



Republique Algerienne Democratique Et Populaire
Ministere De L'enseignement Superieur Et De La Recherche Scientifique
Université Echahid HAMMA LAKHDAR D'El-Oued



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique
MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Specialite: Electromécanique

Thème

**Modélisation et commande robuste d'un
système éolien associée à une GADA pour la
production de l'énergie électrique**

Encadré par:

Dr. BENAMOR Afaf

Présenté par :

- ZIAD Abdelhalim
- LACHHEB Foudil
- ZEGHAOUNE Islam
- OUNIS MOHAMED Ali

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Nous dédions ce travail :

À nos très chers parents, sources inépuisables d'amour et de tendresse

En reconnaissance

Des sacrifices consentis

Avec dévouement Pour

Notre éducation et notre formation.

À nos amis et

à toute notre famille ainsi

Qu'à tous ceux qui nous sont chers veuillez trouver ici le symbole de l'amour Et

l'intime attachement

Que vous nous portez

الملخص

لإنتاج طاقة الرياح يقدم هذا العمل النمذجة والتحكم في الآلة غير المتزامنة ذات التغذية المزدوجة (MADA). لهذا ، تم تقديم نموذج لكل عنصر من عناصر توربينات الرياح (التوربينات ، MADA وتتالي المعدل-العكس). من أجل الوصول إلى نقطة التشغيل عند الطاقة المنتجة ، تم تطوير عنصر تحكم ناقل في قوة الجزء الثابت النشطة والمتفاعلة. تم إجراء تعديل هذا التحكم عن طريق توليف منظمات PI الخطية. نظرًا لأن MADA يتم تشغيله بواسطة الدوار ، فقد طبقنا تقنية التحكم في PWM الجيبية المثلثة على العاكس. تم الانتهاء من هذه الدراسة من خلال محاكاة توربينات الرياح بأكملها.

نقدم في هذا العمل تقنية التحكم المسماة: DTC (التحكم المباشر في عزم الدوران) لآلة متزامنة مزدوجة التغذية. استراتيجية التحكم هذه التي اقترحها Takahashi في عام 1985 لتحسين طريقة التحكم في اتجاه التدفق (FOC). تظهر نتائج المحاكاة صحة هذه الاستراتيجية في MATLAB / SIMULINK.

الكلمات المفتاحية: النمذجة - نظام الرياح - GADA - الإنتاج - الطاقة الكهربائية

Résumé

Pour la production de l'énergie éolienne Ce travail présente la modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Pour cela, un modèle a été présenté pour chaque élément de l'éolienne (Turbine, MADA et cascade redresseur-onduleur). Afin d'arriver le point de fonctionnement à puissance produite, une commande vectorielle en puissance active et réactive statorique a été élaborée. Le réglage de cette commande a été effectué par la synthèse de régulateurs linéaires PI. La MADA étant pilotée par le rotor nous avons appliqué la technique de commande par MLI triangle sinusoïdale à l'onduleur. Cette étude a été terminée par la simulation de l'ensemble de l'éolienne.

Nous présentons dans ce travail la technique de commande dite : DTC (commande directe du couple) d'une machine à synchrone double alimentation. Cette stratégie de commande proposée par Takahashi en 1985 pour améliorer la méthode de commande par orientation du flux (FOC). Les résultats de simulation démontrent la validité de cette stratégie dans MATLAB/SIMULINK.

Mots clé: Modélisation - un système éolien - GADA - la production - l'énergie électrique

Table des Matières

Introduction Générale		1
Chapitre I : Etat de l'Art de L'Énergie Éolienne		
I.1	Introduction	4
I.2	L'énergie éolienne	4
I.3	Production d'énergie électrique	5
I.4	Principe de l'énergie éolienne	5
I.5	Différents types d'éoliennes et leur utilisation	5
I.5.1	Les éoliennes à axe horizontal	6
I.5.2	Les éoliennes à axe vertical	6
I.5.2.1	Avantages des aérogénérateurs à axe vertical	7
I.5.2.2	Inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical	7
I.5.3	Aérogénérateurs à rotor de Darrieus	7
I.5.4	Aérogénérateurs à rotor de Savonius	8
I.6	Etat de l'Art sur la Conversion Electromécanique	9
I.6.1	Les Eoliennes à vitesse Fixe	9
I.6.2	Les Eoliennes à Vitesse Variable	9
I.7	Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens	10
I.7.1	Générateur synchrone	11
I.7.2	Générateur asynchrone	12
I.7.2.1	Machine asynchrone à cage d'écureuil	12
I.7.2.2	Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"	12
I.8	Modélisation de la turbine éolienne	13
I.10.2	Modélisation du Multiplicateur	15
I.10.3	Modélisation de l'Arbre Mécanique	16
I.11	Conclusion	17

Chapitre II : Modélisation de la MADA

II.1	Introduction	18
II.2	Modèle de la machine asynchrone double alimentée (MADA)	18
II.2.1	Définition générale de la MADA	18
II.2.2	Représentation de la MADA	18
II.2.3	L'application de la MADA dans le système éolienne	19
II.3	Principe de fonctionnement de la MADA	20
II.3.1	Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	20
II.3.2	Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	21
II.3.3	Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	21
II.3.4	Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	21
II.4	Modélisation de la MADA	22
II.5	Hypothèses simplificatrice	22
II.6	Modèle triphasé de la MADA	23
II.7	Transformation de Park	24
II.8	Le choix du référentiel	26
II.8.1	Référentiel fixe par rapport au stator (α , β)	27
II.8.2	Référentiel fixe par rapport au rotor (x , y)	27
II.8.3	Référentiel fixé par rapport au champ tournant (d , q)	27
II.9	Modèle de la MADA lié au système d'axes (d , q)	28
II.10	Modélisation de l'alimentation onduleur à MLI	29
II.10.1	Onduleur à deux niveaux	29
II.10.2	Stratégie de commande à MLI	31
II.10.3	Algorithme de commande	32
II.11	Simulation de la MADA avec onduleurs à MLI	32
II.12	Résultats simulation	33
II.13	Conclusion	35

Chapitre III : Commande vectorielle de la MADA

III.1	Introduction	36
III. 2	Généralités sur la commande vectorielle	36
III.3	La commande vectorielle	36

III.4	Principe de la commande vectorielle	37
III.5	Procède d'orientation du flux	37
III.6	Types de Commande vectorielle	37
III.6.1	Commande vectorielle directe	38
III.6.2	Commande vectorielle indirecte	39
III.7	. Comparaison entre les deux types de commande	39
III.7.1	. Commande vectorielle directe CVD	39
III.7.2	. Commande vectorielle indirecte CVI	40
III.8	Application de la commande vectorielle à la MADA	40
III.9	Différents repères de référence à la MADA	41
III.10	Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	43
III.11	Structure de la commande vectorielle directe à la MADA	45
III.12	Dé fluxage	46
III.13	Estimation du flux statorique	46
III.14	Dimensionnement des régulateurs	47
III.14.1	Calcul des régulateurs des courants rotoriques, de flux statorique et de vitesse	47
III.14.2	Régulation du courant rotorique directe	47
III.14.3	Régulation du courant rotorique quadrature	48
III.14.4	Régulateur du flux statorique	49
III.14.5	Régulation de la vitesse	50
III.15	Régulation par un régulateur PI	50
III.16	Simulation et interprétation des Résultats	51
	Conclusion	53

Chapitre IV : Commande Directe du Couple (DTC) de la MADA

IV.1	Introduction	54
IV.2	Généralité sur commande directe du couple DTC "Classique"	54
IV.3	Caractéristiques générales du contrôle direct du couple	54
IV.4	Principe de la commande DTC	56

IV.5	Structure du système de contrôle directe de couple à la GADA	56
IV.5.1	Elaboration de la table de commutation	59
IV.5.2	Estimation du flux rotorique	60
IV.5.3	Estimation du couple électromagnétique	61
IV.5.4	La structure générale de la commande par DTC-Classique à la GADA	61
IV.5.5	DTC-Classique au Contrôle du couple électromagnétique et le flux rotorique	62
IV.6	Resultats de simulation	63
IV.7	Conclusion	65
	Conclusion générale	66

Table des figures

Chapitre I.

Figure I.1	La naissance du vent	4
Figure I.2	Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure I.3	Aérogénérateur à axe horizontal	6
Figure I.4	Principe du rotor de Savonius	7
Figure I.5	Éolien Darrieus	8
Figure I.6	Éolien Savonius	8
Figure I.7	Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage	9
Figure I.8	Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage	10
Figure I.9	Machine synchrone connectée directement au réseau	11
Figure I.10	Schéma de la turbine éolienne	13
Figure I.11	Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de pale β	15
Figure I.12	Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne	16

Chapitre II.

Figure II.1	MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances	19
Figure II.2	Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	20
Figure II.3	Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	21
Figure II.4	Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	21
Figure II.5	Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	22
Figure II.6	Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique	22
Figure II.7	Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique	24
Figure II.8	Représentation des enroulements de la machine de Park	26
Figure II.9	Schéma électrique de la liaison de rotor via un onduleur à deux niveaux	30
Figure II.10	Principe de la commande MLI	31
Figure II.11	Schéma de principe de la commande MLI	32
Figure II.12	Schéma bloc de simulation de la MADA	33
Figure II.13	Schéma bloc de simulation de la MADA	33
Figure II.14	courant rotorique et statorique	34
Figure II.15	le courant rotorique et statorique avec zoom	34
Figure II.16	le flux(Web)	34

Figure II.17	le couple électrique	35
Figure II.18	la vitesse (rad/s)	35

Chapitre III.

Figure III.1	Schéma de principe de la commande directe	38
Figure III.2	Schéma de principe de la commande indirecte	39
Figure III.3	Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et MCC	41
Figure III.4	Orientation du flux statorique	41
Figure III.5	Orientation du flux rotorique	42
Figure III.6	Orientation de la tension et de flux statorique	43
Figure III.7	Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA	45
Figure III.8	La commande vectorielle directe à flux statorique orienté du MADA	45
Figure III.9	Schéma de régulation de courant I_{rd}	47
Figure III.10	Schéma de régulation du courant I_{qr}	49
Figure III.11	Schéma de régulation du flux statorique	50
Figure III.12	Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation	51
Figure III.13	Profil du vent appliqué	52
Figure III.14	Vitesse mécanique	52
Figure III.15	Variation de coefficient de puissance	52
Figure III.16	La puissance active et réactive statorique	52
Figure III.17	Les courants statoriques et rotoriques triphasés	53
Figure III.18	Les courants statorique et rotorique avec zoom	53
Figure III.19	Spectre d'harmonique des courants : (a) phase statorique, (b) phase rotorique	53

Chapitre IV.

Figure IV.1	Structure générale de la "DTC classique" à la MADA	57
Figure IV.2	Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux rotorique	57
Figure IV.3	Contrôle du couple à l'aide d'un comparateur à hystérésis à deux niveaux	58
Figure IV.4	Représentation des vecteurs de tension	59
Figure IV.5	Structure de la commande du système de conversion d'énergie éolienne	62
Figure IV.6	L'estimation du couple et du flux.	62
Figure IV.7	La vitesse mécanique de la GADA et la vitesse spécifique	63
Figure IV.8	Le coefficient de puissance.	64
Figure IV.9	Le couple électromagnétique et le flux rotorique.	64

Figure IV.10	Trajectoire du flux rotorique de la MADA.	64
Figure IV.11	Le courant rotorique à flux fixe dans les deux cas de contrôle.	65
Figure IV.12	Rang l'harmonique du courant rotorique.	65

Liste des Symboles

$a_s, b_s, c_s,$	Correspondent aux trois phases du stator
$a_r, b_r, c_r,$	Correspondent aux trois phases du rotor
$[v_{as}, v_{bs}, v_{cs}]^T$	Vecteurs des tensions statoriques et rotoriques (V)
$[v_{ar}, v_{br}, v_{cr}]^T$	
$[i_{as}, i_{bs}, i_{cs}]^T$	Vecteurs des courants statoriques et rotoriques (A)
$[i_{ar}, i_{rs}, i_{cr}]^T$	
$[\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}]^T$	Vecteurs des flux statoriques et rotoriques (Wb)
$[\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}]^T$	
R_s, R_r	Résistance statorique et rotorique
L_s, L_r	Inductances cycliques statoriques et rotoriques (H)
M_s	Inductance mutuelle entre phases statoriques (H)
M_R	Inductance mutuelle entre phases rotoriques (H)
$[M_{sr}]$	Matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor (H)
M	Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques (H)
σ	Coefficient de dispersion
d	Indice de l'axe direct
q	Indice de l'axe en quadrature
o	Indice de l'axe homopolaire
$[A]$	Matrice de Park
$[A]^{-1}$	Matrice inverse de Park
θ_s	Position de stator (rad)
θ_s, θ_r	Position entre l'axe statorique a_s et l'axe rotorique a_r (rad)
θ_r	Position électrique de rotor (rad)
ω_s	Pulsation statorique
ω_r	Pulsation rotorique
ω_{sr}	Pulsation électrique des grandeurs rotoriques (Pulsation de glissement)
ω_m	vitesse angulaire de rotation du rotor
$\omega_n = P \cdot \Omega_n$	Vitesse angulaire nominale de la machine (rad/sec)
Ω_n	Vitesse de rotation mécanique nominale de la machine (rad/sec)

Ω	Vitesse de rotation mécanique du rotor (rad/sec).
Ω_m	Vitesse de rotation mécanique (rad/sec).
f_s, f_r	Fréquence statorique et rotorique (Hz).
f	Fréquence de la tension de référence (Hz).
f_p	fréquence de la porteuse (Hz).
V_{sd}, V_{sq}	Composantes de la tension statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (V).
V_{rd}, V_{rq}	Composantes de la tension rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (V).
i_{sd}, i_{sq}	Composantes du courant statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (A).
i_{rd}, i_{rq}	Composantes du courant rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (A).
$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$	Composantes du flux statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (Wb)
$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$	Composantes du flux rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (Wb).
φ_{sn}	Flux statorique nominal (Wb).
C_e	Couple électromagnétique (N.m).
C_r	Couple résistant (N.m).
J	Moment d'inertie des parties tournantes (Kg.m ²).
f	Coefficient de frottement (N.m.sec/rad).
p	Nombre de paires de pôles.
U_d	tension de bus continu (V).
$S = \frac{d}{dt}$	Opérateur de Laplace.
T_s, T_r	Constante de temps statorique et rotorique.
K_i	Gain intégral.
K_p	Gain proportionnel.
K_{id}, K_{pd}	Gains proportionnel et intégral de régulateur PI du courant rotorique directe.
K_{iq}, K_{pq}	Gains proportionnel et intégral de régulateur PI du courant rotorique quadrature.
$K_{i\varphi}, K_{p\varphi}$	Gains proportionnel et intégral de régulateur PI du flux statorique.
r_e	Constante de temps électrique
r	Constante de temps.
ξ	Constante d'amortissement.
P_s, Q_s	Puissance statorique active et réactive

Introduction Générale

Introduction Générale

Pour des nombreux pays, la situation concernant la production d'énergie électrique est devenue alarmante. Les experts ont annoncé l'épuisement imminent des réserves pétrolières, tandis que les effets des gaz à effet de serre sur le climat ont intensifié l'urgence de trouver des solutions. C'est pourquoi l'utilisation des énergies renouvelables est devenue essentielle pour réduire les émissions de carbone et avoir un impact positif sur l'environnement.

