

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En Electrotechnique

Spécialité Commandes électriques

Par ADDOUN AFAFE

et ATTIA SEFIA

Sujet

**Conception d'un émulateur de vent dédié à un banc
d'essai expérimental**

Soutenu publiquement, le 07 / 07 / 2021, devant le jury composé de :

S-M. MELIANI	Professeur	U.A.B.-Tlemcen	Président
A. MECHERNENE	Maitre de Conférence	U.A.B.-Tlemcen	Encadrant
M. LOUCIF	Maitre de Conférence	U.A.B.-Tlemcen	Co- Encadrant
M-A BRIKCI NIGASSA	Maitre-Assistant	U.A.B.-Tlemcen	Examineur

Dedicaces 1

Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous avons achevé ce modeste travail que je dédie :

- A mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie ;
- A ma mère, le bijou de ma vie pour son amour, son soutien, tous les sacrifices, et que sa présence me donne la confiance dans ma vie ;
- A ma chère sœur Dalale pour son appui et son encouragement ;
- A mes très chers frères Youcef et Abdelouahed ;
- A mes très chères amies dans ma vie : Safia et Mériem ;
- Enfin à toute la promotion Electrotechnique, option Commande électrique de l'année 2020-2021.

Afafe Addoun
Tlemcen, le 07 Juillet 2021

Dedicaces 2

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers respectueux et magnifiques parents qui ont soutenus tout au long de ma vie.

- A ma sœur Nour El Houda et mes très chères frères Abde Al Hak et Abde Al Ali pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral, ainsi à toute ma famille, et en particulier à mon binôme et meilleur amie ADDOUN AFAFE ;
- A tous mes amis de promotion de 2^{ème} année Master CE en électrotechnique ;
- A toute personnes qui m'ont encouragé ou aidé au long de mes études ;
- Ceci sans oublier mes professeurs auxquels je rends un vibrant hommage pour la science et le savoir prodigués tout au long de mon cursus universitaire. Ce qui m'a permis de réaliser ce mémoire duquel ils tireront toute leur fierté et qui j'espère sera à la hauteur de leurs espérances ;

ATTIA SEFIA
Tlemcen, le 07 Juillet 2021

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à nos encadrants, les Docteurs Abdelkader MECHERNENE et Mourad LOUCIF, tout deux Maitre de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour nous avoir proposé et dirigé ce travail, nous les remercions pour nous avoir fait profité de leur expérience, pour orientations qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait monsieur Sidi Mohamed MELIANI, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaïd, pour avoir accepté de présider et de nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire ; qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Enfin, nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à Mr BRIKCI NIGASSA Mohammed Amine, Maitre de Conférences à l'Université Abou Bekr Belkaïd, nous le remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire et pour ses observations et remarques pertinentes et constructives.

Nous remercions également le Docteur Hichem BETAOUAF, chef du département de Génie Électrique et Électronique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour sa coopération et sa gentillesse, ainsi que l'ensemble des enseignants du département pour leur dévouement.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

ADDOUN AFAFE ATTIA SEFIA
Tlemcen, le 07 Juillet 2021

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	xii
GLOSSAIRE	xvi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I CARACTÉRISTIQUES DU VENT ET SYSTÈMES ÉOLIENS	3
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES DU VENT	4
I.2.1 Définition du vent	4
I.2.2 Variabilité du vent (temporelle, spatiale)	4
I.2.2-a Variabilité temporelle	4
I.2.2-b Variabilité spatiale	4
I.2.3 Intermittence du vent	4
I.2.4 Distribution de Weibull	5
I.2.5 Distribution de Rayleigh	6
I.2.6 Puissance moyenne et la densité de puissance	6
I.2.7 Variation de vitesse du vent en fonction de la hauteur	6
I.3 TECHNOLOGIES DES SYSTÈMES ÉOLIENS	7
I.3.1 Définition et principe de la conversion	7
I.3.2 Principaux composants d'une éolienne	8
I.3.3 Différents types d'éoliennes	9
I.3.3-a Eoliennes à axe vertical	9
I.3.3-b Eoliennes à axe horizontal	10
I.3.4 Action du vent sur les pales d'une éolienne à axe horizontal	11
I.3.4-a Vitesses angulaire et tangentielle du rotor	11
I.3.4-b Vitesse spécifique	12
I.3.4-c Forces de portance et de trainée	12
I.3.4-d Finesse du profile	13
I.3.4-e Angle d'attaque des pales	14
I.4 PRINCIPE DE LA CONVERSION CINÉTIQUE DU VENT	14

I.4.1	Etude aérodynamique d'une turbine éolienne	14
I.4.1-a	Energie cinétique du vent	14
I.4.1-b	Puissance théoriquement récupérable	15
I.4.1-c	Limite de Betz	15
I.4.1-d	Courbe de puissance d'une éolienne	16
I.4.1-e	Coefficient de puissance d'une turbine éolienne	16
I.4.2	Couple mécanique produit par la turbine éolienne	17
I.4.3	Puissance mécanique à l'entrée de la génératrice	17
I.4.4	Rendement de la conversion	18
I.4.5	Système de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	18
I.4.5-a	Système d'orientation des pales "Pitch Control"	18
I.4.5-b	Système à décrochage aérodynamique "Stall Control"	19
I.4.6	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	19
I.5	GÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES MIS EN OUVRE DANS LES SYSTÈMES ÉOLIENS À VITESSE VARIABLE	20
I.5.1	Avantages des éoliennes fonctionnant à vitesse variable	20
I.5.2	Système utilisant la machine asynchrone à cage (MAS)	20
I.5.3	Système utilisant la machine asynchrone à double alimentation (MADA)	20
I.5.4	Système utilisant la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)	21
I.5.5	Système utilisant la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	22
I.5.6	Machine à réluctance variable (MRV)	22
I.6	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	23
I.6.1	Avantages	23
I.6.2	Inconvénients	23
I.7	CONCLUSION	23
II	MODÉLISATION ET COMMANDE DU MOTEUR À COURANT CONTINU	24
II.1	INTRODUCTION	25
II.2	PRINCIPE ET CONSTITUTION DES MOTEURS À COURANT CONTINU	25
II.2.1	Principe de fonctionnement	25
II.2.2	Constitution du moteur à courant continu	26
II.2.3	Différentes méthodes d'excitation	28
II.2.4	Avantages et inconvénients du moteur à courant continu	29
II.3	MOTEUR À COURANT CONTINU À EXCITATION SÉPARÉE	29
II.3.1	Equations de fonctionnement en régime permanent	29
II.3.2	Caractéristiques électromécaniques et mécanique	30
II.3.3	Bilan des puissances et rendement	32
II.3.4	Principe de la variation de vitesse	33
II.3.5	Modélisation dynamique du moteur à excitation séparée	33
II.4	IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MOTEUR À COURANT CONTINU	34
II.4.1	Identification des paramètres électriques	34
II.4.1-a	Mesure des résistances d'induit et d'inducteur	35
II.4.1-b	Mesure des inductances d'induit et d'inducteur	35
II.4.1-c	Détermination de la constante de la f.c.e.m et de couple	36
II.4.2	Détermination des paramètres mécaniques	37

II.4.2-a	Détermination du coefficient de frottement	37
II.4.2-b	Détermination du moment d'inertie par l'essai du ralentissement	38
II.4.3	Validation expérimentale du modèle dynamique et des paramètres	38
II.4.3-a	détermination des paramètres électriques	38
II.4.3-b	détermination des paramètres mécaniques	40
II.4.3-c	Simulation du moteur à courant continu à excitation séparée	42
II.5	CONVERTISSEURS À BASE DE HACHEURS POUR MOTEURS À COURANT CONTINU	45
II.5.1	Hacheur série	45
II.5.2	Hacheur réversible en courant	46
II.5.3	Hacheur réversible en tension	47
II.5.4	Hacheur réversible en courant et en tension	48
II.5.5	Technique de commande à MLI	50
II.5.5-a	Principe de la commande MLI	50
II.6	COMMANDE DU MOTEUR À EXCITATION SÉPARÉE	50
II.6.1	Commande PI en régulation de vitesse	50
II.6.2	Structure d'un régulateur PI	51
II.6.3	Calcul de régulateurs de système	51
II.6.3-a	Régulateur de courant	51
II.6.3-b	Régulateur de vitesse	52
II.6.4	Simulation du MCC avec régulation	54
II.7	CONCLUSION	55
III	MODÉLISATION DE LA TURBINE ÉOLIENNE	56
III.1	INTRODUCTION	57
III.2	MODÉLISATION DU VITESSE DE VENT	57
III.3	MODÉLISATION DYNAMIQUE DE LA TURBINE ÉOLIENNE	57
III.3.1	Aérodynamique	57
III.3.2	Modèle dynamique	59
III.3.3	Modélisation de multiplicateur	60
III.3.4	Modélisation de l'arbre mécanique	60
III.4	RÉSULTATS DE SIMULATIONS	61
III.5	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	64
III.6	DIFFÉRENTS TYPES DE MPPT POUR LES APPLICATIONS ÉOLIENNES	65
III.6.1	Maximisation MPPT sans la connaissance de la courbe C_p	65
III.6.2	Maximisation MPPT avec la connaissance de la courbe C_p	65
III.6.3	Maximisation MPPT sans asservissement de la vitesse	65
III.6.4	Maximisation MPPT avec asservissement de la vitesse	67
III.7	COMMANDE DE L'ANGLE DE CALAGE	68
III.8	CONCLUSION	68
IV	ÉTUDE D'UN ÉMULATEUR À BASE DE MCC	69
IV.1	INTRODUCTION	70
IV.2	CONSTRUCTION DE L'ÉMULATEUR	70

IV.3 MODÉLISATION DE L'ÉMULATEUR SANS ASSERVISSEMENT DE VITESSE . . .	70
IV.4 RÉSULTATS DE SIMULATION SANS MPPT	70
IV.4.1 Interprétation des résultats	72
IV.5 MODÉLISATION DE L'ÉMULATEUR PAR COMMANDE MPPT AVEC ASSER- VISSEMENT DE VITESSE	72
IV.5.1 Commande MPPT avec asservissement de vitesse	72
IV.5.1-a Calcul de régulateur PI à avance de phase	72
IV.6 RÉSULTATS DE SIMULATIONS AVEC MPPT	73
IV.6.1 Interprétation des résultats	75
IV.7 CONCLUSION	75
 CONCLUSION GÉNÉRALE	 76
 BIBLIOGRAPHIE	 80
 ANNEXE A : SCHÉMAS BLOCS DE SIMULATION DANS L'ENVIRONNEMENT MATLAB/ SIMULINK	 1
 ANNEXE B : IDENTIFICATION DU MOTEUR À COURANT CONTINU	 5
 ANNEXE C :SYSTÈME DSPACE1104	 8

TABLE DES FIGURES

I.1	Distribution de Weibull	5
I.2	Distribution de Rayleigh	6
I.3	Valeurs de l'exposant α selon la nature de terrain	7
I.4	Principe de la conversion de l'énergie	7
I.5	Principales composants d'une éolienne	8
I.6	Composants d'une nacelle	9
I.7	Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)	10
I.8	Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)	10
I.9	Aérogénérateur à axe horizontal	11
I.10	Portance et trainée sur le profil d'une pale d'éolienne	12
I.11	Angle d'attaque des pales	14
I.12	Limite de Betz	15
I.13	Courbe de puissance d'une éolienne	16
I.14	Coefficient de puissance	17
I.15	Puissance mécanique en fonction de la vitesse de vent	18
I.16	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	19
I.17	Eolienne à vitesse variable utilise la MAS	20
I.18	Système éolien à vitesse variable à basse da MADA	21
I.19	Configurations des systèmes éoliens basés sur la MSRB	21
I.20	Eolienne à vitesse variable basée sur la MSAP	22
I.21	Eolienne à vitesse variable basée sur la MRV	22
II.1	Champs magnétiques créés dans un moteur à courant continu	25
II.2	Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu	26
II.3	Constitution du moteur à courant continu	26
II.4	L'inducteur du moteur	27
II.5	Rotor du moteur à courant continu	27
II.6	Collecteur	27
II.7	Balais du moteur à courant continu	28
II.8	Schéma du moteur à excitation série	28
II.9	Schéma du moteur à excitation séparée	28
II.10	Schéma du moteur à excitation shunt	29
II.11	Schéma du moteur à excitation composé	29
II.12	Caractéristique électromécanique de vitesse en fonction de courant	31
II.13	Caractéristique électromécanique du couple en fonction de courant d'induit	31
II.14	Caractéristique mécanique du couple en fonction de vitesse	32
II.15	Bilan des puissances du moteur à courant continu	32

II.16 Schéma dynamique du moteur à excitation séparée	33
II.17 Détermination de résistance de l'induit R_a	35
II.18 Détermination de résistance de l'inducteur R_f	35
II.19 Détermination de l'inductance de l'induit L_a	36
II.20 Détermination de l'inductance de l'inducteur L_f	36
II.21 Détermination de la constante de la f.c.e.m K_e	36
II.22 Caractéristiques de couple électromagnétique	37
II.23 Détermination de coeficient de frottement f	37
II.24 Caractéristiques de tension d'induit du moteur à vide	40
II.25 Caractéristiques du couple électromagnétique du moteur à vide	41
II.26 Caractéristiques de la vitesse de rotation de ralentissement	41
II.27 Vitesse de rotation du MCC à vide	42
II.28 Courant d'induit du moteur à vide	43
II.29 Couple électromagnétique du MCC à vide	43
II.30 Vitesse de rotation du MCC en charge	44
II.31 Courant d'induit du moteur en charge	44
II.32 Couple électromagnétique du MCC en charge	44
II.33 Convertisseur continu-continu (hacheur)	45
II.34 Schéma fonctionnelle de hacheur série	45
II.35 Interrupteur réversible en courant	46
II.36 Schéma fonctionnelle du hacheur réversible en courant	47
II.37 Hacheur réversible en tension	48
II.38 Hacheur réversible en courant et en tension	48
II.39 Schéma de fonctionnement à quatre quadrants	49
II.40 Réalisation de signal MLI	50
II.41 Structure du régulateur de vitesse PI	51
II.42 Vitesse de rotation du moteur seul	53
II.43 Vitesse de rotation du MCC avec régulation	54
II.44 Courant d'induit du MCC avec régulation	54
II.45 Couple électromagnétique du MCC avec régulation	54
III.1 Schéma de la turbine éolienne	58
III.2 Vitesse du vent V et la vitesse triangulaire $\Omega_T R$	58
III.3 Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide	59
III.4 Schéma bloc de la turbine éolienne	60
III.5 Caractéristique de coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative	61
III.6 Vitesse du vent	61
III.7 Puissance mécanique de la turbine éolienne	61
III.8 Zoom 1 sur la puissance de la turbine	62
III.9 Zoom 2 sur la puissance de la turbine	62
III.10 Zoom 3 sur la puissance de la turbine	62
III.11 Vitesse de la turbine	63
III.12 Couple de la turbine	63
III.13 Vitesse mécanique à la sortie de l'arbre	63
III.14 Couple mécanique	64

III.15	Couple électromagnétique	64
III.16	MPPT sans asservissement de la vitesse	66
III.17	MPPT avec asservissement de la vitesse	67
III.18	Schéma bloc pour la régulation de l'angle de calage	68
IV.1	Schéma du système d'un émulateur à base d'un MCC	70
IV.2	Vitesse de référence et vitesse de la MCC	71
IV.3	Courant d'induit de la MCC	71
IV.4	Couple électromagnétique de MCC	71
IV.5	Correcteur PI a avance de phase	72
IV.6	Vitesse de rotation de la turbine	73
IV.7	Vitesse mécanique à la sortie de l'arbre	73
IV.8	Vitesse de rotation du motor	74
IV.9	Vitesse de référence et vitesse msurée de la MCC	74
IV.10	Courant rotorique I_a	74
IV.11	Couple m'ecanique de la MCC	75
12	Schéma bloc du moteur à excitation séparée fonctionner à vide	1
13	Bloc de simulation du moteur à excitation séparée fonctionner en charge	2
14	Schéma Simulink d'une commande de MCC par un régulateur de vitesse	2
15	Régulateur de courant en boucle fermée	2
16	Régulateur de vitesse en boucle fermée	2
17	Schéma Simulink du moteur seul	2
18	Schéma Simulink de modèle du vent	3
19	Schéma Simulink de modèle complet de la turbine éolienne	3
20	Schéma Simulink de l'association du modèle de la turbine avec la MCC	3
21	Schéma Simulink de la structure de la MPPT avec asservissement de vitesse	3
22	Schéma Simulink de l'association de la turbine avec la MPPT avec asservis- sment de vitesse	4
23	Schéma Simulink de la commande de la MCC par la turbine + MPPT avec asservissement de vitesse	4
24	Abaque des temps de réponse réduits	7
25	Abaque des dépassements transitoires	7
26	La carte DSPACE 1104	8
27	Architecture de la carte DS1104	9
28	Panneau de connexion	9
29	Schéma du Panneau de connexion CLP1104	9
30	Photo du Panneau de connexion CLP1104	10
31	L'interface controlDesk 1	11
32	L'interface controlDesk 2	11
33	Définition de projet	12
34	Définition de l'expérience	12
35	Choix de la carte	12
36	Fichier .sdf	13
37	Création de layout 1	13
38	Création de layout 2	13

39	Variables à mesurés	14
40	Mesurment a	14
41	Mesurment b	14
42	l'enregistrement	15
43	l'enregistrement de fichier en .mat	15
44	Programme Matlab de chargement de données	15
45	Onduleur	16
46	Capteur LEM de courant 1	17
47	Capteur LEM de courant 2	17

Nomenclature

Les principales notations et abréviations utilisées dans cette thèse sont explicitées ci-dessous, sous leur forme la plus couramment employée dans le domaine du génie électrique.

Indices et exposants 1

Symbole	Signification
α	exposant donné suivant la nature de terrain
V_1, V_2	vitesse de vent horizontal
h_1, h_2	hauteurs
V_r	vitesse de déplacement : vitesse relative du vent par rapport à la pale
C_z	coefficient de portance
C_x	coefficient de trainée
E_c	énergie cinétique de vent
P_{max}	puissance maximale récupérable
C_p	coefficient de puissance
P_m	puissance mécanique à l'entrée de la génératrice
η_{Profil}	rendement de la conversion
V_a	Tension aux bornes d'induit
V_f	Tension aux bornes de l'inducteur
I_a	Courant à travers de l'induit
I_f	Courant à travers de l'inducteur
R_a	Résistance de l'induit
R_f	Résistance de l'inducteur
L_a	L'inductance de l'induit
L_f	L'inductance de l'inducteur
M_{fd}	L'inductance mutuelle
Z_a	Impédance d'induit
Z_f	Impédance d'inducteur
K_e	Constante de la force électromotrice
K_c	Constante de couple

Indices et exposants²

Symbole	Signification
P_a	Puissance absorbé
P_u	Puissance utile
P_{em}	Puissance électromagnétique
P_{ja}	Pertes joules statorique
P_{exc}	Pertes joules rotorique
P_{mc}	Puissance mécanique
P_c	Pertes collectives
P_{fer}	Pertes fer
C_r	Couple résistant
C_s	Couple statique
C_p	Couple des pertes
p_0	Puissance des pertes
V_D	Tension aux bornes de diode
V_e	Tension de source
V_s	Tension de charge
I_e	Courant à l'entrée de hacheur
I_D	Courant aux bornes de diode
K_p	Gain d'action proportionnelle
K_i	Gain d'action intégrale
T_i	Temps d'action intégrale
K_{cm}	Gain d'hacheur
T_{cm}	Constante de temps du hacheur
t_r	Temps de réponse
ω_n	Pulsation propre
V_T	Vitesse de perturbation du vent
V_0	Vitesse moyenne de vent
A_i	Amplitude de la vitess de vent
ω_i	Pulsation de la vitess de vent
P_T	Puissance de turbine
Ω_t	Vitesse de rotation de turbine
Ω_{mec}	Vitesse mécanique du moteur
C_T	Couple aérodynamique
C_g	Couple de multiplicateur de vitesse

Grandeurs électriques et mécaniques, Constantes

Nom	Symbole	Unité
Vitesse de vent	V	m/s
Densité de puissance moyenne	\bar{P}	W
Hauteur	h	m
Vitesse de rotation	ω	rad/s
Fréquence de rotation de rotor	f	Hz ou s^{-1}
Vitesse tangentielle de rotor	U_t	N/m
Vitesse angulaire de rotor	ω	rad/s
Fréquence de rotation de rotor	n	tr/min
Vitesse spécifique	λ	/
Rayon de la turbine	R	m
La portance	ζ	Kg.m/s^2
Surface de la pale	S	m^2
Corde de la pale	c	m
Longueur de la pale	L	m
La trainée	D	Kg.m/s^2
Finesse de profile	s	/
Angle d'attaque des pales	α	degré
Angle d'incidence	i	degré
Angle de calage	β	degré
Energie	E	Joules
Masse de volume d'aire	m	Kg
Vitesse instantanée de vent	v	m/s
Puissance cinétique de vent	P	W
diamètre de l'hélice de l'éolienne	D	m
Tension	U	V
Courant	I	A
Puissance	P	W
Flux magnétique	ϕ	Wb
Induction magnétique	B	T
Facteur de puissance	$\cos \varphi$	/
Fréquence	f	Hz
Pulsation électrique	ω	rad/s
Vitesse de rotation	Ω	rad/s
Moment d'un couple	C	mN
Rapport cyclique	α	/
Coefficient d'amortissement	ξ	/
Phase de la vitesse de vent	ϕ	/

Nom	Symbole	Valeur	Unité
ρ	Densité de l'air	1.225	Kg/m^3
Facteur de forme de Weibell	k	1,751311	/
Facteur d'échelle de Weibell	C	5,986052	m/s

Glossaire

Acronyme	Signification
MCC	Moteur à courant continu
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsions
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor
MAS	Machine asynchrone à cage
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MSRB	Machine synchrone à rotor bobiné
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
MRV	Machine à réluctance variable
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PI	Propotionnele-Intégrale

Introduction générale

L'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place parmi les énergies renouvelables, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire aux autres sources [44], elle répondre au besoins de la lutter contre le réchauffement qui constitue un phénomène de perturbation sur le plan climatologique et qui est générée par des gazes à effet de serre ainsi des émissions du Co2 car c'est une énergie peu polluante, inépuisable et de plus, elle est respectueuse à la nature [11] .

Les centrales éoliennes agissent comme des centrales électriques traditionnelles, qui sont reliées aux réseaux de transmission, sont généralement installées sous des multi-mégawatt et avec des tailles énormes. Aujourd'hui, suite à l'augmentation considérable du taux de pénétration et de la puissance des éoliennes, plusieurs pays dans le monde intègrent cette énergie qui recouvre un taux de 30 % de l'énergie consommée en Danemark [18].

La centrale éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. cette conversion s'effectue en deux niveaux dont le premier est celui de la turbine et le second est celui de la génératrice telle que la MADA qui offre plusieurs avantages [11] .

Une adaptation de la vitesse de la turbine avec la vitesse du vent est nécessaire afin que la puissance convertie soit optimale, c'est pourquoi les éoliennes de forte puissance raccordées aux réseaux de moyenne et haute tension fonctionnent de plus en plus fréquemment à vitesse variable vu qu'elle a plusieurs avantages comparées avec celles à vitesse fixe [11] .

La meilleure vitesse moyenne du vent pour une centrale sécurisée est 8 m/s, et dès qu'elle dépasse 11,7 m/s , la turbine sera dotée d'un dispositif de réglage de l'angle de calage des pales qui oriente les pale en fonction de la vitesse du vent afin de garantir une protection des parties mécanique de l'éolienne [11] .

A fin d'améliorer les performances de système, il faut trouver des stratégies de commande qui permettra d'augmenter la robustesse de l'éolienne vu que le vent est une source naturelle qu'on ne peut pas la contrôler [11] .

Parmi les lois de commande, l'algorithme de poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui s'applique avec la présence des vents faible afin de maximiser la puissance récupérable. Il sera testé sur l'environnement Matlab/Simulink pour ce projet.

La structure de ce mémoire est constituer de quatre chapitre, et organisé de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, comprend une généralité sur l'énergie éolienne, qui décrit les différents types de turbines et les nouvelles technologies intégrées , les principaux composants d'une éolienne à axe horizontale ainsi que l'étude de l'action du vent sur ces pales, aussi les zones de fonctionnement d'une éolienne avec différentes plages de puissances, les systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne, les génératrices électriques utilisées dans la chaînes de conversion énergétique sont dictés . Ce chapitre finis par citation des avantages et des inconvénients de l'énergies éolienne.

Le chapitre deux contient la modélisation de la machine à courant continue (MCC), grâce à des équations électriques et mécaniques qui décrivent son fonctionnement, l'identification de ces paramètres par des essais réelles aussi sa commande qui contient des régulateurs PI de courant et de la vitesse de rotation de la machine pour améliorer ces performances, cette étude est testée sur logiciel Matlab/Simulink.

Le troisième chapitre s'intéresse à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne telle que le vent, la turbine, le multiplicateur et enfin l'arbre mécanique. Ensuite une représentation sur Matlab/Simulink se faite à l'aide des schémas bloc a fin de simuler le comportement de l'éolienne [11].

Le quatrième chapitre et le dernier, basé sur la simulation de la chaîne de conversion qui est l'ensemble de vent, turbine éolienne et machine à courant continue. Cette étude se faite en deux parties dans la première sans MPPT et la deuxième à base de la MPPT avec asservissement de vitesse. Une comparaison des résultats de simulations de deux essais a été faite.

La dernière partie sera clôturée par une conclusion générale, ainsi que par des suggestions et quelques perspectives pour les travaux de recherches futurs dans ce domaine.

Chapitre I

Caractéristiques du vent et systèmes éoliens

SOMMAIRE

I.1	INTRODUCTION	4
I.2	DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES DU VENT	4
I.2.1	Définition du vent	4
I.2.2	Variabilité du vent (temporelle, spatiale)	4
I.2.3	Intermittence du vent	4
I.2.4	Distribution de Weibull	5
I.2.5	Distribution de Rayleigh	6
I.2.6	Puissance moyenne et la densité de puissance	6
I.2.7	Variation de vitesse du vent en fonction de la hauteur	6
I.3	TECHNOLOGIES DES SYSTÈMES ÉOLIENS	7
I.3.1	Définition et principe de la conversion	7
I.3.2	Principaux composants d'une éolienne	8
I.3.3	Différents types d'éoliennes	9
I.3.4	Action du vent sur les pales d'une éolienne à axe horizontal	11
I.4	PRINCIPE DE LA CONVERSION CINÉTIQUE DU VENT	14
I.4.1	Etude aérodynamique d'une turbine éolienne	14
I.4.2	Couple mécanique produit par la turbine éolienne	17
I.4.3	Puissance mécanique à l'entrée de la génératrice	17
I.4.4	Rendement de la conversion	18
I.4.5	Système de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	18
I.4.6	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	19
I.5	GÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES MIS EN OUVRE DANS LES SYSTÈMES ÉOLIENS À VITESSE VARIABLE	20
I.5.1	Avantages des éoliennes fonctionnant à vitesse variable	20
I.5.2	Système utilisant la machine asynchrone à cage (MAS)	20
I.5.3	Système utilisant la machine asynchrone à double alimentation (MADA)	20
I.5.4	Système utilisant la machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)	21
I.5.5	Système utilisant la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	22
I.5.6	Machine à réductance variable (MRV)	22
I.6	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	23
I.6.1	Avantages	23
I.6.2	Inconvénients	23
I.7	CONCLUSION	23

I.1 Introduction

Aujourd'hui, la promotion des énergies renouvelables constitue un des grands axes de la Politique énergétique et environnementale de beaucoup de pays [5].

L'énergie produit par les systèmes éoliens est une énergie non polluante, elle a des caractères renouvelables puis qu'elle est basée sur le vent qui est une source gratuite et disponible partout, ce qui augmente l'intégration de ces systèmes dans plusieurs systèmes de production de l'énergie électrique. Un projet de pose d'éolienne pris en compte la qualité du vent car elle représente un critère essentiel [9], [8].

Dance ce chapitre, nous allons énoncer une généralité sur l'énergie éolienne ensuite nous allons présenter d'une part les caractéristique du vent, et d'autre part les nouvelles technologies intégrées dans les systèmes éoliens, ainsi le principe de la conversion cinétique du vent en énergie électrique.

I.2 Définition et caractéristiques du vent

I.2.1 Définition du vent

On peut décrire le vent comme l'ensemble des déplacements de l'aire des anticyclones qui sont des zones à haute pression vers des zones à basse pression qui s'appelle les dépressions .Et donc, on peut lui donner une énergie cinétique puis qu'il est de l'aire en mouvement [27], [4].

I.2.2 Variabilité du vent (temporelle, spatiale)

La vitesse de vent varie avec l'heur de la journée, l'année, la hauteur au dessus du sol et l'emplacement sur la surface de la terre [2].

On peut classer les variabilités du vent en deux catégories, tels que :

I.2.2-a Variabilité temporelle

Elle contient les variations à basse fréquence (annuelles), à moyenne fréquence (journalisées) et aussi à haute fréquence (à la seconde).

I.2.2-b Variabilité spatiale

La variation spatial approuver une dimension différente au problème d'étude du vent. La problématique considérée est la variation verticale du vent , don on cherche des tours éolienne très heurts, et heureusement avec la technologie, cette hauteur à augmenter et elle dépasse les 100m ce qui définit une relation entre la variation du vent et la hauteurs des pales d'une éolienne [40].

I.2.3 Intermittence du vent

Le caractère intermittent et aléatoire de l'énergie éolienne pose un grand problème car il suite des conditions météorologiques et n'est pas produit selon la demande, donc il faut associer des sources d'électricité modulable avec les éolienne au cas où elle n'est pas capable de faire la production demandée du fait des variations du vent [3].

I.2.4 Distribution de Weibull

La minimisation des coûts liés à la production d'électricité pour l'industrie éolienne est un objectif essentiel tout en mesurant les variations de la vitesse du vent [5].

