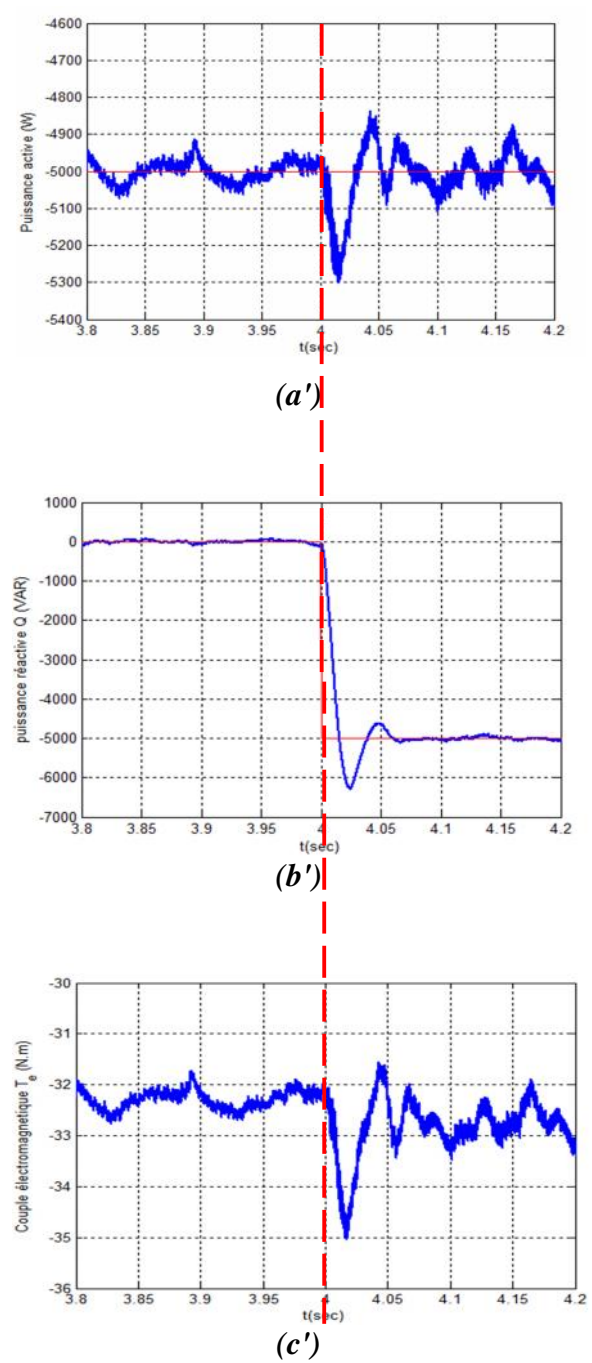


Figure IV.17 : Evolution des paramètres
(a') : $P(W)$, (b') : $Q(VAR)$, (c') : $T_{em}(N.m)$
à $t=4s$ avec régulateur IP

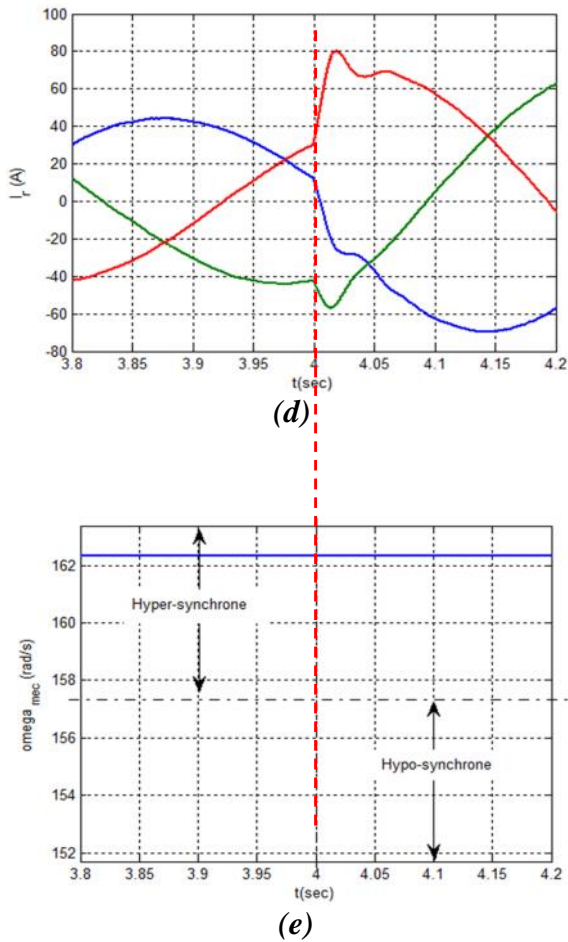


Figure IV.18 : Evolution des paramètres (d): I_r (A), (e): ω_m (rad/s) à $t=4s$ avec régulateur PI

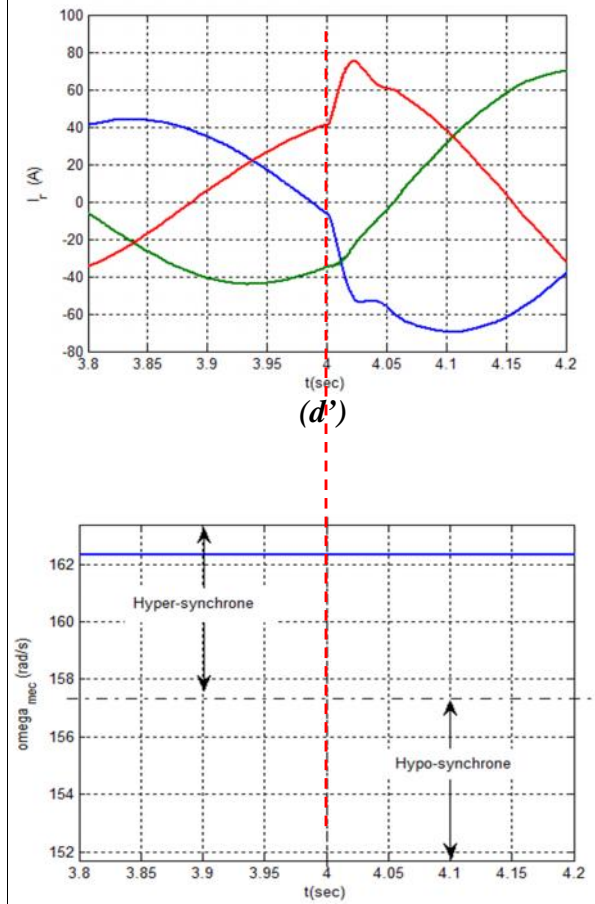


Figure IV.19: Evolution des paramètres (d'): I_r (A) à $t=4s$ avec régulateur IP

L'application de l'échelon de la puissance réactive à l'instant $t=4s$, il apparaît une perturbation aux niveaux de la puissance active en remarque pour le régulateur IP (Figure IV.15.a') des faibles oscillations atteignant une valeur maximale de -5250 VAR et une valeur minimale de -4900 VAR par contre le régulateur PI (Figure IV.14.a) la puissance active atteint la valeur maximale de -5290 VAR et la valeur minimale de -4850 VAR.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

A partir de l'instant $t=3,8s$ et jusqu'à $t=4s$ la puissance réactive est au tour de 0 VAR pour les deux régulateur, la différent entre les deux régulateur est d'un dépassement de 24% pour la régulation utilisant le régulateur IP (Figure IV.17.b') et de 40% pour PI (Figure IV.16.b). A partir de $t=4,1s$ la puissance réactive suivre la consigne au tour de la valeur de -5000 VAR pour les deux régulateurs.