Dans l'industrialisation, les chercheurs ont été confrontés au problème de la commande des machines électriques à vitesse variable. Des performances de plus en plus élevées sont exigées des entraînements électriques. Cependant, la présence de collecteurs à balais les rend inutilisables dans les environnements à forte puissance et corrosifs, et ils nécessitent une maintenance avec des collecteurs.

Ainsi, les limitations ont conduit la recherche dans le domaine de la vitesse variable à se concentrer sur les machines à courant alternatif, en particulier les machines asynchrones. Ces dernières présentent plusieurs avantages, notamment une fabrication moins coûteuse, une construction relativement simple, une capacité à supporter des surcharges, une vitesse de rotation plus élevée et une faible exigence en termes d'entretien régulier.

Leur inconvénient réside dans la complexité de leur fonctionnement, car ces machines agissent comme des systèmes multi-variables, non linéaires et fortement couplés, ce qui les rend difficiles à contrôler.

Dans le domaine des entraînements de grande puissance, il existe une nouvelle solution sous la forme d'une machine à mouvement alternatif qui fonctionne dans un mode spécial appelé "MADA", une machine asynchrone à double alimentation.

Machines asynchrones triphasées à rotor bobiné, pouvant être alimentées par deux sources de tension, le stator et le rotor.

L'intérêt pour ces machines ne cesse de croître. Cet intérêt est dû au degré élevé de liberté offert par l'accessibilité du rotor et donc à la possibilité d'alimentation par des convertisseurs à la fois du côté du stator et du côté du rotor, ainsi qu'à la large gamme de vitesses (hypo-synchrone, synchrone, hyper-synchrone).

Pour fonctionner à vitesse variable, un convertisseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) doit être installé entre la machine et le réseau électrique. En effet, quelle que soit la vitesse

à laquelle la machine fonctionne, la tension est redressée et l'onduleur connecté au réseau sert à assurer la cohérence entre la machine et le réseau.

L'onduleur du côté du réseau est chargé d'assurer la correspondance entre la fréquence du réseau et la fréquence fournie par la machine.

Les machines asynchrones à double alimentation sont intrinsèquement non linéaires, car le flux magnétique et le couple électromagnétique sont couplés. La commande vectorielle, qui aligne le flux magnétique le long d'un axe privilégié, garantit que le flux et le couple ne sont pas couplés.

L'objectif de cette technologie est de contrôler les machines asynchrones comme des machines à courant continu à excitation indépendante, où il existe un découplage naturel entre la variable contrôlant le flux magnétique (courant d'excitation) et la variable liée au couple (courant d'induit).

Le plan de notre travail du mémoire constitué de quatre chapitres organisés comme suit :

Le première chapitre, présente une étude théorique sur l'état de l'art de l'énergie éolienne, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer depuis que les éoliennes ont été utilisées pour la première fois. Ce n'est qu'au début des années 1940 que des prototypes réels d'éoliennes à pales profilées ont réussi à produire de l'électricité. Plusieurs technologies (capteurs à axe vertical ou à axe horizontal) sont utilisées pour capter l'énergie éolienne et les structures des capteurs sont de plus en plus efficaces.

Autre caractéristiques mécaniques des éoliennes, l'efficacité avec laquelle l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique est également très importante. Là encore, il existe un certain nombre de systèmes utilisant des machines synchrones ou asynchrones. La stratégie de contrôle de ces machines et l'interface pour les connecter au réseau doivent permettre de capter le plus d'énergie possible pour la plus grande plage possible de fluctuations de la vitesse du vent,

Le deuxième chapitre, Il s'agit d'une étude théorique portant sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) qui examine son fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients. Le chapitre en question se concentre sur la modélisation mathématique de la MADA, qui est basée sur des hypothèses simplificatrices dans différents référentiels, ainsi que sur la modélisation du système d'alimentation de la MADA.

Le troisième chapitre, présente la commande vectorielle directe d'une machine asynchrone à double alimentation par orientation du flux statorique. Il passe ensuite à la simulation numérique à l'aide de MATLAB/SIMULINK.

Le quatrième chapitre, est consacré sur le principe du contrôle de l'amplitude de la MADA a été développé. Le contrôle d'amplitude de la MADA, en particulier sur le contrôle direct du couple (DTC). La méthode directe du couple (DTC) est le but de ce thème.

L'information de stratégie de contrôle est, les principes de la commande du flux électromagnétique et du couple sont illustrés à l'aide d'un modèle continu d'un onduleur de tension à deux niveaux et des vecteurs de tension générés. Vecteurs de tension générés Dans, les études suivantes sont réalisées. L'influence des bandes d'hystérésis sur les performances de la commande DTC.

Finalement, en guise de synthèse, une conclusion générale sera proposée pour mettre en évidence les points les plus importants de cette étude et offrir une perspective qui pourrait orienter les initiatives futures en matière d'évolution et de recherche.

Chapitre I

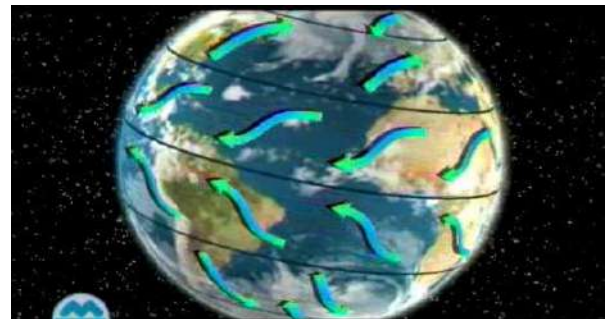
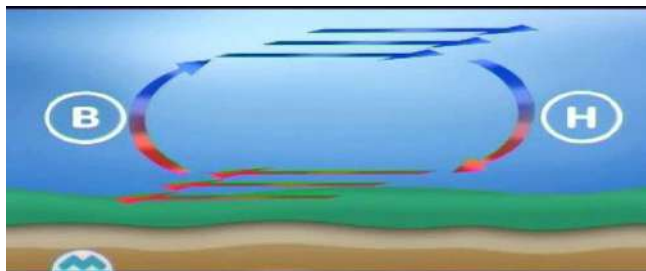
I.1. Introduction

L'utilisation des sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité décentralisée peut aider à résoudre les défis liés à l'électrification des zones isolées.

Dans ce chapitre, on va proposer l'énergie éolienne et de leurs types éoliennes à axe vertical et éoliennes à axe horizontal et comment elles sont formées. Nous avons également abordé les types de machines électriques utilisées.

I.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne résulte de l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement au-dessus de la surface terrestre. Le terme "vent" tire son origine du nom du personnage mythologique "Éole", reconnu dans la Grèce antique en tant que "maître du vent". L'énergie éolienne est une forme indirecte d'énergie solaire, puisque les rayons solaires absorbés par l'atmosphère entraînent des variations de température et de pression de l'air. Ces différences occasionnent le mouvement des masses d'air, générant ainsi de l'énergie cinétique qui peut être convertie et utilisée pour diverses fins [poi03].

**A****B****C****D****Figure. I.1.** La naissance du vent.

I.3. Production d'énergie électrique

Les turbines éoliennes sont équipées d'un générateur qui a la capacité de produire du courant électrique continu ou alternatif. Ce générateur peut être connecté au réseau électrique ou fonctionner de manière autonome en utilisant un générateur de secours tel qu'un groupe électrogène, une batterie ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Les turbines éoliennes sont souvent appelées éoliennes en raison de leur capacité à générer de l'électricité. [Azz 19].

I.4. Principe de l'énergie éolienne

Les ressources éoliennes résultent du déplacement des masses d'air indirectement provoqué par le rayonnement solaire de la Terre. En réchauffant certaines régions de la Terre et en refroidissant d'autres, les masses d'air créent des différences de pression atmosphérique.

En refroidissant d'autres régions et en créant des différences de pression atmosphérique, les masses d'air sont en mouvement constant.

Les masses d'air sont continuellement en mouvement, et les éoliennes sont capables de convertir une partie de l'énergie cinétique du vent (c'est-à-dire la masse d'air en mouvement) en énergie mécanique. Cette énergie peut être utilisée pour faire fonctionner un arbre d'entraînement ou peut être transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'une génératrice asynchrone à double alimentation. [Azz 19].

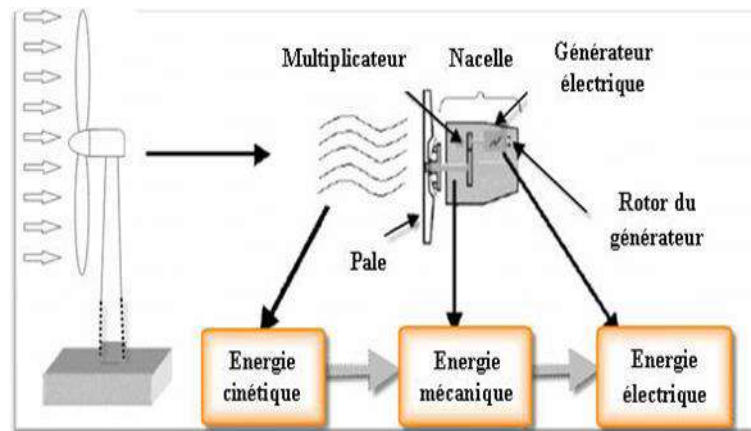


Figure. I.2. Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.5. Différents types d'éoliennes et leur utilisation

Les éoliennes peuvent généralement être divisées en éoliennes à axe vertical (VAWT) et éoliennes à axe horizontal (HAWT). Les éoliennes à axe vertical tendent à disparaître, tandis que les

éoliennes à axe horizontal à faible vitesse sont particulièrement utilisées du pompage de l'eau et que les éoliennes à axe horizontal à grande vitesse sont usées de la production d'électricité [Bet 19].

I.5.1. Les éoliennes à axe horizontal

Ce type est basée sur le principe de l'éolienne, également appelée "éolienne à hélice". Elles changent de direction en fonction du sens du vent et sont généralement composées de trois pales. C'est le modèle le plus courant. En raison de leur grande taille, elles sont généralement installées dans les zones rurales ou en mer. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées car elles sont aérodynamique plus efficaces, moins sujettes aux contraintes mécaniques et moins chères que les éoliennes à axe vertical [Kan 07].

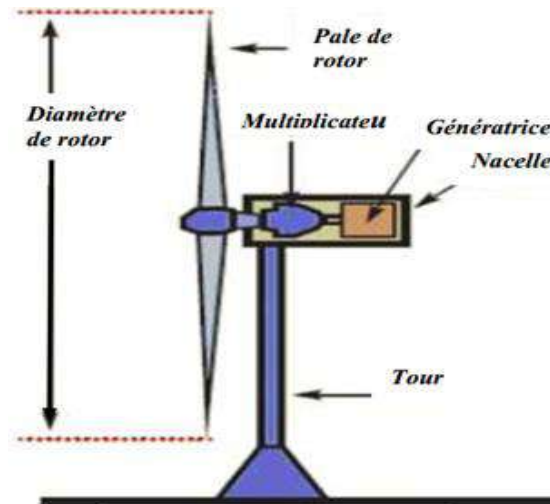


Figure. I.3. Aérogénérateur à axe horizontal.

I.5.2. Les éoliennes à axe vertical

L'axe du rotor est vertical au sol. Aucun système n'est nécessaire pour changer la direction du vent, mais cette éolienne est toujours considérée comme moins efficace que les éoliennes à axe horizontal, car elle ne capte que la moitié de l'énergie du vent. Il existe deux types d'éoliennes à axe vertical : le type Savonius et le type Darius. Les éoliennes à axe vertical de type Darius sont généralement moins efficaces que les éoliennes à pales "classiques" [Kan 07].

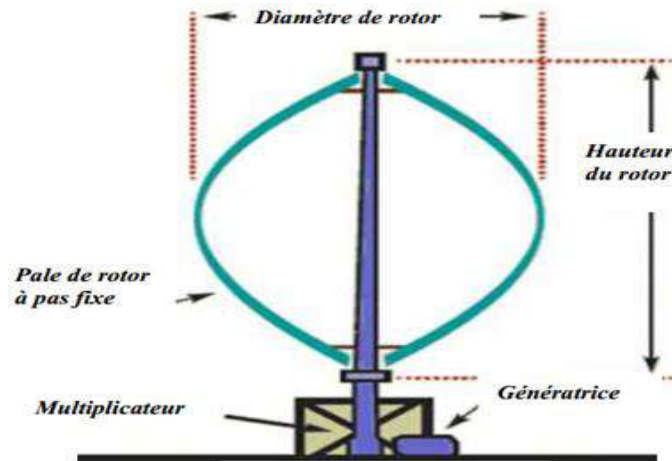


Figure. I.4. Principe du rotor de Savonius.

I.5.2.1. Avantages des aérogénérateurs à axe vertical

La conception verticale présente l'avantage de placer le multiplicateur, la génératrice et les équipements de commande directement au sol, ce qui facilite leur maintenance et leur entretien. De plus, il n'est pas nécessaire d'avoir un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la turbine dans n'importe quelle direction.