La distribution des vitesses du vent est décrite par le coefficient de Weibull qui est déterminé à partir de la courbe de Weibull présentée ci-dessus .

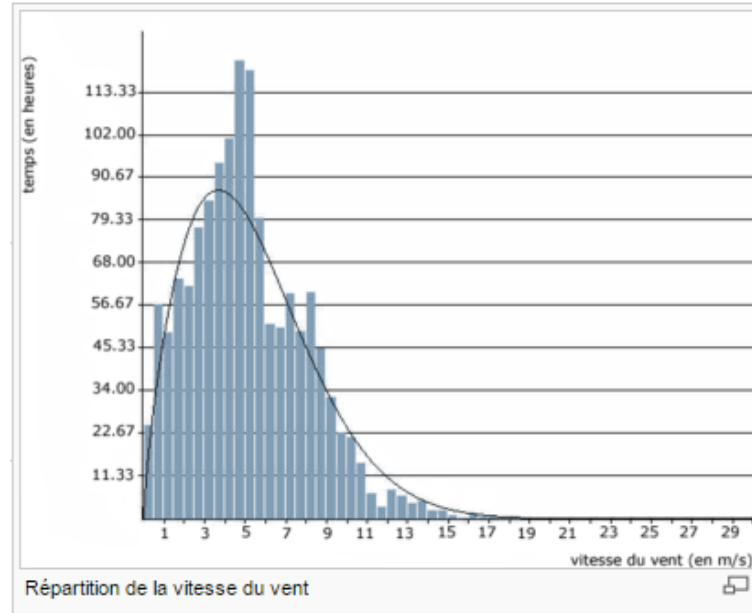


FIGURE I.1 – Distribution de Weibull

Ce graphique est construit à partir des mesures de la vitesse moyenne du vent prises toutes les 10 minutes ; les valeurs obtenues sont réparties en différentes vitesses de vent [8].

l'équation qui définit l'aire sous la courbe ci-dessous est la suivante :

$$f(v) = 1 - \exp - \left(\frac{v}{c}\right)^k \quad (\text{I.1})$$

Avec :

v : La vitesse du vent.

K : Le facteur de forme de Weibull, il est comprise entre 1 et 3, il formule la distribution, il prend des grandes valeurs a vitesse du vent constante. Il est sans dimension.

C : Le facteur d'échelle de Weibull qui indique la chronologie d'une vitesse est qui est proportionnel à la moyenne de cette dernière. Il est exprimé en m/s.

Dans l'exemple exprimé dans la courbe ci-dessous, les facteurs de Weibull prenant les valeurs suivantes : $k = 1,751311$ et $c = 5,986052$.

Fonction de probabilité de densité de Weibull :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \times \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \times \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (\text{I.2})$$

I.2.5 Distribution de Rayleigh

La distribution de Rayleigh c'est la distribution de Weibull à facteur de forme $k=2$.on peut résumer cette distribution dans la fonction suivante [27] :

$$f(v) = 2 \times \left(\frac{v}{c^2}\right) \times \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right] \quad (\text{I.3})$$

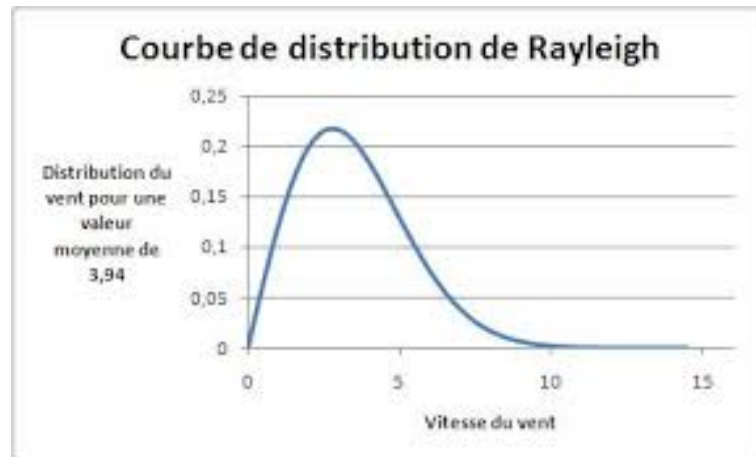


FIGURE I.2 – Distribution de Rayleigh

I.2.6 Puissance moyenne et la densité de puissance

La distribution de Weibull est l'utile pour déterminer la puissance moyenne du vent, tout on prendre en considération la probabilité de l'occurrence de chaque vitesse associée avec sa puissance, puisque la puissance du vent varie avec le cube de la vitesse [5] .

Parmi les meilleurs indicateurs du potentiel éolien disponible on' à La densité de puissance moyenne éolien qui est déterminée à basse des paramètres de Weibull et des données des fréquences de vitesse du vent, on peut l'exprimée par l'équation suivante [20] :

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{I.4})$$

Avec : ρ est la densité de l'aire supposée .

I.2.7 Variation de vitesse du vent en fonction de la hauteur

La variation de la vitesse du vent avec l'altitude dépend essentiellement de la nature du terrain. Ces variations peuvent être représentées par une loi simple de forme [1] :

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^\alpha \quad (\text{I.5})$$

Avec :

α est un exposant donné suivant la nature de terrain

V_1 et V_2 : Vitesses de vent horizontal (en m/s) aux hauteurs respectives h_1 et h_2 (en m)

Nature du terrain	Inégalité du sol h_0 en cm	Exposant α
1. Plat : glace, neige, mer, marécages, herbes courtes	0 à 20	0,08 à 0,12
2. Peu accidenté (inégalités de faible amplitude) : champs et pâturages, cultures	20 à 200	0,13 à 0,16
3. Accidenté : bois, zones peu habitées	1 000 à 1 500	0,20 à 0,23
4. Très accidenté : villes	1 000 à 4 000	0,25 à 0,4

Avec $\alpha = 0,096 \lg h_0 + 0,016 (\lg h_0)^2 + 0,24$.

FIGURE I.3 – Valeurs de l'exposant α selon la nature de terrain

I.3 Technologies des systèmes éoliens

Grace à l'évolution en technologie, des outils et logiciels dédiés aux systèmes éoliens ont été réalisés afin d'améliorer la procédure de production de l'énergie électrique [9].

I.3.1 Définition et principe de la conversion

Une éolienne est une machine à but de transformer l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique [39].

Cette conversion se fait en deux niveaux tel que : Au niveau de la turbine (rotor) et au niveau de la génératrice [44].

La conversion de l'énergie éolienne repose sur la production de l'énergie électrique à partir de la transformation de l'énergie cinétique de vent.

On peut résumer le fonctionnement d'une éolienne dans la figure suivante :

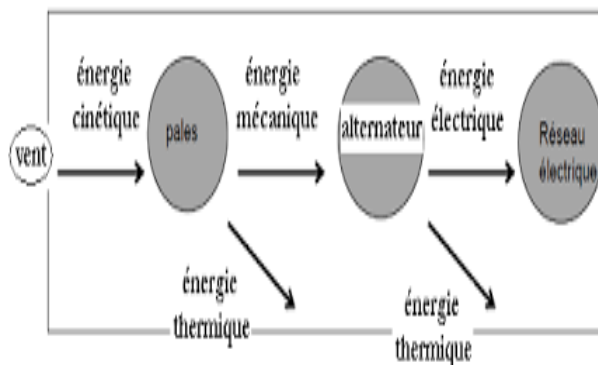


FIGURE I.4 – Principe de la conversion de l'énergie

La vitesse nominale de vent nécessaire pour faire fonctionner une éolienne est de l'ordre de 10 à 15 Km/h, et avec cette vitesse, le rotor (turbine) tourne avec une vitesse très petite de 12 à 15 tours/minute qui va être augmentée par la suite grâce à un multiplicateur

jusqu' à atteindre les 1500 tr/min pour un meilleur fonctionnement. Le rotor entraîne un générateur, et à son tour le générateur convertit l'énergie mécanique de vent en énergie électrique.

A l'aide des convertisseurs de l'électronique de puissance, le courant électrique produit est ensuite transformé et injecté dans le réseau après l'ajustement de sa fréquence à 50 Hz pour pouvoir tourner le rotor à une vitesse variable sous l'effet de vent. Une tension environ 600 à 1000v est produite par l'alternateur doit être transformée à des tensions de 20 ou 30 Kv à l'aide des transformateurs élévateurs de puissance pour qu'elle soit prête au raccordement au réseau public. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais avec l'intégration de la nouvelle technologie, les éoliennes peuvent atteindre les 2 à 3 MW et peut être les 5 MW [39] .

I.3.2 Principaux composants d'une éolienne

Plusieurs configurations possibles d'une éolienne sont disponibles et peuvent avoir beaucoup de différences, mais généralement, une éolienne contient les parties suivantes :

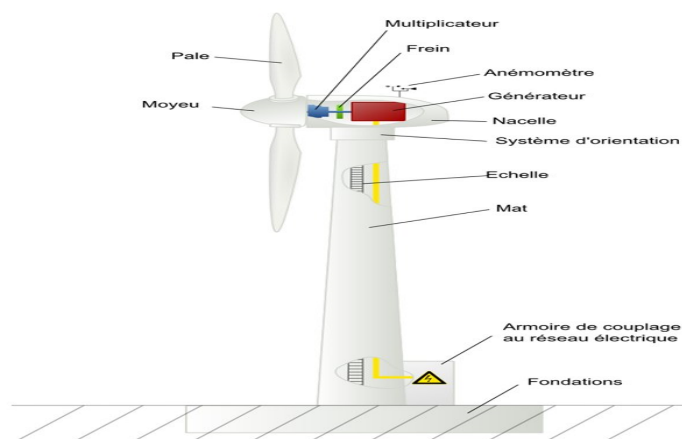


FIGURE I.5 – Principales composants d'une éolienne

- **Mâte** : c'est un support qui rassemble les différents composants essentiels pour la production d'électricité, il est sous forme d'un tube d'acier généralement en métal, et à l'aide d'une fondation implantée dans le sol, il est fixé à fin d'éliminer les perturbations et garantir une bonne stabilité de l'éolienne, donc il doit être le plus haut possible et légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur, il atteint généralement les 80m et bientôt les 100m [39],[44].
- **Rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu (généralement 3 pales) et du nez de l'éolienne. Les pales sont très rigides, solides et résistants, ils ont une longueur de 30 à 55 mètres avec le diamètre du rotor qui est compris entre 60 et 110 mètres [39], [44].
- **Nacelle** : les principales composantes d'une nacelle sont résumées dans la figure ci-dessous :

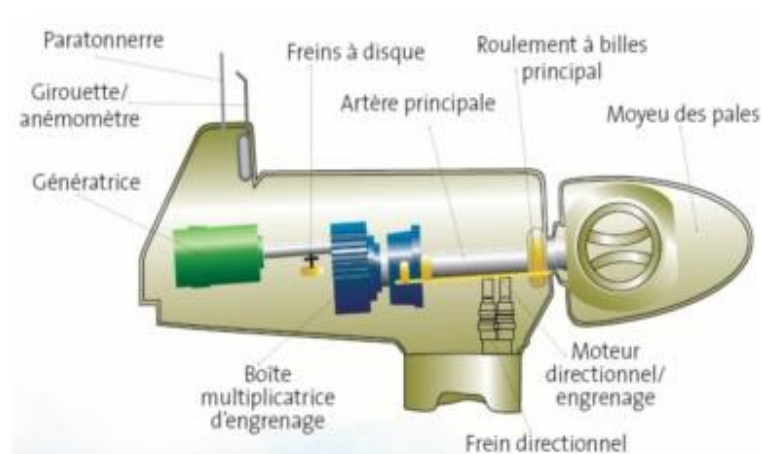


FIGURE I.6 – Composants d'une nacelle

Elle contient les composants électriques, mécaniques et pneumatiques qui assurent le bon fonctionnement de l'éolienne, tel que [39], [44] :

- Les câbles électrique qui organise la circulation de l'électricité de la nacelle jusqu'au sol.
- Le frein disque qui permet l'arrêt de fonctionnement en cas d'une surcharge .
- Le générateur permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, il est composé généralement de la machine synchrone ou bien asynchrone .
- Le multiplicateur de vitesse à but d'augmenter la vitesse de rotation de rotor jusqu'à la vitesse de raccordement au réseau public .
- Un système de refroidissement par air ou par eau est souvent utilisé .

I.3.3 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes diffèrent de part leurs formes, leurs tailles ou encore leurs fonctions [32], mais généralement, on les regroupe en deux grandes familles, celles à axe verticale et celle à axe horizontale [44].

I.3.3-a Eoliennes à axe vertical

Les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal sont les aérogénérateurs à axe vertical. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. La turbine à axe vertical est facilement installée grâce à sa forme cylindrique elle à la capacité de réduire le bruit, elle porte une très grande tolérance aux vents forts [39], [31] .

Elles se divisent en deux grandes familles selon leur caractéristique aérodynamique : celles qui sont à la base de la portance (à rotor de Darrieus) et celle qui sont basés sur la traînée (à rotor de Savonius) [31].

Les types d'éolienne à axe vertical sont présentés dans les figures suivantes :



FIGURE I.7 – Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)



FIGURE I.8 – Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)

I.3.3-b Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal présentent un cout moins important, ce qui les rendent les plus utilisés actuellement . Elles doivent s'orienter face au vent par un mécanisme d'asservissement [31] pour un meilleur rendement de fonctionnement, cela est réalisé soit par un safran (effet girouette), soit à l'aide de capteurs de sens du vent et d'un moteur qui orientera l'éolienne [32].

Le rotor le plus utilisé est le tripale qui contient un compromis entre le cout, la vitesse de rotation de capteur éolien et le facteur de puissance [44]. Dans nos jour, ce John d'éoliennes

est le plus commercial, il mesure jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120m pour une puissance de 6 MW [39].

La forme d'une éolienne à axe horizontal est présentée dans la figure suivante :



FIGURE I.9 – Aérogénérateur à axe horizontal

I.3.4 Action du vent sur les pales d'une éolienne à axe horizontal

L'effet de vent sur la turbine est caractérisé par différentes forces. Chaque force a une action sur un point de la surface d'une pale [31].

I.3.4-a Vitesses angulaire et tangentielle du rotor

La mesure de la vitesse de rotation est caractérisée par une vitesse angulaire ω qui est proportionnel à la fréquence de rotation de rotor et qui est exprimée par la relation suivante [27] :

$$\omega = 2\pi.f \quad (\text{I.6})$$

Avec :

ω : La vitesse de rotation en (rad/s)

f : La fréquence de rotation de rotor en (Hz ou s^{-1})

Le déplacement de la pale génère une vitesse du vent. Cette vitesse est dite tangentielle. Elle est exprimée en (N/m) et décrit par la relation suivante [27] :

$$U_t = \omega.r = 2\pi.f.r = 2\pi.\frac{n}{60}.r \quad (\text{I.7})$$

Avec :

U_t : Vitesse tangentielle de rotor en (N/m)

ω : Vitesse angulaire de rotor en (rad/s)

r : Distance entre la pale et l'axe de rotation en (m)

f : Fréquence de rotation de rotor en (HZ ou s^{-1})

n : Fréquence de rotation de rotor en (tr/min)

I.3.4-b Vitesse spécifique

Elle est dite aussi le paramètre de rapidité λ , c'est un facteur de classification des machines éoliennes tel que [27] :

Si $\lambda < 3$ alors l'éolienne est dite lente.

Si $\lambda > 3$ alors l'éolienne est dite rapide.

La vitesse spécifique est exprimée par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{U_t}{v} = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (I.8)$$

Avec :

λ : Vitesse spécifique (sans unité)

U_t : Vitesse tangentielle en (N/m)

v : Vitesse de vent en (m/s)

R : Rayon de la turbine en (m)

I.3.4-c Forces de portance et de trainée

L'air a une action sur les pales d'une éolienne, cette action est exprimée sous formes de deux force, celle qui est parallèle à la direction de l'écoulement et dite de trainée, et celle qui est normale à l'écoulement et dite de portance. Ces deux forces ont la capacité d'améliorer les performances d'un profil de pale éolienne tout on augmente le rapport entre eux (portance/trainée) [12].

La figure IV.10 explique les forces de portance et de trainée :

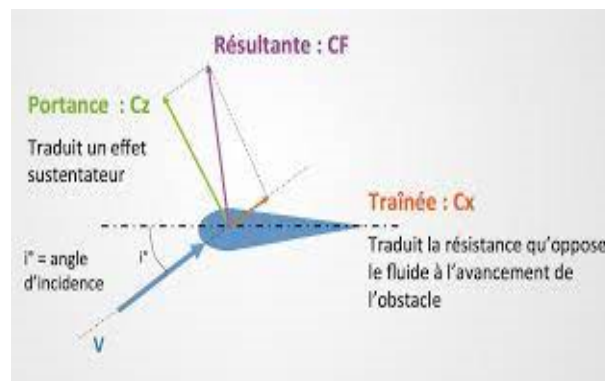


FIGURE I.10 – Portance et trainée sur le profil d'une pale d'éolienne

La portance est calculée de la façon suivante [27] :

$$\zeta = q \cdot S \cdot C_z = \frac{1}{2} \rho_{air} \cdot V_r^2 \cdot S \cdot C_z \quad (I.9)$$

Avec :

ζ : Portance en (kg.m/s²)

ρ_{air} : Masse volumique de l'aire (1,225 kg/m³ à 15°C au niveau de la mer)

V_r : Vitesse de déplacement : vitesse relative du vent par rapport à la pale (en m/s)

C_z : Coefficient de portance, il est déterminé en soufflerie et est propre pour chaque profil de pale

S : Surface de la pale (surface projetée, surface mouillée, maître couple) (en m²), elle est exprimé par la relation suivante :

$$S = L.c \quad (I.10)$$

Avec :

S : Surface de la pale (en m²)

c : Corde de la pale (corde entre le borde d'attaque et le borde de fuite,c'est la longueur de l'aile) (en m)

L : Longueur de la pale (en m)

La force de trainée est calculée de la façon suivante [27] :

$$D = q.S.C_x = \frac{1}{2}\rho_{air}.V_r^2.S.C_x \quad (I.11)$$

Avec :

D : La trainée en (kg.m/s²)

ρ_{air} : La masse volumique de l'aire (1,225 kg/m³ à 15°C au niveau de la mer)

V_r : Vitesse de déplacement en (m/s)

S : Surface de la pale en (m²)

C_x : Coefficient de trainée.

I.3.4-d Finesse du profil

Le rapport de la portance à la trainée est connu sous le nom de la finesse, elle est calculée de la façon suivante [27] :

$$s = \frac{C_z}{C_x} \quad (I.12)$$

Avec :

s : Finesse de profil

C_z : Coefficient de portance

C_x : Coefficient de trainée

La finesse de profil a un rôle très important pour l'amélioration d'un profil de pale éolienne, il suffit de l'augmentée [12]

I.3.4-e Angle d'attaque des pales

la formation de cet angle se repose sur la présence de deux angles principales, celle qui est formé par la pale et son plan de rotation et qui s'appelle l'angle de calage β , et celle qui est entre la direction de vent et la pale et dite l'angle d'incidence i [27].

On présente l'angle d'attaque des pales α , dans la figure IV.11 :

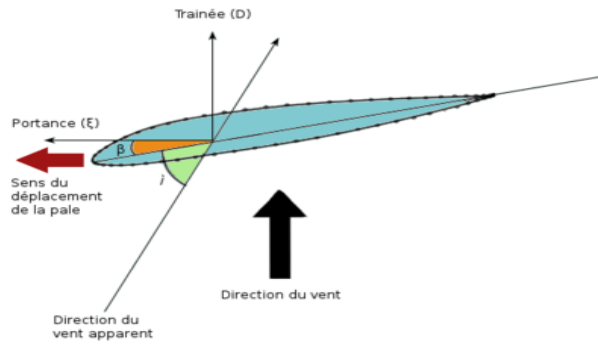


FIGURE I.11 – Angle d'attaque des pales

Pour formuler l'angle d'attaque, on fait la somme entre l'angle de calage et l'angle d'incidence et on obtient la relation suivante [27] :

$$\alpha = i + \beta = \arctan\left(\frac{v}{U_a}\right) \quad (\text{I.13})$$

Avec :

α : Angle d'attaque des pales en (degré)

i : Angle d'incidence en (degré)

β : Angle de calage en (degré)

v : Vitesse de vent en (m/s)

U_a : Vitesse angulaire de vent en (m/s)

I.4 Principe de la conversion cinétique du vent

La conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique dans une éolienne, se fait à l'aide d'un rotor qui représente la partie tournante de système, et à son tour, le rotor entraîne une puissance mécanique qui est ensuite transformée en puissance électrique via une génératrice [29].

I.4.1 Etude aérodynamique d'une turbine éolienne

I.4.1-a Energie cinétique du vent

L'énergie cinétique c'est une énergie qui correspondre à un corps en mouvement, et comme le vent c'est l'air en mouvement, l'énergie cinétique qui le représente est proportionnelle au carrée de sa vitesse. Elle est calculée de la façon suivante [8] :

$$E_c = \frac{1}{2}m.v^2 \quad (\text{I.14})$$

Avec :

E_c : Énergie cinétique de vent (en Joules)

m : Masse de volume d'air (Kg)

v : Vitesse instantanée de vent (en m/s)

la masse de volume m de l'air est fonction de la masse volumique de l'air ρ_{air} et le volume d'air occupé V , elle s'écrit comme suite :

$$m = \rho_{air} \cdot V \quad (\text{I.15})$$

I.4.1-b Puissance théoriquement récupérable

Il n'est pas possible de récupérer toute la puissance cinétique du vent, mais seulement une partie avec un maximum de $16/27$ soit $0,593$ de l'énergie cinétique du flux d'air est absorbée par l'éolienne. Cette compensation est faite à partir de la surface S (en m^2) des pales [8].

I.4.1-c Limite de Betz

En 1919, l'allemand Albert Betz a démontré que la puissance maximale récupérable est [27] :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P \quad (\text{I.16})$$

Avec, P c'est la puissance cinétique de vent qui est calculée de la façon suivante [27] :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{I.17})$$

ρ : La masse volumique du fluide

S : Surface du capteur éolien (en m^2)

v : Vitesse incidente (amont) du fluide (en m/s)

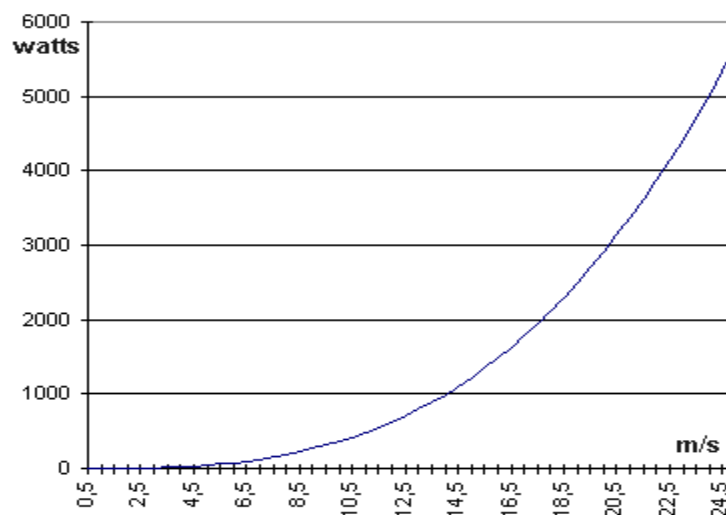


FIGURE I.12 – Limite de Betz

la limite de Betz est égale à [27] :

$$P = 0.29D^2.v^3 \quad (\text{I.18})$$

Avec :

D : Le diamètre de l'hélice de l'éolienne

I.4.1-d Courbe de puissance d'une éolienne

La courbe de puissance d'une éolienne est présentée dans la figure suivante [15] :

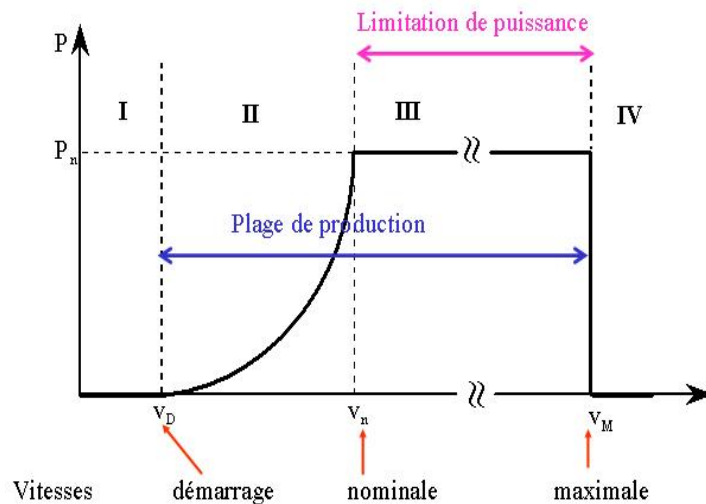


FIGURE I.13 – Courbe de puissance d'une éolienne

- **Zone I** : la turbine ne fonctionne pas, donc il n'y a pas de puissance ($P=0$).
- **Zone II** : la puissance suit une progression rapide avec une vitesse comprise entre la vitesse de démarrage de l'éolienne et celle qui est nominale, elle est proportionnelle au cube de la vitesse de vent, tout en maintenant l'angle de calage β constant et le maximum de coefficient de puissance. Les pales sont perpendiculaires au vent.
- **Zone III** : la puissance atteint sa valeur nominale via une vitesse de vent supérieure à la vitesse nominale et inférieure à la vitesse maximale. Un contrôle de coefficient de puissance est nécessaire dans cette zone de fonctionnement. Les pales sont parallèles au vent.
- **Zone IV** : blocage de l'éolienne à cause d'une augmentation très forte de vitesse de vent afin de protéger les parties mécaniques de l'éolienne.

I.4.1-e Coefficient de puissance d'une turbine éolienne

Chaque éolienne a son coefficient de puissance C_p , il indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité [27]. Il est fonction de l'angle de calage β et du rapport de vitesse λ tel que [39] :

$$\lambda = \frac{R.\omega}{v} \quad (\text{I.19})$$

On exprime le coefficient de puissance sous la formule suivante :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\pi \cdot \frac{\lambda - 3}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (\text{I.20})$$

La courbe de coefficient de puissance est présentée par la figure suivante :

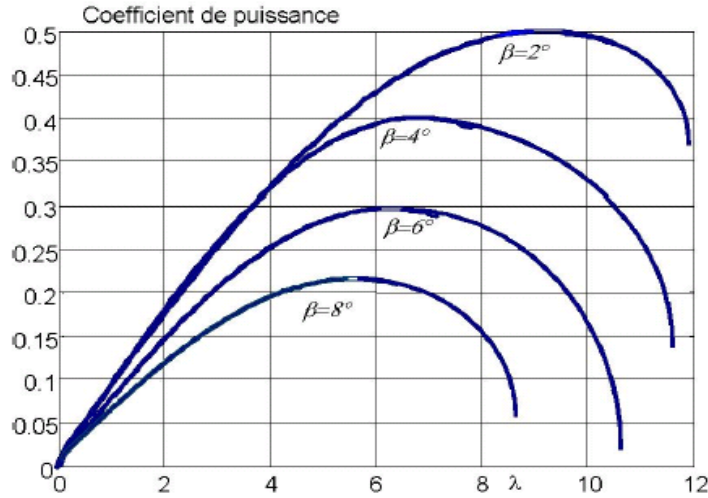


FIGURE I.14 – Coefficient de puissance

I.4.2 Couple mécanique produit par la turbine éolienne

Le couple mécanique produit par la turbine éolienne est fonction de la puissance mécanique (P) et la fréquence de rotation de rotor (ω), il peut s'exprimer comme suite [27] :

$$\Gamma = \frac{P}{\omega} \quad (\text{I.21})$$

Avec :

Γ : Le couple mécanique (en N/m)

P : Puissance mécanique (en W)

ω : Fréquence de rotation de rotor (en m/s)

I.4.3 Puissance mécanique à l'entrée de la génératrice

La relation de la puissance mécanique à l'entrée de la génératrice est la suivante [27] :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p \quad (\text{I.22})$$

Avec :

P_m : La puissance mécanique à l'entrée de la génératrice (en W)

ρ : La masse volumique de l'air

R : Le rayon de la turbine (en m)

v : Vitesse de vent (en m/s)

C_p : Coefficient de performance

L'évolution de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de vent est exprimée dans le schéma de la figure suivante :

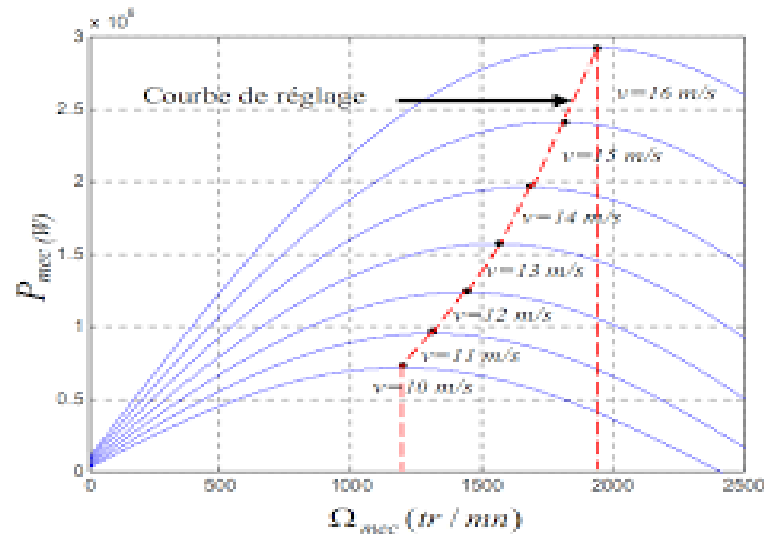


FIGURE I.15 – Puissance mécanique en fonction de la vitesse de vent

I.4.4 Rendement de la conversion

Le rendement de la conversion dépend essentiellement de la finesse de profil, il est calculé de la façon suivante [27] :

$$\eta_{Profil} = \frac{s - \lambda}{s} \quad (I.23)$$

Avec :

s : Finesse de profile

λ : La vitesse spécifique

I.4.5 Système de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

Deux principes de contrôle aérodynamique sont utilisés pour la limitation de la puissance extraire de la puissance nominal dans les systèmes éoliens : ce qui est connue sous le nom « Pitch contrôle » et ce qui est dit « Stall contrôle » [29].