Il est de même pour le couple électromagnétique, il est à l'image de la puissance active remarquant faible oscillation dû à l'application d'un échelon de la puissance réactive à $t=4s$ avec une valeur maximale de -35,2 N.m et une valeur minimale de -31,5 N.m pour le PI (Figure IV.16.c) par contre pour le IP (Figure IV.17.c') atteignant une valeur maximale de -34,7 N.m et une valeur minimale de -32 N.m.

Pour les courant rotoriques $I_r(A)$ la variation de la puissance réactive provoque des faibles variations de courant à l'instant $t=4s$,

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

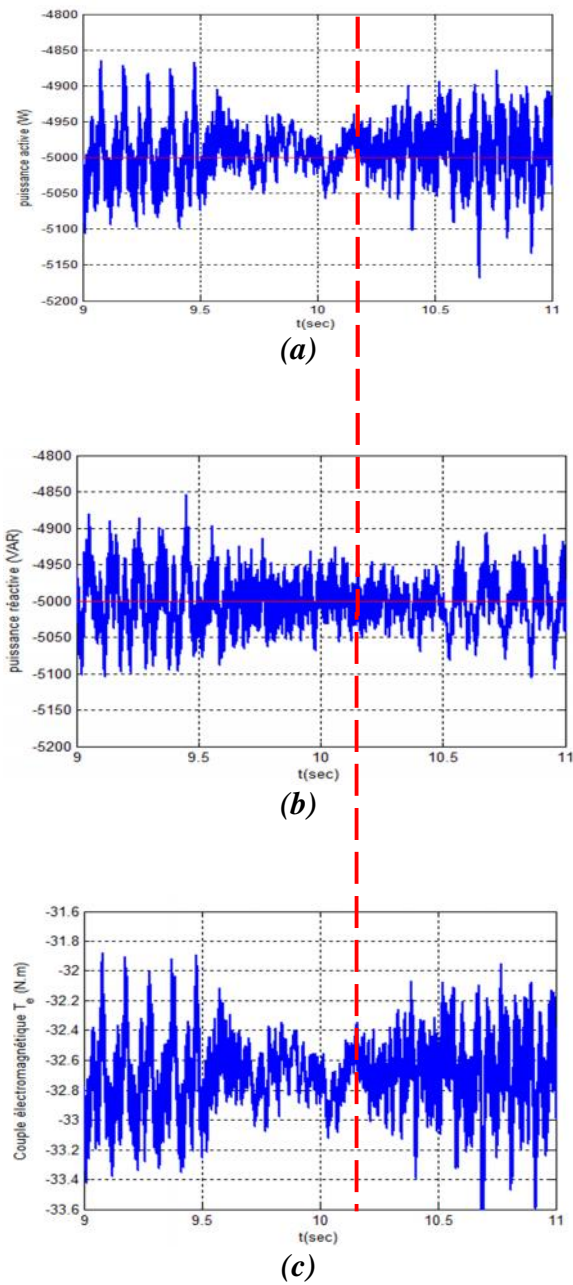


Figure IV.20 : Evolution des paramètres
(a) : $P(W)$, (b) : $Q(VAR)$, (c) : $T_{em}(N.m)$
à $t=10,3s$ avec régulateur PI

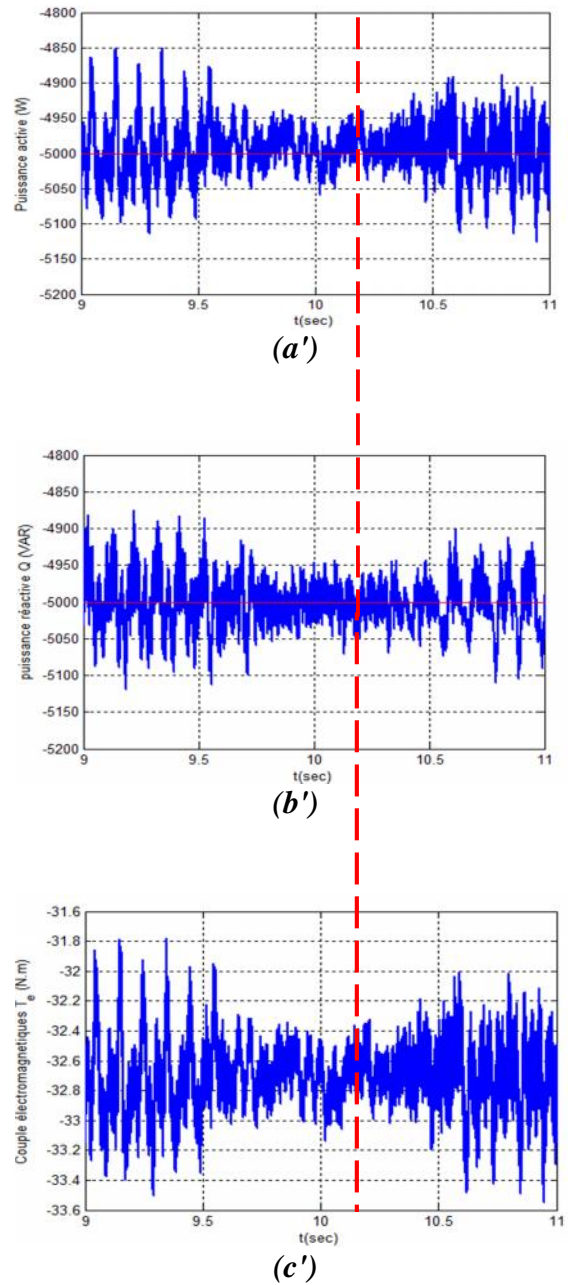


Figure IV.21 : Evolution des paramètres
(a') : $P(W)$, (b') : $Q(VAR)$, (c') : $T_{em}(N.m)$
à $t=10,3s$ avec régulateur IP

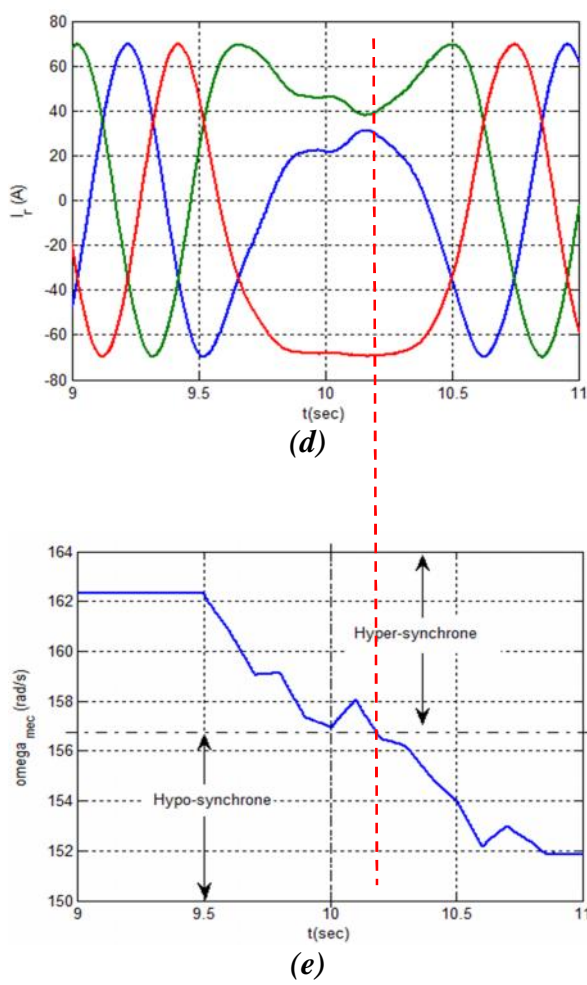


Figure IV.22 : Evolution des paramètres (d): I_r (A), (e) ω_m (rad/s) à $t=10,2s$ avec régulateur PI