I.5.2.2. Inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical

Structure quel que soit sa direction. Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants :

- Les vents sont ralentis par les reliefs et sont donc plus faibles à proximité de la surface du sol.
- Certains types de turbines éoliennes à axe vertical nécessitent un dispositif de démarrage auxiliaire.
- Dans l'ensemble, l'efficacité des turbines éoliennes à axe vertical n'est pas satisfaisante.
- Les turbines éoliennes à axe vertical nécessitent une grande superficie de terrain pour les puissances élevées, ce qui peut être un inconvénient majeur pour les installations situées sur des sites agricoles, par exemple.
- Les éoliennes à axe vertical ont un faible taux de rendement et une grande variabilité de puissance.
- Bien que quelques grands projets industriels aient été réalisés, les turbines éoliennes à axe vertical sont encore peu utilisées, voire abandonnées à l'heure actuelle.

I.5.3. Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'éolienne est basé sur le fait que les profils à autres angles par liaison à la direction du flux d'air sont soumis à des forces. Ces forces sont converties en couple moteur, qui est forces d'écoulement de l'air. S'expliquent par un couple moteur, qui entraîne l'orientation de l'appareil. Entraînement de l'orientation de l'appareil (Figure I.5) [Azz 19].

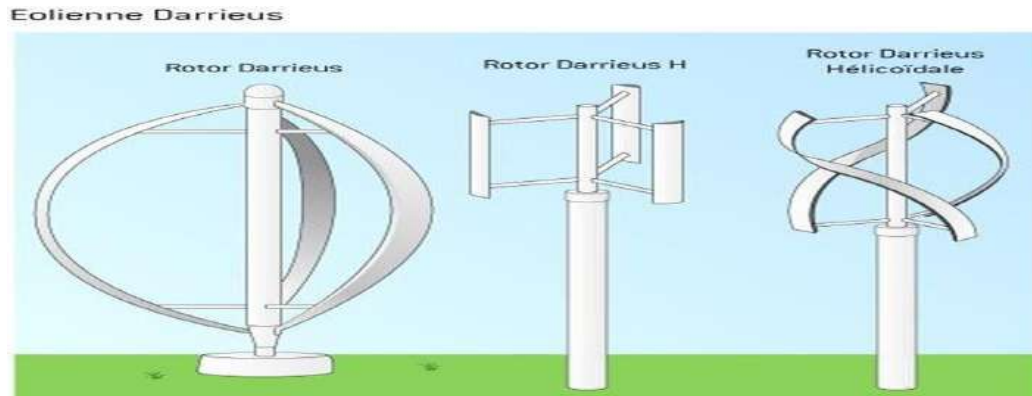


Figure. I.5. Éolien Darrieus.

I.5.3. Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Les forces induites par le vent sur chaque surface du corps concave sont inégales en intensité, générant un couple d'entraînement qui fait tourner l'ensemble. De même, les forces exercées par le vent sur chaque surface du corps creux sont d'intensités différentes, entraînant un couple moteur qui fait tourner l'ensemble. Cet effet est causé par l'effet du vent. En outre, ce phénomène est amplifié par le mouvement de l'air à travers les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple d'entraînement.

Eoliennes à axe vertical Savonius. Les éoliennes Savonius sont moins efficaces que les éoliennes à pales "classiques", mais elles ont l'avantage de fonctionner dans n'importe quelle direction du vent. Ce type d'éolienne est utile pour capter les vents forts (par exemple, en haute montagne ou en bord de mer). L'installation d'éoliennes verticales sur des bâtiments n'est pas une tâche facile car les vibrations peuvent endommager la structure [Azz19]



Figure. I.6. Éolien Savonius.

I.6. Etat de l'Art sur la Conversion Electromécanique

Il y a deux types de technologies éoliennes: les éoliennes à vitesse fixe qui utilisent des générateurs asynchrones à cage d'écureuil, et les éoliennes à vitesse variable. Cette dernière technologie peut également améliorer la qualité de l'électricité en répondant de manière flexible aux brusques variations de vitesse du vent. [Ben 13].

I.6.1. Les Eoliennes à vitesse Fixe

Dans ce scénario, la turbine éolienne tourne à une vitesse contrôlée par l'orientation de ses pales (contrôle de pas). Elle repose principalement sur des machines asynchrones à cage d'écureuil qui sont directement connectées à un réseau de haute puissance qui impose une fréquence de 50 Hz au stator variable. La vitesse de rotation de la machine asynchrone doit être supérieure à la vitesse synchrone (c'est-à-dire avoir un glissement négatif). [Idj 10]-[Dav 07]- Cou 08] pour assurer le fonctionnement de la génératrice.

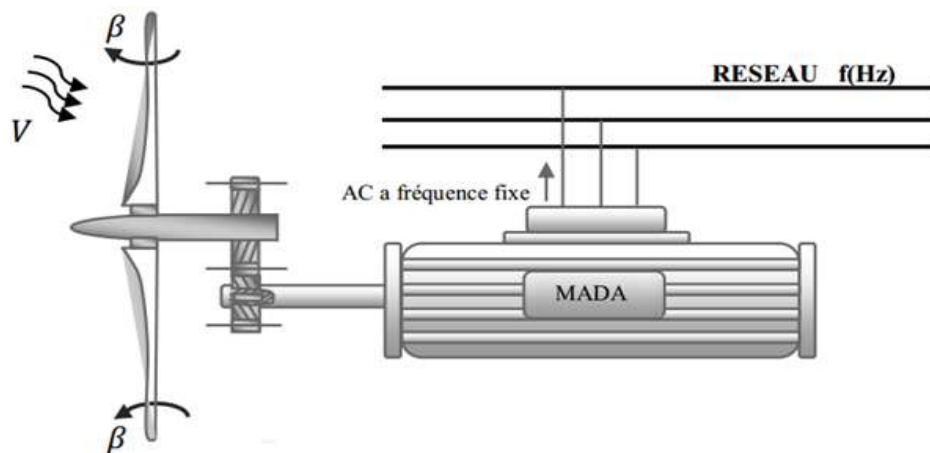


Figure. I.7. Eolienne à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.

I.6.2. Les Eoliennes à Vitesse Variable

La Figure (I.8) illustre le deuxième scénario. Bien que le système à vitesse fixe soit simple, il peut être bruyant en raison des modifications aérodynamiques requises pour orienter les pales, et il limite la plage de vitesses de vent utilisable. Pour maximiser la puissance extraite du vent, une interface de puissance est utilisée pour ajuster la fréquence des courants générés à celle du réseau, permettant ainsi de fonctionner à vitesse variable [Bek 14]. Cependant, une liaison directe au réseau n'est plus possible en raison de la fréquence variable des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance est alors nécessaire entre la génératrice et le réseau, qui est généralement composée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par un plan à tension continue.

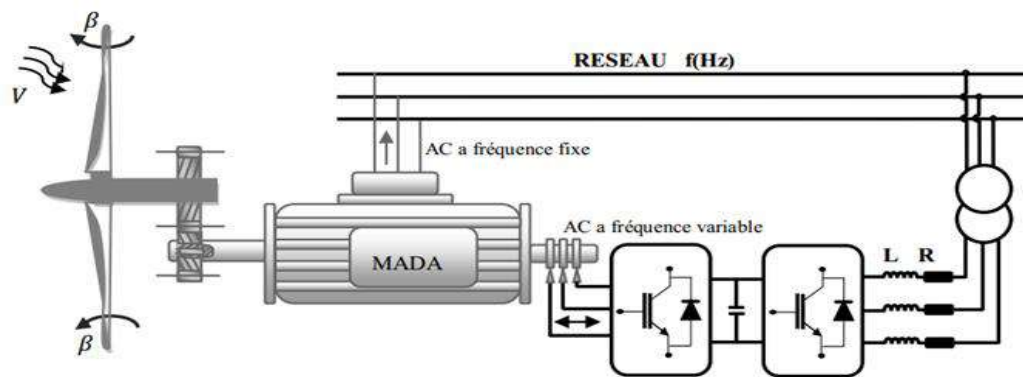


Figure. I.8. Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.

I.7. Types des machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

La forme électrique d'une éolienne a une efficacité significative sur son fonctionnement, telle que, si l'éolienne fonctionne à vitesse fixe ou variable. Les principaux avantages des deux types de fonctionnement sont [Rou 16]-[Cam 03] :

- **Fonctionnement à vitesse fixe :**

- Le système électrique est simplifié ;
- ce qui augmente sa fiabilité et diminue les risques d'excitation des fréquences de résonance des composants de la turbine éolienne ;
- Il n'y a pas besoin d'un système de commande électrique ;
- Ce qui permet de réduire les coûts.

- **Fonctionnement à vitesse variable**

Les avantages de l'utilisation de ces machines électriques dans l'industrie éolienne comprennent une augmentation de l'efficacité énergétique.

- Une réduction des oscillations du couple dans le train de puissance ;
- Une diminution des contraintes subies par le train de puissance ;
- une production d'électricité de meilleure qualité ;
- Une exploitation optimale de l'énergie éolienne et la possibilité d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors des rafales de vent.

Les caractéristiques distinctives de chaque type de machine électrique les plus couramment utilisées dans l'industrie éolienne sont également à considérer.

I.7.1. Générateur synchrone

C'est le type de machine utilisé dans la plupart des processus de production d'électricité conventionnels, en particulier dans les centrales électriques de grande puissance (centrales thermiques, hydroélectriques et nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans la production d'énergie éolienne, d'une puissance allant de 500 kW à 2 MW, sont beaucoup plus chers que les générateurs à induction de même taille.

Si ce type de machine est connecté directement au réseau, sa vitesse de rotation est constante et proportionnelle à la fréquence du réseau. En raison de cette connexion rigide entre le générateur et le réseau, toute variation du couple reçu par l'éolienne est transmise à la puissance générée. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas adaptées pour les éoliennes directement connectées au réseau. Cependant, elles sont utilisées lorsqu'elles sont reliées au réseau via un convertisseur de puissance (tel qu'illustré dans la Figure I.9) [Bel 10]-[Kha 14].

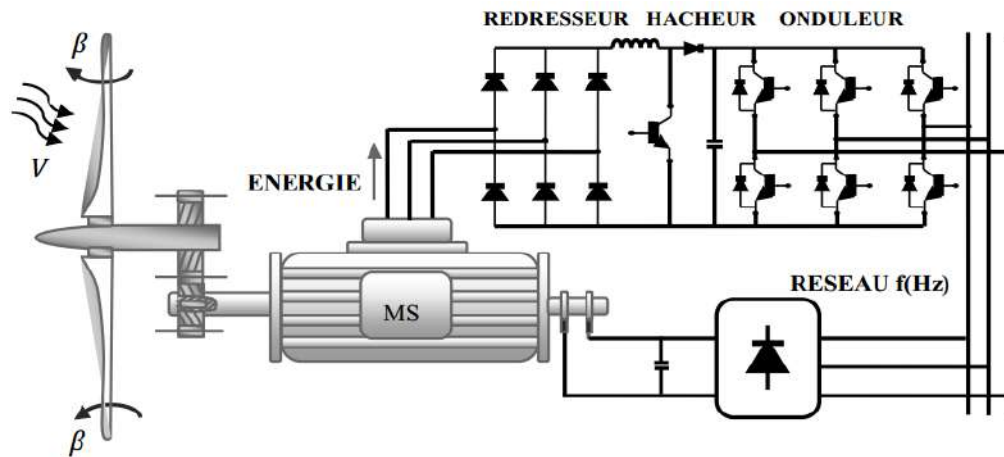


Figure. I.9. Machine synchrone connectée directement au réseau.

Dans cette configuration, la fréquence du réseau est dissociée de la vitesse de rotation de la machine, ce qui permet de modifier cette dernière pour optimiser l'efficacité aérodynamique de l'éolienne et réduire les fluctuations de couple dans le groupe motopropulseur. Certaines machines synchrones peuvent fonctionner à des vitesses de rotation plus basses et être directement connectées à l'éolienne, évitant ainsi la nécessité d'installer des multiplicateurs, qui sont présents sur la plupart des éoliennes et nécessitent un entretien fastidieux.

I.7.2. Générateur asynchrone

Dans ce type de machines la connexion directe au réseau est plus douce en raison de la variation de glissement entre le flux du stator et la vitesse du rotor. C'est pourquoi les machines asynchrones sont utilisées dans presque toutes les éoliennes à vitesse fixe [Cam 03].

Il existe deux types de machines à induction : les machines à induction à cage d'écureuil et les machines à induction à rotor bobiné.

I.7.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus faciles et les moins chères à fabriquer. Elles sont standardisées, peuvent être produites en grandes quantités et présentent l'avantage d'une très grande échelle de production. Elles nécessitent également moins d'entretien et ont un taux de défaillance plus faible que les machines asynchrones à cage. Elles sont très robustes, nécessitent peu d'entretien et ont un faible coût de construction. Elles sont simples à utiliser et faciles à lier au réseau [Ard 16].

La connexion directe de ce type de machines au réseau est plus souple en raison des variations de glissement entre le flux du stator et la vitesse du rotor. C'est pourquoi les machines à induction sont utilisées dans presque toutes les éoliennes à vitesse constante [Poi 03]. L'énergie réactive de la machine n'est pas contrôlée et dépend de la vitesse du rotor. Dans de nombreux cas, une batterie de condensateurs est connectée en parallèle au stator de la machine pour fournir l'énergie réactive requise par la machine [Ard 16].

Dans les années 1990, le Danemark a ajouté une deuxième machine électrique pour permettre aux éoliennes de fonctionner à deux vitesses, améliorant ainsi l'efficacité énergétique des éoliennes. L'introduction d'un convertisseur de puissance dans l'éolienne et le réseau a permis aux éoliennes à vitesse variable de fonctionner avec les avantages décrits ci-dessus, malgré leur montant haut, en découplant la fréquence du réseau et la vitesse de l'éolienne, comme le ferait une machine synchrone [Ben 13].

I.7.2.2. Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

Les générateurs synchrones sont désormais l'une des deux solutions concurrentes pour les éoliennes à vitesse variable. Leur stator est directement couplé au réseau électrique, généralement via un transformateur. Contrairement aux rotors à cage d'écureuil, ces machines ont un rotor bobiné dont le glissement peut être varié grâce à un ajustement électrique [Idj 10].

Actuellement, la plupart des projets éoliens de plus de 1 MW utilisent des machines asynchrones pilotées par le rotor. Leur circuit statorique est directement connecté au réseau, tandis qu'un deuxième circuit installé au niveau du rotor est relié au réseau via des convertisseurs de puissance. Cela permet de minimiser la quantité de puissance rotorique transmise, réduisant ainsi le coût des convertisseurs par rapport à une éolienne à vitesse variable alimentée par des convertisseurs de puissance au niveau du stator. C'est pourquoi ces générateurs sont principalement utilisés pour les projets de forte puissance. Une autre raison est la possibilité de régler la tension à la partie de connexion où cette machine est injectée [Ben 13].