I.4.5-a Système d'orientation des pales "Pitch Control"

D'après la courbe de puissance d'une éolienne, la zone III de fonctionnement à besoin d'une puissance constante, cette condition est vérifiée après l'ajustement de la portance des pales à la vitesse de vent via le système d'orientation « Pitch » [29].

Cette orientation génère un changement dans l'angle de calage ce qui va permet d'optimiser la conversion de l'énergie dans cette zone, de réguler par limitation de la puissance quand la vitesse de vent dépasse la valeur nominal et d'arrêter l'éolienne à l'aide d'un système de freinage lorsque la vitesse de vent augment dans la quatrième zone de fonctionnement [44].

I.4.5-b Système à décrochage aérodynamique "Stall Control"

Il est obtenu à l'aide d'une orientation minimale des pales via un système de réglage robuste.

Cette méthode permet le décrochement des pales a des vitesses de vent qui dépassent la vitesse nominale et nécessite un angle de calage équipée d'un système de freinage et qui n'est pas besoin d'un control, ainsi que le rotor utilisé est le plus simple fabriqué avec une maintenance moins couteux ce qui rendre cette méthode économique [29],[44] .

I.4.6 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être déterminé à partir de la vitesse du vent en trois zones [26].

La courbe de la figure suivante montre les zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable :

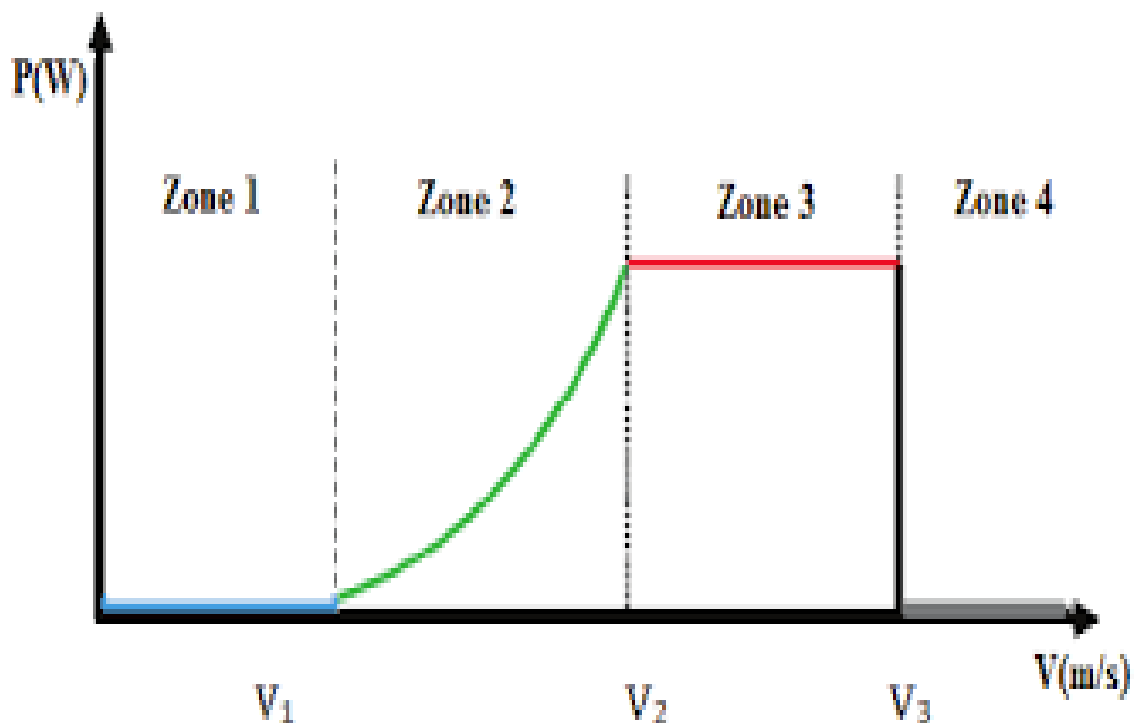


FIGURE I.16 – Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable

- **Zone 1** : la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont nuls car la vitesse de vent est inférieure à la vitesse minimale qui est nécessaire pour entraîner et faire fonctionner l'éolienne.
- **Zone 2** : maintenue, la vitesse de vent augment progressivement , l'éolienne démarre, et à son tour elle atteindre la puissance maximale (nominale) et la vitesse nominale.
- **Zone 3** : dans cette zone, le vent dépasse la valeur nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique gardent ces valeurs nominale à fin de protéger l'éolienne.

I.5 Générateurs électriques mis en oeuvre dans les systèmes éoliens à vitesse variable

La technologie des génératrices utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable évolue progressivement dans le temps. La fabrication de ces éoliennes connait l'intégration des différentes machines [44].

I.5.1 Avantages des éoliennes fonctionnant à vitesse variable

- La puissance électrique produite à haut qualité [28].
- Pour des vitesses de vent très faibles, elles augmentent la marge de fonctionnement et donc le rendement [28].
- À des puissances faibles de fonctionnement, elles diminuent le bruit puisque la vitesse de vent dans ce cas est très petite [28].
- L'utilisation dans ce cas de couple électromagnétique dans le contrôle de la vitesse de générateur n'est pas besoin d'un système d'orientation des pales qui est très compliquée [28].
- Elles donnent un meilleur résultat lors de raccordement de l'éolienne au réseau [28].

I.5.2 Système utilisant la machine asynchrone à cage (MAS)

La construction des machines électriques asynchrones à cage est très simple et moins coûteuse, ce qui les rendent économiques. Elles peuvent être standardisées et fabriquées sur une très grande gamme de puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien [28], et la simplicité de la configuration de ce système génère un taux de défaillance très petit. Avec ces avantages, aujourd'hui la machine asynchrone à cage équipe une large partie des systèmes éoliens installés dans le monde et elle est plus utilisée en fonctionnement moteur [36].

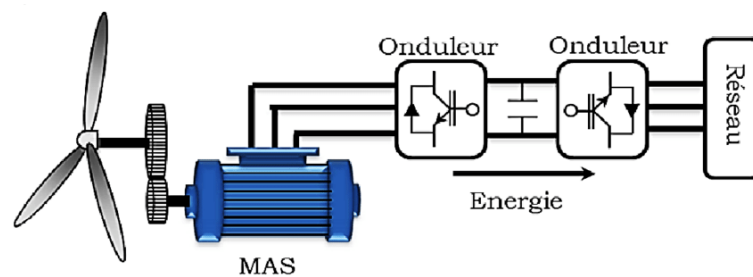


FIGURE I.17 – Eolienne à vitesse variable utilise la MAS

I.5.3 Système utilisant la machine asynchrone à double alimentation (MADA)

L'extraction de potentiel d'une éolienne est le meilleur via ce type de machine. Son stator est raccordé directement au réseau, et le rotor connecté avec la partie commande à l'aide d'un convertisseur statique. L'identification de convertisseur nécessite un écarte

maximale entre la vitesse réelle de rotor et celle de synchronisme. La MADA a la possibilité de commander la puissance réactive ainsi que la d'échanger avec le réseau a fin de commander la tension et sa magnétisation peut être effectuée seulement via son rotor [36].

Le schéma présenté dans la figure suivante exprime la configuration de ce système :

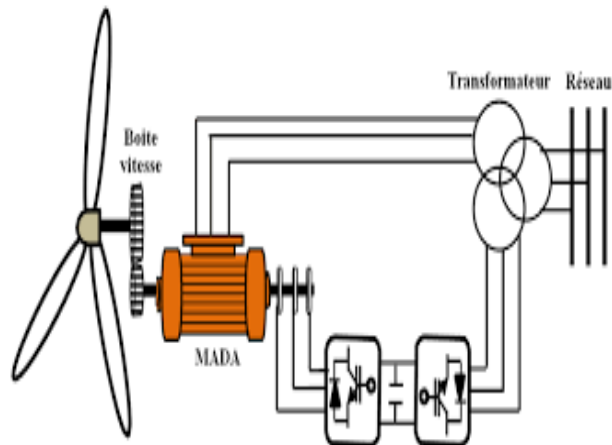


FIGURE I.18 – Système éolien à vitesse variable à basse da MADA

I.5.4 Système utilisant la machine synchrones à rotor bobiné (MSRB)

On classe cette machine en deux types : celle à pole lisse à induction constante, et celle à pole saillant a entrefer magnétique variable [6]. On générale, la création de champ tournant rotorique est faite à partir d'un bobinage alimenté en courant continu via un redresseur qui est connecté au réseau. Un contact glissants au rotor est généré après la création de champs tournante, et pour l'éliminé, des générateurs synchrones à électroaimants, qui sont alimentés en courant continu sont intégrés dans la configuration de système. La fourniture de la puissance réactive en présence de réseau est nécessaire dans ce mode d'excitation [46].

Deux différentes configurations de système éolien basé sur la MSRB sont présentées dans la figure suivante :

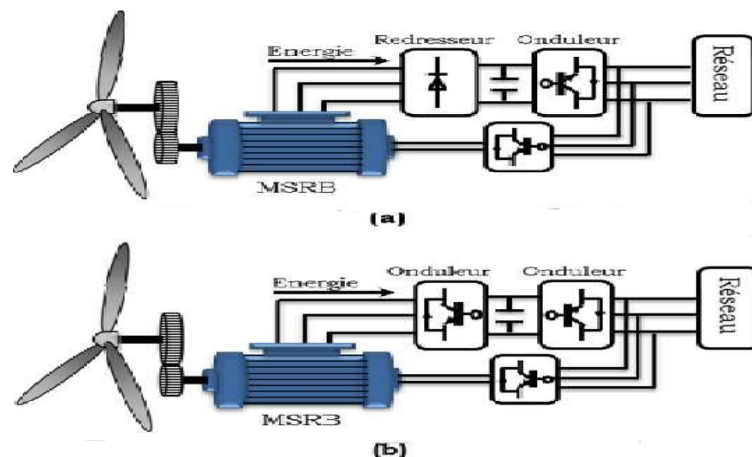


FIGURE I.19 – Configurations des systèmes éoliens basés sur la MSRB

I.5.5 Système utilisant la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Lorsqu'un système éolien utilise une machine synchrone à aimant permanent dans la chaîne de conversion de l'énergie, dans ce cas le multiplicateur est négligeable. Le fonctionnement de la machine est donc basé sur la présence d'un couple massique. Grâce à l'aimantation de ces pôles nombreux, la MSAP a la capacité d'éliminer le bruit ce qui la rend robuste [46].

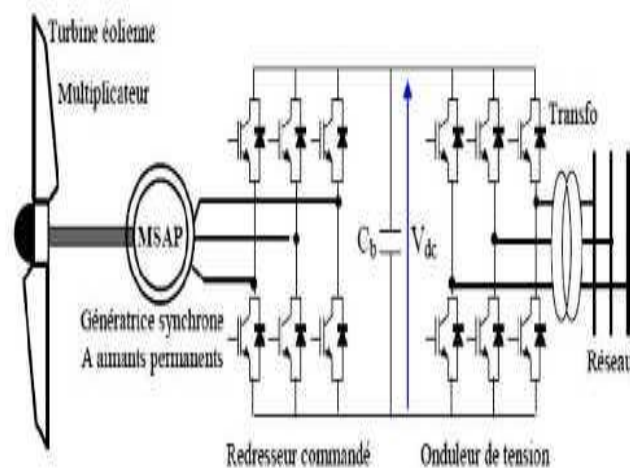


FIGURE I.20 – Eolienne à vitesse variable basée sur la MSAP

I.5.6 Machine à réluctance variable (MRV)

Le principe des machines à réluctance variable (MRV) est basé sur celui de l'électroaimant [33]. Ces fabrications sont la plus simple, elles contiennent un rotor ferromagnétique non aimanté et robuste génère une très grande saillance. Elle a un stator comme toute machine synchrone, il est construit à base d'un matériau ferromagnétique denté possède des bobines qui ont pour but de créer des champs magnétiques. Parmi ces avantages, la MRV est capable de produire un couple très fort à des vitesses faibles, elle peut aussi fonctionner sur une très longue gamme de puissance constante [41].

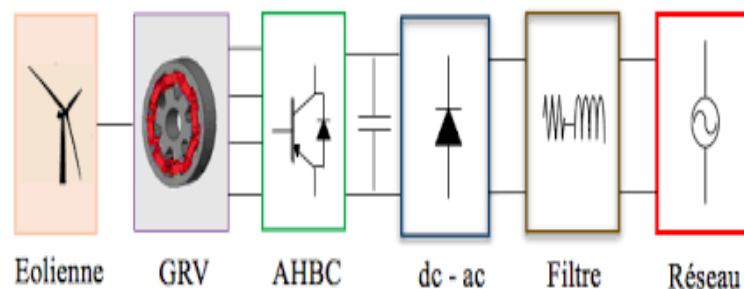


FIGURE I.21 – Eolienne à vitesse variable basée sur la MRV

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Comme chaque énergie, l'énergie éolienne possède des avantages et des désavantages, on cite quelques un dans ce paragraphe.

I.6.1 Avantages

- L'énergie éolienne c'est une énergie 100 %, renouvelable, car elle est basé sur une source inépuisable et gratuite qui est le vent [17].
- Son installation est moins coûteuse [17].
- Elle n'est pas besoin d'un carburant, ne produit pas de gaz à effet de serre, ne génère pas de déchets toxiques ou radioactifs donc elle n'est pas polluante [46].
- L'énergie éolienne a la capacité de diminuer les factures d'électricité et peut vous mettre à l'abri des coupures de courant [46].
- On résume ces avantages, L'énergie éolienne est une énergie qui respecte l'environnement [26].

I.6.2 Inconvénients

- L'énergie éolienne est une énergie intermittente et il est impossible de la prévoir [26].
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [46].
- L'achat des systèmes éoliens coûtent très cher par rapport aux autres systèmes basés sur d'énergie classiques [46].
- Les multiplicateurs dans les éoliennes sont les principales sources du bruit [17].

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on' à décrite en générale que-ce-qu'une énergie éolienne, tout on' à parler des caractéristiques du vent, on' à citer les différentes types d'éolienne ainsi que ces composants essentielles , puis on' à plus intéresser sur celle à axe horizontale à cause de son efficacité tout on' à étudier l'action du vent sur ces pales, on' à parler aussi de principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ainsi la limite de Betz et les systèmes de régulation de la vitesse de rotation d'une éolienne.

Dans le chapitre suivant, nous allons parler de la machine à courant continue, son modélisation à travers des équations qui décrit son fonctionnement ainsi sa commande.

Chapitre II

Modélisation et commande du moteur à courant continu

SOMMAIRE

II.1	INTRODUCTION	25
II.2	PRINCIPE ET CONSTITUTION DES MOTEURS À COURANT CONTINU	25
II.2.1	Principe de fonctionnement	25
II.2.2	Constitution du moteur à courant continu	26
II.2.3	Différentes méthodes d'excitation	28
II.2.4	Avantages et inconvénients du moteur à courant continu	29
II.3	MOTEUR À COURANT CONTINU À EXCITATION SÉPARÉE	29
II.3.1	Equations de fonctionnement en régime permanent	29
II.3.2	Caractéristiques électromécaniques et mécanique	30
II.3.3	Bilan des puissances et rendement	32
II.3.4	Principe de la variation de vitesse	33
II.3.5	Modélisation dynamique du moteur à excitation séparée	33
II.4	IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MOTEUR À COURANT CONTINU	34
II.4.1	Identification des paramètres électriques	34
II.4.2	Détermination des paramètres mécaniques	37
II.4.3	Validation expérimentale du modèle dynamique et des paramètres	38
II.5	CONVERTISSEURS À BASE DE HACHEURS POUR MOTEURS À COURANT CONTINU	45
II.5.1	Hacheur série	45
II.5.2	Hacheur réversible en courant	46
II.5.3	Hacheur réversible en tension	47
II.5.4	Hacheur réversible en courant et en tension	48
II.5.5	Technique de commande à MLI	50
II.6	COMMANDE DU MOTEUR À EXCITATION SÉPARÉE	50
II.6.1	Commande PI en régulation de vitesse	50
II.6.2	Structure d'un régulateur PI	51
II.6.3	Calcul de régulateurs de système	51
II.6.4	Simulation du MCC avec régulation	54
II.7	CONCLUSION	55

II.1 Introduction

Un moteur à courant continu est une machine qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Ils acceptent l'énergie mécanique. La structure du moteur électrique est la même que le générateur, de sorte qu'un moteur à courant continu peut également être utilisé comme Moteur ou générateur. Le moteur à courant continu est l'un des moteurs les plus avancés utilisés dans de nombreux domaines industriels. Tel que cette machine est également fonctionnelle à grande vitesse [23].

Dans ce chapitre, On va définir le moteur à courant continu, préciser sa principe et sa construction, les caractéristiques du moteur à excitation séparée et sa mobilisation. Puis on va identifier les paramètres de cette moteur. Ensuite, on va définir les convertisseurs à base des hacheurs. Enfin on va commander le moteur à excitation indépendantes.

II.2 Principe et constitution des moteurs à courant continu

II.2.1 Principe de fonctionnement

Les moteurs à courant continu fonctionnent selon la loi de Laplace : La longueur L parcourue par le courant I et placée dans le champ magnétique B est soumise à Force F .

Le principe de fonctionnement du moteur à courant continu est basé sur le couple électromagnétique d'un conducteur sur le rotor, qui est traversé par courant continu, et qui se déplace dans un champ magnétique B [21].

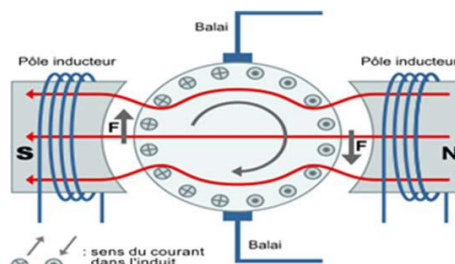


FIGURE II.1 – Champs magnétiques créés dans un moteur à courant continu

L'induit ou le rotor placé dans le champ magnétique qui est généré par le stator est porteur de N conducteurs à travers lesquels passe le courant continu. Les spires sont le siège des courants connus sous le nom de Laplace qui génèrent un couple pour entraîner la rotation du rotor. Cette rotation entraînera le changement du flux magnétique ϕ qui traverse la bobine, ce qui génère une force électromotrice F , ce qui la rend la direction de la main droite à l'extrémité du déterminer cette direction de champ B [21].

Les conducteurs N sont alimentés par l'inversement de sens deux fois par tour du collecteur. Le couple qui entraîne la rotation du rotor, donc le moteur est donné par la formule de la force électromotrice F comme suit :

$$dF = Idl \wedge B$$

$$F = B.I.L. \sin \alpha \quad (\text{II.1})$$

F : Force électromotrice subis par le conducteur (N).

B : Induction de champ magnétique (T).

I : Intensité de courant qui parcourt le conducteur (A).

L : La longueur de conducteur (m).

α : Angle entre le sens de l'induction magnétique et le sens de courant dans le conducteur.

la figure suivante montre le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu par la loi de Laplace.

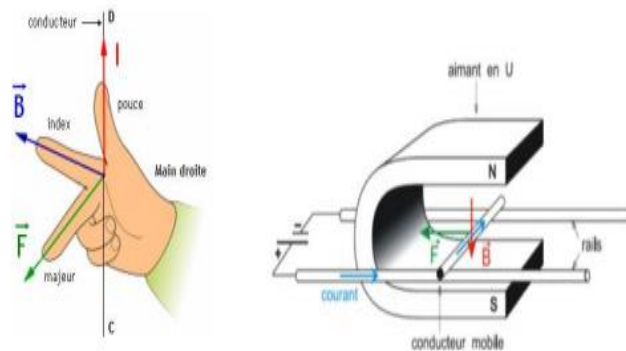


FIGURE II.2 – Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu

II.2.2 Constitution du moteur à courant continu

la figure ci dessous montre la constitution du moteur à courant continu.

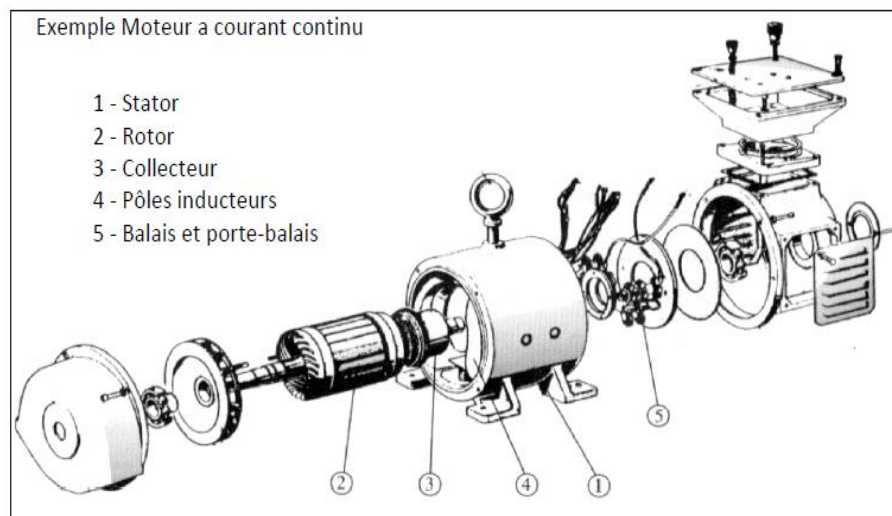


FIGURE II.3 – Constitution du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est constitué à quatre parties principales :

1. L'inducteur (stator)

L'inducteur est également appelée circuit d'excitation c'est la partie fixe du moteur qui crée un champ magnétique est généré dans le stator. Fabriqué la bobine série est enroulée sur le noyau ferromagnétique porté par le stator [43].

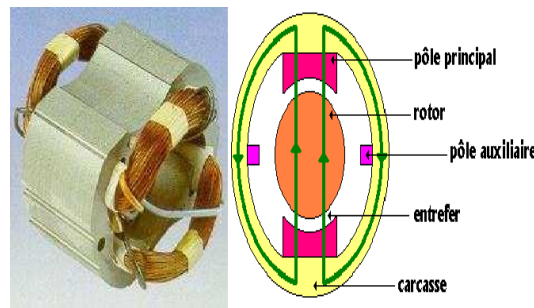


FIGURE II.4 – L'inducteur du moteur

2. L'induit (rotor)

Il s'agit de la partie mobile ou rotative de la machine, qui contient des enroulements transportés par un courant continu. Il est formé par des tôles en acier au silicium, fendu pour accueillir le conducteur d'enroulement du rotor. L'entrefer est séparé entre le rotor et le stator [43].

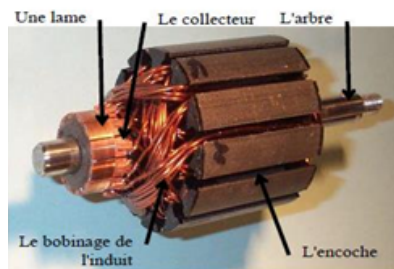


FIGURE II.5 – Rotor du moteur à courant continu

3. Collecteur

Est constituée par plusieurs lames de cuivre isolées .tel que chaque lame est soudée par un des deux fils de bobinage du rotor [43].



FIGURE II.6 – Collecteur

4. Balais

C'est un relie électrique qui connecte la partie fixe (inducteur) par la partie mobile (induit), et qui montré par la figure suivante [43].

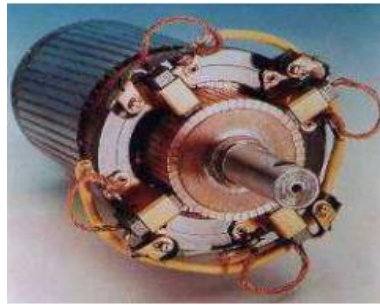


FIGURE II.7 – Balais du moteur à courant continu

II.2.3 Différentes méthodes d'excitation

a- Moteur à excitation série

Ce moteur contient deux enroulements statorique (inducteur) et rotorique (induit) qui relie en série parcourus en même tension V_a et même courant I_a . la figure ci dessous montre se moteur [23].

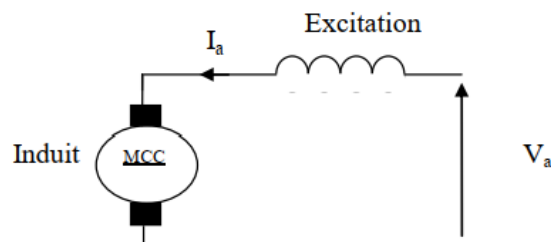


FIGURE II.8 – Schéma du moteur à excitation série

b- Moteur à excitation séparée

Cette moteur contient deux source, tel que la source d'alimentation d'enroulement statorique (inducteur) est indépendante de la source d'enroulement rotorique (l'induit) [23].

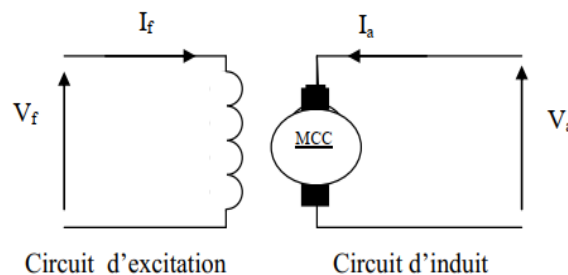


FIGURE II.9 – Schéma du moteur à excitation séparée

c- Moteur à excitation shunt

L'enroulement statorique est en parallèle avec l'enroulement rotorique tel que cette machine contient une seule alimentation [23].

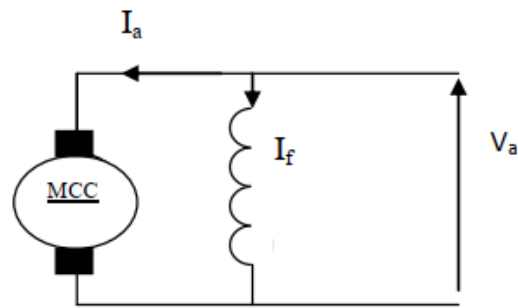


FIGURE II.10 – Schéma du moteur à excitation shunt

d- Moteur à excitation composé

L'enroulement d'inducteur est divisé, un connecté en série avec l'induit et la deuxième placé en parallèle [23].

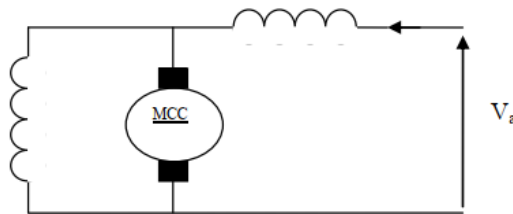


FIGURE II.11 – Schéma du moteur à excitation composé

II.2.4 Avantages et inconvénients du moteur à courant continu

Avantages

- Elle démarre séparément et facilement dans le cas de démarrages fréquents.
- Elle fonctionne moins de pollution et de bruit.
- L'inversement de sens de rotation ne dépend pas d'utilisation d'équipements mécaniques [38].

Inconvénients

- Elle est des pièces fragiles.
- Il faut changer les ballais Pour assurer la meilleure connexion.
- Le moteur à courant continu est plus cher que le moteur asynchrone triphasé de même puissance [38].

II.3 Moteur à courant continu à excitation séparée

II.3.1 Equations de fonctionnement en régime permanent

- Force contre électromotrice

Selon la loi de Faraday, la force contre électromotrice aux bornes de l'induit est proportionnelle au nombre de ces conducteurs N et à la vitesse de rotation n . la relation qui montre ça donnée comme suit [34] :

$$E = \frac{p}{2\pi a} N \phi \Omega \quad (\text{II.2})$$

Avec :

p : le nombre de pair de pôles

a : nombre de pair de voie parallèle

N : le nombre de conducteurs

ϕ : flux à travers les spires en Weber [wb]

Ω : vitesse de rotation en [rad/s]

$$E = K_e \Omega \quad (\text{II.3})$$

K_e : la constante de la F.c.e.m. $K_e = \frac{p}{2\pi a} N \phi$

- Tensions aux bornes de l'induit et l'inducteur

D'après la figure ci dessous et selon la loi de Kirchhoff, les tensions aux bornes de l'induit et l'inducteur sont données par les relations suivantes :

- **L'induit**

$$V_a = R_a I_a + E \quad (\text{II.4})$$

- **L'inducteur**

$$V_f = R_f I_f \quad (\text{II.5})$$

- Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique qui entrainé la rotation de rotor est donnée par la relation suivante :

$$P_{em} = C_{em} \Omega = E I_a \quad (\text{II.6})$$

$$C_{em} = \frac{E I_a}{\Omega} = \frac{p N \phi \Omega}{2\pi a \Omega} I_a$$

$$C_{em} = K_c I_a \quad (\text{II.7})$$

K_c : la constante de couple : $K_c = \frac{p}{2\pi a} N \phi$

II.3.2 Caractéristiques électromécaniques et mécanique

Le moteur à courant continu à excitation séparée bénéficie des avantages du contrôle de vitesse dans une large gamme limite. Cette type du moteur est très sensible aux changements de tension de l'induit et fonctionnée par une charge indépendant. Elle caractérise par un régulateur de vitesse très important et le courant de démarrage très fort pour éviter l'échauffement du circuit. La tension est proportionnelle à la vitesse et la même pour le courant avec le couple [24].

- **Caractéristique électromécanique de vitesse** : $\Omega = f(I_a), V_a$ et ϕ constantes

On'a :

$$V_a = R_a I_a + E$$

$$E = K_e \Omega$$

$$V_a = R_a I_a + K_e \Omega$$

Donc :

$$\Omega = \frac{V_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e} I_a \quad (\text{II.8})$$

Le tracé de la caractéristique correspondante est représenté sur la figure suivante.