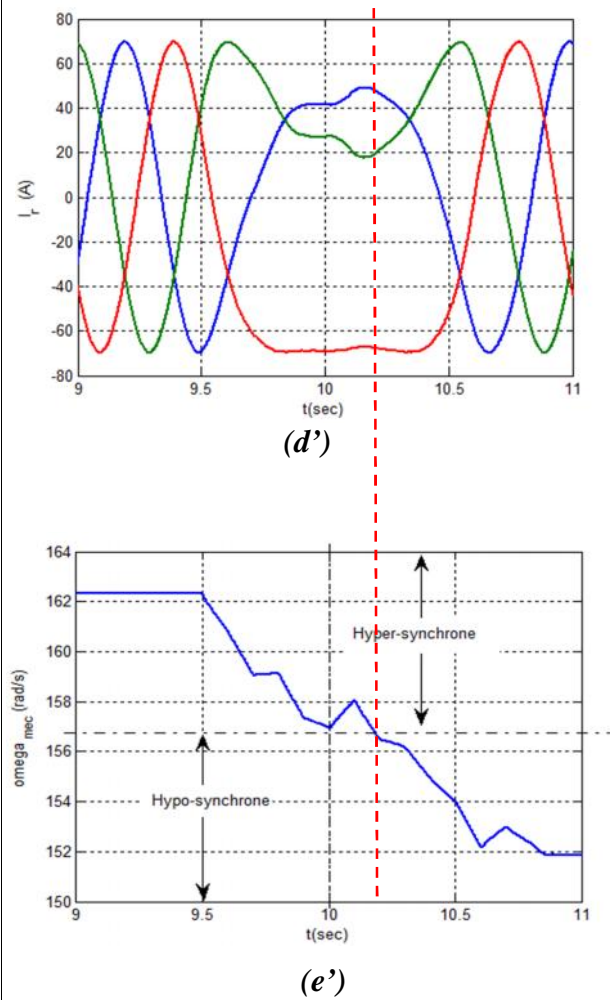


Figure IV.23: Evolution des paramètres (d'): I_r (A) à $t=10,2s$ avec régulateur IP

On remarque pour cet intervalle de temps que l'évolution des paramètres P, Q, T_e , I_r avec les deux régulateurs sont presque identique (Figure IV.20 et Figure IV.21), il y a pas une grand différence.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

Les variations en puissance sont plus réduites et amorties lorsque la vitesse mécanique ω_m approche de la vitesse de synchronisme. Elles présentent des fluctuations de la puissance moins prononcées avec des valeurs maximales de -4900 W et des valeurs minimales de -5020 W pour le IP. Par contre une valeur maximale de -4975 W et des valeurs minimales de -5020 W pour le PI.

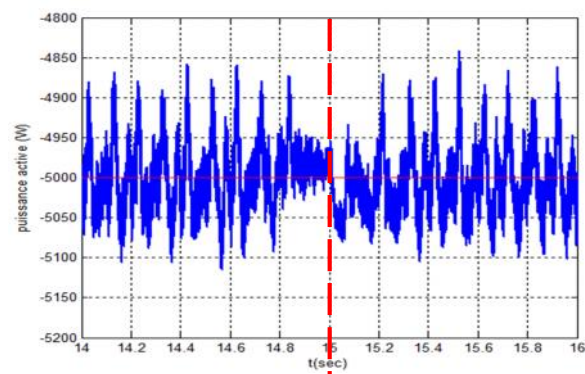
Pour les puissances réactives avec emploi de régulateur IP, on constate que cette puissance réactive varie entre -4960 VAR et -5040 VAR et à $t=10$ s, pour régulateur PI, cette puissance varie entre -4950 VAR et -5010 VAR.

Le couple électromagnétique pour le régulateur IP varie entre $T_{em} = -32.50$ N.m et -32.80 Nm cependant pour le régulateur PI il prend une valeur maximale $T_{em} = -32.80$ Nm et une valeur minimale $T_{em} = -32,6$ Nm.

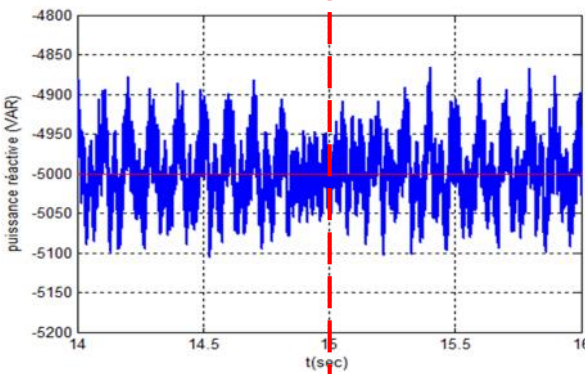
En utilisant le régulateur PI l'évolution des courants rotoriques se fait de façon à ce que la trajectoire sinusoïdale de fonctionnement se perde pour passer dans une zone transitoire qui illustre bien ce passage du mode hyper-synchrone au mode hypsynchrone. Il est à signaler que l'équilibre du système triphasé en amplitude et en phase est maintenue à tout moment même durant ce changement de mode, mais l'amplitude du courant rotorique change pour ensuite revenir au régime établi du second mode de fonctionnement.

L'évolution des courants rotoriques pour les deux régulateurs PI ou IP évolue de manière différente mais aboutissent au même signal courant rotorique en sortie avec la même séquence de phase. Ses variations mettent bien en évidence le changement relatif des vitesses statorique et rotorique avec l'expression du glissement qui définit le mode de fonctionnement où la vitesse rotorique de la MADA qui est aussi la vitesse mécanique de l'éolienne évoluant en fonction de la vitesse du vent.

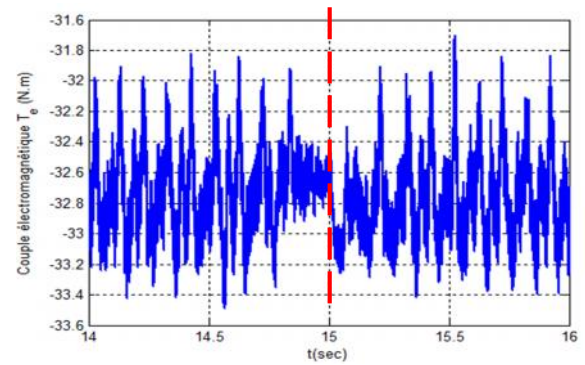
Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »



(a)

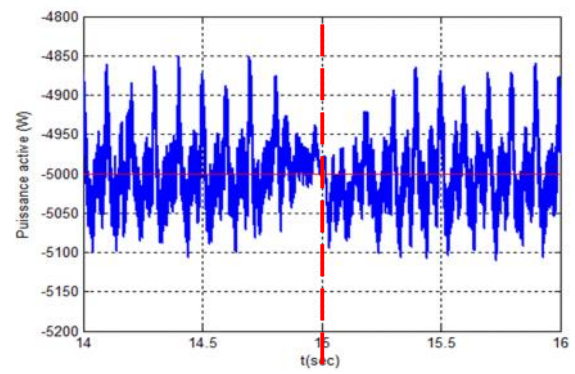


(b)

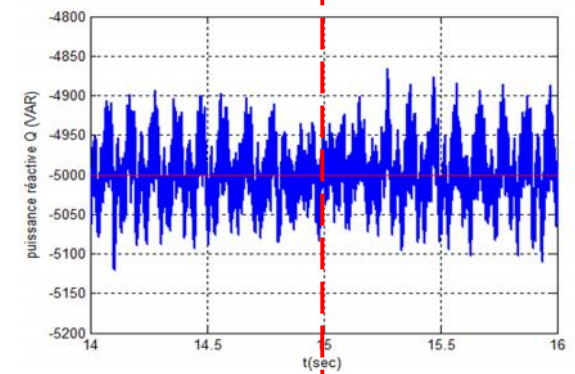


(c)