I.8. Modélisation de la turbine éolienne

La modélisation de la turbine éolienne consiste à déterminer la puissance qui peut être extraite en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, afin de calculer le couple éolien appliqué sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation est basée sur des recherches bibliographiques ou sur des informations provenant de brochures de différents fabricants.

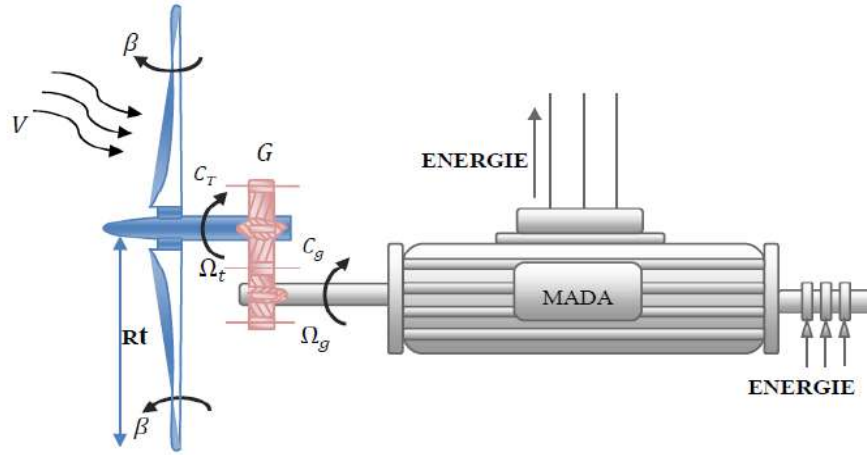


Figure. I.10. Schéma de la turbine éolienne.

L'énergie cinétique du vent est la source initiale d'énergie pour les éoliennes. Le vent est en réalité un champ de vitesses de rotation de masses d'air. La distribution spatiale de ce champ au niveau de la turbine éolienne est complexe, et son évolution au fil du temps présente des variations importantes qui empêchent une représentation entièrement déterministe. La vitesse du vent en un point peut être décomposée en deux composantes : une composante moyenne variant lentement et des fluctuations.

La puissance d'éolienne est définie de la manière suivante [Sag 98]-[Bec 13]:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V_{vent}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (I.1)$$

ρ : Est la densité de l'air qui est égale à 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C . Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité.

S : Est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale R où $S = \pi R^2$.

V_{vent} : Est la vitesse du vent.

Le dispositif de conversion (la turbine éolienne) extrait une puissance aérodynamique P_{aer} inférieure à la puissance disponible P_v .

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (I.2)$$

La turbine éolienne peut uniquement transformer juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent [Ela 03]. On représente ce pourcentage par $C_p(\lambda, \beta)$ qui est en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle de l'orientation de pale β .

Le coefficient de puissance C_p , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne ($\frac{P_{aer}}{P_v}$), Il dépend de la caractéristique de la turbine. L'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [Ela 04]-[Abd 00]:

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (I.3)$$

La courbe réelle du coefficient de puissance C_p de la turbine éolienne étudiée dans cette thèse est illustrée dans la figure I.17 C_p est $C_{p_max} = 0.5$ qui correspond à l'angle de l'orientation de pale $\beta = 2^\circ$ et la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{optim} = 9.2$. Pour extraire le maximum de la puissance générée, nous devons fixer le ratio de vitesse λ_{optim} et le coefficient de puissance maximal $C_{p_max} = 0.5$.

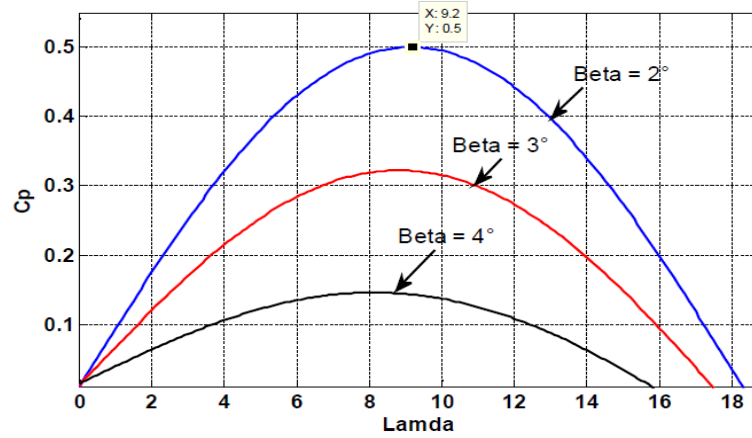


Figure. I.11. Coefficient de puissance C_p en fonction du ratio de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de pale β .

Le couple de la turbine est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine Ω_t :

$$C_t = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} \quad (I.4)$$

Ω_t : Vitesse de la turbine.

C_{aer} : Couple aérodynamique.

Le ratio de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales (la vitesse de rotation de la turbine) et la vitesse du vent [Ela 04]:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (I.5)$$

I.10.2. Modélisation du Multiplicateur

Le multiplicateur est utilisé pour adapter la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Pour ce faire, la turbine est reliée à l'axe du générateur via un multiplicateur, dont le gain de vitesse G est choisi de manière à ajuster la vitesse de l'axe du générateur à la vitesse souhaitée. En supposant que les pertes de transmission sont négligeables, le couple et la vitesse de la turbine sont rapportés au côté du générateur par les équations suivantes [Aou 09] :

Mathématiquement, ce multiplicateur est modélisé par un simple gain.

$$C_g = \frac{G_{aer}}{G} \quad (I.6)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.7)$$

Où :

C_g : Couple du multiplicateur.

Ω_{mec} : Est la vitesse de rotation du générateur.

G : Gain du multiplicateur.

I.10.3. Modélisation de l'Arbre Mécanique

La masse de l'éolienne est transmise à l'arbre de la turbine sous forme d'une inertie J_t qui supporte les pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé prend en compte l'inertie totale J qui se compose de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice elle-même [Ghe 11]-[Abd 13].

$$J_t = J_g + J_t G^2 \quad (I.8)$$

$$C_{mec} = J_t \frac{d\Omega}{dt} \quad (I.9)$$

L'équation mécanique qui gère un tel ensemble est donnée par :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.10)$$

$$C_g - C_{em} = J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} \quad (I.11)$$

Où :

J_t : C'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice

C_{em} : est le couple électromagnétique du GADA.

C_{vis} : Le couple de frottement visqueux.

Le schéma bloc correspondant à la modélisation de la turbine éolienne se déduit aisément des équations ci-dessus et est représenté par la (figure I.12).

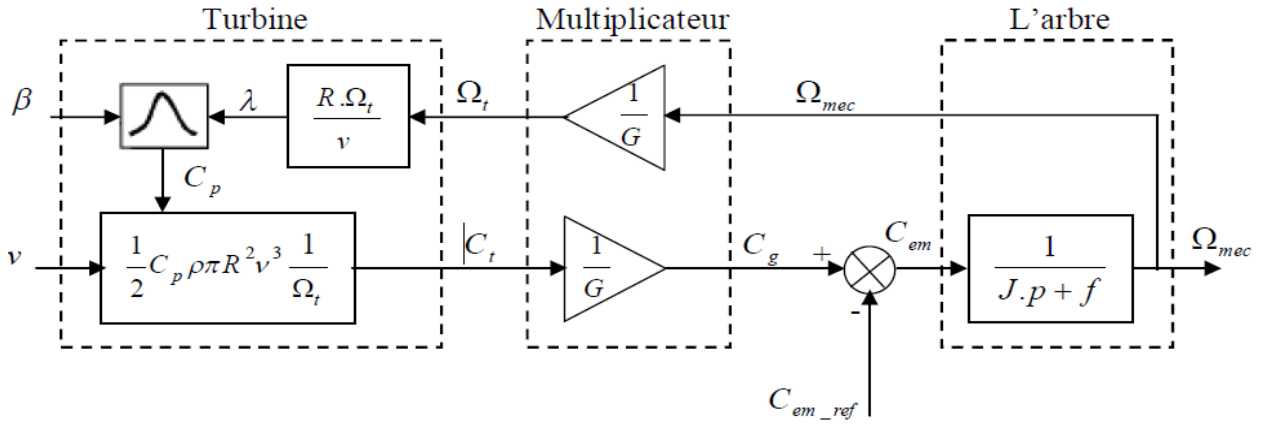


Figure. I.12. Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

I.11. Conclusion

Le chapitre suivant se concentrera sur l'étude de la chaîne de commande éolienne, qui permet la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Ce chapitre nous permet de formuler un ensemble de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes. Les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (décrochage aérodynamique) sont décrits après un rappel des concepts de base nécessaires à la compréhension de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. La deuxième partie de ce chapitre présente les machines électriques et leurs utilisations dans les systèmes éoliens. Trois grandes classes de machines sont introduites : les machines asynchrones, les machines synchrones et les machines de construction spéciale.

Chapitre II

II.1. Introduction

La MADA a été inventée pour la première fois en 1899 et est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimenté par ses deux armatures. Sa structure n'est pas nouvelle, mais c'est plutôt son mode d'alimentation qui est nouveau. Dans cette section, nous allons nous pencher sur le modèle triphasé de la MADA, ainsi que sur la modélisation de la turbine éolienne, du multiplicateur et de l'arbre mécanique. Nous allons également présenter la transformation de PARK, les hypothèses simplificatrices et le choix du référentiel.

II.2. Modèle de la machine asynchrone double alimentée (MADA)

Dans ce qui suit nous allons détailler le modèle de la MADA tel que la définition, son principe de fonctionnement et l'application dans le système éolienne.

II.2.1. Définition générale de la MADA

La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures. Son stator est similaire à celui des machines triphasées classiques, qu'elles soient asynchrones ou synchrones. Cependant, son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais est composé de trois bobinages connectés en étoile. Les extrémités de ces bobinages sont reliées à des bagues conductrices, sur lesquelles des balais frottent lorsque la machine tourne.

II.2.2. Représentation de la MADA

La particularité de cette machine réside dans le fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais plutôt constitué de trois bobines connectées en étoile, dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices qui frottent contre des balais lorsque la machine tourne. En mode moteur, la machine asynchrone à rotor bobiné offre plusieurs avantages, notamment la possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, en y connectant des rhéostats pour limiter le courant lors du démarrage, augmenter le couple durant cette phase, et élargir la plage de variation de la vitesse. Cette machine est souvent appelée "machine généralisée" ou "machine synchrone à excitation alternative" car sa structure permet de considérer son comportement physique de manière similaire à une machine synchrone, à la différence que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, mais plutôt un bobinage triphasé alimenté en alternatif.

II.2.3. L'application de la MADA dans le système éolienne

La MADA trouve sa première application importante dans le fonctionnement des moteurs sur une large plage de vitesses. Contrairement aux machines à cage d'écureuil synchrones et asynchrones conventionnelles, la vitesse n'est pas directement liée à la fréquence du courant alimentant l'enroulement du stator. La méthode traditionnelle pour obtenir une vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine à l'aide d'un redresseur et d'un onduleur contrôlé. Cependant, en utilisant la MADA, la vitesse peut être modifiée en ajustant la fréquence d'alimentation des enroulements du rotor, ce qui permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70%.

Grâce à sa conception, la MADA est économique et ne consomme ni ne produit de puissance réactive, contrairement aux machines asynchrones à cage. Ce concept peut également être appliqué aux générateurs, où un circuit rotor à fréquence variable fournit une fréquence constante au stator, même si la vitesse change. Ce mode de fonctionnement fait de la MADA une alternative viable aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production distribuée.

La MADA peut être utilisée dans de nombreux systèmes de production distribuée tels que la génération d'énergie pour les réseaux de bord des navires ou des avions, les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable, les éoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable et les groupes électrogènes. Dans ce dernier cas, la réduction de la vitesse pendant les périodes de faible consommation peut réduire considérablement la consommation de carburant. En outre, une troisième application de la MADA consiste à l'utiliser en tant que moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs, un pour le rotor et un pour le stator.

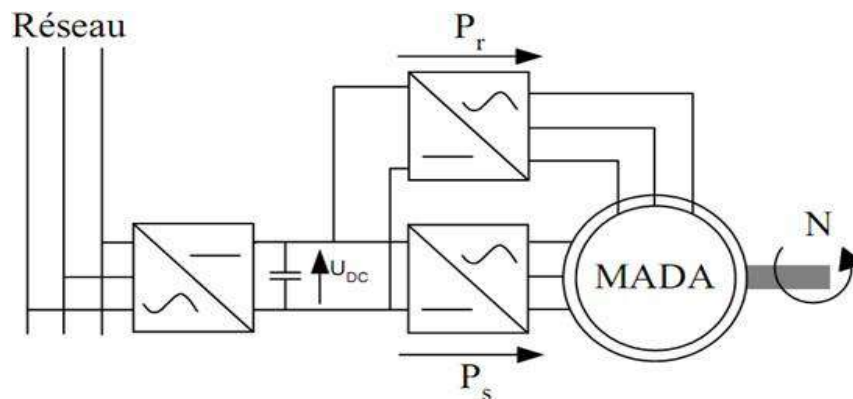


Figure. II.1 MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances.

Pour une utilisation dans un système éolien, le mode de fonctionnement en tant que

génératrice est avantageux. En effet, si la plage de variation de vitesse reste dans les limites de $\pm 30\%$ par rapport à la vitesse de synchronisation, la machine peut produire une puissance allant de 0,7 à 0,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour ne transmettre que la puissance de glissement, c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine [Gho 01]-[Ram 00].

II.3. Principe de fonctionnement de la MADA

Contrairement aux machines à cage, avec la MADA, les moteurs et les générateurs ne sont plus limités par la vitesse de rotation pour leur mode de fonctionnement. En effet, les machines MADA peuvent fonctionner en mode moteur à une vitesse inférieure à la vitesse synchrone et en mode générateur à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone. En contrôlant la tension du rotor, le champ magnétique à l'intérieur de la machine peut être géré, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en mode super-synchrone ou en mode synchrone bas, à la fois en mode moteur et en mode générateur. Les différents modes de fonctionnement sont décrits successivement [Tam 09]-[Ben 12].