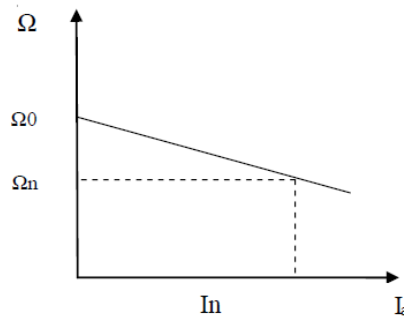


FIGURE II.12 – Caractéristique électromécanique de vitesse en fonction de courant

- **Caractéristique électromécanique du couple** : $C_{em} = f(I_a), V_a$ et ϕ constantes
On sait que :

$$C_{em} = K_c I_a$$

le tracé de cette caractéristique électromécanique du couple en fonction du courant est donnée par la figure suivante :

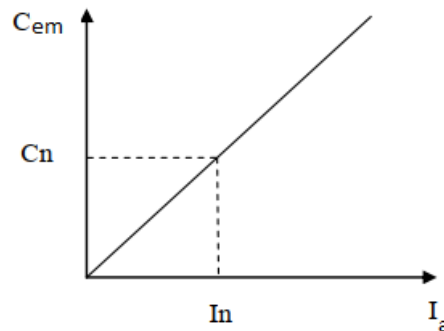


FIGURE II.13 – Caractéristique électromécanique du couple en fonction de courant d'induit

- **Caractéristique mécanique** : $C_{em} = f(\Omega), V_a$ et ϕ constantes
On'a :

$$V_a = R_a I_a + K_e \Omega$$

$$C_{em} = K_c I_a$$

par élimination de courant entre les relations de V_a et C_{em} , on obtient :

$$V_a = R_a \frac{C_{em}}{K_c} + K_e \Omega$$

D'ou :

$$C_{em} = \frac{K_c}{R_a} V_a - \frac{K_c^2}{R_a} \Omega \quad (\text{II.9})$$

Cette équation est représenté par la figure suivante.

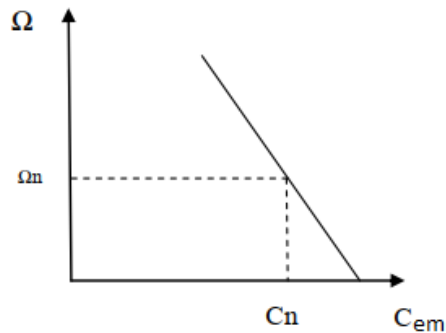


FIGURE II.14 – Caractéristique mécanique du couple en fonction de vitesse

II.3.3 Bilan des puissances et rendement

- Bilan des puissances

On peut résulter le bilan de puissance du moteur à courant continu en fonctionnement nominale dans la figure ci dessous.

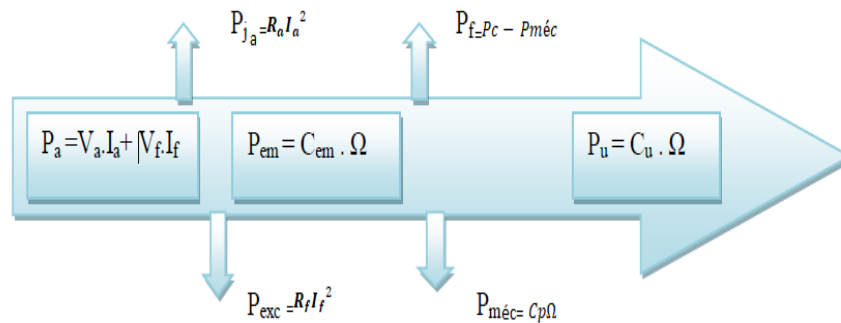


FIGURE II.15 – Bilan des puissances du moteur à courant continu

P_a : Puissance absorbée

P_u : Puissance utile

P_m : Puissance électromécanique

P_{ja} : Pertes joules statoriqueinduit

P_{exc} : Pertes joules rotorique(inducteur)

P_{mc} : Pertes mécaniques

P_c : Pertes collectives

P_{fer} : Pertes fer

- Rendement

Le rendement c'est le rapport entre la puissance utile (l'énergie fournit) et la puissance absorbé (l'énergie consommée pour fonctionner le moteur) [13].

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_a + \sum \text{pertes}} \quad (\text{II.10})$$

II.3.4 Principe de la variation de vitesse

La variation de vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée réside dans la variation de tension d'induit, tel que la vitesse est proportionnelle à cette tension, et la puissance varier mais le couple reste constant. d'autre manière il suffit de faire varier le flux magnétique qui crée par l'inducteur pour varie la vitesse si la tension d'induit reste constante. il y a plusieurs mode pour faire varier et réglé la vitesse permis ces modes [14],[30] :

- Réglage rhéostatique action sur R_a .
- Réglage de flux.
- Réglage par la tension d'induit.
- Réglage sur le courant d'excitation.

II.3.5 Modélisation dynamique du moteur à excitation séparée

Selon le schéma de la figure ci dessous du moteur à courant continu à excitation séparée qui régit par des équations qui croix à ces caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques [37].

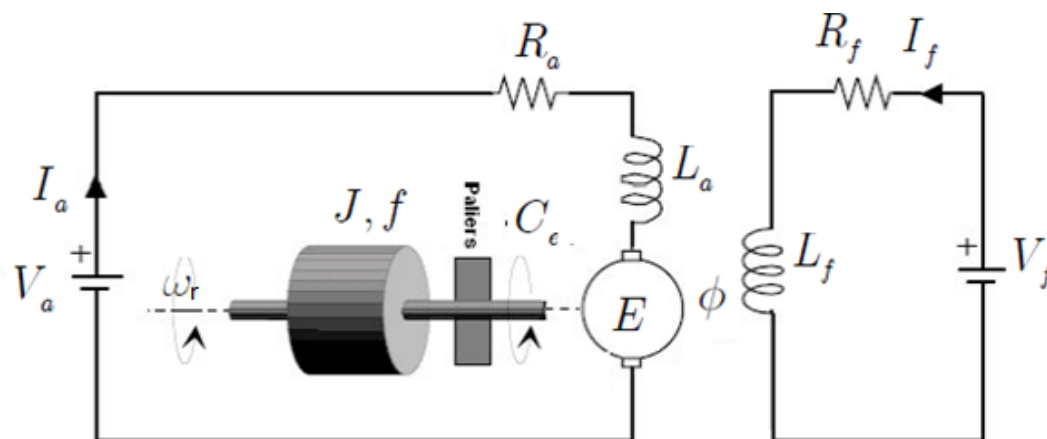


FIGURE II.16 – Schéma dynamique du moteur à excitation séparée

D'après les lois de Newton et les lois de Kirchhoff on obtient les équations différentielles suivantes :

- Equation de l'induit

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.11})$$

$$e(t) = M_f di_f \Omega(t) = K_e \Omega(t) \quad (\text{II.12})$$

- Equation de l'inducteur

$$v_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (\text{II.13})$$

- Equation de mécaniques

$$C_{em}(t) - C_r(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f\Omega(t) \quad (\text{II.14})$$

$$C_{em} = M_f di_f i_a(t) = K_c i_a(t) \quad (\text{II.15})$$

On peut écrit ces équation en transformé de Laplace comme suit :

- Equation de l'induit

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + E(s)$$

$$E(s) = K_e \Omega(s)$$

D'ou :

$$G_1(s) = \frac{I_a(s)}{V_a(s) - E(s)} = \frac{1}{R_a + L_a s} \quad (\text{II.16})$$

- Equation de l'inducteur

$$V_f(s) = R_f I_f(s) + L_f s I_f(s)$$

D'ou :

$$G_2(s) = \frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f + L_f s} \quad (\text{II.17})$$

- Equation mécaniques

$$C_{em}(s) = J s \Omega(s) + f \Omega(s)$$

$$C_{em} = K_c I_a(s)$$

D'ou :

$$G_3(s) = \frac{\Omega(s)}{C_{em}(s)} = \frac{1}{f + J s} \quad (\text{II.18})$$

II.4 Identification des paramètres du moteur à courant continu

II.4.1 Identification des paramètres électriques

Pour identifier et relever les paramètres du moteur à courant continu il y a des méthodes comme :

- Méthode de Pasek
- Méthode classique

On utilise la méthode classique pour identifier les paramètres de ce moteur.

II.4.1-a Mesure des résistances d'induit et d'inducteur

Pour mesurer les résistances de l'induit R_a et de l'inducteur R_f à chaud. Il y a la méthode qui s'appelle méthode de voltampèremétrie. Cette méthode permet de mesurer la tension et le courant tel que les valeurs de l'intensité de courant et s'effectuent jusqu'à 30% du courant nominale pour que la machine n'échauffe pas [14].

$$R_a = \frac{V_a}{I_a}$$

$$R_f = \frac{V_f}{I_f}$$

Les figures suivantes montrent la méthode de voltampèremétrie.

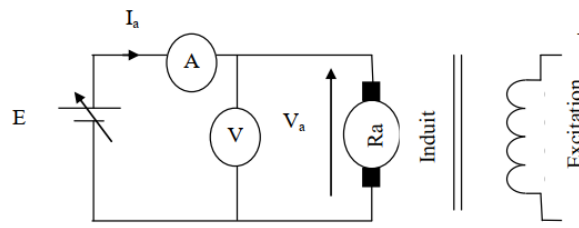


FIGURE II.17 – Détermination de résistance de l'induit R_a

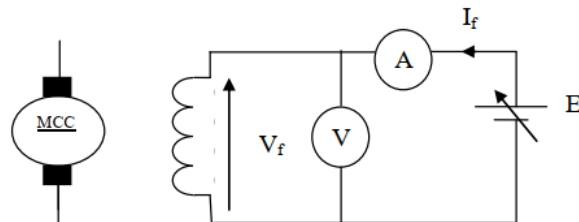


FIGURE II.18 – Détermination de résistance de l'inducteur R_f

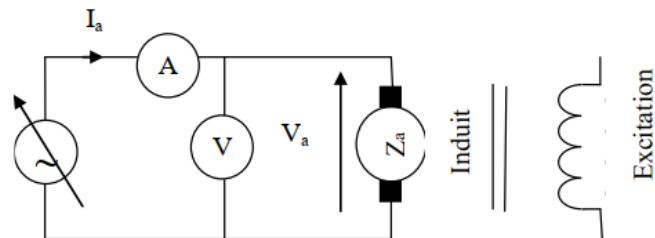
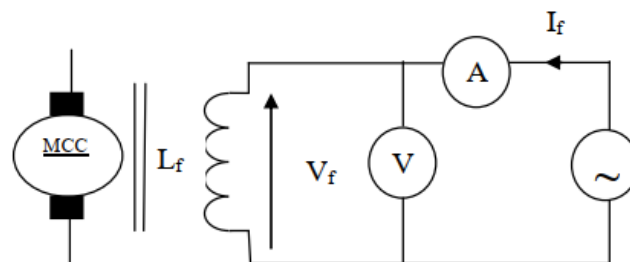
II.4.1-b Mesure des inductances d'induit et d'inducteur

Pour mesurer les inductances de l'induit L_a et de l'inducteur L_f . l'alimentation de cette moteur est en courant alternatif tel que les inductances de chaque enroulement donnée par les relations suivantes [14] :

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_a}{I_a}\right)^2 - R_a^2}$$

$$L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{V_f}{I_f}\right)^2 - R_f^2}$$

Les figures II.19 et II.20 montrent les schémas de mesure les inductances d'induit et d'inducteur.

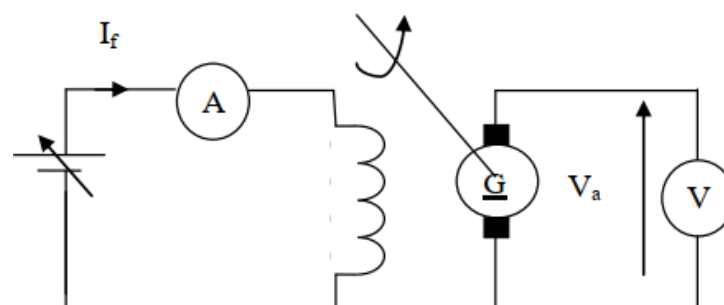
FIGURE II.19 – Détermination de l'inductance de l'induit L_a FIGURE II.20 – Détermination de l'inductance de l'inducteur L_f

II.4.1-c Détermination de la constante de la f.c.e.m et de couple

Pour identifier la constante de la force contre électromotrice K_e ou la constante de couple il faut de mesurer les caractéristiques $V_a(I_f)$ pour donne la pente qui doit représenter la valeur de $M_{fd}\Omega$ en essai à vide de moteur relever les caractéristiques $V_a(I_f)$ tel que sa vitesse nominale le moteur est fonctionner en génératrice. Et pour mesurer la constante K_e de couple électromotrice les caractéristiques qui doivent relever sont $C_{em} = f(I_a)$ [23].

- La relation de la tension d'induit à vide est donnée comme suit : $E = M_{fd}I_f\Omega$
- La relation de couple électromotrice : $C_{em} = M_{fd}I_fI_a$
- La constante de la f.c.e.m et de couple K_e est : $K_e = M_{fd}I_f = K_c$

La figure II.21 représente le schéma pour déterminer la constante de la f.c.e.m.

FIGURE II.21 – Détermination de la constante de la f.c.e.m K_e

II.4.2 Détermination des paramètres mécaniques

II.4.2-a Détermination du coefficient de frottement

L'équation mécanique du couple est donnée comme suit :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$$

à vide : $J \frac{d\Omega}{dt} = 0$

Donc :

$$C_{em} = f\Omega + C_s = K_c I_a$$

Les caractéristiques de $C_{em} = f(\Omega)$ à vide est donne comme la figure II.22.

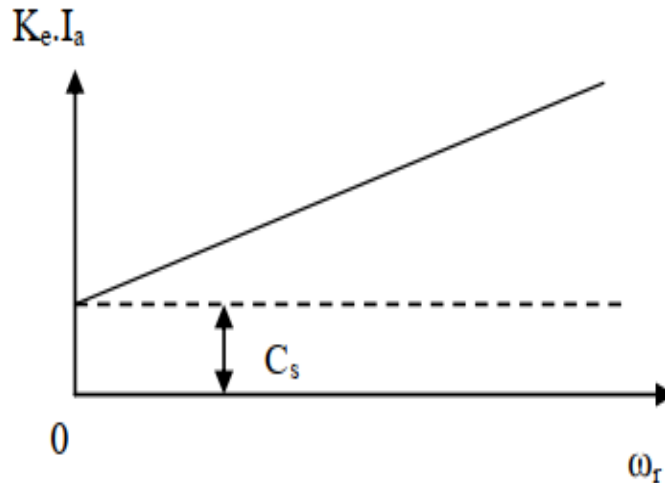


FIGURE II.22 – Caractéristiques de couple électromagnétique

A l'intersection de l'axe des ordonnées, on relever la valeur de couple statique C_s et le coefficient de frottement f c'est la pente de ces caractéristiques [23].

La figure II.23 représente le schéma pour déterminer le coefficient de frottement f .

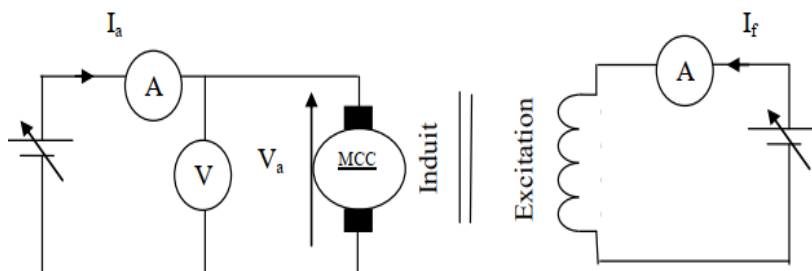


FIGURE II.23 – Détermination de coefficient de frottement f

II.4.2-b Détermination du moment d'inertie par l'essai du ralentissement

Pour déterminer le moment d'inertie J il faut que le moteur fonctionné à vide est l'entraînement du moteur la vitesse de rotation soit il est supérieur à la vitesse nominale. Puis en coupe l'alimentation de l'induit et l'inducteur sera alimentée en séparée. D'après on enregistrons les caractéristiques de vitesse en fonction du temps pour trouver le Δt [22].

L'équation mécanique est comme suit :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + C_p$$

à vide : $C_r = 0$

pas de courant d'induit : $C_{em} = 0$

L'expression de moment d'inertie est donnée par :

$$J = \frac{-C_p}{\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}}$$

— pour déterminer le couple des pertes à vide C_p il faut calculer les pertes à vide par la relation suivant :

La puissance absorbée par le moteur :

$$P_a = R_a I_a^2 + p_0 = V_a I_a$$

En déduire la puissance des pertes

$$p_0 = P_a - R_a I_a^2 = C_p \Omega_0$$

En déduire le couple des pertes :

$$C_p = \frac{p_0}{\Omega_0}$$

Enfin en déduire le moment d'inertie J

II.4.3 Validation expérimentale du modèle dynamique et des paramètres

II.4.3-a détermination des paramètres électriques

- **Mesure des résistances d'induit R_a et d'inducteur R_f**

Les résultats obtenus pour déterminer les résistances d'induit R_a et d'inducteur R_f et montrent sur les tableaux suivantes.

TABLE II.1 – Résultats obtenus pour déterminer R_a

V_a	V	18,5	20,5	23,6	26,5	30
I_a	A	1,8	2,0	2,3	2,5	2,8
R_a	Ω	10,27	10,25	10,26	10,6	10,71

TABLE II.2 – Résultats obtenus pour déterminer R_f

V_f	V	160	180	200	220	240
I_f	A	0,8	0,89	0,97	1,1	1,2
R_f	Ω	200	202	206	200	200

Donc la valeur moyenne des résistances d'induit et d'inducteur sont :

$$R_a = 10,41\Omega$$

$$R_f = 201,60\Omega$$

- **Mesure des inductances d'induit L_a et d'inducteur L_f**

Les résultats obtenus pour déterminer les impédances Z_a et Z_f et montrent dans les tableaux suivantes.

TABLE II.3 – Résultats obtenus pour déterminer l'impédance Z_a

V_a	V	54	63	81	94	106
I_a	A	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
R_a	Ω	67,5	63	67,5	67,1	66,25

TABLE II.4 – Résultats obtenus pour déterminer l'impédance Z_f

V_f	V	100	80	60	40	20
I_f	A	0,0032	0,0026	0,00205	0,0014	0,00082
R_f	Ω	31250	30769	29268	28571	24390

La valeur moyenne des impédances d'induit Z_a et d'inducteur Z_f sont :

$$Z_a = 66,27\Omega$$

$$Z_f = 28849,6\Omega$$

Donc en déduire les valeur des inductances par les relation suivantes :

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{(Z_a)^2 - R_a^2}$$

$$L_f = \frac{1}{\omega} \sqrt{(Z_f)^2 - R_f^2}$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f, f = 50Hz$$

On trouve :

$$L_a = 0,2083H$$

$$L_f = 91,8288H$$

- **détermination de la constante de f.c.é.m et de couple**

Les résultats obtenus par un essai a vide pour déterminer la constante de K_e est représenter par le tableau ci dessous :

TABLE II.5 – Mesures pour déterminer la constante K_e

I_f	A	0	0,02	0,05	0,07	0,09	0,1	0,11
E_{mon}	V	1,4	76	125	170	210	225	235
E_{des}	V	5,3	82	130	175	210	225	235
E_{moy}	V	3.35	79	127,5	172,5	210	225	235

– Les caractéristiques de $E_v(I_f)$ est comme suivant :

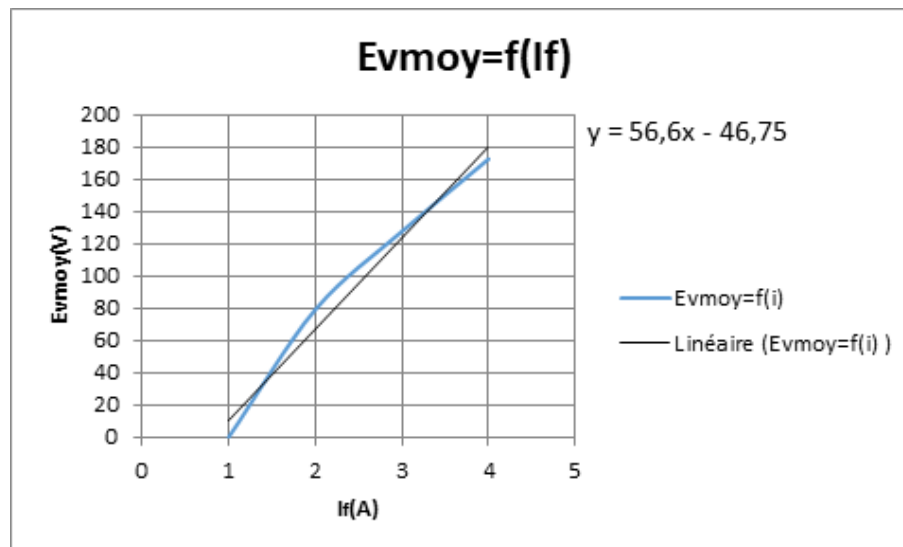


FIGURE II.24 – Caractéristiques de tension d'induit du moteur à vide

La vitesse nominale qui de cette moteur est : $n=3000tr/min$

La tension nominale dans cette essai est : $E=225V$

On sait que :

$$E = M_{fd} I_f \Omega$$

$$\Omega = 2\pi n = 314tr/min$$

$$M_{fd} = \frac{E}{I_f \Omega} = 7,1H$$

D'ou :

$$K_e = M_{fd} I_f = 0,71V/rad/s$$

la valeur de la constante de la f.c.e.m et du couple sont le même : $K_c = 0,71Nm/A$

II.4.3-b détermination des paramètres mécaniques

- détermination de coefficient de frottement f

Pour déterminer le coefficient de frottement f ont relevé les caractéristiques de $C_e m = f(\Omega)$ à vide comme la figure II.25 . Ces caractéristiques sont déterminé par le tableau suivant :

TABLE II.6 – Résultats obtenus pour déterminer le frottement f

n	tr/min	1010	1403	1887	2178	2980	3363
Ω	rd/s	105,76	146,92	197,6	228,07	312,06	352,17
C_p	Nm	0,2094	0,2236	0,2414	0,2556	0,2911	0,3124
I_a	A	0,295	0,315	0,34	0,36	0,41	0,44
V_a	V	80	110	145	172	235	265

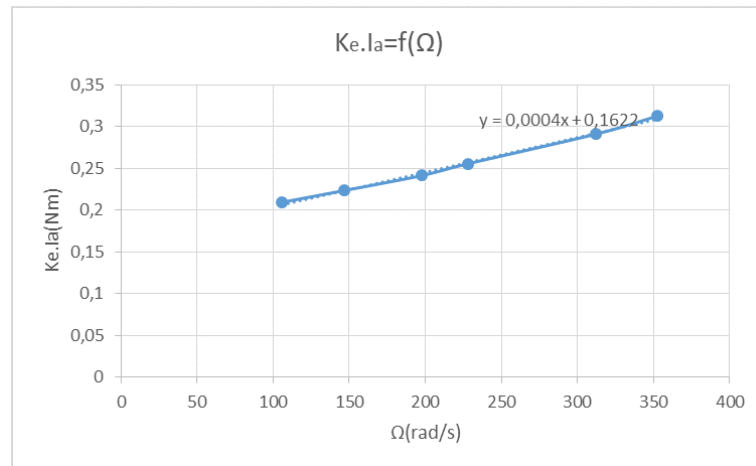


FIGURE II.25 – Caractéristiques du couple électromagnétique du moteur à vide

On sait que l'équation de couple : $K_e I_a = f\Omega + C_s$

D'après la figure l'équation graphique est : $y = 0.0004x + 0.1622$

–Donc par identification entre l'équation de couple et de graphe on trouve :

$f=0.0004 \text{ Nm/rad/s}$

$C_s = 0.1622 \text{ Nm}$

Détermination du moment d'inertie par l'essai du ralentissement

Les caractéristiques de la vitesse de rotation en fonction de temps de ralentissement sont montrées dans la figure suivant :

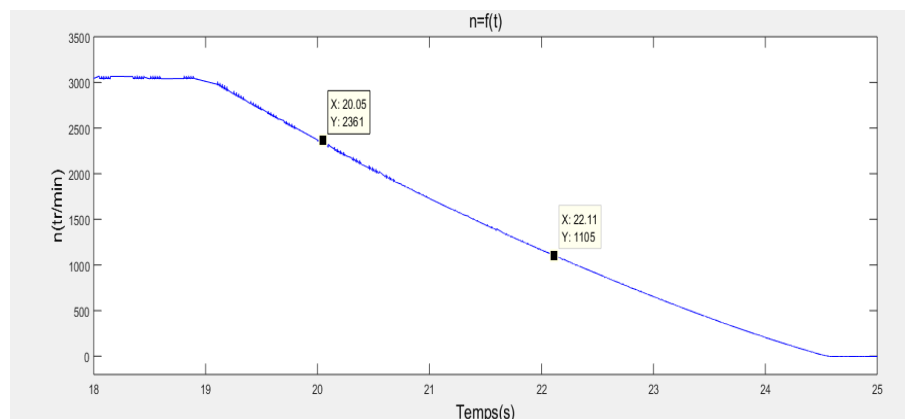


FIGURE II.26 – Caractéristiques de la vitesse de rotation de ralentissement

La puissance absorbée :

$$P_a = V_a I_a = 550W$$

En déduire la puissance des pertes :

$$p_0 = P_a - R_a I_a^2 = 484,93W$$

Le couple des pertes C_p :

$$C_p = \frac{p_0}{\Omega_0} = 1,54Nm$$

On relie les cordones de deux points pour déterminer $\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 = 2361 \text{tr/min} \\ t_1 = 20,05 \text{s} \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} n_2 = 1105 \text{tr/min} \\ t_2 = 22,11 \text{s} \end{array} \right.$$

D'ou :

$$\frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{t_2 - t_1} = 63,85 \text{ rad/s}^2$$

Enfin en déduire le moment d'inertie J :

$$J = 0.024 \text{Kg.m}^2$$

II.4.3-c Simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

Les fonctions de transferts qui sont obtenus nous permettent de modéliser le schéma bloc du MCC qui représente les paramètres d'entrée et de sortie.

Dans le schéma bloc la tension à la borne de l'induit c'est une grandeur d'entrée et la vitesse du moteur c'est un grandeur de sortie. le schéma bloc qui obtenu appelée schéma tension-vitesse [22].

1- Modèle Simulink de la MCC à vide

On utilise le modèle simulink de la machine à courant continu soit à vide soit en charge avec un temps de simulation $t = 10s$:

- Après la simulation on trouve les résultats suivants :

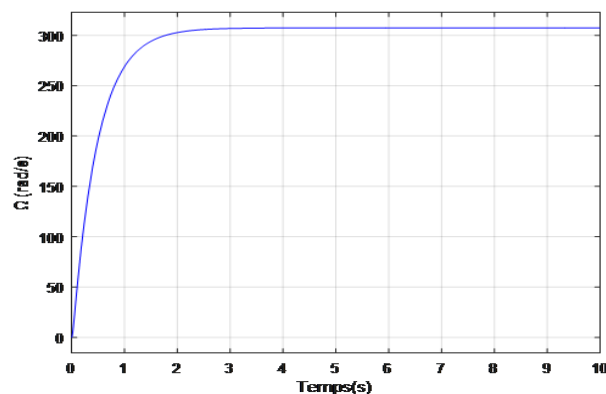


FIGURE II.27 – Vitesse de rotation du MCC à vide

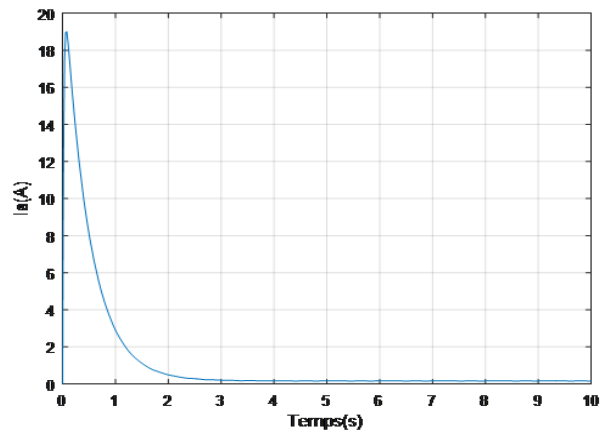


FIGURE II.28 – Courant d'induit du moteur à vide

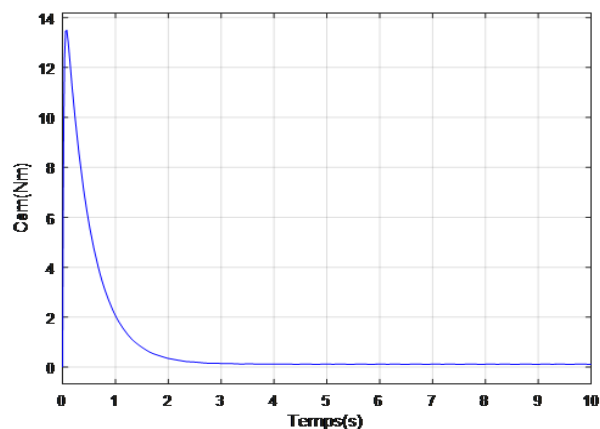


FIGURE II.29 – Couple électromagnétique du MCC à vide

Interprétation des résultats

- Le fonctionnement du moteur à vide ,on remarque que la vitesse de rotation Ω elle est nulle donc la f.c.e.m E est nulle car la f.c.e.m suit à la vitesse de rotation ($E = K_e \cdot \Omega$).
- Le courant d'induit $I_a = \frac{V_a}{R_a}$ suit à la valeur de résistance d'induit R_a ,donc lorsque le moteur démarre la résistance d'induit est plus faible et le courant I_a augmente ,puis lorsque la vitesse de rotation augmente à sa vitesse nominale ,la f.c.e.m augmente et le courant d'induit diminue .Donc on dit que le courant d'induit diminue avec l'augmentation de vitesse .
- Au démarrage les conducteurs du moteur produit un couple qui est proportionnelle au courant d'induit I_a tel que $C_{em} = K_c \cdot I_a$.
- La f.c.e.m de cette moteur est inférieur à la tension nominale pour le le passage de courant nécessaire dans l'induit qui fait la production du couple électromagnétique.