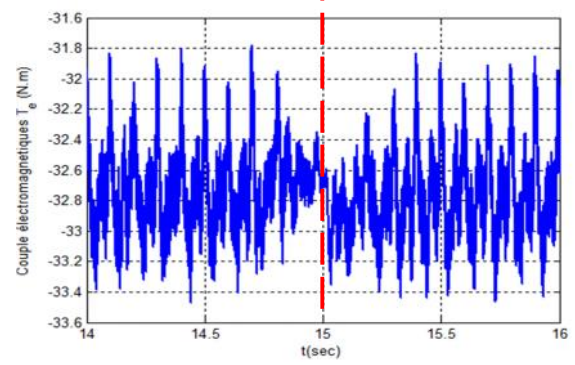
Figure IV.24 : Evolution des paramètres (a) : $P(W)$, (b) : $Q(VAR)$, (c) : $T_{em}(N.m)$ à $t=15s$ avec régulateur PI



(a')



(b')



(c')

Figure IV.25 : Evolution des paramètres (a') : $P(W)$, (b') : $Q(VAR)$, (c') : $T_{em}(N.m)$ à $t=15s$ avec régulateur IP

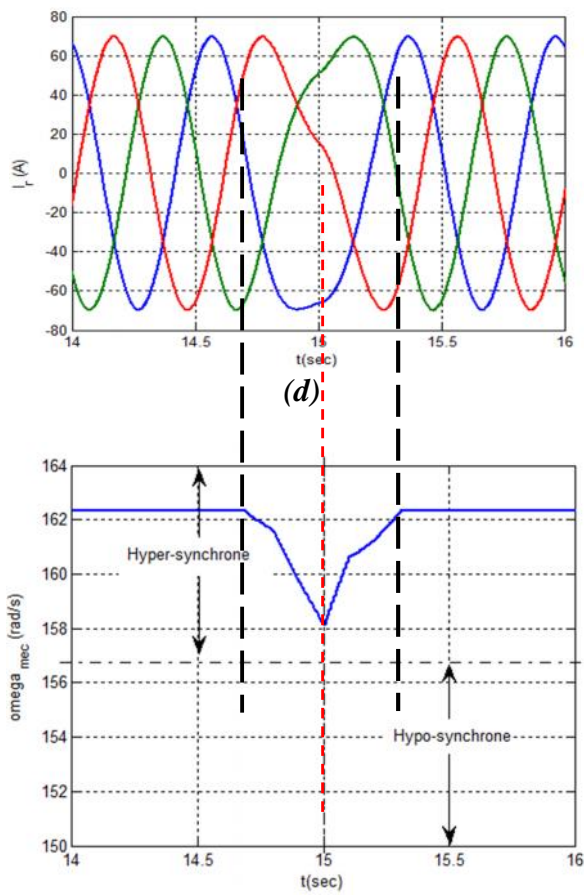


Figure IV.26 : Evolution des paramètres (d): I_r (A), (e) (ω_m) (rad/s) à $t=15\text{s}$ avec régulateur PI

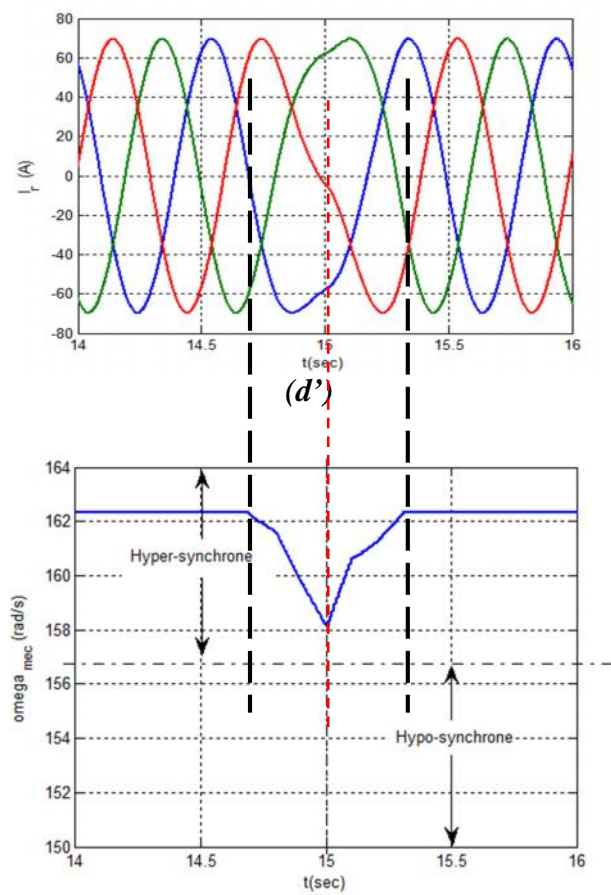


Figure IV.27 : Evolution des paramètres (d'): I_r (A) à $t=15\text{s}$ avec régulateur IP

La variation des puissances active et réactive autour du point $t=15\text{s}$ sont plus amorties pour les deux régulateurs « PI » et « IP », de même pour ce qui est de l'évolution du couple électromagnétique.

La vitesse rotorique de la MADA a subi une décélération sans pour autant atteindre la vitesse de synchronisme, ce qui explique que les courants rotoriques n'ont été fortement perturbés.

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

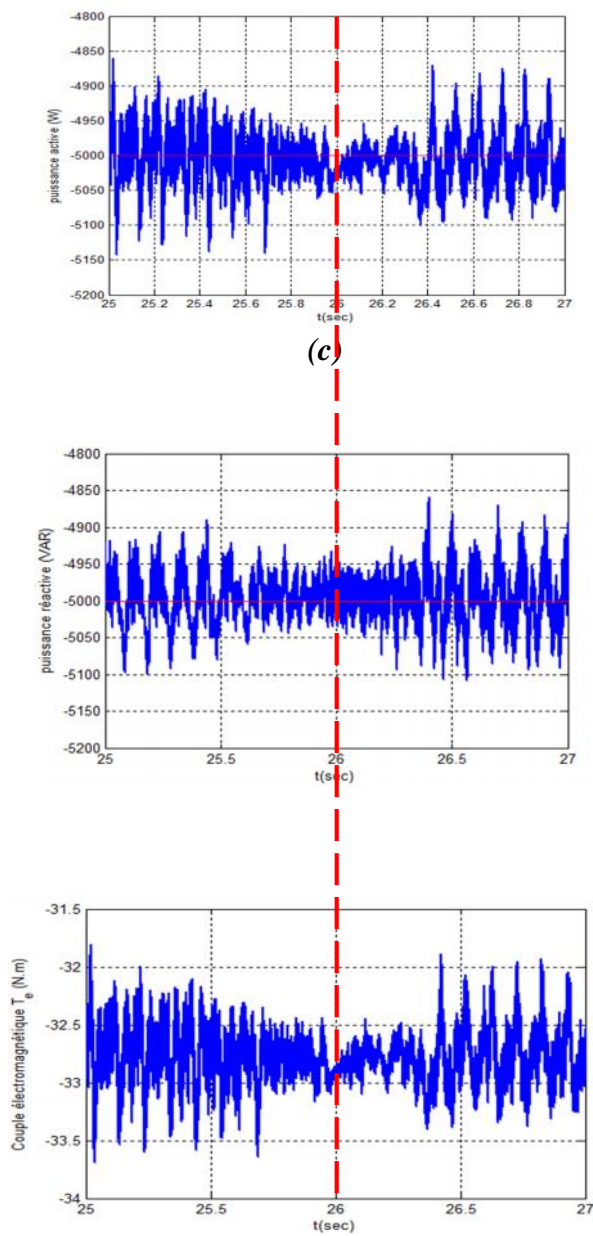


Figure IV.28 : Evolution des paramètres (a) : $P(W)$, (b) : $Q(VAR)$, (c) : $T_{em}(N.m)$ à $t=26s$ avec régulateur PI