II.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

D'après la figure (II.2), la puissance est transférée du réseau électrique vers le stator, et la puissance de glissement est renvoyée au réseau à travers le rotor. Dans ce mode de fonctionnement, le moteur tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisation. Cette région est généralement appelée le mode de récupération de l'énergie de glissement. Les machines asynchrones conventionnelles à cage d'écureuil peuvent également fonctionner de cette manière, mais dans ce cas, la puissance de glissement est dissipée sous forme de pertes Joule dans le rotor.

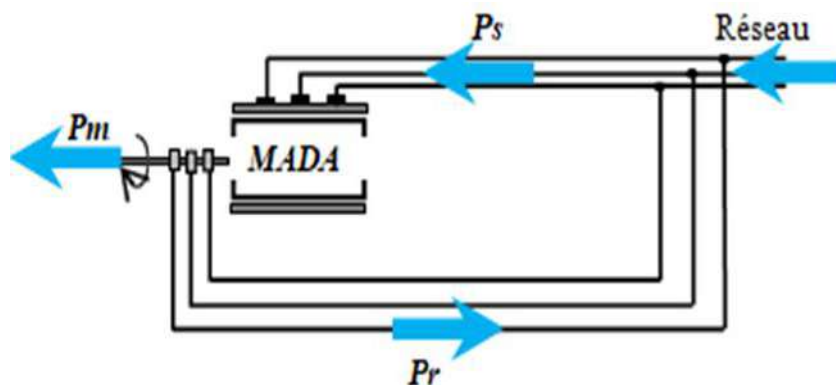


Figure. II.2. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

II.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

D'après la figure (II.3), la puissance est injectée par le réseau dans le stator, et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor, ce qui permet au moteur de fonctionner à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone. Cependant, ce mode de fonctionnement n'est pas possible pour les machines asynchrones à cage.

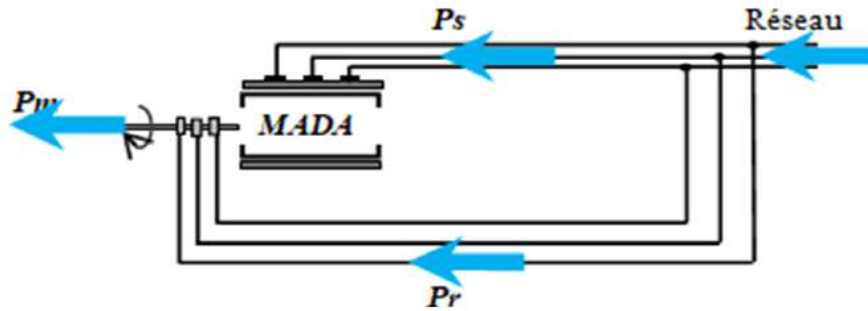


Figure. II.3. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

II.3.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

D'après la figure (II.4), la puissance est transférée du stator vers le réseau électrique. La puissance de glissement est également fournie par le stator. Dans ce mode de fonctionnement, la génératrice tourne à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisation. Cependant, ce mode de fonctionnement n'est pas possible avec les machines asynchrones classiques.

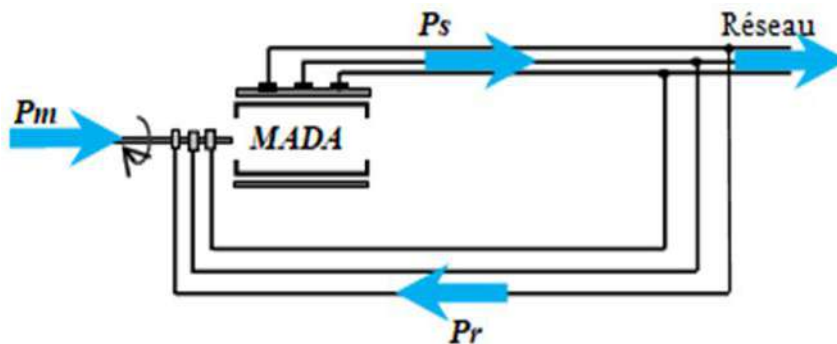


Figure. II.4. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.

II.3.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure (II.5) montre alors que la puissance est injectée dans le réseau par le stator, tandis que la puissance de glissement est récupérée par le rotor et réinjectée dans le réseau. Le générateur fonctionne donc à une vitesse synchrone ou supérieure. Un tel fonctionnement est également possible avec des machines asynchrones à cage, mais dans ce cas, la puissance de glissement est dissipée sous forme de pertes Joule. Elle est dissipée sous forme de pertes Joule dans le rotor.

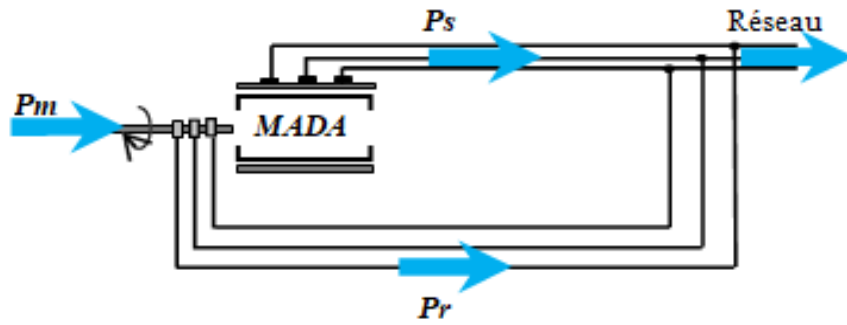


Figure. II.5. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

II.4. Modélisation de la MADA

Les machines asynchrones triphasées se composent d'un stator statique et d'un rotor cylindrique mobile. Le stator est constitué de trois enroulements couplés en étoile ou en triangle, alimentés par un système de tension triphasé. Cela crée un champ magnétique qui se déplace dans l'entrefer de la machine. La vitesse de déplacement de ce champ magnétique par rapport au stator est appelée :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (\text{II.1})$$

ω_s : Est la pulsation du réseau triphasé d'alimentation du stator et p est le nombre de paires de pôles du champ magnétique apparaissant dans le stator. Le schéma ci-dessous représente une machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique .

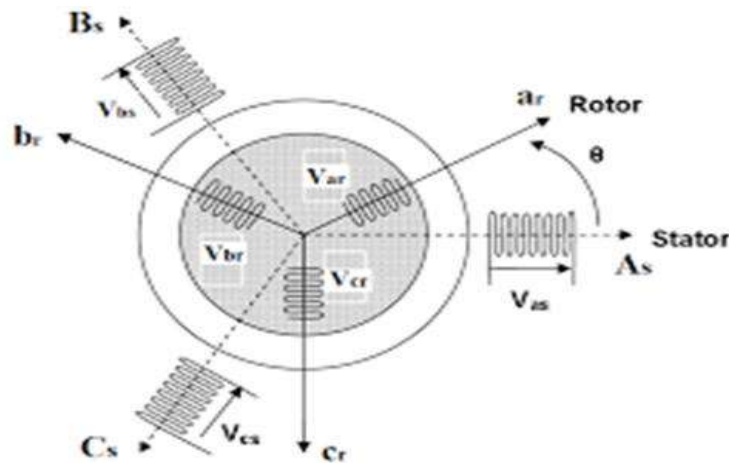


Figure. II.6. Représentation de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.

II.5. Hypothèses simplificatrice

Afin de simplifier l'étude des machines électriques, qui sont des systèmes très complexes, nous utiliserons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Un entrefer constant ;
- L'effet des encoches est négligeable ;
- Une distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Un circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante ;
- Des parties ferromagnétiques négligeables ;
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Ces hypothèses ont plusieurs conséquences, telles que l'additivité des flux, la constance des inductances propres, ainsi que la loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.6. Modèle triphasé de la MADA

L'équation générale d'une machine asynchrone à double alimentation dans un cadre de référence triphasé (abc) est exprimée sous les hypothèses précédentes, la loi de Faraday, la loi d'Ohm et l'équation de la tension du stator peuvent être exprimées en notation matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Et les équations des tensions rotorique sont comme suite :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Grandeurs statorique :

$$[V_s] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T \quad (\text{II.4})$$

$$[I_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T \mu \quad (\text{II.5})$$

Grandeurs rotorique :

$$[V_r] = [v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T \quad (\text{II.6})$$

$$[I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T \quad (\text{II.7})$$

$$[\varphi_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^T \quad (\text{II.8})$$

Les flux statorique et rotorique instantanés par phase, sont donnés par équations

magnétiques suivantes :

• **Les flux statorique**

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

• **Les flux rotorique**

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Tel que :

R_s, R_r : Sont respectivement les résistances statorique et rotorique ;

L_s, L_r : Inductances propres statorique et rotorique ;

M_s, M_r : Inductances mutuelles entre le stator et le rotor ;

M_s : Inductances mutuelles entre les phases statorique ;

M_r : Inductances mutuelles entre les phases rotorique ;

φ_s, φ_r : le flux statorique et rotorique.

II.7.Transformation de Park

La transformation de Park est une opération mathématique qui permet de transformer un système triphasé dont les axes magnétiques sont décalés de cent vingt degrés d'angle électrique en un système à trois axes orthogonaux. En pratique, il s'agit simplement de changer la base des axes magnétiques du système.

La transformation de Park est une opération mathématique qui permet de convertir un système triphasé dont les axes magnétiques sont décalés de 120 degrés d'angle électrique en un système à trois axes orthogonaux. En pratique, cela revient simplement à changer la base des axes magnétiques du système.

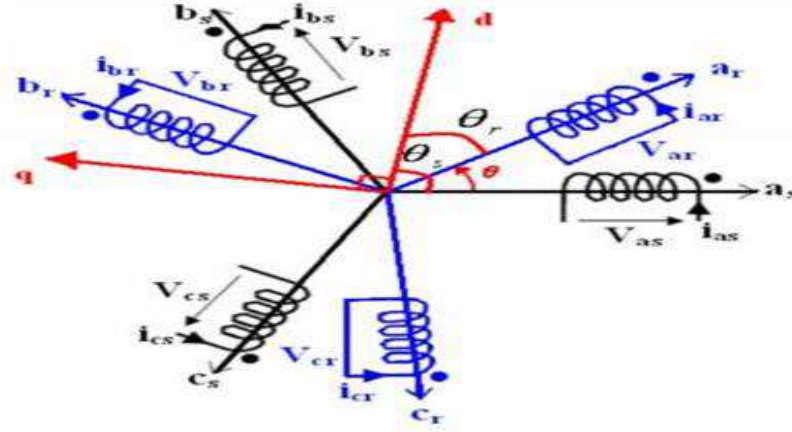


Figure. II.7. Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

Le repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique est important pour simplifier les équations et le modèle final. Il existe une relation qui les relie, permettant de simplifier les équations. Les repères utilisés pour la transformation de Park des grandeurs statoriques et rotoriques doivent être identiques pour simplifier ces équations. Le produit matriciel qui définit la transformation de Park est exprimé par :

$$[X]_{dqo} = [P(\theta)] \cdot [x]_{abc} \quad (\text{II.11})$$

Où :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

Ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation : $\theta = \theta_s - \theta_r$.

Les nouvelles variables x_d et x_q sont appelées respectivement composants directe et en quadrature.

La transformation inverse est définie par :

$$[x]_{abc} = [P(\theta)]^{-1} \cdot [X]_{dqo} \quad (\text{II.13})$$

Tell que, la matrice $[P(\theta)]^{-1}$ est définie comme suite :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$[P(\theta)]^{-1}$ et $[P(\theta)]$ représentent respectivement les matrices de passage et inverse de Park.

On vérifie que la matrice de passage obtenue est bien orthogonale et vérifie la condition :

$$[P(\theta)].[P(\theta)]^{-1} = [1] \quad (\text{II.15})$$

En appliquant la transformation de Park aux équations d'une machine asynchrone dans le référentiel naturel, on obtient un modèle de la machine qui prend en compte la composante homopolaire :

Au stator

$$[v_{dqos}] = [R_s].[i_{dqos}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dqos}] + [\lambda].[\Phi_{dqos}].\theta_s \quad (\text{II.16})$$

Au rotor

$$[v_{dqor}] = [R_r].[i_{dqor}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dqor}] + [\lambda].[\Phi_{dqor}].\theta_r \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$[\lambda] = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.18})$$

θ_r et θ_s : sont les dérivées des angles des transformations de Park des grandeurs statoriques et rotoriques respectivement :

$[V_{dqos}]$: Est la vectrice tension statorique dans le repère de Park ;

$[i_{dqos}]$: Est le vecteur courant statorique dans le repère de Park ;

$[\Phi_{dqos}]$: Est le vecteur flux statorique dans le repère de Park ;

$[V_{dqor}]$: Est la vectrice tension rotorique dans le repère de Park ;

$[i_{dqor}]$: Est le vecteur courant rotorique dans le repère de Park ;

$[\Phi_{dqor}]$: Est le vecteur flux rotorique dans le repère de Park.

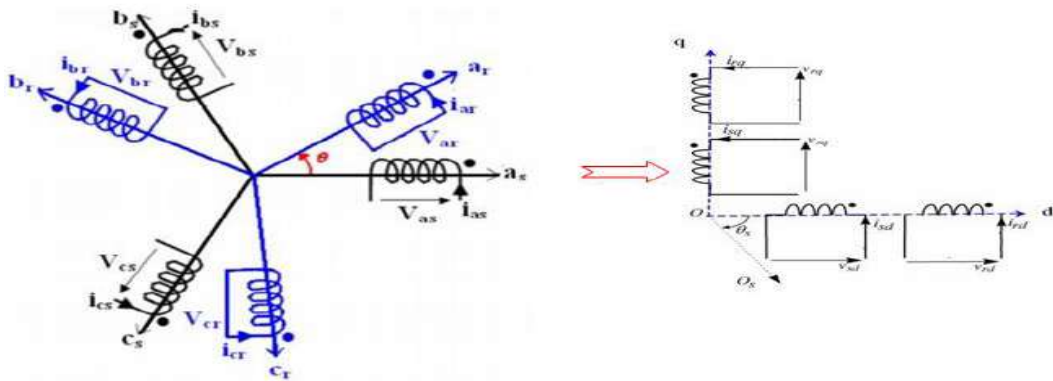


Figure. II.8. Représentation des enroulements de la machine de Park.

II.8. Le choix du référentiel

Pour simuler des moteurs asynchrones, il est recommandé de sélectionner un système d'axes de référence qui peut produire le système différentiel le plus simple et le mieux adapté au moteur.