- 2- **Modèle Simulink de la MCC en charge avec un couple de charge à $t = 3s$**
 -Après la simulation on trouve :

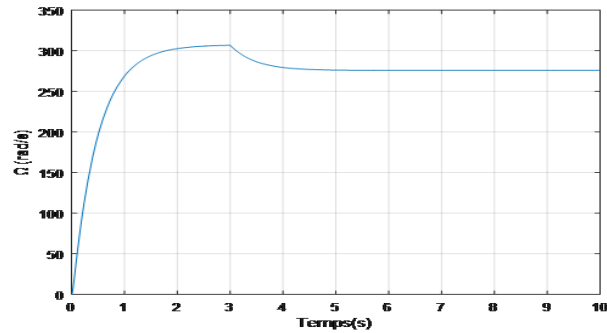


FIGURE II.30 – Vitesse de rotation du MCC en charge

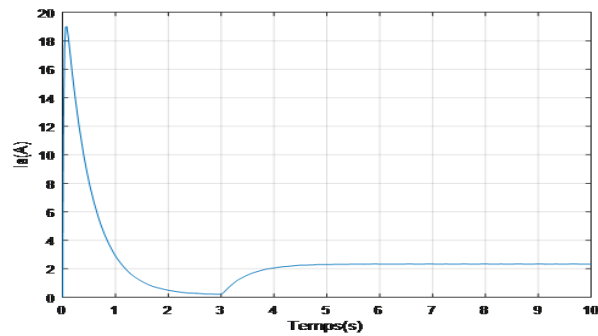


FIGURE II.31 – Courant d'induit du moteur en charge

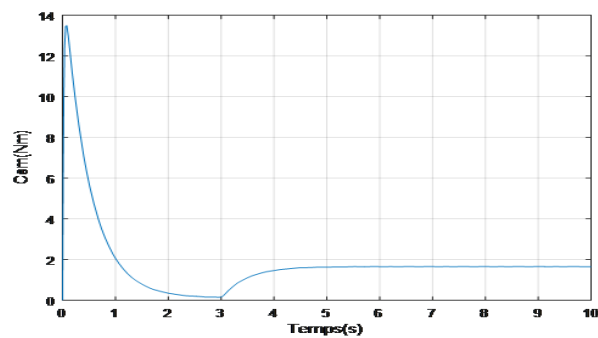


FIGURE II.32 – Couple électromagnétique du MCC en charge

Interprétation des résultats

- Le fonctionnement du moteur en charge, le couple résistant $C_r = 1.54 Nm$ qui appliquée à l'arbre du moteur qui tourne à vide .On remarque que le courant est faible (diminution) donc il n y a pas une production du couple qui entrainer la charge.

- à $t = 3s$, la vitesse diminue, la f.c.e.m diminue et le courant d'induit elle augmente donc il y a un passage de courant, le moteur produit un couple C_{em} qui entrainer cette charge.

II.5 Convertisseurs à base de hacheurs pour moteurs à courant continu

Il y a plusieurs méthodes pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu. Permet ces méthodes, la variation de la tension aux bornes de l'induit mais dans cette méthode il y a un problème qui consiste à consommer une partie d'énergie par l'alimentation. Donc on utilise d'autre manière pour consommer moins d'énergie, cette manière consiste à utiliser une alimentation de façon discontinue avec le hacheur pour varier la tension moyenne. On parle alors sur le principe de MLI (modulation par largeur d'impulsion) [23].

Le hacheur est un convertisseur qui permet de convertir une source de tension continue fixe à une tension moyenne continue.

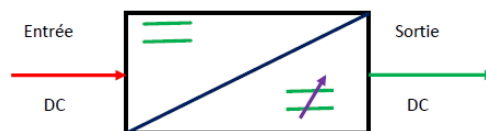


FIGURE II.33 – Convertisseur continu-continu (hacheur)

Les interrupteurs utilisés dans ce convertisseur sont des interrupteurs commandés comme les thyristors GTO ou les transistors bipolaires, IGBT.

II.5.1 Hacheur série

C'est un hacheur à liaison directe entre une source de tension et un récepteur qui est une charge de courant. Tel que la tension de source (l'entrée) est supérieure à la tension moyenne de récepteur (sortie), il contient un interrupteur commandé (blocage et amorçage) comme transistor, IGBT ou MOSFET et un interrupteur non commandé la diode. La figure suivante explique le schéma fonctionnel de hacheur série [21].

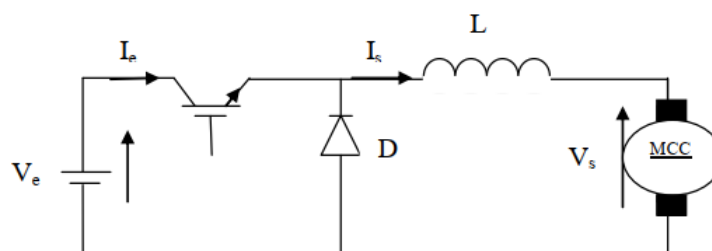


FIGURE II.34 – Schéma fonctionnel de hacheur série

- Principe de fonctionnement

- $0 \leq t \leq \alpha T$:

L'interrupteur K est passant, donc la diode polarisée en inversé est bloquée. Donc le réseau fournit d'énergie.

$$\begin{cases} V_D = -V_e \\ V_s = V_e \\ I_s = I_e \end{cases}$$

- $\alpha T \leq t \leq T$:

L'interrupteur K est bloqué, la diode est passant (la polarisation direct). L'inductance permet de lissage le courant (continuité).

$$\begin{cases} I_s = 0 \\ I_D = I_e \\ V_D = 0 \end{cases}$$

La valeur moyenne du tension de la charge :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V(t) dt = \alpha V_e$$

I_s : Le courant de la charge (A).

I_e : Le courant de la source (A).

V_e : La tension de source (V).

V_c : La tension aux bornes de la charge (V).

V_D : La tension aux bornes de la diode D (V)

α : Le rapport cyclique compris entre $[0 \ 1]$. c'est le rapport entre la durée de l'état passante de K et la période de fonctionnement de K.

II.5.2 Hacheur réversible en courant

C'est un hacheur à liaison direct entre la source et le récepteur et l'interrupteur à réversible en courant, il comporte deux composants qui lié en parallèle [23] :

- Le transistor ou l'IGBT sont des interrupteurs commandé de fermeture et l'ouverture.
- La diode c'est un interrupteur non commandé polarisé en direct (passante) et en inverse (bloqué) .

Figure II.35 c'est le schéma d'un interrupteur réversible en courant.

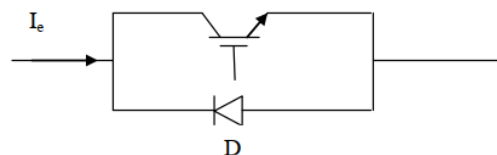


FIGURE II.35 – Interrupteur réversible en courant

Figure II.36 représente le schéma fonctionnel de hacheur réversible en courant.

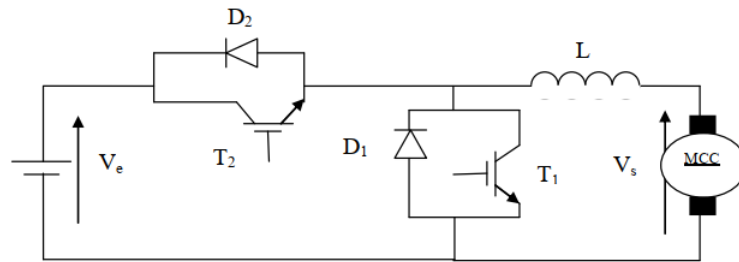


FIGURE II.36 – Schéma fonctionnelle du hacheur réversible en courant

- Principe de fonctionnement

L'interrupteur T_2 fonctionne périodiquement avec T_1 donc si T_2 commandé alors T_1 n'est pas commandé est l'inverse et le même pour D_2 et D_1 si D_2 passante alors D_1 bloqué.

1. Etat normale

T_2 doit être commandé et T_1 n'est pas commandé et D_1 c'est un court-circuit si $T_2 = 1$ et bloquée si $D_2 = 1$ avec un rapport cyclique α_1 . La tension moyenne est comme suit :

$$V_{moy} = \alpha_1 V_e$$

2. Etat de fonctionnement

T_1 doit être commandé et T_2 n'est pas commandé et D_2 ne participent pas au fonctionnement. La tension moyenne est :

$$V_{moy} = 1 - \alpha_2 V_e$$

II.5.3 Hacheur réversible en tension

La valeur de rapport cyclique α ce qui donne la valeur de la tension de source elle prend soit $+V_e$ ou $-V_e$. Donc avec cette valeur permet d'obtenir la valeur moyenne de tension de la charge tel que cette valeur soit positive ou négative. Le signe de courant ne change pas dans la charge. La charge est composé par une inductance et un moteur à courant continu qui connecté en série tel que le moteur fonctionne avec un courant de même signe [42].

Figure II.37 représente le schéma de fonctionnement de hacheur réversible en tension.

- Principe de fonctionnement

- $0 \leq t \leq \alpha T$:

T_1 et T_2 sont fermée alors elles sont passantes donc D_1 et D_2 sont bloquées. la tension de charge est $V_s = +V_e$.

- $\alpha T \leq t \leq T$:

T_1 et T_2 sont ouvertes alors elles sont bloquées donc D_1 et D_2 sont passantes. la tension de charge est $V_s = -V_e$.

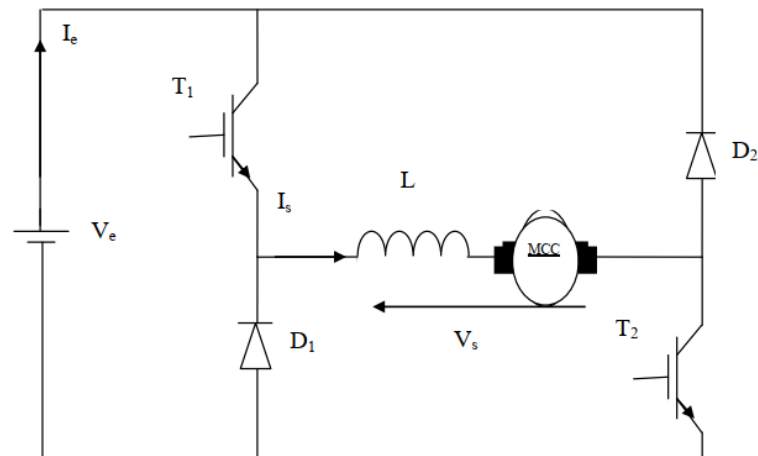


FIGURE II.37 – Hacheur réversible en tension

II.5.4 Hacheur réversible en courant et en tension

S'appelé hacheur à quatre quadrant la structure du hacheur de tension réversible qui vient d'être donnée à la place La commutation est effectuée par les interrupteurs de courant réversible. Donc le signe de courant est changer comme le hacheur réversible en courant .La diode et le transistor sont passantes ou bloquées suivent le signe de courant [42].

La figure suivante représente le schéma principal du hacheur réversible en courant et en tension.

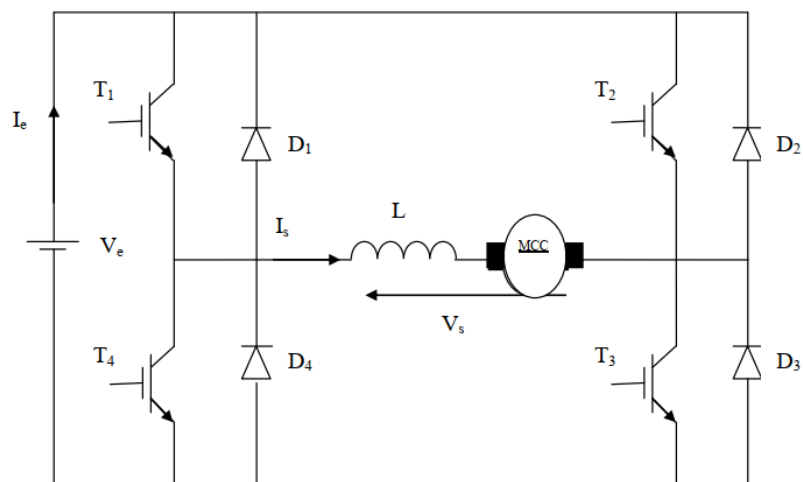


FIGURE II.38 – Hacheur réversible en courant et en tension

- Principe de fonctionnement

Cette hacheur est permet de fonctionner en 4 quadrants, la figure II.39 représente le schéma fonctionnelle à quatre quadrants.

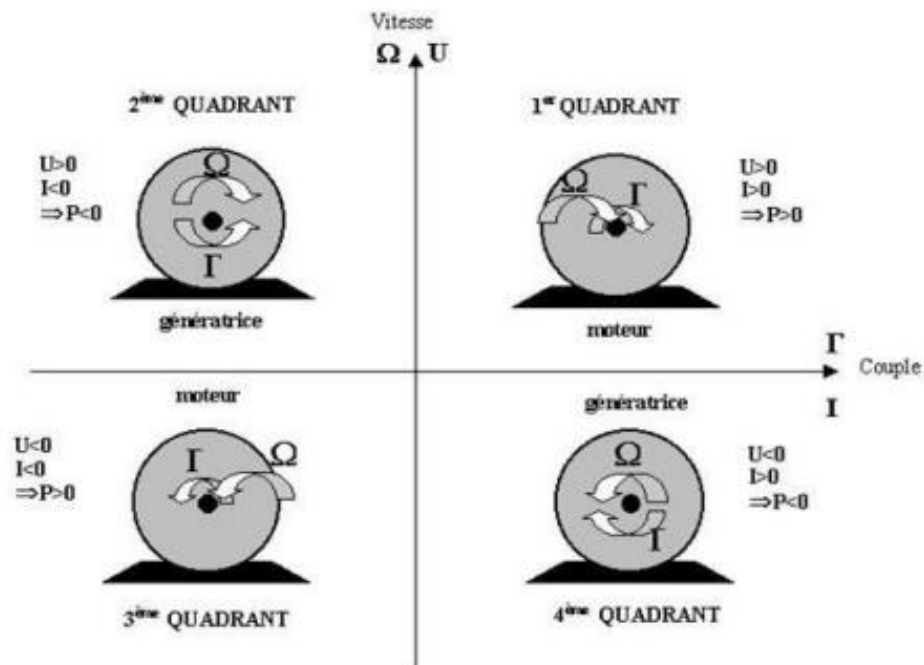


FIGURE II.39 – Schéma de fonctionnement à quatre quadrants

1. 1^{ère} Quadrant :

Le moteur fonctionne normale. T_4 Fermé et T_3 doit être bloquée, T_1 et T_2 sont fonctionnées de façon complémentaire suivie le rapport cyclique α .

— $0 \leq t \leq \alpha T$:

T_1 et T_4 sont passantes alors le moteur et l'inductance pompent l'énergie qui fournit par la source.

— $\alpha T \leq t \leq T$:

D_2 et T_4 sont passants, l'inductance transfère l'énergie au moteur. la valeur de tension moyenne de récepteur est positive :

$$V_s = \alpha V_e$$

2. 3^{ème} Quadrant :

Le moteur fonctionne dans le sens inverse. Les interrupteurs sont fonctionnés de façon complémentaire, T_2 en permanence et T_1 elle est bloquée, T_3 et T_4 sont fonctionnées de façon complémentaires suivent le rapport cyclique α .

— $0 \leq t \leq \alpha T$:

T_3 et T_2 sont passantes alors le moteurs et l'inductance pompent l'énergie de source.

— $\alpha T \leq t \leq T$:

D_4 et T_2 sont passants, la bobine transfère de l'énergie au moteur dans une phase de roue libre. La tension moyenne de récepteur est négative.

$$V_s = -\alpha V_e$$

II.5.5 Technique de commande à MLI

Pour commander les interrupteurs des hacheurs il y a plusieurs techniques de commande. Le choix de technique dépend de type d'application qui doit que l'appareil est désigné .tel que la tension de sortie dépend de cette technique qui utilisé. La technique ou la méthode qui doit régler la variation de vitesse de moteur à courant continu est appelé la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI [42].

II.5.5-a Principe de la commande MLI

Le principe de la commande MLI consiste que la tension de sortie est formée par un succession d'amplitude qui égale à la tension continu d'alimentation et de largeur d'impulsion variable .tel que cette technique fondé sur le découpage des ondes rectangulaire qui produit un signal MLI et qu'il est la comparaison entre deux signaux se sont [42] :

a- **Signal de référence (modulatrice)**

Est un signal continue qui varie entre deux seuils dépend de notre application.

b- **Signal de porteuse**

Est un signal de haute fréquence qui la cadence de la commutation des interrupteurs.

c- Les temps de commutation des interrupteurs donnée par l'intersection des signaux.

La figure II.40 représente la réalisation électronique de MLI.

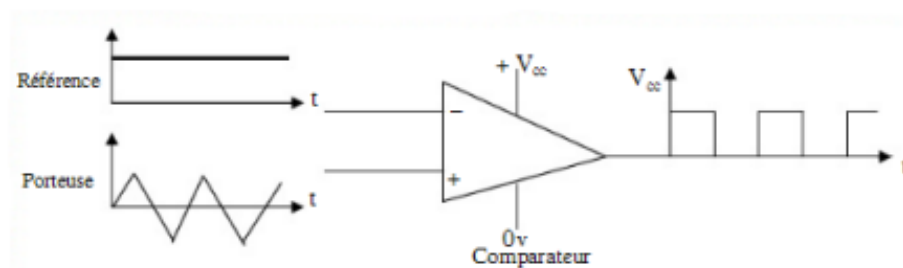


FIGURE II.40 – Réalisation de signal MLI

II.6 Commande du moteur à excitation séparée

II.6.1 Commande PI en régulation de vitesse

La régulation est une technique utilisée pour contrôler les grandeurs physiques du système comme la régulation de vitesse et le courant, le couple. Tel que le réglage de vitesse rigide de l'ajout d'un correcteur PI pour optimiser ces performances de ce moteur [43],[36].

La structure d'un variateur de vitesse (réglage de vitesse) comporte deux boucles de régulation sont le boucle de régulation de vitesse Ω et le boucle de régulation de courant I . La grandeur principale du moteur est la vitesse et la tension tel que cette structure permet de comparer la tension correspond à la vitesse réelle et la tension de référence [23].

II.6.2 Structure d'un régulateur PI

La commande d'une régulation PI proportionnelle intégrale est un commande qui insérée dans la chaine directe de l'asservissement. Ce régulateur permettre de élaborer avec le signal d'erreur $e(t)$ et la commande $u(t)$. La figure suivante montre le schéma bloc de cette structure [10].

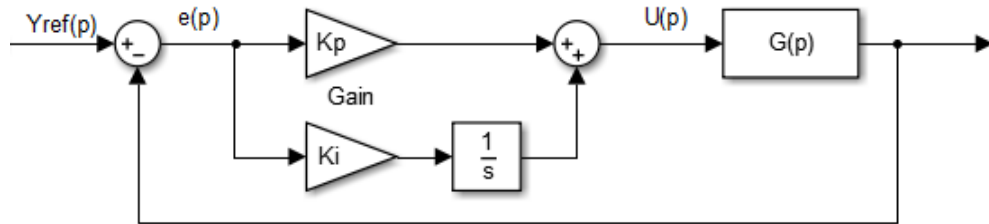


FIGURE II.41 – Structure du régulateur de vitesse PI

La fonction de transfert de cette structure est donnée comme suit :

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = K \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$K = K_p \text{ et } T_i = \frac{K_p}{K_i}$$

K_p : Gain d'action proportionnelle.

K_i : Gain d'action intégrale.

T_i : Constante de temps, ou temps d'action intégrale.

II.6.3 Calcul de régulateurs de système

La figure dans l'Annexe A montre le schéma Simulink qui permet de calculer les régulateurs pour la commande d'un MCC.

II.6.3-a Régulateur de courant

La fonction de transfert en boucle ouvert :

$$G_i(s) = \frac{I_a(s)}{V_e(s)} \quad (\text{II.20})$$

$$I_a(s) = \frac{1}{R_a + L_a s} \frac{K_{cm}}{1 + T_{cm} s} V_e(s) \quad (\text{II.21})$$

Donc :

$$G_i(s) = \frac{I_a(s)}{V_e(s)} = \frac{K_{cm}}{(R_a + L_a s)(1 + T_{cm} s)} \quad (\text{II.22})$$

On sait que $T_e = \frac{L_a}{R_a}$

$$G_i(s) = \frac{K_{cm}/R_a}{(R_a + L_a s)(1 + T_{cm} s)} \quad (\text{II.23})$$

On néglige $T_{cm} \ll T_e$ et on obtient :

$$G_i(s) = \frac{K_{cm}/R_a}{1 + T_e s} = \frac{G}{1 + T_e s} \quad (\text{II.24})$$

La fonction de transfert d'un correcteur PI est donnée comme suit :

$$C_i(s) = K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \quad (\text{II.25})$$

$$C_i(s) = K_{pi} + \frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s} = \left(\frac{s \frac{K_{pi}}{K_{ii}} + 1}{s} \right) K_{ii} = K_{ii} \frac{(1 + T_i s)}{s} \quad (\text{II.26})$$

Avec la méthode de compensation des pôles on choisit $\frac{K_{pi}}{K_{ii}} = T_i = T_e$. Donc la fonction de transfert de ce système en boucle fermée est comme suit :

$$G_{ibf}(s) = \frac{C_i(s)G_i(s)}{1 + C_i(s)G_i(s)} \quad (\text{II.27})$$

$$G_{ibf}(s) = \frac{K_{ii} \frac{(1+T_i s)}{s} \frac{G}{(1+T_e s)}}{1 + K_{ii} \frac{(1+T_i s)}{s} \frac{G}{(1+T_e s)}} \quad (\text{II.28})$$

$$G_{ibf}(s) = \frac{K_{ii}G}{s + K_{ii}G} = \frac{1}{1 + T_{bf}s} \quad (\text{II.29})$$

Donc :

$$T_{bf} = \frac{1}{K_{ii} \cdot G} = T_e$$

$$K_{ii} = \frac{1}{G \cdot T_e}$$

$$K_{pi} = T_e \cdot K_{ii}$$

II.6.3-b Régulateur de vitesse

Le couple électromagnétique est un couple qui résiste au couple d'entraînement de vent. L'importance d'un l'action intégrale est annulé l'erreur statique et on pose que le couple résistance C_r est considérée comme une perturbation donc $C_r = 0$, car cette couple sera compenser par l'action intégrale [25].

Système régulé régit par une FT du deuxième ordre

Le système régulé par une fonction de transfert de deuxième ordre est besoin a ajouté des paramètres comme le temps de réponse t_r , le dépassement D et la pulsation propre ω_n . Tel que ces paramètres de cette régulateur K_p et K_i sont donnent en fonction de deux grandeurs; le coefficient d'amortissement ξ et la pulsation propre ω_n .

La fonction de transfert on boucle ouvert :

$$G_v(s) = \frac{\Omega(s)}{C_{em}(s)} = \frac{K_c}{Js + f} \quad (\text{II.30})$$

La fonction de transfert de correcteur PI :

$$C_v(s) = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} = \frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s} \quad (\text{II.31})$$

La fonction de transfert en boucle fermée :

$$G_{vbf}(s) = \frac{G_v(s)C_v(s)}{1 + G_v(s)C_v(s)} \quad (\text{II.32})$$

$$G_{vbf}(s) = \frac{K_c(K_{pv}s + K_{iv})}{s^2 + \left(\frac{f + K_c K_{pv}}{J}\right)s + \left(\frac{K_{iv} K_c}{J}\right)} \quad (\text{II.33})$$

La forme canonique du système de deuxième ordre est donnée comme suit :

$$F(s) = \frac{G(s)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II.34})$$

Par identification entre la forme canonique du système de deuxième ordre $F(s)$ et la fonction transfert en boucle fermée $G_{vbf}(s)$ on obtient les paramètres de régulateur comme suit :

$$K_{pv} = \frac{2\xi\omega_n J - f}{K_c}$$

$$K_{iv} = \frac{J\omega_n^2}{K_c}$$

Par coefficient d'amortissement $\xi = 0.707$ (cas choisit) on trouve le dépassement et le temps de réponse avec la pulsation propre comme suit :

$$\omega_n t_r = 3$$

$$D = 5\%$$

Pour trouve la constante de temps τ on alimente le moteur direct par un tension nominale comme la représente par la figure annexeA :

–Après la simulation on trouve :

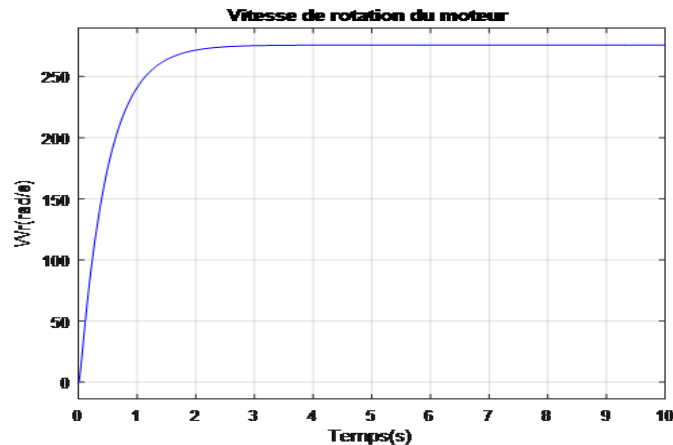


FIGURE II.42 – Vitesse de rotation du moteur seul

Donc on peut tirer la constante de temps qui correspond à 63% de la valeur finale de vitesse et qui est : $\tau = 0.4s$

Donc :

$$t_r = 3\tau = 1.4s$$

On va améliorer les paramètres de régulateur PI de vitesse par la méthode d'essai erreur afin d'avoir un temps de réponse inférieur à 1s.

Par l'essai erreur : $K_p=1, K_i=0.0263$.

II.6.4 Simulation du MCC avec régulation

Après la simulation de la commande du MCC par régulateur PI et par une couple résistant $C_r = 1.21Nm$ avec un temps de simulation $t = 10s$. On trouve les résultats suivants :

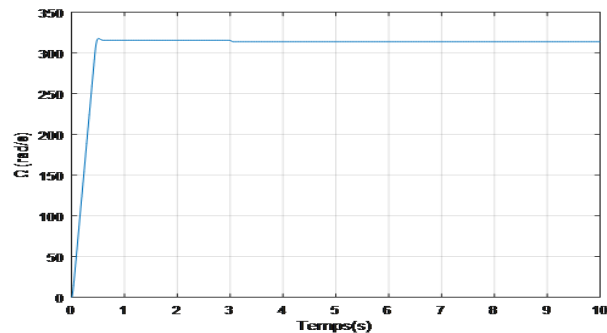


FIGURE II.43 – Vitesse de rotation du MCC avec régulation

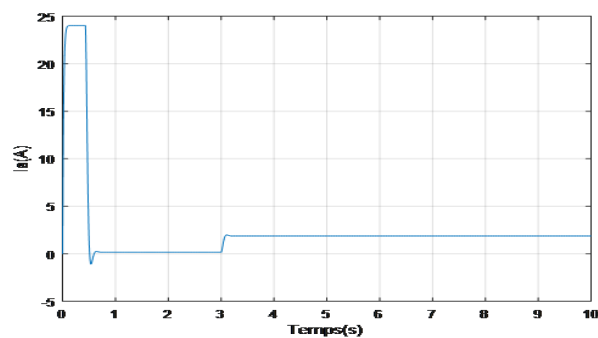


FIGURE II.44 – Courant d'induit du MCC avec régulation

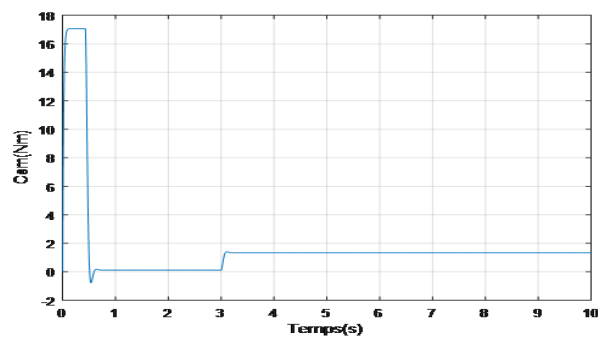


FIGURE II.45 – Couple électromagnétique du MCC avec régulation

Interprétation des résultats

On remarque que la vitesse remette à sa vitesse nominale $\omega_r = 314rad/s$, car il y a un régulateur de vitesse qui relie avec le moteur.

Le signale de courant d'induit elle augmente, puis elle remette à sa courant nominale $I_a = 2.5A$. Donc le régulateur de courant intervient pour régler le courant d'induit.

On remarque qu'il y a un dépassement de 5% par ce qu'il y a un zéro dans la fonction de transfert en boucle fermée. Par conséquent, le rôle de ces régulateurs soit de vitesse soit de courant sont permettent de régler et contrôler ces performances de cette système. Le couple résistant qui nous ajoutons permet de chuter la vitesse et augmenter le courant.

On sait que Le régulateur qui commander ce moteur est comprend deux structures ,un boucle interne qui est le régulateur de courant qui régler le courant et le couple ,et un boucle externe qui est le boucle de vitesse qui régler la vitesse de rotation de ce moteur , tel que le boucle de courant et plus rapide de 10 fois par rapport a le boucle de vitesse pour avoir une bonne régulation.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre on'a étudiée le moteur à courant continu de façon bien détaillée, on avoir la constitution de cette machine, ainsi l'identification des différentes paramètres de fonctionnement à travers des essais pratiques, puis on'a la modélisation par des schémas de simulation qui convient de cette machine.