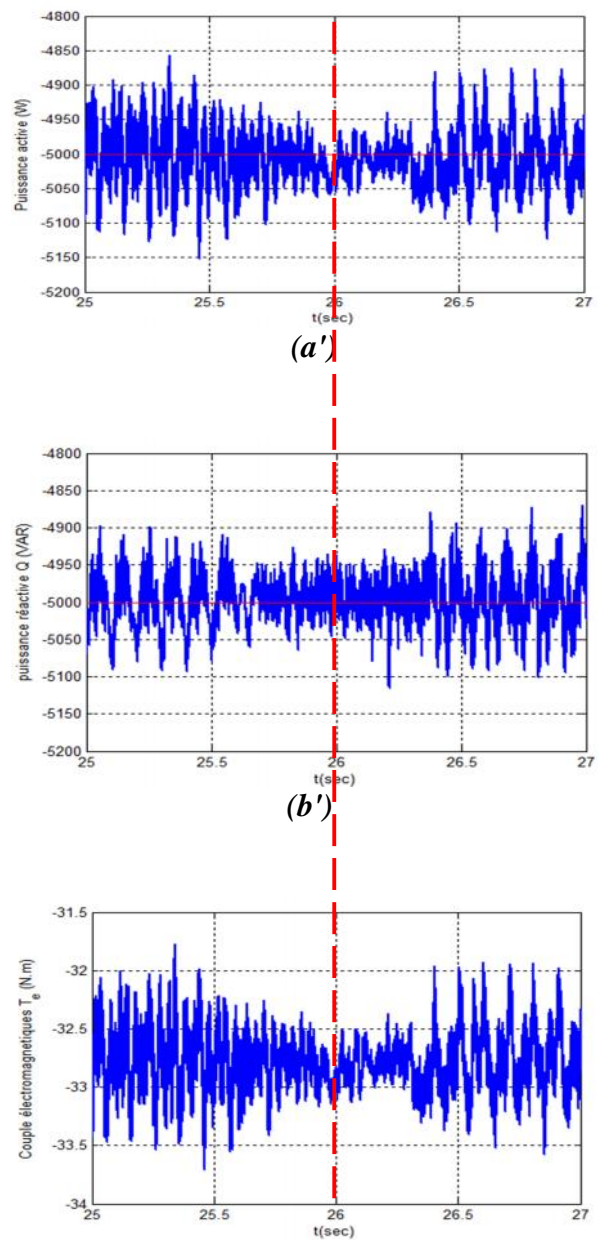


Figure IV.29 : Evolution des paramètres (a) : $P(W)$, (b) : $Q(VAR)$, (c) : $T_{em}(N.m)$ à $t=26s$ avec régulateur IP

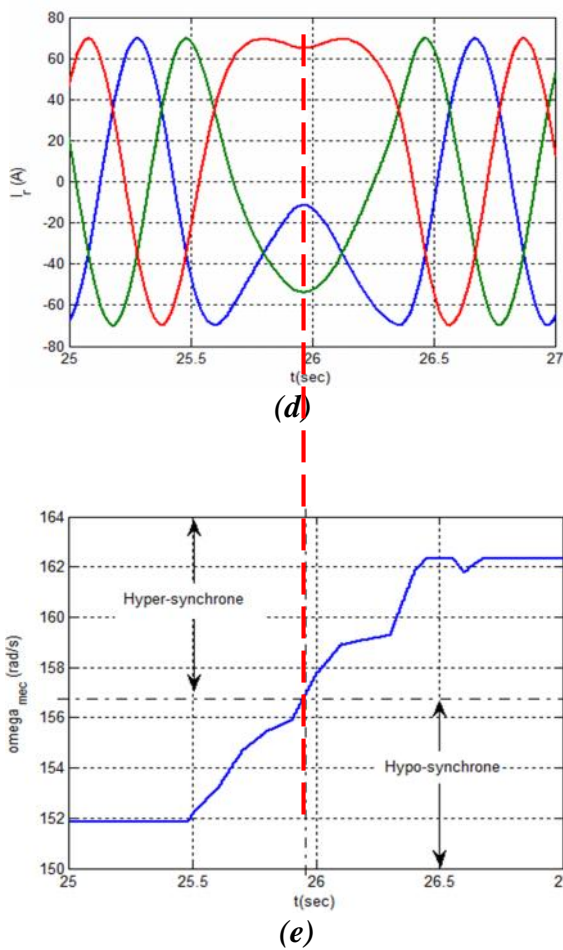


Figure IV.30 : Evolution des paramètres (a) : $P(W)$, (b) : $Q(VAR)$, (c) : $T_{em}(N.m)$ à $t=25,96s$ avec régulateur PI

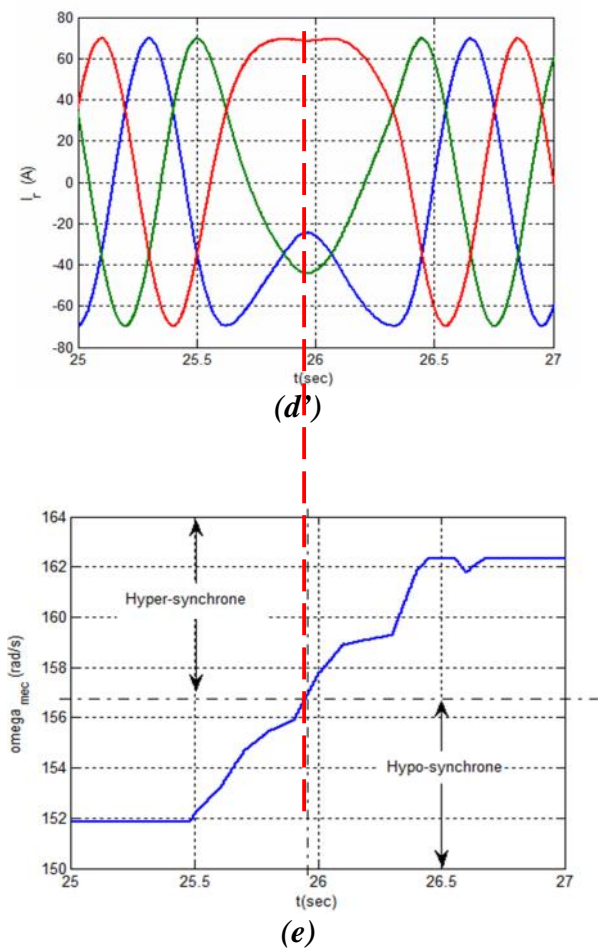


Figure IV.31 : Evolution des paramètres (d') : I_r (A) à $t=25,96s$ avec régulateur IP

L'évolution de la puissance active et réactive utilisant le régulateur PI présente des signaux moins perturbés que ceux employés avec le régulateur IP.

Pour ce qui de l'évolution du couple électromagnétique avec le régulateur PI, il nous donne un signal moins perturbé que celui donné par le régulateur IP

Chapitre IV : Etude des performances du Modèle combiné Turbine et Machine Asynchrone à Double Alimentation « MADA »

Les courants rotoriques évoluent de la même façon, cependant l'évolution des deux phases (verte et bleu) atteignent des valeurs différentes pour les deux régulateurs mais revienne à un même régime établi (hypersynchrone), ses remarques sont confirmé par le comportement de l'évolution de la vitesse mécanique.

IV.6 Conclusion :

A travers la simulation de notre model, nous avons pu mettre en évidence la transition dans les deux sens du passage de mode de fonctionnement de la génératrice asynchrone à double alimentation, hypo synchrone vers l'hyper synchrone et inversement en se basant principalement sur l'évolution de la vitesse mécanique de l'éolienne par apport à la vitesse de synchronisme de la MADA.