Il est conseillé de sélectionner un système d'axes de référence qui simplifie le système différentiel, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. Les calculs peuvent être plus ou moins complexes en fonction du système d'axes choisi. Les axes (d, q) peuvent être utilisés comme système de référence pour définir d'autres systèmes d'axes, qui sont un cas particulier. Dans la suite, la composante homopolaire est supposée être nulle [Zem 17].

II.8.1. Référentiel fixe par rapport au stator (α , β)

Les axes de référence sont fixés par rapport au stator d'où :

$$\omega_s = 0 \leftrightarrow \begin{cases} u \rightarrow \alpha \\ v \rightarrow \beta \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Ce référentiel sera choisi en vue d'étudier les variations des grandeurs rotoriques.

II.8.2. Référentiel fixe par rapport au rotor (x , y)

Les axes de référence sont fixés par rapport au rotor d'où :

$$\omega_r = 0 \leftrightarrow \begin{cases} u \rightarrow x \\ v \rightarrow y \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{xs} \\ V_{ys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xs} \\ I_{ys} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xs} \\ \Phi_{ys} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{xs} \\ \Phi_{ys} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{bmatrix} V_{xr} \\ V_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xr} \\ I_{yr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xr} \\ \Phi_{yr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Ce référentiel est utilisé pour l'étude des grandeurs statoriques.

II.8.3. Référentiel fixé par rapport au champ tournant (d ,q)

Pour un référentiel lié au champ tournant, on a $\omega_s = \omega_r + \omega_m$ dans le système d'équation devient comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Les expressions du flux sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} & (a) \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} & (b) \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} & (c) \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} & (d) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

La conception du contrôle vectoriel par orientation du flux implique la transformation des grandeurs sinusoïdales en grandeurs continues en régime permanent, en utilisant la représentation qui correspond à cette transformation. Cette approche requiert également des modèles d'action qui dépendent de la position du référentiel par rapport aux différents axes de flux.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + l_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s l_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + l_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} - \omega_s l_s I_{ds} - \omega_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + l_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s l_r I_{qr} - \omega_s M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + l_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega_s l_r I_{dr} - \omega_s M I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

On peut l'écrire ce système d'équation sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & M & 0 \\ 0 & l_s & 0 & M \\ M & 0 & l_r & 0 \\ 0 & M & 0 & l_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -l_s & 0 & -M \\ -l_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -l_r \\ -M & 0 & -l_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

En règle générale, le référentiel lié au champ tournant est utilisé pour mettre en œuvre le contrôle vectoriel, de sorte que les grandeurs deviennent continues. Les équations qui représentent le mouvement mécanique sont les suivantes :

$$\begin{cases} C_{em} = P \cdot M \cdot (I_{sq} \cdot I_{rd} - I_{sd} \cdot I_{rq}) \\ C_e - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Sachant que : C_{em} et C_r : le couple électromagnétique et le couple résistant (la charge mécanique).

f et j : Coefficient de frottement et moment d'inertie de l'arbre de rotor.

II.9. Modèle de la MADA lié au système d'axes (d, q)

On représente les équations de la MADA dans le repère biphasé (d q). En multipliant les systèmes des équations par la matrice de Park, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \end{array} \right. \quad (II.31)$$

En multipliant les systèmes des équations (I.6) et (I.7) par la matrice de Park, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_r \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_r \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_s \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_s \end{array} \right. \quad (II.32)$$

Avec :

$i_r = L_r - M_r$: inductance cyclique propre du rotor;

$i_r = L_s - M_s$: inductance cyclique propre du stator;

$M = \frac{3}{2} i_m$: Inductance cyclique mutuelle entre l'armature du stator et l'armature du rotor.

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante

$$C_{em} = P \frac{M}{L} (\varphi_{sd} i_{rq} - \varphi_{sq} i_{rd}) \quad (II.33)$$

II.10. Modélisation de l'alimentation onduleur à MLI

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques qui transforment une source de tension continue en une source de tension alternative variable [Seg 06]. Un onduleur de tension est constitué de trois bras de commutation à transistor ou à thyristor (GTO), chacun étant composé de deux cellules avec une diode et un transistor ou un thyristor. Tous ces éléments sont considérés comme étant des commutateurs idéaux [Seg 06]-[Men07]. La technologie de modulation de largeur d'impulsion (MLI) est utilisée pour contrôler la tension de sortie de l'onduleur, permettant ainsi d'ajuster simultanément la fréquence et la tension de sortie [Men07].

II.10.1. Onduleur à deux niveaux

La MADA est alimentée par un convertisseur de tension à deux niveaux, équipé de dispositifs à semi-conducteurs dont l'ouverture et la fermeture sont contrôlées. Afin de faciliter la modélisation du convertisseur de puissance, les commutateurs à semi-conducteurs sont considérés comme étant parfaits [Ben 13].

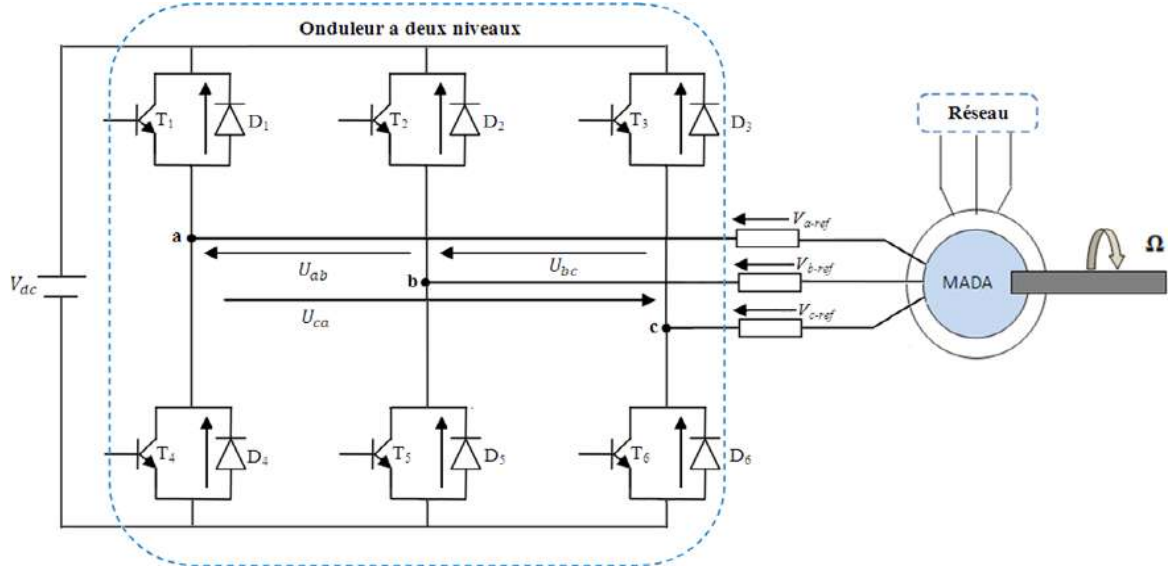


Figure. II.9. Schéma électrique de la liaison de rotor via un onduleur à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a et S_b et S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.

- Branche a

$S_a = 0$ Si T_1 est ouvert et T_4 est fermé.

$S_a = 1$ Si T_1 est fermé et T_4 est ouvert.

- Branche b

$S_b = 0$ Si T_2 est ouvert et T_5 est fermé.

$S_b = 1$ Si T_2 est fermé et T_5 est ouvert.

- Branche c

$S_c = 0$ Si T_3 est ouvert et T_6 est fermé.

$S_c = 1$ Si T_3 est fermé et T_6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = 1/3(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3(U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{a-ref} \\ V_{b-ref} \\ V_{c-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

II.10.2. Stratégie de commande à MLI

La modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale triangulaire consiste à comparer à chaque instant un signal triangulaire Ω_t de fréquence f_p , appelé porteuse, à trois signaux de commande marqués V_a , V_b et V_c . L'interrupteur est commuté lorsqu'une égalité telle que est respectée. [Ben 12]-[Had 09].

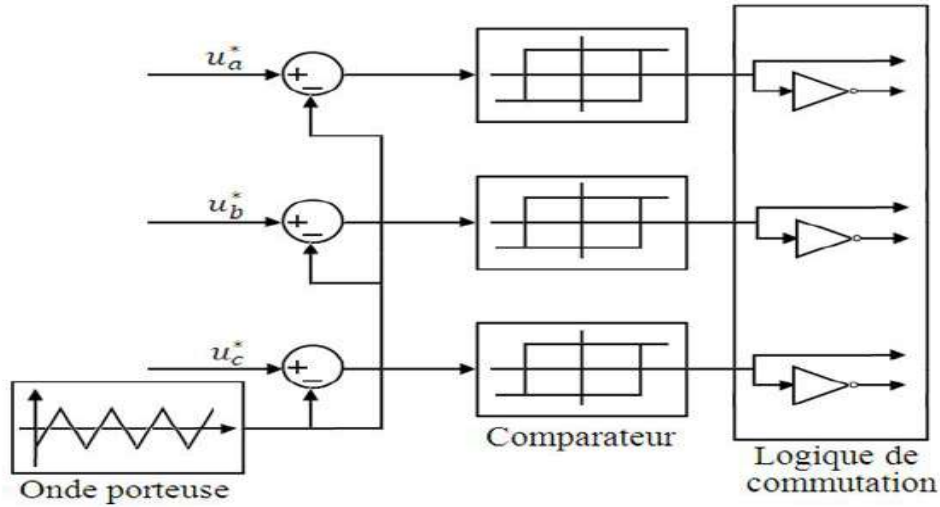


Figure. II.10. Principe de la commande MLI.

$$V_i(t) = \omega(t) \quad (\text{II.37})$$

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.38})$$

- Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (II.39)$$

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous admet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée.

II.10.3. Algorithm de commande

L'algorithme de commande de la stratégie sinus-triangle pour un onduleur à deux niveaux pour un bras k peut être résumé en 2 étapes.

La première étape :

$$\begin{cases} V_{ref} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{ref} \leq -U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (II.40)$$

La deuxième étape :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (II.41)$$

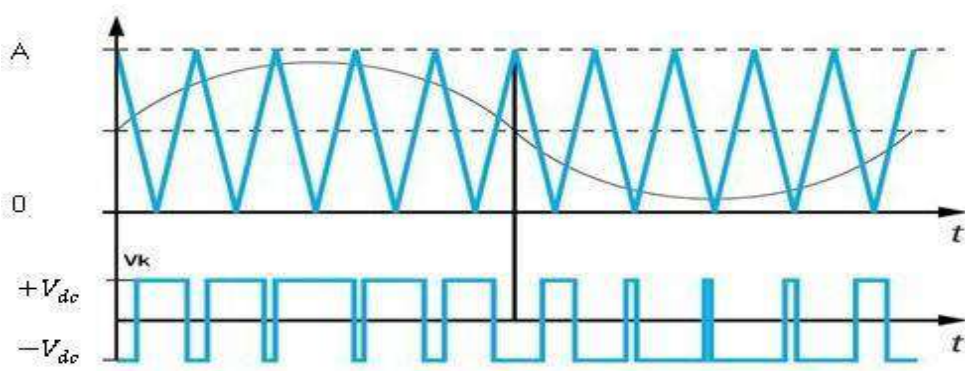


Figure .II.11. Schéma de principe de la commande MLI.

II.11. Simulation de la MADA avec onduleurs à MLI

Cette section présente un modèle de machine asynchrone à double alimentation MADA dans un référentiel de Park lié à un champ tournant. Machine asynchrone dans le référentiel de Park liée au champ tournant. Ce modèle a été développé sous certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter. Ensuite, un système de puissance comprenant un redresseur, un filtre et un onduleur PWM a été modélisé.

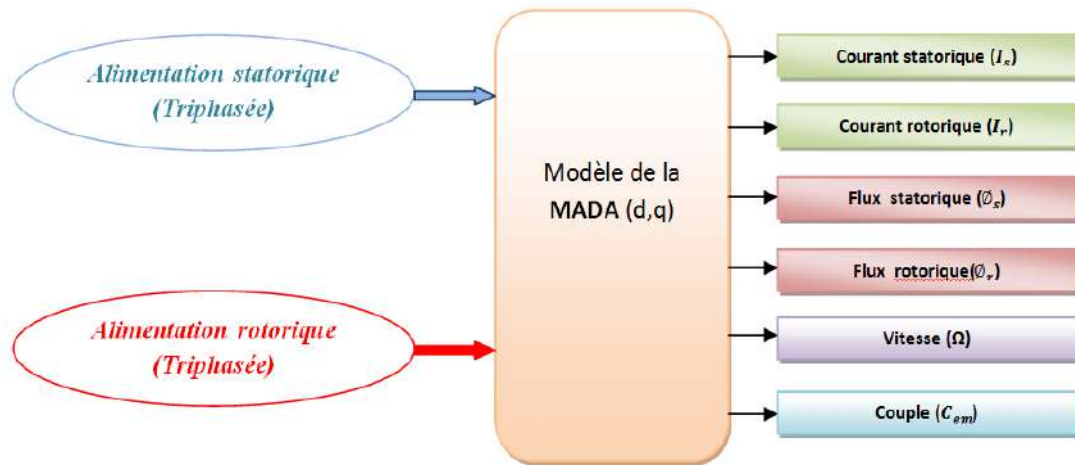


Figure. II.12. Schéma bloc de simulation de la MADA.