Ensuite on'a fait la commande de cette moteur par des régulateurs PI de courant et de vitesse et on'a calculée les paramètres du régulateur par la méthode de compensation des pôles et par la méthode de l'identification avec la fonction de transfert de deuxième ordre pour faire une bonne simulation.

Dans le chapitre suivant nous allons étudier les différentes modélisation de la turbine éolienne à travers des équations principales de leur fonctionnement pour faire l'association du turbine avec le moteur à courant continu.

Chapitre III

Modélisation de la turbine éolienne

SOMMAIRE

III.1 INTRODUCTION	57
III.2 MODÉLISATION DU VITESSE DE VENT	57
III.3 MODÉLISATION DYNAMIQUE DE LA TURBINE ÉOLIENNE	57
III.3.1 Aérodynamique	57
III.3.2 Modèle dynamique	59
III.3.3 Modélisation de multiplicateur	60
III.3.4 Modélisation de l'arbre mécanique	60
III.4 RÉSULTATS DE SIMULATIONS	61
III.5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	64
III.6 DIFFÉRENTS TYPES DE MPPT POUR LES APPLICATIONS ÉOLIENNES	65
III.6.1 Maximisation MPPT sans la connaissance de la courbe C_p	65
III.6.2 Maximisation MPPT avec la connaissance de la courbe C_p	65
III.6.3 Maximisation MPPT sans asservissement de la vitesse	65
III.6.4 Maximisation MPPT avec asservissement de la vitesse	67
III.7 COMMANDE DE L'ANGLE DE CALAGE	68
III.8 CONCLUSION	68

III.1 Introduction

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. C'est une conversion directe et régulière qui s'effectue en deux niveaux, celui de la turbine et celui de la génératrice [11].

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la conversion mécanique qui s'effectue au niveau de l'arbre de transmission, on va modéliser tout d'abord le vent puis la turbine éolienne après nous allons étudier leurs comportements en utilisant le logiciel Matlab-Simulink [11].

III.2 Modélisation du vitesse de vent

Le vent en principe c'est la source d'énergie des éoliennes car l'énergie cinétique est une énergie qui contenue dans le vent est partiellement convertie en énergie mécanique par la turbine, puis il est alimenté par une machine à courant continu. La modélisation des changements de vent est appropriée car la précision de la simulation dépendra de la qualité de son modèle. Les caractéristiques de la vitesse de vent est produites par plusieurs méthodes comme les mesures expérimentales à partir d'un site bien déterminé et la modélisation analytique par le modèle mathématiques. Dans ce cas on utilisera la méthode qui est la plus utilisée pour modéliser le vent tel que cette méthode est utilisée la caractéristique spectrale de Van Der Hoven. La vitesse du vent est une fonction scalaire évolue par le temps $V = f(t)$ [18],[7].

La vitesse de vent peut être représentée par la somme des vitesses moyennes et aléatoires.

$$V(t) = V_0 + V_T(t)$$

$$V(t) = V_0 + \sum A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (\text{III.1})$$

D'où :

V_T : La vitesse de perturbation du vent est une opération stationnaire.

V_0 : La vitesse moyenne de vent varie dans une longue période.

A_i, ω_i et φ_i : l'amplitude, la pulsation et la phase de la vitesse du vent aléatoire.

III.3 Modélisation dynamique de la turbine éolienne

III.3.1 Aérodynamique

La puissance qui est produite par le vent qui est appliquée par les pales d'éolienne dépend de la surface S et de la vitesse du vent V et de la densité de l'air ρ . Cette équation est donnée par [7] :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot V^3 \quad (\text{III.2})$$

D'où :

$$S = \pi R^2$$

R : le rayon de la turbine (la longueur des pales) en m.

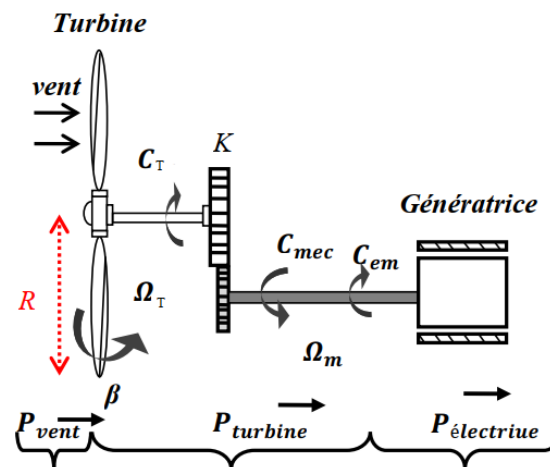


FIGURE III.1 – Schéma de la turbine éolienne

La puissance mécanique est convertie par une turbine du vent. La puissance de turbine P_T et dépend du coefficient de puissance C_p . Cette puissance est donnée par [18] :

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V^3 \quad (\text{III.3})$$

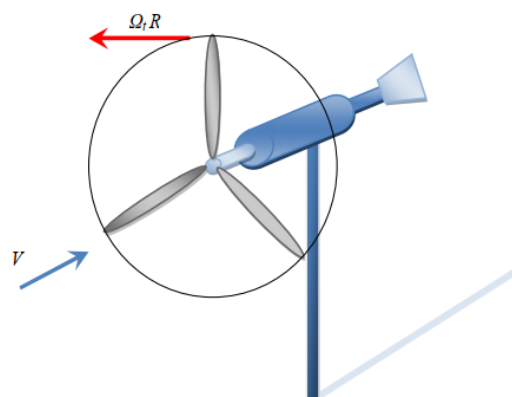
D'où :

$$\lambda = \frac{\Omega_T R}{V}$$

λ : La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

Ω_T : La vitesse de rotation de la turbine.

- La figure suivante représente la vitesse du vent et la vitesse triangulaire.

FIGURE III.2 – Vitesse du vent V et la vitesse triangulaire $\Omega_T R$

Le coefficient de la puissance C_p est le rapport entre la vitesse relative λ et la l'angle de calage des pales (β°) et qui représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne tel que chaque turbine il y a un comportement spécifique. Ce coefficient donnée par la relation suivante [18] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \right) - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

C_1, C_2, C_3, C_4 et C_5 : Coefficients dépendent de la turbine et les valeurs sont données dans le tableau III.1 coefficients d'évolution de C_p .

TABLE III.1 – Coefficients d'évolution de C_p

Coefficient	Valeur
C_1	0.5109
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.0068

La puissance aérodynamique de l'éolienne peut exprimer aussi par la relation suivante :

$$P_T = \Omega_T C_T \quad (\text{III.5})$$

L'expression du couple aérodynamique C_T est donnée par :

$$C_T = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot C_q(\lambda, \beta) \cdot V^3 \quad (\text{III.6})$$

$C_q(\lambda, \beta)$: Le coefficient du couple, donnée par :

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\Omega_T}$$

III.3.2 Modèle dynamique

La figure ci dessous montre le modèle dynamique de la turbine éolienne à une masse ramenée sur l'arbre rapide.

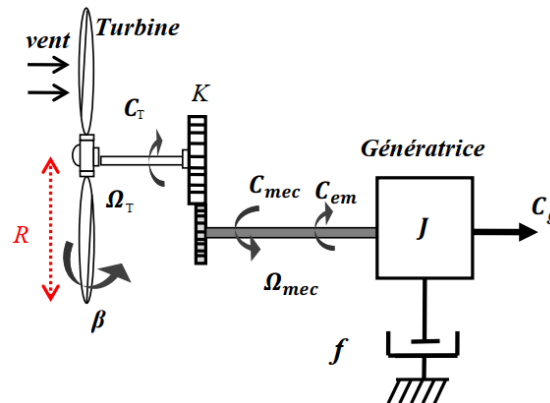


FIGURE III.3 – Modèle à une masse ramenée sur l'arbre rapide

- Hypothèses

- On néglige l'inertie de l'axe lent et du multiplicateur par rapport à l'inertie des pales.
- On néglige les frottements.
- Peut être négliger l'inertie du moteur par rapport à la turbine [7].

III.3.3 Modélisation de multiplicateur

C'est une transformation de la vitesse mécanique de la turbine vers la vitesse de moteur et le couple aérodynamique en couple de multiplicateur. Tel que le rapport entre ces vitesses et ces couple est appelée le rapport de multiplication K et donnée par la formule suivante [18] :

$$K = \frac{C_T}{C_g} = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_T} \quad (\text{III.7})$$

C_T : Le couple aérodynamique (Nm).

C_g : Le couple de multiplicateur de vitesse.

Ω_{mec} : La vitesse mécanique du moteur (rad/s).

Ω_T : la vitesse de turbine (rad/s).

III.3.4 Modélisation de l'arbre mécanique

Dans le modèle dynamique qui représente par la figure si dessus, l'inertie totale J est comme suit :

$$J = J_g + J_t \cdot K^2$$

J_g : L'inertie de générateur (Kg.m²).

J_t : L'inertie de la turbine ramenée à l'arbre rapide (Kg.m²).

- L'équation dynamique de la turbine éolienne est donnée par l'équation suivante :

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{III.8})$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis}$$

-Le couple de frottement C_{vis} est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f , et donnée par : $C_{vis} = f\Omega_{mec}$

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} \quad (\text{III.9})$$

Le schéma bloc qui définit la modélisation de la turbine éolienne et qui déduit les équations ci-dessus est représenté par la figure suivante :

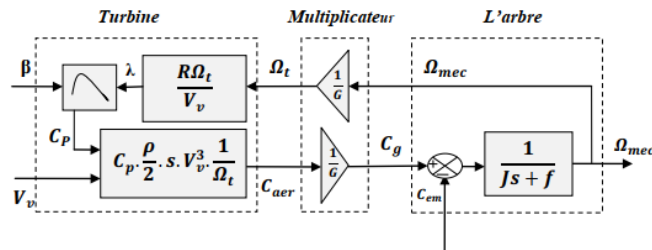


FIGURE III.4 – Schéma bloc de la turbine éolienne

III.4 Résultats de simulations

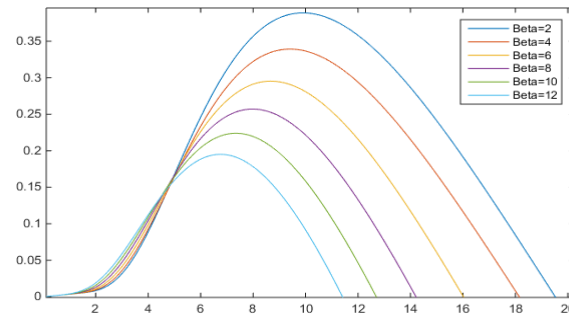


FIGURE III.5 – Caractéristique de coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative

Cette courbe est caractérisée par le point optimale ($\lambda_{opt} = 9.98, C_{p_{max}} = 0.39, \beta = 2$) qui correspond au coefficient de puissance maximale de la puissance mécanique, ainsi qu'on remarque que l'augmentation de la vitesse relative permet de réduire la valeur de coefficient de puissance C_p .

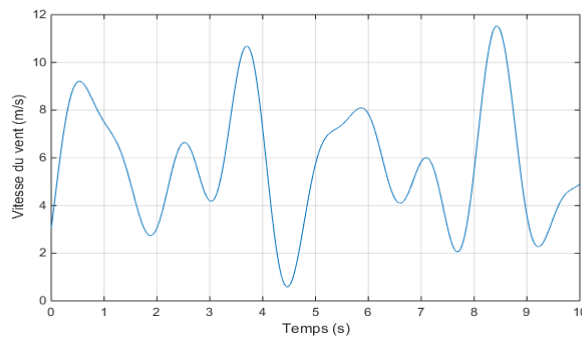


FIGURE III.6 – Vitesse du vent

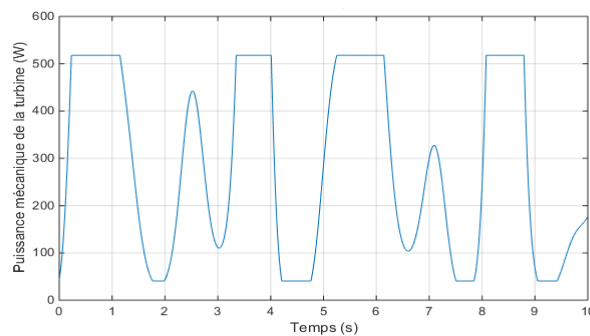


FIGURE III.7 – Puissance mécanique de la turbine éolienne

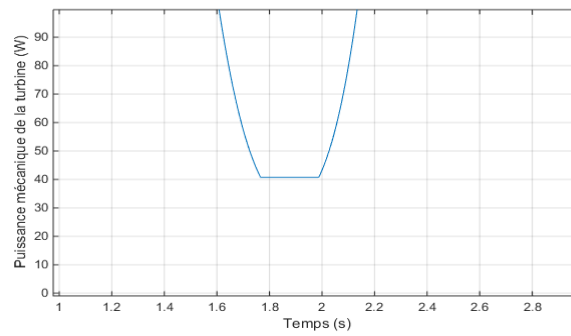


FIGURE III.8 – Zoom 1 sur la puissance de la turbine

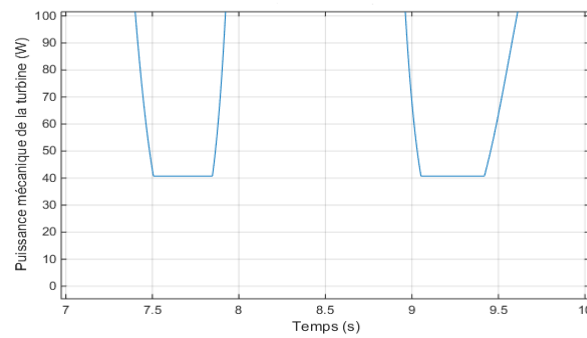


FIGURE III.9 – Zoom 2 sur la puissance de la turbine

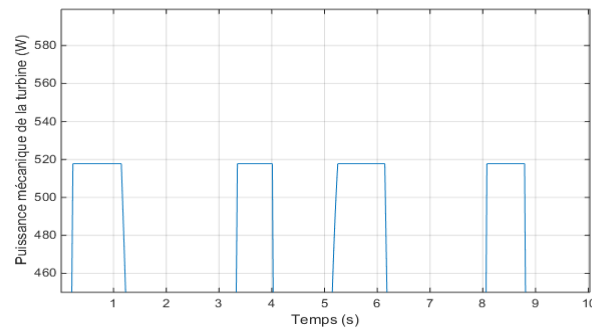


FIGURE III.10 – Zoom 3 sur la puissance de la turbine

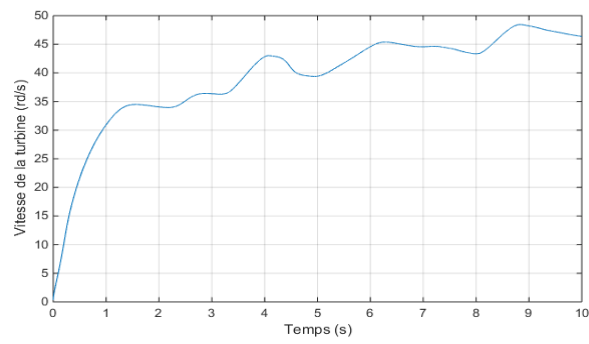


FIGURE III.11 – Vitesse de la turbine

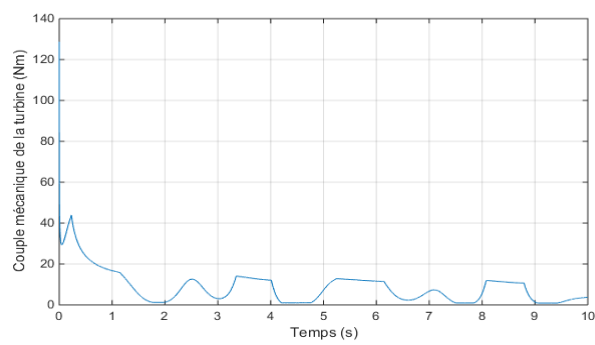


FIGURE III.12 – Couple de la turbine

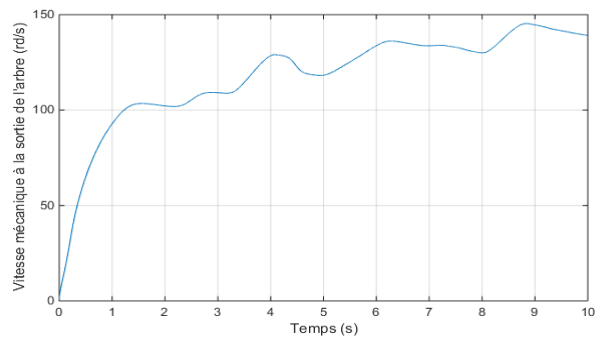


FIGURE III.13 – Vitesse mécanique à la sortie de l'arbre

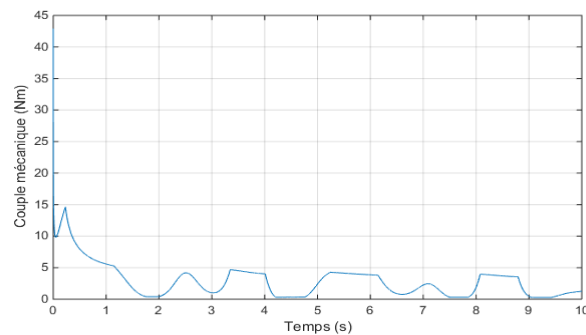


FIGURE III.14 – Couple mécanique

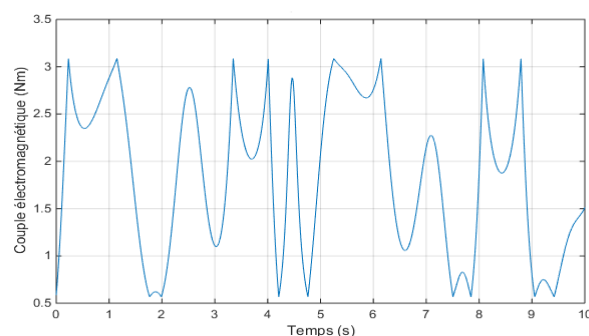


FIGURE III.15 – Couple électromagnétique

III.5 Interprétation des résultats

Ce profil du vent est donnée selon la caractéristique de Van der Hoven à partir de l'équation suivante [7] :

$$V(t) = 5.7 + 2 \sin\left(2.5t + \frac{\pi}{5}\right) + 2 \sin\left(4t + \frac{\pi}{3}\right) + 1.5 \sin\left(5.4t + \frac{\pi}{12}\right) + 0.5 \sin\left(2.5t + \frac{\pi}{12}\right) \quad (\text{III.10})$$

La puissance mécanique de la turbine éolienne suite le profile du vent dans sa variation, elle est limitée pour ne pas dépasser la puissance nominale de 500 W, elle varie entre des pics de 40 à 550 W avec des petites intervalles du temps ce qui protège la turbine.

La vitesse de la turbine monte à une valeur de 459 tr/min avec des petites perturbation, et ça dépend des variations du vent.

Le couple au démarrage est très fort, il atteint les 130 Nm puis il diminue, il contient des perturbation au régime permanent due au variation de la puissance.

La vitesse mécanique à la sortie de l'arbre varie avec des valeur 3 fois plus grandes que la vitesse de rotation de la turbine grâce à le multiplicateur, elle atteindre une vitesse de 1375 tr/min qui est très petite à celle de la nominale de MCC c'est qui protège la rotation de la machine mécaniquement.

Le couple au démarrage est très fort, il atteint les 44 Nm puis il diminue, sa valeur est 3 fois plus petit que celle de couple turbine.

Le couple électromagnétique est variable dans ce cas afin de faire des réglage sur le comportement de la turbine.

III.6 Différents types de MPPT pour les applications éoliennes

Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou éoliens [35]. Un système qui rassemble une éolienne et MPPT (Maximum Power Point Tracking) a la possibilité d'extraire le maximum de puissance électrique[45] tout on agit sur le coefficient de puissance C_p et en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence[26] .

III.6.1 Maximisation MPPT sans la connaissance de la courbe C_p

Plusieurs algorithmes basés sur les variations des puissances et des vitesses ont l la capacité de converger vers le point optimale dans le cas où il est impossible de connaître les caractéristiques de voilure. Le dispositif MPPT qui repose sur la mesure des variations et $\Delta\Omega$ provoque des changements autour de la consigne de vitesse de rotation de l'éolienne, ces changements sont expliqués par les équations suivantes [44] :

$$\Delta P = P [K] - P [K - 1] \quad (\text{III.11})$$

$$\Delta\Omega = \Omega [K] - \Omega [K - 1] \quad (\text{III.12})$$

$$\Omega_{ref} [K] = \Omega [K - 1] + \Delta\Omega_{ref} [K] \quad (\text{III.13})$$

La valeur de la consigne de vitesse est augmentée ou diminuée de façon petite ou respectivement grande dans le sens qui permet d'augmenter la puissance selon plusieurs règle telle que [44] :

Si $\Delta P > 0$ et $\Delta\Omega > 0$ alors $\Delta\Omega_{ref} > 0$.

Si $\Delta P < 0$ et $\Delta\Omega < 0$ alors $\Delta\Omega_{ref} < 0$.

III.6.2 Maximisation MPPT avec la connaissance de la courbe C_p

Parmi les techniques de la recherche de point maximale de puissance, telle qui est basé sur la courbe qui caractérise le C_p tout on fait des mesure sur la vitesse de rotation parfois à l'aide d'insertion (ou pas) des capteurs de vitesse de vent [44].

III.6.3 Maximisation MPPT sans asservissement de la vitesse

En réalité, il est très difficile d'avoir une mesure correcte de la vitesse de vent, l'une des méthodes pour effectuer ce processus est la MPPT avec asservissement de la vitesse, mais le problème c'est qu'elle génère des fausses résultats ce qui rendre l'algorithme de la MPPT sans contrôle de vitesse le plus utilisé dans la plupart des turbine éoliennes installées par tout dans le monde[26].

Le couple d'accélération dans ce cas, est considéré comme il est nul, car l'hypothèse de ce contrôle repose sur une variation très lente de la vitesse de vent en régime permanent, et on peut voir ça dans l'équation suivante [44] :

$$J_{Tr} \frac{d\Omega_{Tr}}{dt} = C_{mec} - C_{em} = 0 \quad (\text{III.14})$$

Ce qui implique que :

$$C_{mec} = C_{em}$$

Le couple aérodynamique de référence peut être déterminé en fonction de l'estimation de la vitesse de vent et la vitesse mécanique telle que [26] :

$$C_{em_{ref}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{V^3}{\Omega_{Tr}} \quad (\text{III.15})$$

La vitesse Ω_{Tr} est fonction de la mesure de vitesse mécanique [26] :

$$\Omega_{Tr} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

G : gain de multiplicateur.

On peut exprimer la vitesse de vent par l'équation suivante [26] :

$$V_v = \frac{\Omega_{Tr} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{III.17})$$

Avec :

R : Rayon de la turbine éolienne.

D'après ces équations, le couple électromagnétique peut s'écrire comme suivant :

$$C_{em_{ref}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{p_{max}}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (\text{III.18})$$

Avec :

λ_{opt} : La valeur optimale du ratio de vitesse.

On peut alors, obtenir le schéma de commande suivant :

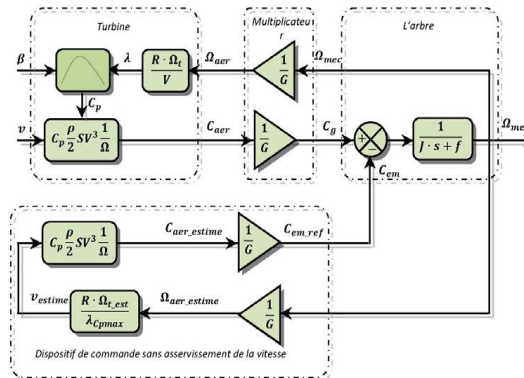


FIGURE III.16 – MPPT sans asservissement de la vitesse

III.6.4 Maximisation MPPT avec asservissement de la vitesse

Cette méthode repose sur l'hypothèse que le couple électromagnétique C_{em} apparaît sur l'arbre de la turbine [26] est fixé à une référence, c'est le cas d'une génératrice parfaite, ainsi qu'une mesure de la vitesse de la turbine Ω_{Tr} est nécessaire afin de maximiser la puissance générée. La vitesse de rotation est fixée à celle-ci de référence [44]. Pour réaliser ceci, on doit effectuer un asservissement de vitesse grâce à un régulateur qui asservie la vitesse mécanique à sa valeur de référence et abaisser l'action du couple éolien qui a une entrée perturbatrice [26].

Le couple électromagnétique égale à sa référence et s'écrit comme suivant :

$$C_{mec} = C_{mec_{ref}} = (C(p) \cdot \Omega_{mec_{ref}} - \Omega_{mec}) \quad (III.19)$$

Avec :

$C(p)$: Le correcteur de système.

Donc :

$$\frac{d\Omega_{Tr}}{dt} = \frac{1}{J_{Tr}} (C_{mec} + C_{em} - f\Omega_{mec}) \quad (III.20)$$

Et d'après les équations précédentes :

$$\Omega_{mec_{ref}} = G \cdot \Omega_{Tr_{ref}} \quad (III.21)$$

La valeur de la référence de la vitesse de la turbine dépend de l'optimisation de ration de vitesse λ_{opt} lorsque l'angle de calage β est nulle, elle est exprimée par la relation suivante :

$$\Omega_{Tr_{ref}} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (III.22)$$

On peut alors, obtenir le schéma de commande de la vitesse mécanique suivant :

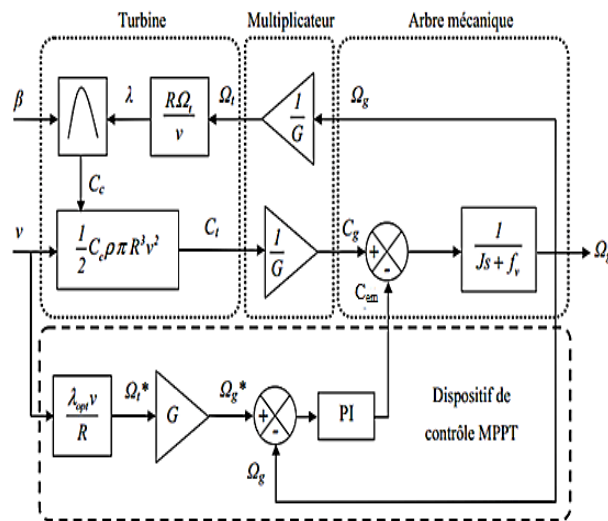


FIGURE III.17 – MPPT avec asservissement de la vitesse

III.7 Commande de l'angle de calage

Lorsque la vitesse du vent atteint sa valeur nominale, la vitesse de rotation de la turbine doit être réduite grâce à une variation de l'angle de calage tout on l'augmente. Pour cela, une diminution de la puissance générée par la turbine est nécessaire afin de maintenir la puissance de la génératrice à sa référence et donc protéger les parties mécaniques du système éolien contre les défaillances. Cette procédure est faite à l'aide d'un dispositif de commande qui s'appelle : (Pitch contrôle) [11] .

Ce système d'orientation des pales repose sur la fixation de l'angle de calage β à une référence β_{ref} à l'aide d'une boucle externe qui doit être insérée dans le système de manière à régler soit la vitesse de la turbine, soit la puissance mécanique générée, ainsi que la connaissance de la valeur de couple exercé sur les pales [44]. On peut alors, obtenir le schéma de réglage de l'angle de calage suivant :

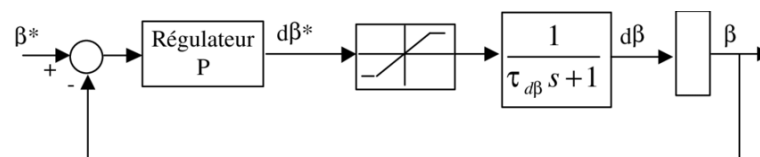


FIGURE III.18 – Schéma bloc pour la régulation de l'angle de calage

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une modélisation du vent et de la turbine éolienne à vitesse variable grâce à des équations mathématiques qui décrivent leur fonctionnement, ainsi qu'on a simulé leur modèle dans la plateforme Matlab-Simulink afin de suivre leur comportement. Cette modélisation nous a donné le couple aérogénérateur en fonction de la densité de l'air, de la section de la turbine, du coefficient de puissance, de la vitesse relative et de la vitesse du vent [11]. Les résultats de simulation nous ont donné la vitesse mécanique générée à la sortie de l'arbre.

Dans le chapitre suivant, on va utiliser la vitesse mécanique à la sortie de l'arbre comme vitesse de référence pour commander la machine à courant continu, on va faire cette étude en première sans MPPT, et en deuxième part avec MPPT ainsi qu'on va comparer les résultats de simulations de deux essais.

Chapitre IV

Étude d'un émulateur à base de MCC

SOMMAIRE

IV.1 INTRODUCTION	70
IV.2 CONSTRUCTION DE L'ÉMULATEUR	70
IV.3 MODÉLISATION DE L'ÉMULATEUR SANS ASSERVISSEMENT DE VITESSE	70
IV.4 RÉSULTATS DE SIMULATION SANS MPPT	70
IV.4.1 Interprétation des résultats	72
IV.5 MODÉLISATION DE L'ÉMULATEUR PAR COMMANDE MPPT AVEC ASSERVISSEMENT DE VITESSE	72
IV.5.1 Commande MPPT avec asservissement de vitesse	72
IV.6 RÉSULTATS DE SIMULATIONS AVEC MPPT	73
IV.6.1 Interprétation des résultats	75
IV.7 CONCLUSION	75

IV.1 Introduction

Les études des systèmes éoliennes dans les laboratoires sont très difficile à cause de l'absence du vent, mais les émulateurs sont des systèmes plus utiliser car leur réglage est très facile .la structure de cette émulateur est généralement utilisée les machines à courant continu pour produire les mémés caractéristiques de système réelle de la turbine éolienne.

Dans ce chapitre on étudie l'émulateur de la turbine éolienne à base du MCC avec et sans asservissement de vitesse.