Ces résultats se sont réconfortés par l'obtention des caractéristiques des courants rotorique qui mettent bien en évidence la variation du glissement définissant ainsi le mode de fonctionnement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Lors de notre étude, nous avons modélisé le système global de génération d'électricité à partir d'une éolienne. Celle-ci a été suivie d'une commande adaptée en vue d'atteindre les meilleures performances.

Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

Dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art ainsi que le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs constitutions et leurs différentes topologies. Après quoi, on a présenté leurs avantages et inconvénients. En fin de ce chapitre, on a présenté les différents types des machines employées dans les éoliennes ainsi que la description de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans le second chapitre, nous avons cherché à valider le modèle de la turbine, pour cela nous avons établi sa modélisation suivie par une série de simulation que ce soit avec ou sans asservissement de vitesse où deux cas d'études ont été traité : « 1. vitesse du vent constant, 2. Vitesse du vent variable ». la série de simulation établie ont aboutit à des résultats souhaités mettant concrètement en valeur la liaison entre la vitesse du vent, la puissance et la vitesse mécanique.

Dans le troisième chapitre, on a cherché à valider le modèle de la MADA, et cela en effectuant deux série de simulation, la première avait pour but de valider le model de la MADA avec une commande coté machine CCM, et le seconde était consacré à validé le modèle coté réseau CCR en prenant en charge l'aspect régulation

Conclusion Générale

de la vitesse. Que ce soit pour la commande CCM ou CCR, les résultats de simulation ont été conformes à nos attentes.

La quatrième chapitre à traiter la simulation du model complet d'une éolienne intégrant : « la turbine à la MADA et le multiplicateur ». en se basant sur les deux chapitres précédent, le modèle global de notre système a été développé suite à quoi une série de simulation a été établie : « P, Q, T_e , I_r , ω_m ». le passage du mode hyposynchrone vers le mode hypersynchrone a été bien mis en évidence ou cette transition a été marquée par l'absence de phénomènes transitoire brusque. La variation des courants rotorique ont constitué la preuve de cette transition considérée comme douce.

Comme perspective en effectuer les mêmes simulations du modèle complet en mode discret pour effectuer des commandes robustes et d'éventuelle implémentation.

Le travail effectué dans le cadre de notre mémoire de master peut être un début de piste pour des travaux avenir pouvant contribuer à son amélioration, à savoir :

- Prise en charge de l'angle de calage de la turbine à travers un asservissement (pitch contrôle) pour avoir à la fois une énergie maximal pour des vents faibles et au contraire un minimum d'énergie pour des vents important.
- Intégrer de nouvelles techniques de commande robuste de la vitesse
- Intégrer de nouveaux types de régulateurs
- Prise en charge des conditions d'interconnexion au réseau
Intégration de cette éolienne comme deuxième source pour l'alimentation d'une charge non linéaire en intégrant un système d'aiguillage

Annexes

Annexe A

A.1 Identification des régulateurs:

Les régulateur classique permet de contrôler la précision et la rapidité des systèmes asservis, ils sont le prisés dans l'industrie. Nous avons travaillé avec deux régulateur, Régulateur Proportionnelle-Intégral PI et régulateur Intégral- Proportionnelle IP.

A.2 Régulateur de vitesse de la turbine:

A.2.1 Régulateur PI :

Notre système est corrigé par un régulateur de type proportionnel intégral (PI) dont la fonction de transfert est de la forme $\left[K_p + \frac{K_i}{S} \right]$. La figure II.11 montre l'asservissement de la vitesse Ω_{m-ref} en boucle fermé

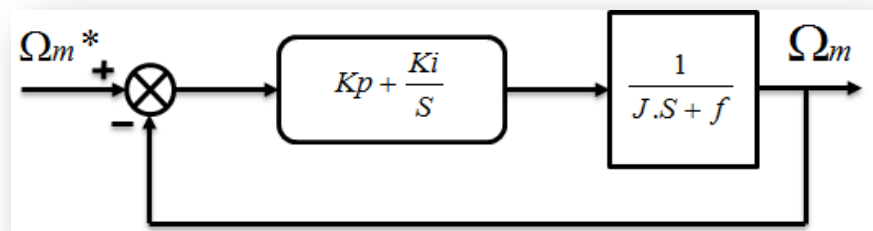


Figure A.1 : Système à régulé par PI

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = \frac{K_p.S + K_i}{S} \cdot \frac{1}{J.S + f} \quad (A.1)$$

Annexes

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par la formule suivante :

$$FTBO = \frac{\frac{K_p.S + K_i}{J}}{S^2 + \frac{K_p + f}{J}.S + \frac{K_i}{J}} \quad (A. 2)$$

Sachant que la pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont donnés par :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{J} \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \quad (A. 4)$$

et :

$$\xi = \frac{K_p + f}{2.\omega_n.J} \quad (A. 5)$$

Donc les paramètres du régulateur deviennent alors :

$$K_p = 2.\xi.\omega_n.J - f \quad K_i = J.\omega_n^2 \quad (A. 6)$$

Annexe B

B.1 Régulation de puissance :

Le schéma bloc de régulation de puissance active et réactive avec un régulateur PI représente par la figure B.1.

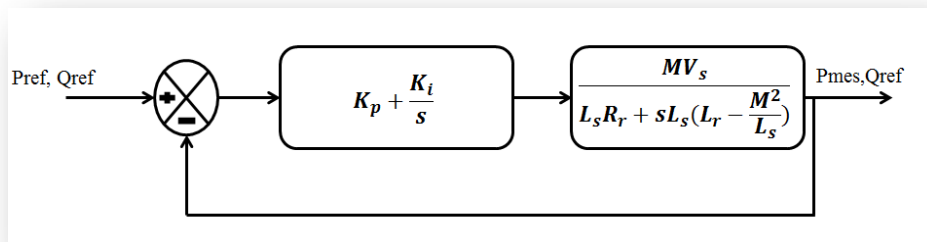


Figure B.1 : Schéma d'un Régulateur PI de puissance

La fonction de transfère en boucle ouvert est :

$$FTBO = \frac{MV_s(K_p s + K_i)}{s[L_s R_r + sL_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})]} \quad (B.1)$$

La fonction de transfère en boucle fermé est donner par:

$$FTBF = \frac{(K_p s + K_i)MV_s}{sL_s R_r + s^2 L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s}) + MV_s(K_p s + K_i)} \quad (B.2)$$

$$FTBF = \frac{(K_p s + K_i)MV_s}{s^2 L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s}) + s(L_s R_r + MV_s K_p) + MV_s K_i} \quad (B.3)$$

$$FTBF = \frac{\frac{(K_p s + K_i) M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{s^2 + \frac{s(L_s R_r + M V_s K_p)}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} + \frac{M V_s K_i}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (B.4)$$

On a l'équation :

$$FT = \frac{K w_n^2}{s^2 + 2\varepsilon w_n s + w_n^2} \quad (B.5)$$

Par identification de l'équation (B.5) avec l'équation (B.4) on obtienne:

$$2\varepsilon w_n = \frac{(L_s R_r + M V_s K_p)}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \Rightarrow 2\varepsilon w_n \cdot L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) = (L_s R_r + M V_s K_p) \quad (B.6)$$

$$K_p = \frac{2\varepsilon w_n \cdot L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) - L_s R_r}{M V_s} \quad (B.7)$$

$$w_n^2 = \frac{M V_s K_i}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (B.8)$$

$$K_i = \frac{w_n^2 \cdot L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (B.9)$$

B.2 Régulation de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondant. La dynamique de vitesse est donnée par l'équation mécanique suivant :

$$\begin{aligned} C_{em} - C_r &= J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \Rightarrow C_{em} - C_r = J \cdot \Omega s + f \cdot \Omega \\ &\Rightarrow C_{em} - C_r = (Js + f) \Omega \\ &\Rightarrow \Omega = \frac{C_{em} - C_r}{(Js + f)} = \frac{C_{ref} - w}{(Js + f)} = \frac{w}{p} \\ \frac{w}{C_{ref}} &= \frac{p}{Js + f} \end{aligned} \quad (B.10)$$

La régulation de vitesse avec régulateur PI est représentée par la figure B.2.