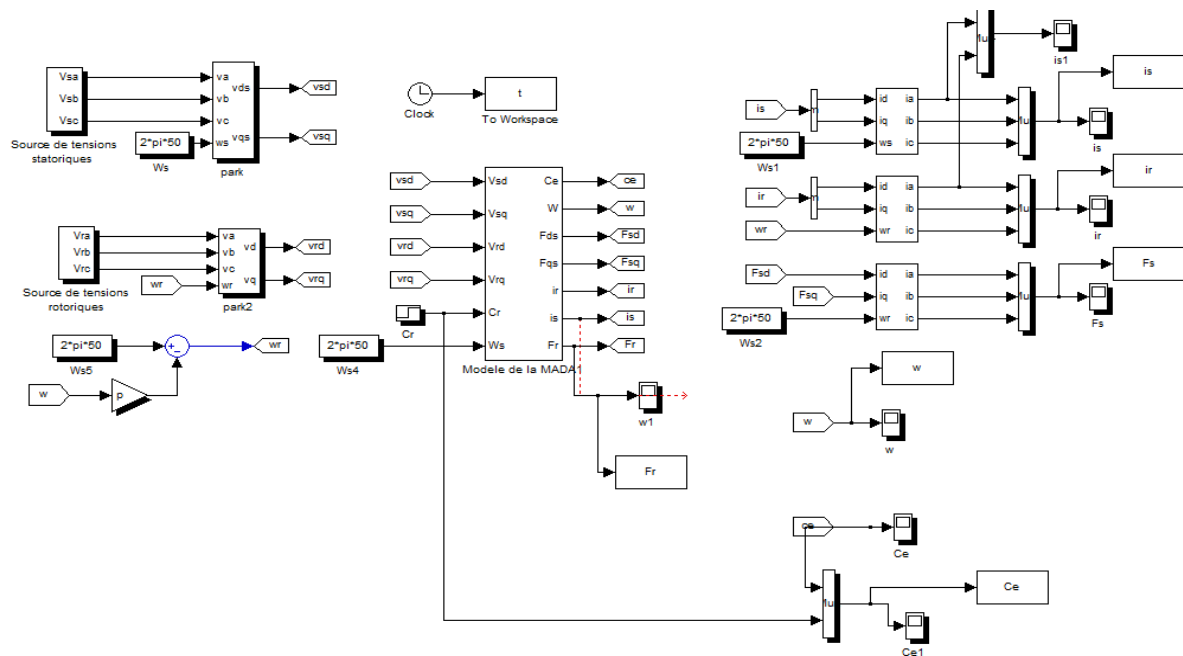


Figure. II.13. Schéma bloc de simulation de la MADA.

II.12. Résulta simulation

La figure (II.14), représente les réponses de simulation de la MADA avec une alimentation statorique à travers un onduleur (220v ,50Hz) et du coté rotorique par alimentation (12v ,10Hz à t=1s), avec une application d'un couple de charge de 5N.m à t= 3sec.

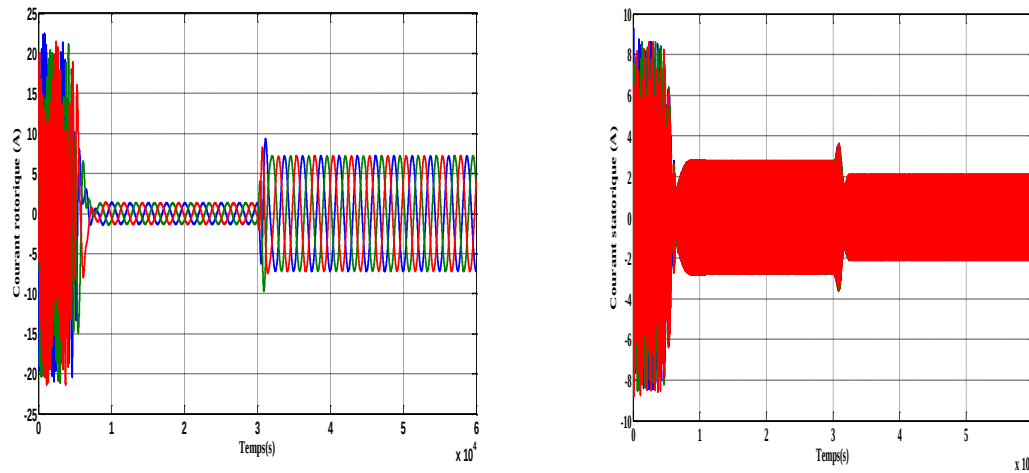


Figure.II.14. courant rotorique et statorique.

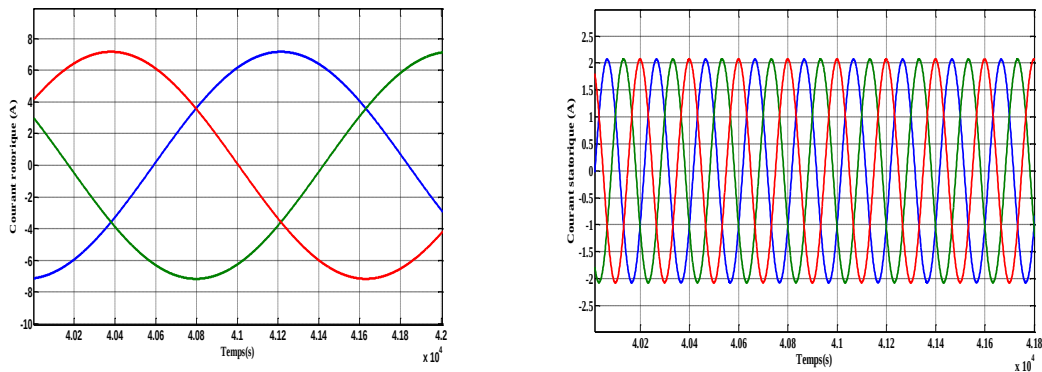


Figure.II.15. le courant rotorique et statorique avec zoom.

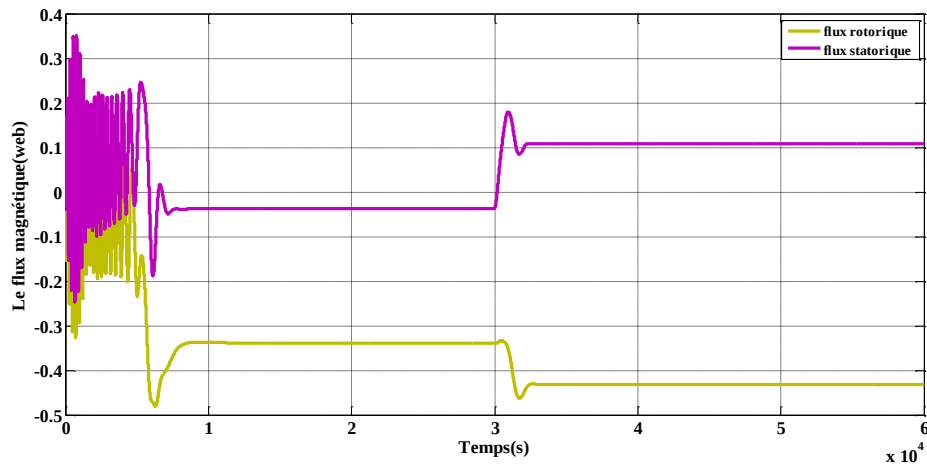


Figure.II.16. le flux(Web).

La figure (II.17.18), représente les réponses de simulation de la MADA avec une alimentation par deux onduleurs , statorique (220V,50Hz) et du coté rotorique ($V_r = 12$ V, $f_r = 10$ Hz, a $t = 1$ s), avec une application d'un couple de charge de 5N.m à $t = 3$ sec.

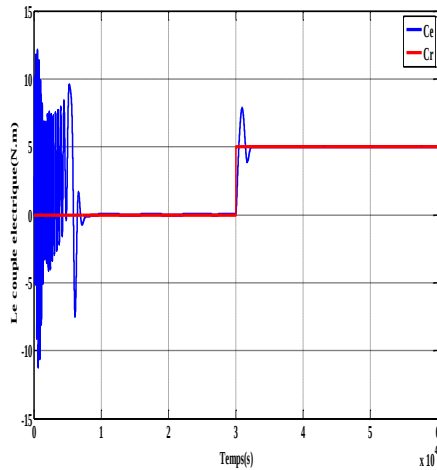


Figure.II.17. le couple électrique.

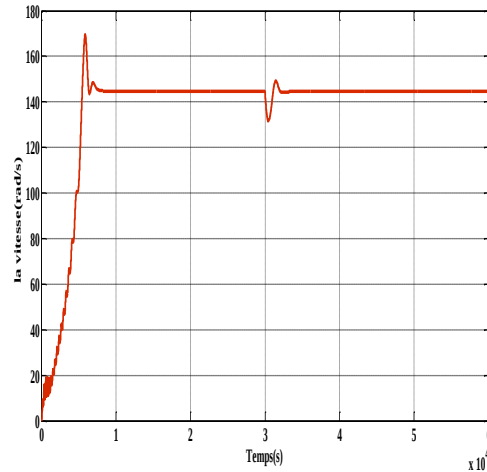


Figure.II.18. la vitesse (rad/s).

Ces résultats montrent que le système réagit plus rapidement que les systèmes sans convertisseurs, sans dépassement de vitesse, mais reste sensible au couple. Le système est sensible au couple de charge du système. L'autre variable est le siège de la pulsation causée par les harmoniques à haute fréquence. L'autre variable est le siège de la pulsation causée par les harmoniques à haute fréquence.

Les machines asynchrones à double alimentation sont donc clairement caractérisées par leur sensibilité au couple de charge en boucle fermée. Dans les machines asynchrones, le problème de la sensibilité à la charge dans la boucle fermée est grave, En d'autres termes, il existe un fort couplage entre le flux et le couple.

II.13. Conclusion

Ce chapitre présente un modèle de machine asynchrone à double alimentation dans un référentiel de Park lié à un champ tournant, valable dans tous les domaines. Ce modèle a été élaboré à partir d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui doivent être respectées. La modélisation a été axée sur l'utilisation du modèle pour le contrôle de la machine. Ensuite, l'onduleur a été modélisé et simulé, avec l'application d'une technologie de contrôle PWM à onde triangulaire. Les résultats de la simulation ont montré que les machines asynchrones à double alimentation sont sensibles aux charges en boucle ouverte.

La modélisation de la MADA et de son système d'alimentation vise à faciliter la mise en œuvre de la commande vectorielle. Par conséquent, les chapitres suivants détailleront le contrôle vectoriel de la MADA, qui permet d'avoir un comportement dynamique similaire à celui des machines à courant continu.

Chapitre III

III.1. Introduction

L'utilisation de techniques de commande sur la machine asynchrone à double alimentation est une solution intéressante pour obtenir de meilleures performances dans les applications de production d'énergie dans une plage de vitesses limitée, et constitue actuellement un domaine de recherche. Dans ce chapitre, nous allons présenter la technique de commande vectorielle appliquée à la GADA. Nous commencerons par une présentation générale de cette technique, puis nous examinerons la robustesse du système étudié vis-à-vis des variations paramétriques de la machine à la fin du chapitre.

III.2. Généralités sur la commande vectorielle

Contrairement aux idées reçues, les prémices de la lutte contre la commande vectorielle remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de Blondel sur la théorie de la réaction à deux axes. Cependant, avec la technologie disponible à l'époque, il était impossible de mettre en pratique cette théorie pour le contrôle des machines électriques [Mek 14].

III.3. La commande vectorielle

Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont désolidarisées et commandées de manière indépendante. L'ensemble des travaux de recherche menés sur ce sujet utilise principalement deux méthodes :

La méthode directe développée par Blaschke et la méthode indirecte développée par Hasse. Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, pouvant être classées selon la source d'énergie.

La commande en tension et la commande en courant. Elles peuvent également être classées en fonction de l'orientation du repère (d-q).

Le flux rotorique, le flux statorique et le flux de l'entrefer. Dans notre étude, nous nous intéressons à une commande vectorielle directe en tension avec une orientation du flux statorique selon le repère (d-q) [Zem 17].

III.4. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle permet aux machines asynchrones de fonctionner de manière similaire aux machines à courant continu, avec un couple électromagnétique proportionnel à deux grandeurs indépendantes (le flux du champ et le courant de l'induit). Pour contrôler les machines asynchrones, il est nécessaire de contrôler le couple, la vitesse ou la position. Cependant, la formule du couple électromagnétique est plus complexe que celle des machines

à courant continu, où il existe un découplage naturel entre le flux magnétique et le couple. La force magnétomotrice de l'induit est plus élevée que celle des machines à courant continu, mais elle est facile à contrôler. Pour obtenir une commande similaire à celle d'une machine à courant continu avec excitation individuelle séparée, I_{sd} est similaire au courant d'excitation I_{sq} , tandis que I_{rd} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, ces deux composantes sont mutuellement désolidarisées. Cette méthode peut être schématisée pour la GADA [Dje 15].

III.5. Procède d'orientation du flux

Plusieurs choix sont possibles, mais nous référençons Vecteur de flux : une variable essentielle pour notre contrôle. Il s'agit donc de déterminer les flux qui Pour orienter le référentiel (d-q) [Bek 20]:

-  Le flux statorique ;
-  Le flux rotorique ;
-  Le flux d'entrefer.

L'orientation de l'axe d le long de la direction du flux du rotor sera la méthode choisie pour notre travail. Il existe trois options pour la direction de l'écoulement le long de l'axe perpendiculaire d du cadre rotatif :

- ✓ Orientation du flux rotorique : $\varphi_{rq} = 0 \Leftrightarrow \varphi_{rd} = \varphi_r$
- ✓ Orientation du flux statorique : $\varphi_{sq} = 0 \Leftrightarrow \varphi_{sd} = \varphi_s$
- ✓ Orientation du flux magnétisant (d'entrefer): $\varphi_{mq} = 0 \Leftrightarrow \varphi_{md} = \varphi_m$

III.6. Types de Commande vectorielle

Le contrôle vectoriel direct régule le flux d'une manière qui nécessite la connaissance du flux, alors que le contrôle vectoriel indirect ne nécessite pas la connaissance du flux.

Dans la commande vectorielle directe, le flux est régulé d'une manière qui nécessite la connaissance du flux, alors que dans la commande vectorielle indirecte, aucune connaissance du flux n'est requise et une certaine approximation est effectuée [Nec 20].

III.6.1. Commande vectorielle directe

Blaschke a proposé cette méthode de contrôle, qui nécessite la connaissance du module et de la phase du flux pour assurer le découplage entre le couple et le flux, indépendamment de la phase transitoire atteinte. Dans ce cas, le flux magnétique est contrôlé par rétroaction et

doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tension et de courant du stator. Pour obtenir des informations sur l'amplitude et la phase du flux magnétique, un capteur tel qu'une sonde à effet Hall peut être utilisé, placé sous les dents du stator (dans le vide de la machine). Cette méthode présente l'avantage d'être moins sensible aux fluctuations paramétriques. Cependant, elle présente l'inconvénient que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas fonctionner dans des conditions sévères telles que des vibrations ou une chaleur excessive [Red 17].