IV.2 Construction de l'émulateur

L'émulateur de vent est un système de conversion d'énergie .comme on ne peut pas expérimenter sur l'éolienne dans le labo de recherche ,on 'a remplacer le vent et la turbine par le PC pour émuler la turbine éolienne à base de la machine à courant continu .le couple et la vitesse qui généré par la turbine c'est un référence de la machine .on utilise MATLAB/SIMULINK pour la modélisation du cette émulateur avec la commande MPPT sans asservissement de vitesse, et avec l'asservissement de vitesse de rotation.la figure suivante montre cette émulateur [16].

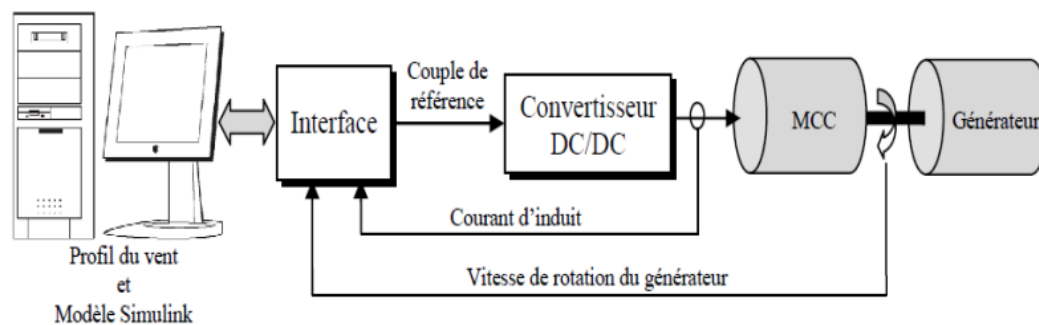


FIGURE IV.1 – Schéma du système d'un émulateur à base d'un MCC

IV.3 Modélisation de l'émulateur sans asservissement de vitesse

L'émulateur de la turbine éolienne qui étudiée est correspond à le modèle de la MCC qui couplé par un turbine de 500W avec un commande de MPPT sans asservissement de vitesse de rotation donc sans régulateur PI donc il y a une dégradation de la puissance captée est imposée.

La figure dans l'annexe(A) représente le schéma Simulink de l'émulateur qui utilisé la turbine avec la commande MPPT sans asservissement de vitesse.

IV.4 Résultats de simulation sans MPPT

D'après la simulation de schéma bloc de la figure dans Annexe A qui correspond à le modèle de l'émulateur, tel que la vitesse de référence qui généré par le modèle de la turbine

qui étudie dans la troisième chapitre, cette référence est appliquée sur le modèle de la MCC de chapitre deux avec un commande sans asservissement de vitesse, en fait cette émulation par la présence de couple résistant. On trouve la différence entre la vitesse de la turbine et la vitesse de la MCC qui montre dans la figure suivante et on trouve le courant d'induit figure IV.3 avec le couple électromagnétique la figure IV.4 [19].

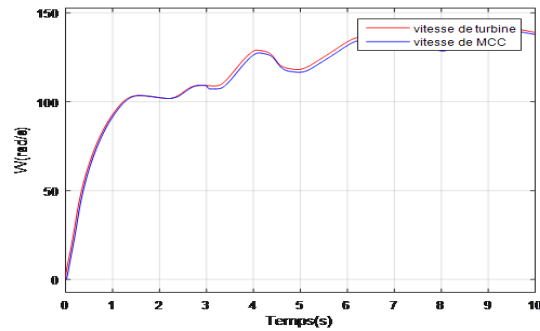


FIGURE IV.2 – Vitesse de référence et vitesse de la MCC

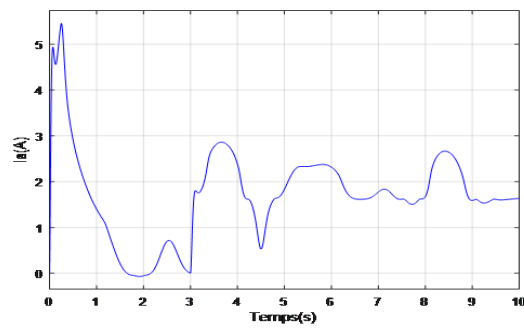


FIGURE IV.3 – Courant d'induit de la MCC

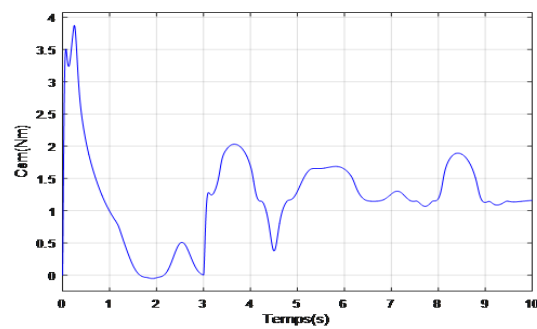


FIGURE IV.4 – Couple électromagnétique de MCC

IV.4.1 Interprétation des résultats

La vitesse de rotation de cette machine elle suit a la forme de la vitesse de référence qui est la vitesse de la turbine, cette vitesse elle augmente jusqu'à 150 rad/s donc la moitié de la vitesse nominale de la machine 314 rad/s, on dit que il y a une poursuite de la vitesse.

Le courant d'induit au démarrage est très fort, puis elle remettre sa valeur nominale 2.5 A, tel que cette dernier ne dépasse a sa valeur moyenne.

Le couple électromagnétique de la MCC est prend l'image de courant de cette machine .au début le couple fort est égale 4Nm puis elle varie entre 0 et 2 Nm. Ce qui montre la perturbation qui crée le profil de vent sur le couple mécanique de la turbine. Alors on dit que le MCC est bien commandée.

IV.5 Modélisation de l'émulateur par commande MPPT avec asservissement de vitesse

L'émulateur qui doit utiliser, elle comprend un commande MPPT avec asservissement de vitesse qui commander par un correcteur PI a avancé de phase. Cette dernier permet de émuler la partie mécanique de l'aérogénérateur qui on a étudié. La figure dans l'annexe(A) représente le schéma Simulink de cette émulateur .

IV.5.1 Commande MPPT avec asservissement de vitesse

la figure dans l'annexe A montre le schéma simulink de commande MPPT avec le correcteur PI.

IV.5.1-a Calcule de régulateur PI a avance de phase

le schéma suivante représente le régulateur PI de la commande MPPT.

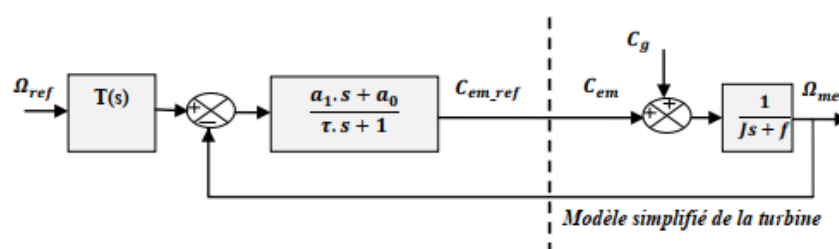


FIGURE IV.5 – Correcteur PI a avance de phase

D'après le schéma de régulateur en trouve :

$$C_{em_ref} = \frac{a_1 s + a_0}{\tau s + 1} (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (IV.1)$$

a_1, a_0, τ sont des paramètres de correcteur qui le déterminer.

La fonction de transfert en boucle fermée qui correspond à cette schéma est donnée par la forme suivante :

$$\Omega_{mec} = H(s)\Omega_{ref} + G(s)C_g$$

$H(s)$: la fonction de transfert de la vitesse de référence sur la vitesse mécanique.

$G(s)$: la fonction de transfert de la perturbation C_g .

$$\begin{cases} H(s) = \frac{a_1 s + a_0}{J\tau s^2 + (f\tau + J + a_1)s + a_0 + f} \\ G(s) = \frac{\tau s + 1}{J\tau s^2 + (f\tau + J + a_1)s + a_0 + f} \end{cases}$$

$$H(s) = \frac{a_1 s + a_0}{\frac{J\tau}{a_0 + f} s^2 + \frac{f\tau + J + a_1}{a_0 + f} s + 1} \quad (\text{IV.3})$$

La forme canonique de système de deuxième ordre est donnée par :

$$F(s) = \frac{G(s)}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}$$

Par identification de $H(s)$ avec $G(s)$ on trouve :

$$\begin{cases} a_0 = J\tau\omega_n^2 - f \\ a_1 = \frac{2\xi}{\omega_n}(a_0 + f) - f\tau - J \end{cases}$$

Le temps de réponse qui correspond à la vitesse de la turbine est : $t_r = 1.2s$

Par coefficient d'amortissement $\xi = 0.707$ on trouve le dépassement et la pulsation propre ω_n .

IV.6 Résultats de simulations avec MPPT

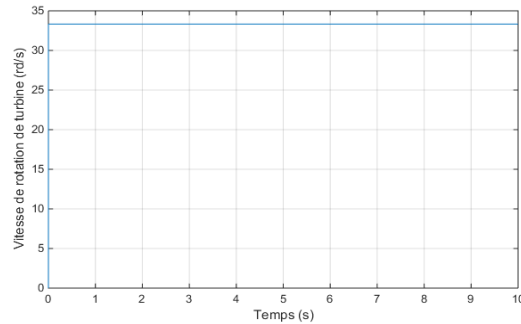


FIGURE IV.6 – Vitesse de rotation de la turbine

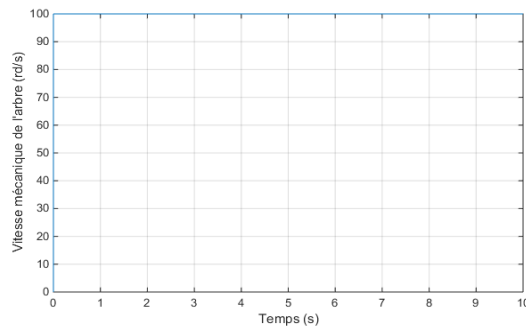


FIGURE IV.7 – Vitesse mécanique à la sortie de l'arbre

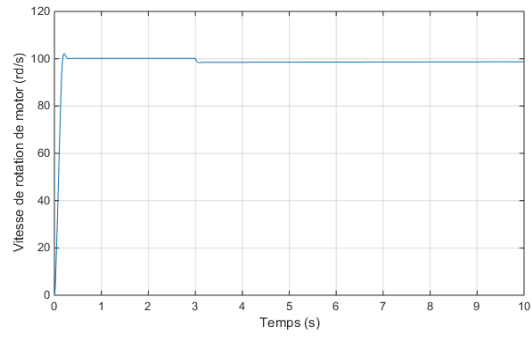


FIGURE IV.8 – Vitesse de rotation du motor

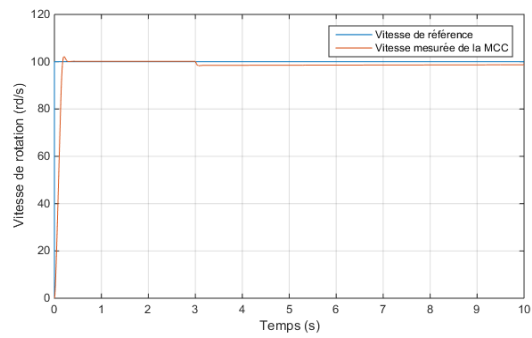


FIGURE IV.9 – Vitesse de référence et vitesse msurée de la MCC

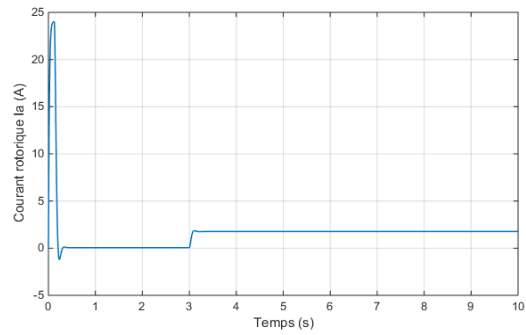


FIGURE IV.10 – Courant rotorique I_a

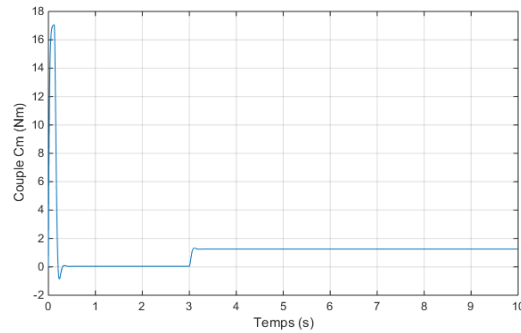


FIGURE IV.11 – Couple m'ecanique de la MCC

IV.6.1 Interprétation des résultats

D'après ces résultats, on remarque que la vitesse de référence est meilleure que celle sans MPPT, et la vitesse mesurée de la MCC suite cette dernière avec un dépassement de 2 %.

Le courant rotorique au démarrage est très fort, il atteint une valeur de 24 A, puis il descend au régime permanent à sa valeur nominale de 2.5 A.

Le couple moteur suit le courant rotorique, au démarrage il atteint les 17 Nm, puis il descend au régime nominal à sa valeur nominale qui est 1.2 Nm.

la commande MPPT elle contrôle les performances dynamiques et statiques de ce système.

IV.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité la modélisation et la simulation d'un émulateur de la turbine éolienne avec la commande MPPT qui contrôle ce système. Cette dernière est basée sur le MCC, tel que le but de cette étude est de produire un couple et une vitesse réelle pour appliquer sur le générateur.

Les résultats de simulation qui ont été obtenus ont permis de faire une comparaison entre l'émulateur avec et sans asservissement de vitesse.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire consiste à étudier l'émulateur d'une turbine qui basée par une machine à courant continu MCC. Pour exploiter ce système, il est impératif de commander et de modéliser les différentes modèles qui contiennent cet émulateur. Pour cela on 'a organisé ce travail on quatre chapitre.

Le premier chapitre nous avons fait les caractéristiques du vent et le traitement de système éolien. Ainsi on rappelle le principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et les différentes structures des éoliennes à axe verticale et celles à axe horizontal. Puis on 'a représenté les notions principale de la conversion d'énergie cinétique en énergie mécanique .A la fin on'a généralité sur les systèmes d'éolienne à vitesse variable et les différentes machine qui utilisé avec cette conversion d'énergie et leur avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre parle sur la commande et la modélisation du moteur à courant continu MCC, pour cela nous avons cité le principe et la construction de cette machine. Aussi on 'a représenté les équations importantes de leur fonctionnement on régime permanents et les différentes caractéristiques de ce système .Dans l'essai pratique nous avons identifié et déterminer les paramètres pour la réalisation et la modélisation Simulink de la MCC à vide et en charge. Puis nous avons défini les convertisseurs qui basée sur les hacheurs et le principe de la technique MLI. On 'a étudié la structure de la commande de la MCC qui fait à l'aide de l'utilisation des régulateurs PI pour faire une bonne performance et qui contrôler l'erreur statique et le dépassement de ce système.

Le troisième chapitre basé sur la modélisation du vent qui est la source primaire de cet émulateur à l'aide des caractéristiques de Van Der Hoven .Ainsi nous avons modélisé la turbine éolienne, la simulation du ce système est effectué par logiciel MATLAB-SIMULINK .Cette turbine permet d'optimiser la puissance produit par différentes types d'applications pour cela nous avons cité les types de la commande MPPT .

Le quatrième chapitre montre l'évolution et la réalisation d'un émulateur de vent qui basée par le machine à courant continu MCC par la commande de MPPT qui contrôler par le correcteur PI avec asservissement de vitesse et sans asservissement de vitesse.

La commande MPPT avec asservissement de vitesse est plus performante par rapport à la commande sans asservissement de vitesse car le premier cas donne un meilleur résultat et meilleur caractéristiques de cet émulateur.

Bibliographie

- [1] *Eolienne puissance et vitesse vent*, 2019.
- [2] *Variabilité du vent*, 2019.
- [3] *Energie éolienne*, 22 mars 2021.
- [4] *Le ventâ, où vient-il, comment se forme-t-il ?*, 28 août 2020.
- [5] *Description de la variation du vent : La distribution de Weibull*, 7 mai 2003.
- [6] B. ABDERRAHIM, A. MOUSSA : *Etude d'une éolienne de petite puissance à base d'une machine synchrone à aimants permanents*, 2018.
- [7] S. ABDOULAYB MAMADIE : *Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation*. Mémoire présenté à l'université du Québec à trois-rivières, 2013.
- [8] G. Guillemot E. AGASSE, C. Bonthonou : *L'énergie éolienne une énergie visionnaire et durable pour les régions isolées*.
- [9] A. ARBAOUI, J-P. NADEAU et P SEBASTIAN : Adéuation site et syst em éolien éléments d'aide à la décision par la modélisation par contraintes. *Rev. Energ. Ren*, Vol. 8 : pp 81-94, 2005.
- [10] M. ARHOUDAMI MOHAMED : *Mise en d'une régulation de vitesse d'un moteur à courant continu*. Mémoire de projet de fin d'études Diplome de génie industriel et maintenance de l'université Mohammed V Souissi, 2013.
- [11] A. BOUABDALLAH : *Commande de la vitesse d'une grande éolienne à vitesse variable dans différents zones de fonctionnements*. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master de l'Université de Aboubakr Belkaï id de Tlemcen, 2018.
- [12] A. BOUDIS : *Comment améliorer les performances aérodynamiques d'une pale éolienne ?* *Division Energie Eolienne, CDER*, 2014.
- [13] S. BOULAKROUNE : *Commande à vitesse variable d'un moteur à Courant continu alimenté par hacheur bidirectionnel en courant*. Mémoire de Master de l'Université de Annaba, 2018.
- [14] S. BOUTERAA : *Contribution à l'identification numérique expérimentale d'une machine à courant continu*. Projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique, 2011.
- [15] M-A. BRIKCI NIGASSA : *Notes de cours :Etude et simulation d'une turbine, Master M1-ELT-CE, Semestre S1 - EC771*, 2019.

- [16] K. CHABBI, N. Merbouti : *Etude et émulation d'une turbine éolienne de 3kW*. Mémoire de Fin d'étude de Master académique de l'Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [17] A. CHAUCHE : *Contrôle d'un aérogénérateur*, 2019.
- [18] N. CHERFIA : *Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne*. Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences de Magister en Electrotechnique de l'Université des Frères Mentouri de Constantine, 2018.
- [19] A. DAHBI : *Contribution à la commande et à l'Amélioration des performances de l'Énergie Électrique d'une chaîne de Production Éolienne*. Thèse de Doctorat en Sciences pour obtenir le diplôme de Doctorat en Electrotechnique de l'Université Mostefa BENBOULAI, BATNA-2, 2018.
- [20] S. DIAF : Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'adrar. *Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza*, pp 161-172, 2010.
- [21] N. DICH, B. Cherigui : *Etude d'une commande d'un moteur à courant continu*. Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, 2020.
- [22] H. FEKID : *Identification des paramètres d'une machine à courant continu*. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, 2011.
- [23] F. HAMIDA, M. Kadi : *Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103*. Mémoire de fin d'études de Master académique de l'Université de Tizi-Ouazou, 2015.
- [24] M. Zamoum M. HAMITOUCHE, A. Selmani : *Identification par Algorithmes Génétiques des Pertes dans un Moteur à Courant Continu à Excitation Séparée*. Mémoire de fin d'études en vue de l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'etat en Electrotechnique de l'Université de Tizi-Ouzou, 2013.
- [25] N. HASSANI, Z. Horri : *Modélisation et commande d'une génératrice synchrone a aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie éolienne*. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master de l'Université de Mohammed Boudiaf d'Oran, 2020.
- [26] Y. IZGHECHE : *Estimation de la vitesse de la machine d'une éolienne*, 2019.
- [27] JEAN : *Etude théorique d'une éolienne*, 19 mars 2021.
- [28] I. KADDOUR, M. Bouster : *Etude d'un syst ème de conversion éolienne connecté au réseau*, 2019.
- [29] A. KAMEL, A. Ahmed : *Commande de la vitesse d'une éolienne par l'approche multi-modèle*, 2014.
- [30] Z. KHADJBOUR, A. Boukouicem : *Etude et simulation de l'asservissement de vitesse dans l'association moteur à courant continue-hacheur série*. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme Master en Electromécanique l'Université de Jijel, 2019.
- [31] A. LARABI : *Conception de la commande d'une machine asynchrone destinée à l'énergie renouvelable, Application de la commande par mode de glissement à une éolienne basée sur la Machine Asynchrone a Double Alimentation*, 2018.

- [32] LUDOVIS. : *Les différents types d'éoliennes*. jardi brico, 15 février 2016.
- [33] K. MAZARI, A. Smail : *Commande avancée d'une cascade de deux machines asynchrones*, 2019.
- [34] A. MECHERNENE : *Notes de cours : Machines électriques approfondies, Master M1-ELT-CE, Semestre S1 - EC721*, 2019.
- [35] B. MEGHNI : *Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne*. Thèse Présenté à l'université BADJI MOKHTAR de ANNABA en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat, 2015.
- [36] L. MOHAMMED TAHA : *Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien*, 2012.
- [37] A. RAMEDI, F. Siouane : *Modélisation et commande de la machine à courant continu*. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master de l'Université de Oum El Bouaghi, 2012.
- [38] S. Hoggui I. RAMOULI, L. Sek : *Commande et Simulation de Moteur à Courant Continu*. Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique de l'Université d'El-Oued, 2019.
- [39] R. REDJEM : *Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne*. Mémoire Présenté à l'université MENTOURI de CONSTANTINE en vue de l'obtention du diplôme de magistère en Electrotechnique, 2009.
- [40] J. RETIVEAU : *Analyse de données expérimentales et conception d'un générateur numérique de vitesse de vent*. Mémoire de recherche présentée à l'université du QUEBEC pour l'obtention du grade de maître en science appliquée, 2006.
- [41] Y. SAADI : *Stratégies de contrôle et analyse des défauts d'une machine à réluctance variable pour une chaîne de traction électrique*, 2019.
- [42] F. SADEG, M. Yahiatene : *Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu*. Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention de diplôme de Master de l'Université de Sidi Bel Abes, 2016.
- [43] T. SEDDIKI, A. Boursali : *Validation de différentes stratégies de commande automatique sur un moteur à courant continu*. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master de l'Université de Tlemcen, 2019.
- [44] A. SYLLA : *Modélisation d'un émulateur éolien à basse de machine asynchrone à double alimentation*. Mémoire présenté à l'université de QUÉBEC comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, 2013.
- [45] N. TAMISSA, H. Touti : *Comparaison entre les techniques d'extraction de puissance MPPT appliquées à une éolienne hybride*. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master de l'Université de Kasdi Merbah Ourgla, 2017.
- [46] M. TEBBAL, A. Sekhri : *Commande prédictive d'un système éolien à base d'une machine synchrone à aimant permanent*, 2019.

Annexe A :Schémas blocs de simulation dans l'environnement Matlab/ Simulink

Conditions de simulations

Les différentes simulations réalisées lors de ce travail ont été faites à l'aide du logiciel MATLAB (version 2014) et son outil de simulation SIMULINK.

Les conditions adoptées lors des simulations sont les suivantes :

TABLE 1 – Condition de simulation

Fixed-step	ode4(Runge-Kutta)
Fixed-step Size (fundamental sample time)	0.0001
Tasking mode for periodic sample time	auto

Modèles Simulink construit pour les différentes simulations

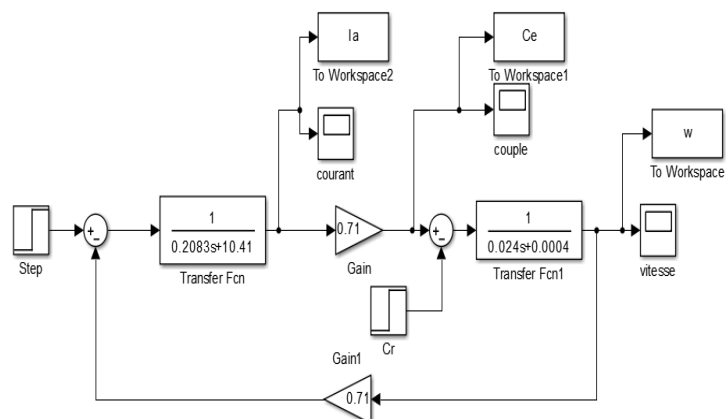


FIGURE 12 – Schéma bloc du moteur à excitation séparée fonctionner à vide

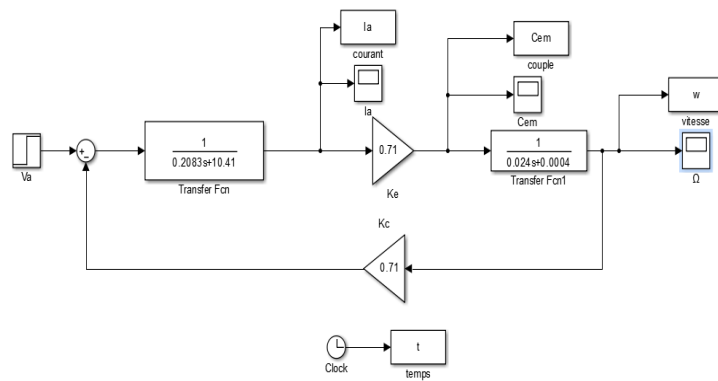


FIGURE 13 – Bloc de simulation du moteur à excitation séparée fonctionner en charge

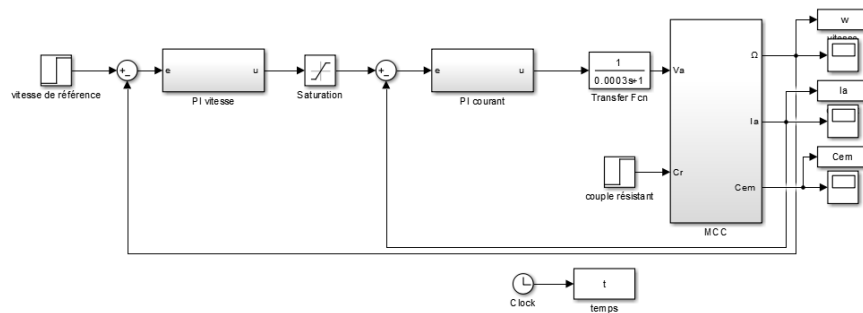


FIGURE 14 – Schéma Simulink d'une commande de MCC par un régulateur de vitesse

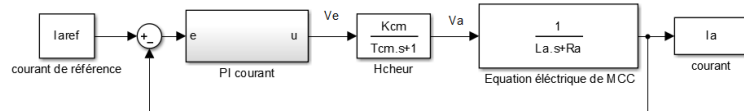


FIGURE 15 – Régulateur de courant en boucle fermée

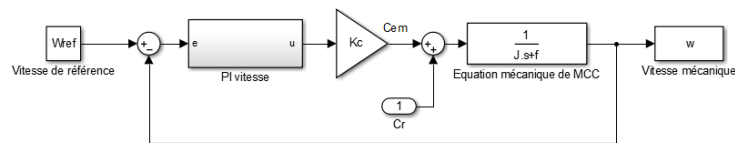


FIGURE 16 – Régulateur de vitesse en boucle fermée

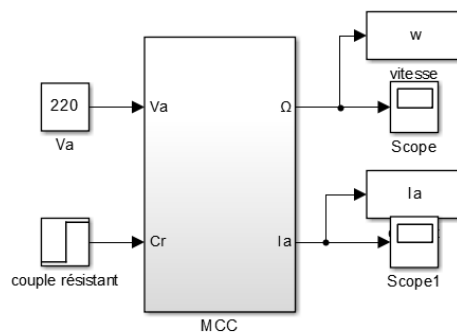


FIGURE 17 – Schéma Simulink du moteur seul

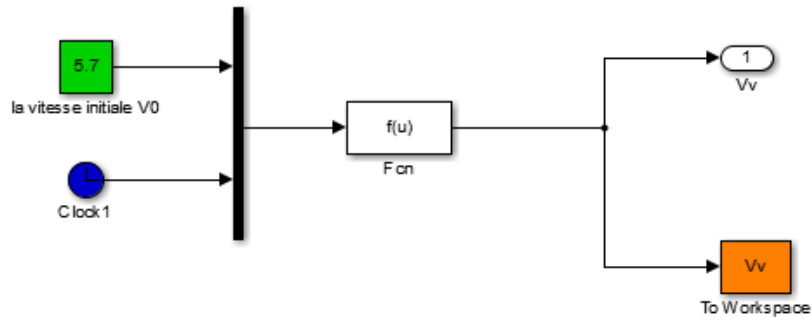


FIGURE 18 – Schéma Simulink de modèle du vent

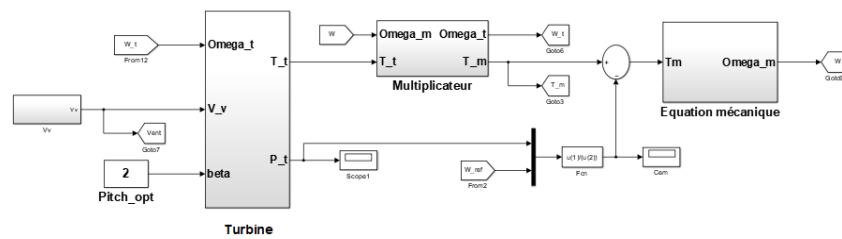


FIGURE 19 – Schéma Simulink de modèle complet de la turbine éolienne

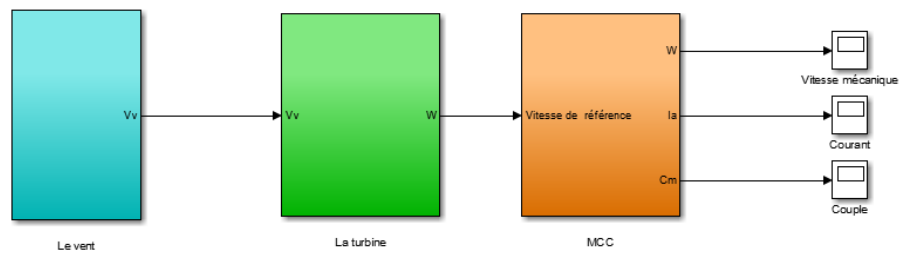


FIGURE 20 – Schéma Simulink de l'association du modèle de la turbine avec la MCC

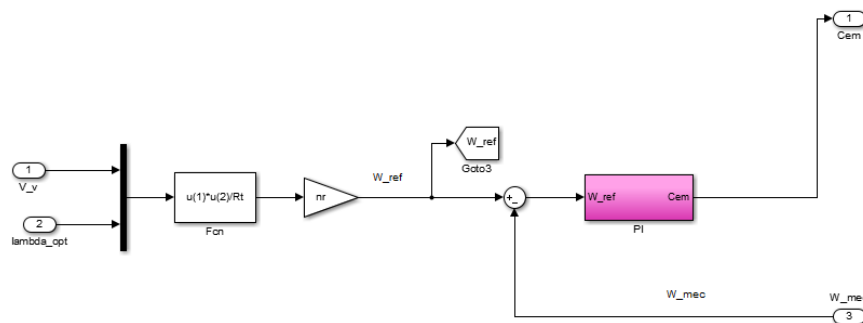


FIGURE 21 – Schéma Simulink de la structure de la MPPT avec asservissement de vitesse