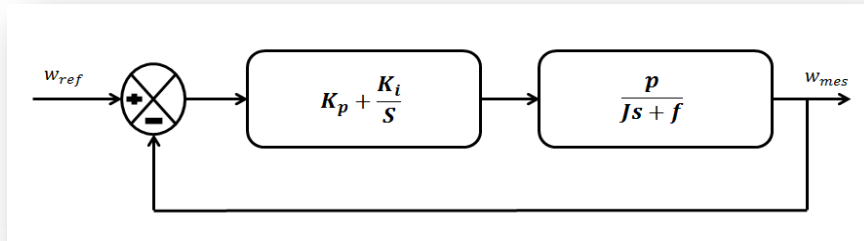


Figure B.2 : Schémas d'un régulateur PI de vitesse.

La fonction de transfère en boucle ouvert est :

$$FTBO = \frac{(sk_p + k_i)p}{s(JS + f)} \quad (B.11)$$

La fonction de transfère en boucle fermé est donnée par :

$$FTBF = \frac{(sk_p + k_i)p}{s(JS + f) + (sk_p + k_i)p} \quad (B.12)$$

$$FTBF = \frac{(sk_p + k_i)p}{Js^2 + s(f + pK_p) + k_i p} \quad (B.12)$$

$$FTBF = \frac{\frac{(sk_p + k_i)p}{J}}{s^2 + \frac{s(f + pK_p)}{J} + \frac{k_i p}{J}} \quad (B.13)$$

Par identification de l'équation B.5 avec l'équation B.13 nous obtenons :

$$2\varepsilon\omega_n = \frac{(f + pK_p)}{J} \Rightarrow K_p = \frac{2\varepsilon\omega_n J - f}{p} \quad (B.14)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k_i p}{J} \Rightarrow k_i = \frac{\omega_n^2 J}{p} \quad (B.15)$$

B.3 Régulation de la tension du bus continue U_{ds} :

La régulation des transites de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation, permet de maintenir une tension constante du bus continue, avec deux types de correcteur PI et IP générant la référence de la tension a injecté dans le condensateur C.

Il est à noter que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe de régulation

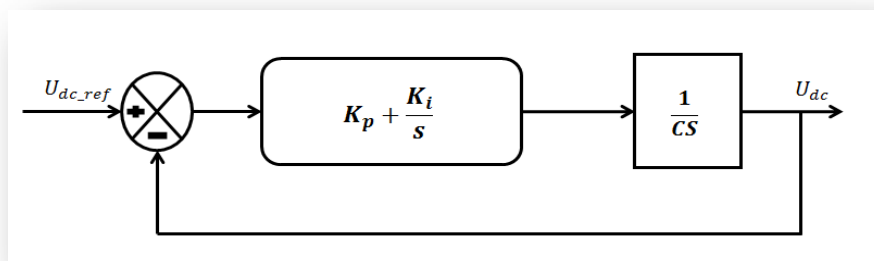


Figure. B.3 : Commande en boucle fermée de la tension Du bus continu avec régulateur PI

La fonction de Transfer en boucle ouvert est comme suit :

$$FTBO = \frac{Kp.S + Ki}{C.S^2} \quad (B.16)$$

La fonction de Transfer en boucle fermé est comme suit :

$$T(S) = FTBF = \frac{Kp.S + Ki}{C.S^2 + Kp.S + Ki} \quad (B.17)$$

On divise le dénominateur et le numérateur de l'équation B.17 par C est en trouve:

$$T(S) = \frac{\left(\frac{Kp \cdot S + Ki}{C} \right)}{S^2 + \frac{Kp}{C} \cdot S + \frac{Ki}{C}} \quad (B.17)$$

Après identification du dénominateur de l'équation (B.5) avec celui de la fonction de transfert du second ordre utilisé précédemment, nous obtenons :

$$2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{Kp}{C} \qquad \omega_n^2 = \frac{Ki}{C}$$

Donc :

$$Kp = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot C \qquad Ki = \omega_n^2 \cdot C$$

B.4 Régulation de puissance :

Le schéma fonctionnel du système de contrôle avec régulateur IP est donné par la figure (B.19)

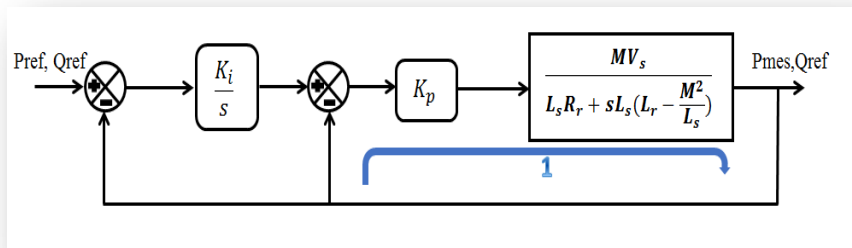


Figure B.4: Schémas d'un régulateur IP de puissance.

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$FTBO = \frac{Kp MV_s}{L_s R_r + s L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (B.20)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF1 = \frac{Kp MV_s}{Kp MV_s + L_s R_r + s L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (B.21)$$

$$FTBF = \frac{Ki Kp MV_s}{s \left[Kp MV_s + L_s R_r + s L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \right] + Ki Kp MV_s} \quad (B.22)$$

$$FTBF = \frac{K_i K_p M V_s}{s^2 L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) + s (K_p M V_s + L_s R_r) + K_i K_p M V_s} \quad (B.23)$$

$$FTBF = \frac{\frac{K_i K_p M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{s^2 + s \frac{K_p M V_s + L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} + \frac{K_i K_p M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad (B.24)$$

Par identification de l'équation (B.25) avec (B.26) en obtiennes :

$$2\varepsilon w_n = \frac{K_p M V_s + L_s R_r}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \Rightarrow K_p = \frac{2\varepsilon w_n L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) - L_s R_r}{M V_s} \quad (B.27)$$

$$w_n^2 = \frac{K_i K_p M V_s}{L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (B.28)$$

$$K_i = \frac{w_n^2 L_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{K_p M V_s} \quad (B.29)$$

B.5 Régulation de vitesse :

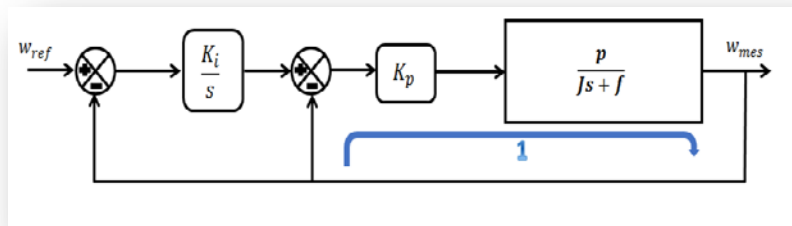


Figure B.5: Schémas d'un régulateur IP de vitesse

De la même façon précédemment, les fonctions de transfère sera comme suite :

$$FTBO1 = \frac{K_p p}{J s + f} \quad (B.30)$$

$$FTBF1 = \frac{K_p p}{(J s + f) + K_p p} \quad (B.31)$$

$$FTBO = \frac{p K_p K_i}{s [(J s + f) + K_p p]} \quad (B.32)$$

$$FTBF = \frac{p K_p K_i}{s [(J s + f) + K_p p] + p K_p K_i} \quad (B.33)$$

$$\Rightarrow FTBF = \frac{pK_p K_i}{Js^2 + s(f + K_p p) + pK_p K_i} \quad (B.34)$$

$$= \frac{\frac{pK_p K_i}{J}}{s^2 + \frac{s(f + K_p p)}{J} + \frac{pK_p K_i}{J}} \quad (B.35)$$