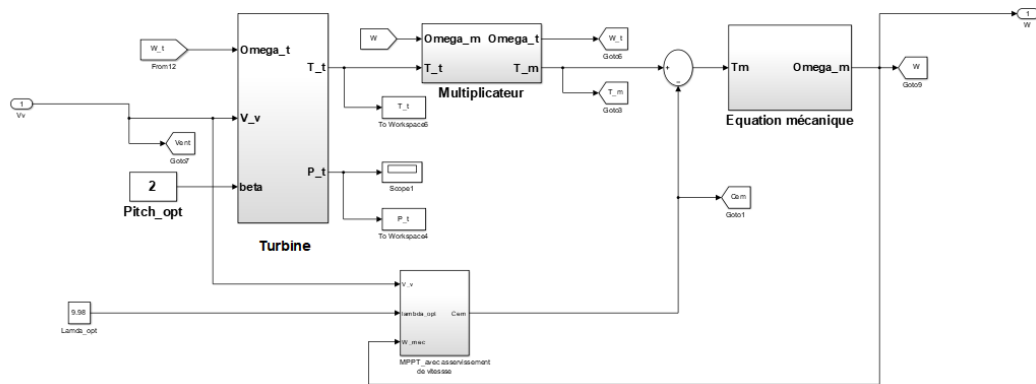


FIGURE 22 – Schéma Simulink de l'association de la turbine avec la MPPT avec asservissement de vitesse

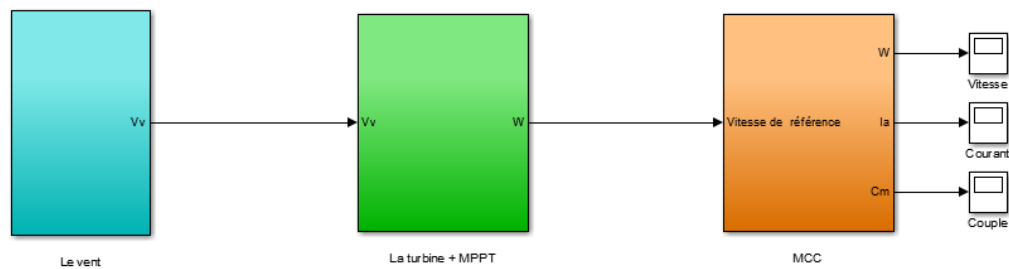


FIGURE 23 – Schéma Simulink de la commande de la MCC par la turbine + MPPT avec asservissement de vitesse

Annexe B : Identification du moteur à courant continu

Plaque signalétique de la machine à courant continu

TABLE 2 – Plaque signalétique

Puissance nominale P_n	380 W
Vitesse nominale n	3000 tr/min
Tension d'induit V_a	220 V
Courant d'induit I_a	2,5 A
Tension d'inducteur V_f	0/220 V
Courant d'inducteur I_f	0,1 A

Paramètres de la machine à courant continu

TABLE 3 – Paramètres de MCC

symbols	Désignations	Valeurs	Unité
R_a	Résistance de l'induit	10.41	Ω
R_f	Résistance de l'inducteur	201.60	Ω
L_a	L'inductance de l'induit	0.2083	H
L_f	L'inductance de l'inducteur	91.8288	H
M_{fd}	L'inductance mutuele	7.1	H
K_e	Constante de la f.c.e.m	0.71	V/rad/s
K_c	Constante de couple	0.71	Nm/A
f	Coefficient de frottement	0.0004	Nm/rad/s
C_s	Couple statique	0.1622	Nm
J	Moment d'inertie	0.024	Kg.m ²

Paramètres du hacheur

TABLE 4 – Paramètres du hacheur

symbols	Désignations	Valeurs	Unité
K_{cm}	Gain du hacheur	1	/
T_{cm}	Constante de temps du hacheur	300	$\mu.s$

Paramètres des régulateurs PI

TABLE 5 – Paramètres des régulateurs PI

symbols	Désignations	Valeurs
K_{ii}	Gain d'action intégrale de courant	520.83
K_{pi}	Gain d'action proportionnelle de courant	10.41
K_{iv}	Gain d'action intégrale de vitesse	0.017
K_{pv}	Gain d'action proportionnelle de vitesse	0.033

Paramètres de turbine éolienne

TABLE 6 – Paramètres de turbine éolienne

symbols	Désignations	Valeurs	Unité
P	Puissance nominale	500	W
V_0	Vitesse du vent	5.7	m/s
R_t	rayon de la turbine	1.25	m
n_r	Gain de multiplicateur de vitesse	3	/
β	angle de pitch	2	°
f	Coefficient de frottement	0.0004	Nm/rad/s
J	Moment d'inertie	0.07	Kg.m ²

Méthode par la compensation des pôle

Cette méthode se déroule en deux étapes, elle Consiste, dans une première étape, à utiliser le zéro du régulateur pour compenser un pôle du système à commander. Elle permet ainsi de simplifier l'ordre de la fonction de transfert en boucle ouverte. Cette compensation donne la première équation permettant de calculer les deux paramètres K_i et K_p . Dans une seconde étape, on calcule la fonction de transfert en boucle fermée, et on détermine une seconde équation permettant de calculer le deuxième coefficient du régulateur [23].

Courbes des Caractéristiques de système de deuxième ordre

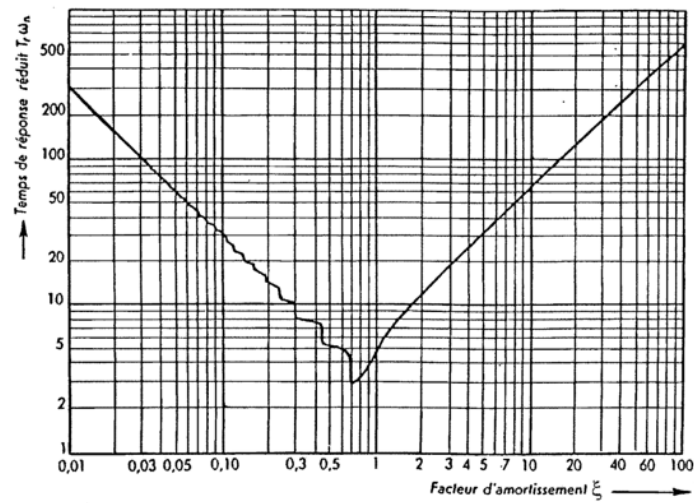


FIGURE 24 – Abaque des temps de réponse réduits

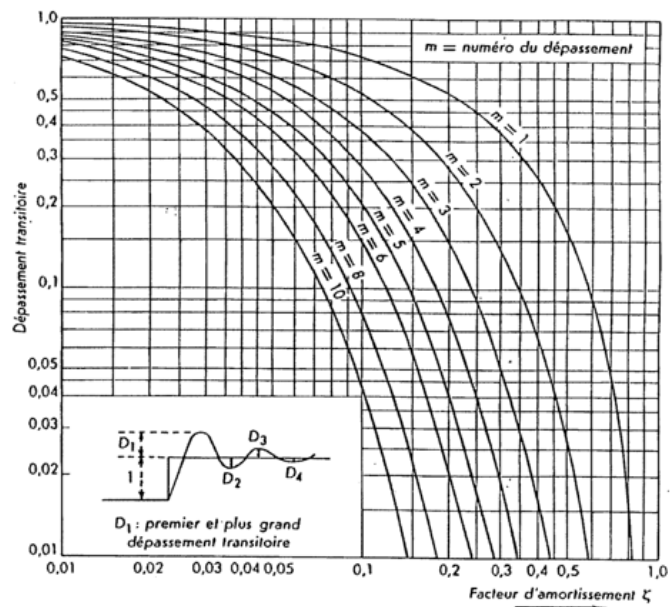


FIGURE 25 – Abaque des dépassements transitoires

Annexe C : Système Dspace1104

La carte DSPACE 1104

Présentation

La carte DS1104 représente un système électronique conçu entre autre pour développer des systèmes de commande en temps réel. Ce système est relativement rapide grâce notamment à la présence de deux processeurs. Le temps réel du système permet d'une part de faire l'acquisition des mesures nécessaires et d'autre part d'élaborer la commande et de piloter le convertisseur de puissance [43].

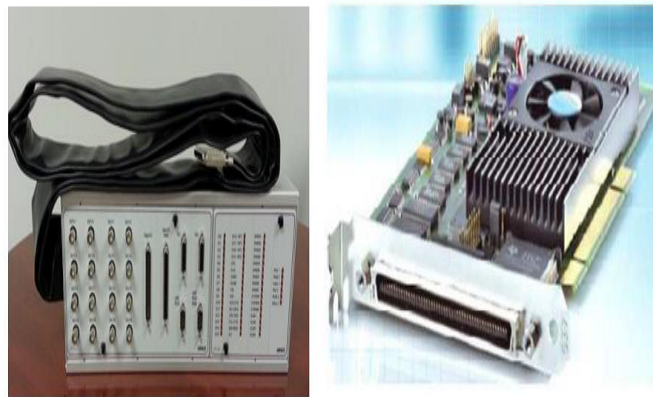


FIGURE 26 – La carte DSPACE 1104

Architecture

La plate-forme Dspace est séparée en trois couches distinctes, illustrées par la figure ci-dessous. Du bas en haut, ces couches sont : couche de stockage, couche de la logique métier et couche de service. La carte DS1104 dispose également d'un DSP esclave, le TMS320F240 DSP qui est utilisé pour générer les signaux PWM.

Les signaux PWM générés par le DSPACE sont des signaux TTL de niveau de tension compris entre 0 et 5V. Les onduleurs pédagogiques SEMIKRON sont dotés des cartes drivers permettant de piloter les IGBT des bras de pont [43].

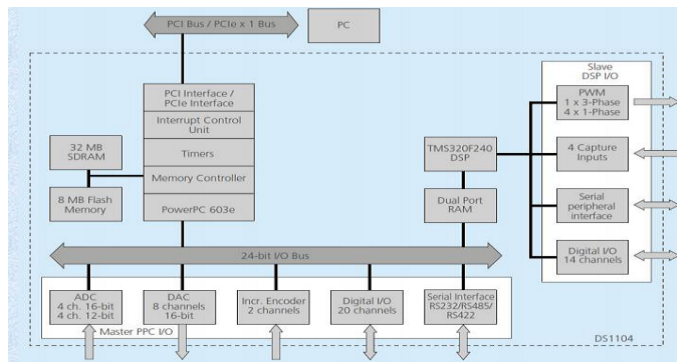


FIGURE 27 – Architecture de la carte DS1104

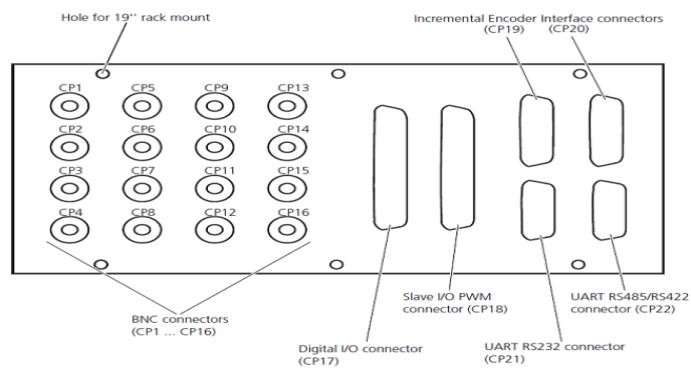


FIGURE 28 – Panneau de connexion



FIGURE 29 – Schéma du Panneau de connexion CLP1104

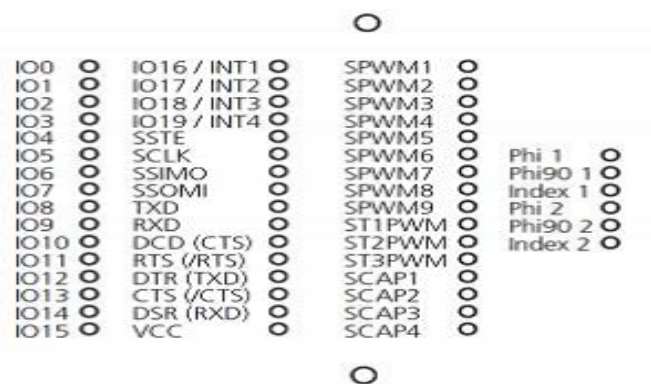


FIGURE 30 – Photo du Panneau de connexion CLP1104

- La carte DS1104 (Master PPC) est munie d'un panneau de connexion disposant de :
- 8 convertisseurs analogiques numériques ADC dont la tension d'entrée est comprise entre -10V et +10V.
 - 8 convertisseurs numériques analogiques DAC dont la tension délivrée est comprise entre -10V et +10V.
 - plusieurs interfaces notamment des entrées sorties numériques, des codeurs incrémentaux, etc.

Le master PPC contrôle deux types de Convertisseurs analogique-numérique [43] :

Un convertisseur A/D (ADC1) multiplexé pour les signaux ADCH1 à ADCH4, caractérisés par [43] :

- 8 Résolution 16-bit.
- 8 Plage de tension ± 10 V.
- Marge d'erreur Offset ± 5 mV.
- Marge d'erreur sur le gain $\pm 0.25\%$.
- Rapport signal sur bruit SNR80 dB (à 10 kHz).

Quatre convertisseurs A/D (ADC2 ADC5) pour les signaux(ADCH5 ADCH8). Les caractéristiques de ces convertisseurs sont [43] :

- Résolution 12-bit.
- Plage de tension d'entrée ± 10 V.
- Marge d'erreur Offset ± 5 mV.
- Marge d'erreur sur le gain $\pm 0.5\%$.
- Rapport signal sur bruit 70 dB.

Control Desk

Zone d'application

ControlDesk est un logiciel de test dSPACE pour la développer des interfaces conviviales de contrôle. Il effectue toutes les tâches nécessaires et donne un environnement de travail unique, dès le début de l'expérimentation à sa fin.

Il peut être utilisé pour plusieurs tâches entre-autres [43] :

- Prototypage rapide de contrôle (RCP, fullpass, bypass).

- Simulation de matériel dans la boucle(HIL).
- Mesure, calibration et diagnostic du calculateur.
- Accès aux systèmes de bus du véhicule (CAN, CAN FD, LIN, Ethernet).
- Validation virtuelle avec VEOS et SCALEXIO1.

Avantages clés

ControlDesk regroupe des fonctionnalités qui nécessitent souvent plusieurs outils spécialisés. Il donne accès aux plates-formes de simulation ainsi qu'aux systèmes de bus connectés et peut effectuer des mesures, des étalonnages et des diagnostics sur les calculateurs, par exemple via des interfaces ASAM normalisées. Sa structure modulaire souple offre une grande évolutivité pour répondre aux besoins d'applications spécifiques. Cela donne des avantages évidents en termes de manipulation, de quantité de formation nécessaire, de puissance de calcul requise, et de coûts [43].

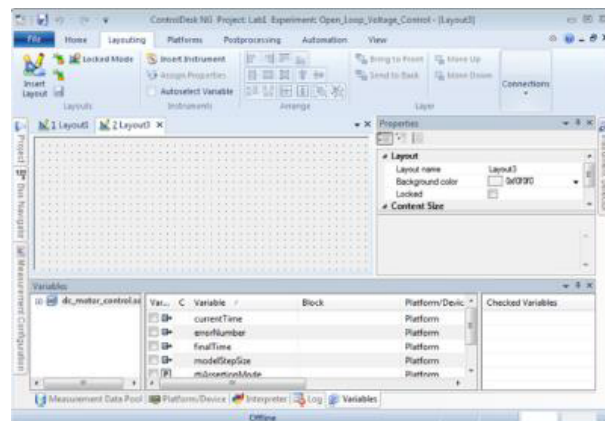


FIGURE 31 – L'interface controlDesk 1

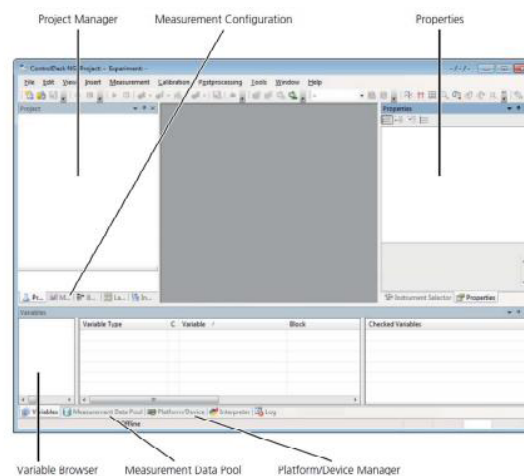


FIGURE 32 – L'interface controlDesk 2

Comment créer un nouveau projet sur l'interface ControlDesk

Ouvrez le programme dSPACE [43].

Créer un nouveau projet + expérience.

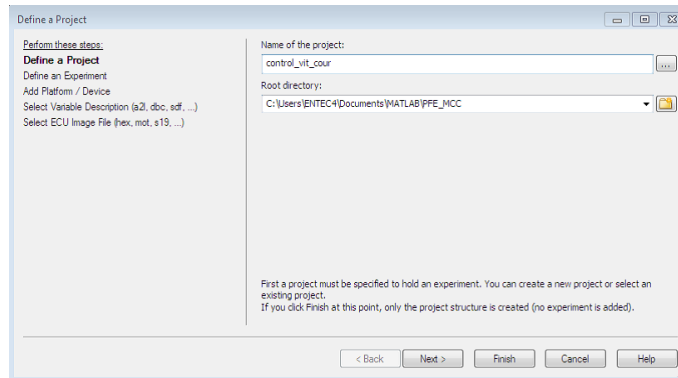


FIGURE 33 – Définition de projet

Donner un nom à l'expérience.

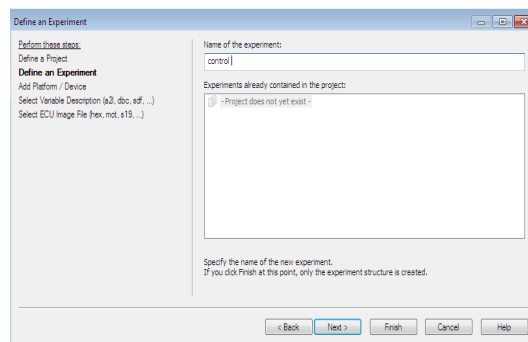


FIGURE 34 – Définition de l'expérience

Vérifier que la { Carte contrôleur R et D DS1104} est sélectionnée.

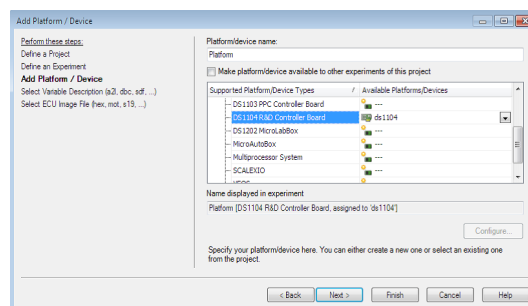


FIGURE 35 – Choix de la carte

Ouvrir le fichier de description du système .sdf du modèle.

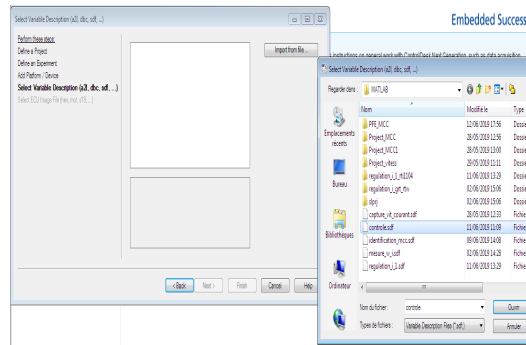


FIGURE 36 – Fichier .sdf

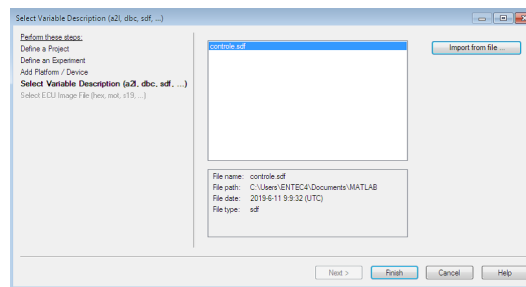


FIGURE 37 – Création de layout 1

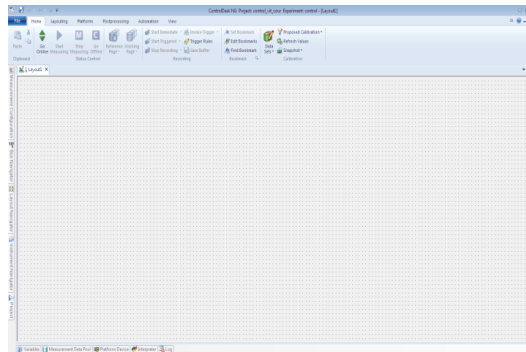
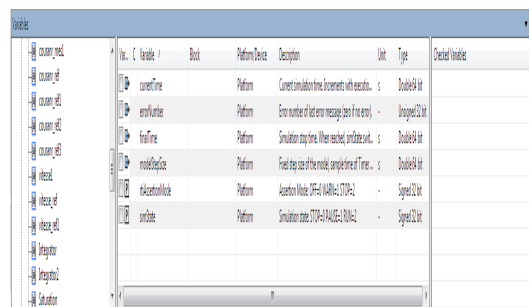


FIGURE 38 – Création de layout 2

Noter qu'un seul fichier .sdf peut être ouvert à la fois dans dSPACE. Le chargement d'un fichier .sdf chargera toutes les variables créées sur Simulink dans dSPACE, Les variables disponibles via Simulink sont illustrées au niveau de la figure suivante [43] :



Variable	Unit	Type	Default Variable
current_time	s	Double64 bit	
error_number	-	Unsigned32 bit	
total_time	s	Double64 bit	
total_steps	s	Double64 bit	
acceleration	-	Signed32 bit	
position	-	Signed32 bit	

FIGURE 39 – Variables à mesurés

Comment faire une mesure sur ContolDesk

Ci-dessous les étapes à suivre afin d'enregistrer les données (mesures) [43] :

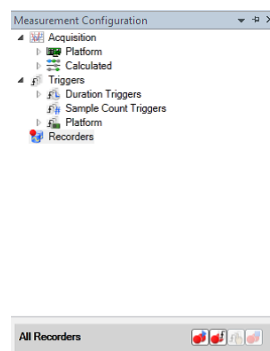


FIGURE 40 – Mesurment a

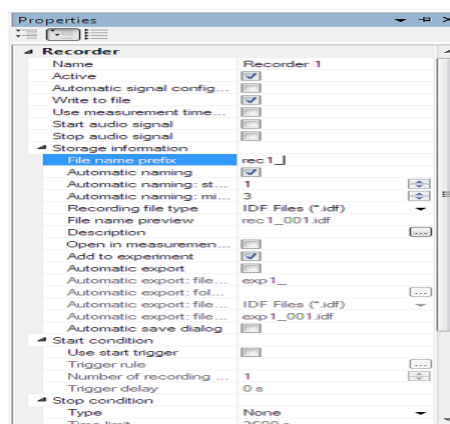


FIGURE 41 – Mesurment b



FIGURE 42 – l'enregistrement

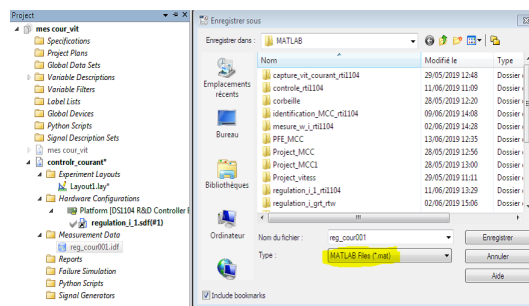


FIGURE 43 – l'enregistrement de fichier en .mat

Récupération des données enregistrées précédemment sous forme .mat

Une fois vous avez exporté le fichier .mat, vous pouvez le charger et extraire les variables en utilisant le code Matlab suivant [43] :

```
clear all, close all, clc
=====
% programme de récupération de données Matlab
load reg_cour001      % charger les données
t=  reg_cour001.X.Data; %creation de vecteur temps
u =  reg_cour001.Y(1).Data; %récupération des variables (entrée)
y =  reg_cour001.Y(2).Data; % récupération des variables (sortie)
figure(1)
plot(t,u,'r'); grid
hold on
plot(t,y,'b'); grid
```

FIGURE 44 – Programme Matlab de chargement de données

Onduleur

L'onduleur utilisé est préseté dans la figure suivante :

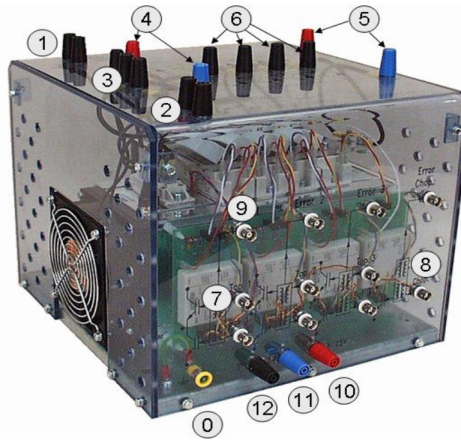


FIGURE 45 – Onduleur

Avec :

- 1 Alimentation de ventilateur 230V/50Hz.
- 2 Disjoncteur thermique (15V).
- 3 Entrée de redresseur PD3 .
- 4 Sorties de redresseur de C.C (600V).
- 5 Entrées de l'onduleur à IGBT de C.C (600V).
- 6 Sortie de l'onduleur à IGBT et sorties de résistance de frein 400VAC/600VCC.
- 7 Entrée de PWM de l'onduleur, logique C-MOS (0V= IGBT ouvert, 15V= IGBT fermé).
- 8 Entrée de PWM de résistance de frein, logique C-MOS (0V= IGBT ouverte, 15V= IGBT fermé).
- 9 Sortie d'erreur.
- 10 Alimentation de Drive 15V.
- 11 Alimentation de Drive 0V .
- 12 Sonde de température.

Capteur de courant

Il a pour rôle de convertir la mesure de courant (I) en tension (V). Il est présenté sans la figure suivante :



FIGURE 46 – Capteur LEM de courant 1



FIGURE 47 – Capteur LEM de courant 2

Caractéristiques

- Technologie à Effet Hall.
- Isolation galvanique.
- Mesures-en continue, alternatif et instantané.
- $I \rightarrow V$.
- Filtrage.
- ADC.

تصميم محاكي رياح مخصص لمنصة اختبار تجريبية

تلخيص

قدم هذا العمل تصميمًا لمحاكي الرياح، والذي يتكون من نمذجة توربينات الرياح التي تتحكم في العديد من مناطق التشغيل. يمكن لهذا التوربين من تحسين الطاقة المنتجة، إما عن طريق تعظيم الطاقة التي تلتقطها الرياح مع إعداد ثابت زاوية يعني بواسطة أمر الذي يتحكم في أداء هذا الهيكل، إما عن طريق تحديد السرعة إلى أقصى قيمة لها والقوة إلى قيمتها الاسمية بزاوية ضبط متغيرة وبالتالي من خلال التحكم في درجة الصوت. يعتمد هذا التصميم على محرك التيار المباشر لإعادة إنتاج خصائص ثابتة وديناميكية أفضل. اذن مصلحة هذا المحاكي هي الجمع بين مولدات كهربائية مختلفة لاختبار تكاملها في نظام توربينات الرياح المستقلة.

Conception d'un émulateur de vent dédié à un banc d'essai expérimental

Résumé

Ce travail présente la conception d'un émulateur de vent, qui consiste à la modélisation de la turbine éolienne qui est commandée par plusieurs zones de fonctionnement. Cette turbine permettant d'optimiser la puissance produite, soit par la maximisation de la puissance qui captée par le vent avec un angle de calage fixe donc par la commande MPPT qui contrôler les performances de cette structure, soit par la limitation de la vitesse à sa valeur maximale et la puissance à sa valeur nominale par un angle de calage variable donc par le contrôle de Pitch. Cette conception est basée sur le moteur à courant continu pour reproduire des meilleures caractéristiques statiques et dynamiques. Ensuite, l'intérêt de cet émulateur est à coupler des différents générateurs électriques (GSAP, GADA, ...) pour tester leur intégration dans un système éolien autonome.

Mots clés

Turbine éolienne; Emulateur de vent; Extraction du maximum de puissance (MPPT); Moteur à courant continu

Design of a wind emulator dedicated to an experimental test bench

Abstract

This work presented the design of a wind emulator, which consists in the modeling of the wind turbine which control by several operating zones. This turbine making it possible to optimize the power produced, either by maximizing the power captured by the wind with a fixed setting angle therefore by the MPPT command which controls the performance of this structure, either by limiting the speed to its maximum value and the power to its nominal value by a variable setting angle therefore by the Pitch control. This design is based on the direct current motor to reproduce better static and dynamic characteristics. Then, the interest of this emulator is to couple different electric generators (GSAP, GADA, ...) To test their integration in a system autonomous wind turbine.

Keywords

Wind turbine; Wind emulator; Maximum power extraction (MPPT), DC motor