L'identification de l'équation (B.5) avec (B.35) donne:

$$2\varepsilon w_n = \frac{(f + K_p p)}{J} \Rightarrow 2\varepsilon w_n J - f = K_p p \quad (B.36)$$

$$\Rightarrow K_p = \frac{2\varepsilon w_n J - f}{p} \quad (B.37)$$

$$w_n^2 = \frac{pK_p K_i}{J} \Rightarrow K_i = \frac{w_n^2 J}{pK_p} \quad (B.38)$$

B.6 Régulation de la tension du bus continue U_{ds} :

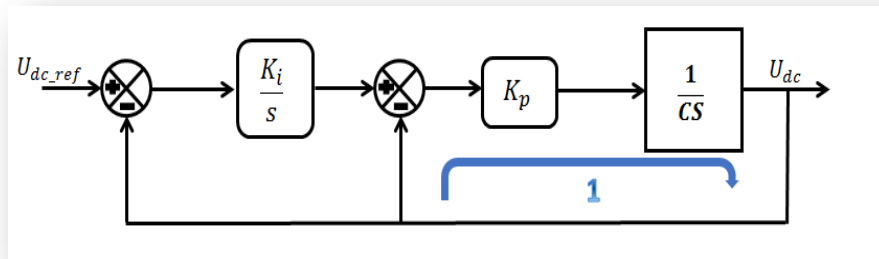


Figure B.6: Commande en boucle fermée de la tension du bus continu avec régulateur IP

La fonction de Transfer 1 en boucle ouvert du K_p est comme suit :

$$FTBO1 = \frac{K_p}{C.S} \quad (B.39)$$

La fonction de Transfer 1 en boucle fermé est comme suit :

$$T1(S) = FTBF1 = \frac{K_p}{C.S + K_p} \quad (B.40)$$

La fonction de transfert générale en boucle ouverte est comme suit :

$$T(S) = FTBO = \frac{Kp.Ki}{CS^2 + Kp.S} \quad (B.41)$$

La fonction de transfert en boucle fermé est :

$$T(S) = FTBF = \frac{\left(\frac{Kp.Ki}{C}\right)}{S^2 + \frac{Kp}{C}.S + \frac{Kp.Ki}{C}} \quad (B.42)$$

Après identification du dénominateur de l'équation (B.42) avec celui de la fonction de transfert du second ordre utilisé précédemment, nous obtenons :

$$2.\xi.\omega_n = \frac{Kp}{C} \qquad \omega_n^2 = \frac{Kp.Ki}{C}$$

Donc :

$$Kp = 2.\xi.\omega_n.C \qquad Ki = \frac{\omega_n^2.C}{Kp}$$

Annexe C

Paramètres de Simulation

TURBINE	<i>Vitesse du vent</i>	V_v	4,5 m/s
	<i>Angle de calage</i>	B	2°
	<i>Densité de l'ar</i>	ρ	1.25
	<i>Gain du multiplicateur</i>	G	15
	<i>Rayon des pales</i>	R	4
	<i>Inertie globale</i>	J	1.63
	<i>Inertie de la turbine</i>	J_t	315
	<i>Inertie de l'arbre mécanique</i>	J_m	0.2
	<i>Coefficient de frottement visqueux</i>	f_v	0.0024
	<i>Le coefficient d'amortissement</i>	ζ	0.7
	<i>Coefficients du régulateur</i>	K_p	210,75
K_i		42812	

M.A.D.A	<i>Tension du réseau</i>	v_s	230
	<i>Puissance de la MADA</i>	P_n	5 Kw
	<i>Fréquence du réseau</i>	f_n	50
	<i>Nombre de pair de pôle</i>	p	2
	<i>Résistances statorique</i>	R_s	0.445 Ω
	<i>Résistances rotorique</i>	R_r	0.17 Ω
	<i>Inductance statorique</i>	L_s	0.0696H
	<i>Inductance rotorique</i>	L_r	0.0219H
	<i>Inductance mutuelle</i>	m	0,03402 H
	<i>Inertie de l'arbre de la MADA</i>	J	0,04125
	<i>Coefficient de frottement de la MADA</i>	f	6,93 .10 ⁻³
	<i>Le coefficient d'amortissement</i>	ζ	0.707

Résumé

Résumé

A travers notre mémoire, nous nous sommes penchés sur l'étude et simulation d'une éolienne (Turbine + MADA) à vitesse variable suivant les deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone. Pour ce faire, dans un premier temps on a modélisé chacune des parties mécaniques et électriques (Turbine, Arbre mécanique, Multiplicateur, Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)), suit à quoi on a validé les deux modèles que nous avons ensuite associés.

Afin d'extraire le maximum de puissance éolienne (MPPT) et d'avoir le meilleur rendement possible, deux algorithmes de commandes ont été établis (avec et sans asservissement de la vitesse de rotation) où un seul type de régulateur a été utilisé (PI).

Ainsi une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la MADA en mode continu a été élaborée.

Une série de simulations nous ont permis de vérifier l'adéquation avec la théorie où les tests et analyses du dispositif en terme de suivi de consigne, rejet de perturbation et de robustesse, ont été validés. Ce qui nous a permis d'atteindre les objectifs de cette étude.

Mots clés :

Energie renouvelable, Machine Asynchrone à Double Alimentation, éolienne, modélisation, mode hyper-synchrone et hypo-synchrone, reg PI et reg IP, MPPT, commande vectorielle.

ملخص

من خلال هذه المذكرة, تطرقنا لدراسة الهوائيات ذات سرعة متغيرة (توربينه + المولد اللاتزامني) ولهذا قمنا في اول الامر في تحقيق نجاعة لكلى النموذجين الكهربائي و الميكانيكي (المولد الا تزامني ثنائي التغذية و التوربين و المحور والمضاعف) وذلك عبر تطوير برنامج باستعمال MATLAB بهدف استخراج اكبر قدر ممكن من الطاقة و الحصول على أفضل أداء حيث تم تطوير خوارزمية « MPPT » و ذلك باستخدام نوع من المنظمات « PI » كذلك قمنا باستعمال تقنية التحكم الشعاعي للطاقة الفعالة والارتكاسية للجزء الثابت للمولد (stator) ولتحقيق هذا التحكم استخدمنا نوعين من المنظمات « PI و IP » أختتمت هذه الدراسة بمحاكاة أين تم التحليل و المقارنة بهدف إيجاد النظام المناسب لأداء أفضل

الكلمات المفتاحية

الطاقة المتجددة، الماكنة اللامتزامنة ثنائية التغذية، استخراج اكبر قدر ممكن من الطاقة، التحكم الشعاعي، التوربينات الريحية، نموذج، فرط متزامن، هيبو متزامن.

Abstract

Through our memory, we are look at the study and simulation of a turbine (Turbine + MADA) speed variable depending on the two modes of operation hypo and hyper-synchronous to do this, initially was modeled each of the mechanical and electrical parts (Turbine, mechanical shaft, multiplier, Asynchronous Machine to Double Feed (AMDF)), following what the two were validated model that we then associated.

To extract the maximum wind power (MPPT) and have the best possible performance, two algorithms of orders established (with and without enslavement of the rotational speed) where one type of regulator is used (PI).

A series of simulation have enabled us to check the adequacy with the theory where the tests and analyses of the device in terms of follow-up to set point, rejection of disturbance and robustness, have been validated. What has enabled us to achieve the objectives of this study.

Key words:

Renewable energy, Doubly-fed induction machine, wind turbine, modeling, hype-synchronous and hypo-synchronous, Reg PI and Reg IP, MPPT, control vector.