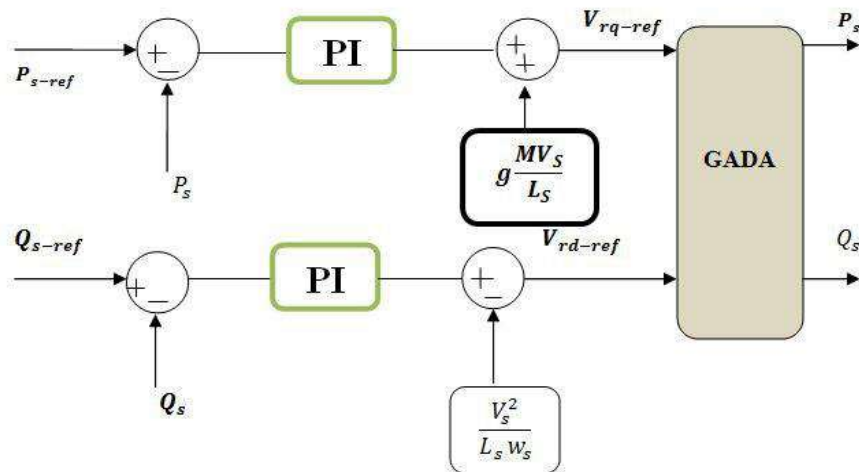


Figure.III.1. Schéma de principe de la commande directe.

III.6.2. Commande vectorielle indirecte

Le principe de cette méthode est de ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude du flux, mais seulement sa position. La méthode consistant à ne mesurer que sa position a été proposée par Hasse. Il s'agit d'estimer la position du vecteur flux et d'ajuster son amplitude en boucle ouverte. La tension ou le courant qui assure la direction du flux La tension ou le courant qui assure la direction du flux et le découplage est évalué à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire.

Grâce au développement des microprocesseurs, cette méthode présente l'avantage d'être très sensible aux variations paramétriques de la machine. Toutefois, elle est très sensible aux changements de paramètres de la machine. Il est important de noter que la méthode indirecte est la méthode la plus simple.

Il est important de souligner que la méthode indirecte est plus facile à mettre en œuvre et plus largement utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'un pays à l'autre.

Il est important de souligner que les méthodes indirectes sont plus simples à mettre en œuvre et plus largement utilisées que les méthodes directes, mais le choix entre les deux méthodes dépend de l'application [Red 20].

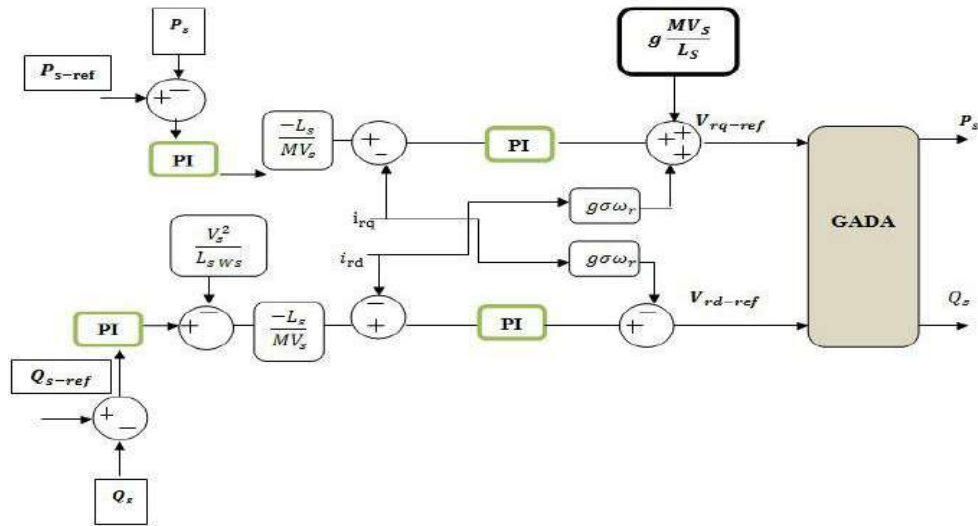


Figure.III.2. Schéma de principe de la commande indirecte.

III.7. Comparaison entre les deux types de commande

III.7.1. Commande vectorielle directe CVD

- Le contrôle vectoriel direct requiert des capteurs de flux, ce qui peut rendre cette méthode un peu coûteuse. Cette méthode consiste à estimer ou mesurer le flux de la machine pour le réguler.
- Le choix de la référence θ_s doit être tel que la machine soit à la limite de la saturation et que le modèle linéaire reste valide. Cette méthode comporte 4 boucles de régulation et nécessite l'estimation de θ_s pour l'utilisation de la transformation de Park.
- Comparée au contrôle indirect, on observe une nette amélioration de l'établissement du couple et, par conséquent, de la dynamique de la vitesse avec le contrôle direct du flux.

III.7.2. Commande vectorielle indirecte CVI

Cette méthode est plus facile à mettre en œuvre et plus simple. Elle consiste à ne pas mesurer le flux de la machine, mais plutôt à supposer qu'il est établi en régime permanent à la valeur désirée. Contrairement à la méthode directe, elle ne nécessite pas de capteurs de flux et ne comporte donc pas de régulation de flux. Elle est plus attrayante et plus couramment utilisée, et peut être utilisée pour le contrôle à basses vitesses. Cette méthode comporte 3 boucles de régulation [Nec 20].

III.8. Application de la commande vectorielle à la GADA

L'application du contrôle vectoriel à la GADA consiste à découpler la génération du couple de la génération du flux. Ainsi, le flux magnétique peut être contrôlé par une composante du courant du stator i_{ds} ou du rotor i_{dr} et le couple par l'autre composante i_{qs} ou i_{qr} .

L'expression du couple électromagnétique d'une machine à courant continu compensée à excitation individuelle en l'absence de saturation est donnée par la formule suivante :

$$C_{em} = (I_f) \quad (III.1)$$

(I_f) : Est le flux imposé par le courant d'excitation (I_f) .

I_a : Est le courant d'induit.

Selon l'équation (III.1), le flux magnétique dépend du courant d'excitation. Cela signifie que si le flux magnétique est constant, le couple est contrôlé uniquement par le courant. Par conséquent, la génération du couple et la génération du flux magnétique sont indépendantes. Cette méthode peut être résumée comme suit :

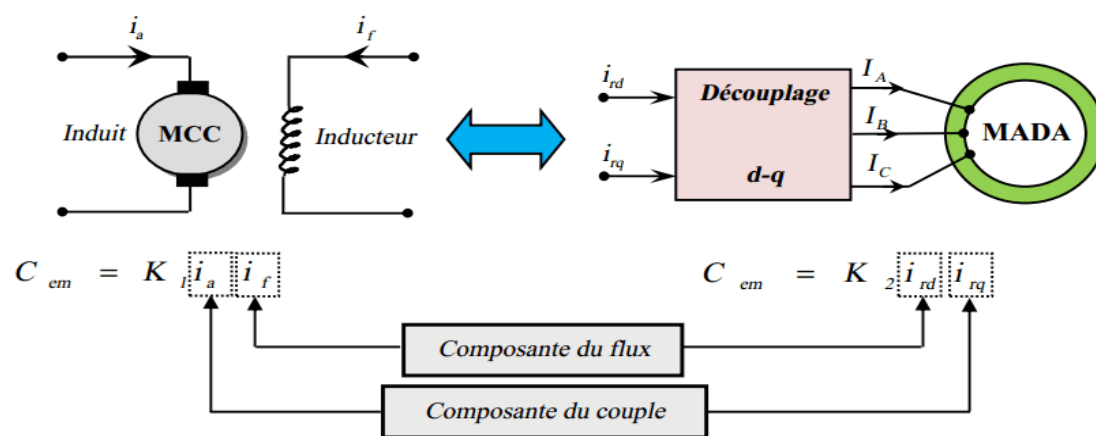


Figure. III.3. Analogie entre la commande vectorielle d'une GADA et MCC.

III.9. Différents repères de référence à la GADA

Le contrôle vectoriel est basé sur la sélection d'un cadre de référence. L'axe de référence peut être présélectionné en fonction de l'un des flux de la machine (flux du stator, flux du rotor ou flux de l'entrefer). Pour orienter le flux statorique, le cadre de référence (d, q) doit être choisi de manière à ce que le flux statorique soit aligné avec l'axe (o, d). Il en résulte une expression de couple impliquant à la fois les composantes du courant du stator et du

rotor, la première produisant le flux magnétique et la seconde le couple. La direction du flux statorique est la suivant :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \quad (III.2)$$

$$C_{em} = \frac{3P}{2} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (III.3)$$

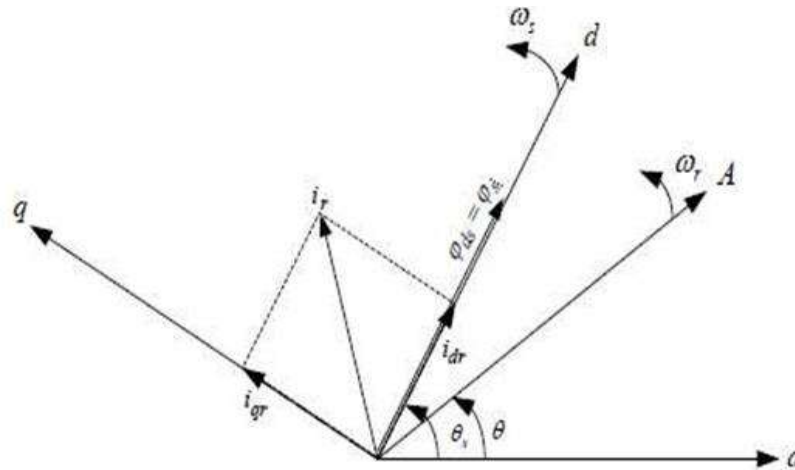


Figure.III.4. Orientation du flux statorique.

A partir de l'équation en fonction du flux statorique et des conditions de direction du flux, le courant statorique peut être exprimé comme suit :

$$i_{ds} = \frac{(\varphi_{ds} - M_{idr})}{L_s} \quad (III.4)$$

$$i_{qs} = \frac{-M_{iqr}}{L_s} \quad (III.5)$$

En remplaçant les deux composantes du courant statorique par l'équation du couple électromagnétique (III.3), on obtient l'équation suivante :

$$C_{em} = \frac{-3PM}{2L_s} \varphi_s i_{qs} \quad (III.6)$$

Selon cette équation, φ_s est constant, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le courant. Le couple d'une GADA peut alors prendre une forme similaire à celle d'une machine à courant continu.

D'autre part, et de la même manière, on peut orienter le flux rotorique suivant l'axe (od) de Park. Dans ce cas, le flux φ_r est aligné avec φ_{dr} . Alors, on aura :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \quad (III.7)$$

Donc l'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{-3PM}{2L_r} \varphi_r i_{qr} \quad (III.8)$$

On peut représenter ce type d'orientation par la figure (III.5)

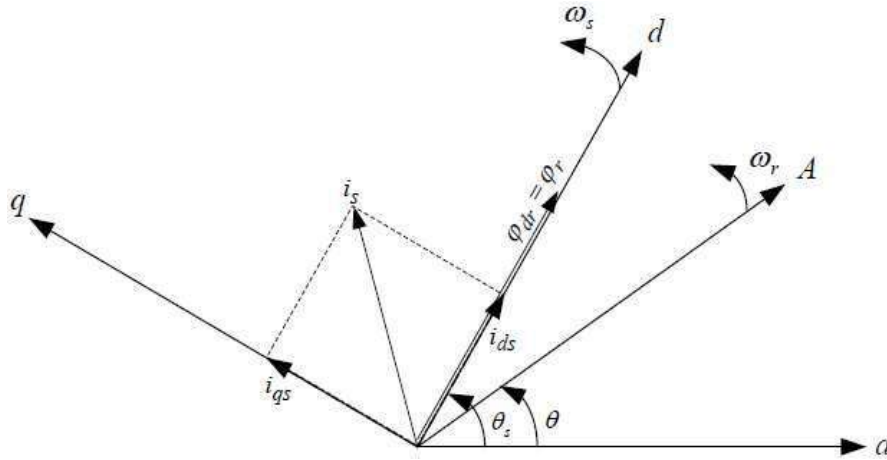


Figure. III.5. Orientation du flux rotorique.

Dans le figure (III.5) le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle indirecte de la GADA en orientant l'axe (od) du repère de Park suivant le flux statorique.

III.10. Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique

Afin de permettre un contrôle aisé de la quantité d'énergie générée, il convient de considérer les éléments suivants les puissances active et réactive peuvent être contrôlées indépendamment en établissant une équation qui relie les valeurs de la tension et du courant du rotor générés par l'onduleur à la puissance active et réactive du stator. Les valeurs de tension et de courant du rotor générées par l'onduleur à la puissance active et réactive du stator. Puissance réactive. La tension du stator et la direction du flux sont illustrées à la Figure II.5. Dans ce travail, l'orientation du flux statorique le long de l'axe d du cadre de référence biphasé est choisie (d, q) par rapport au champ de rotation.

On a donc:

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ \& } \varphi_{qs} = 0 \quad (III.9)$$

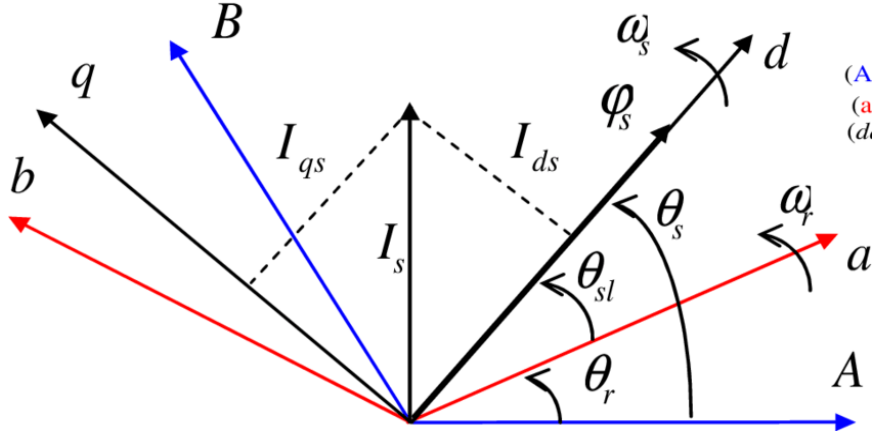


Figure.II.6. Orientation de la tension et de flux statorique.

A partir de l'équation du flux statorique, selon les conditions d'orientation du flux
Le courant statorique est exprimé comme suit :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{(\varphi_{sd} - M i_{rd})}{L_s} \\ i_{sq} = \frac{-M i_{rq}}{L_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

Par conséquent, dans ce cadre, compte tenu des hypothèses, la puissance active et la puissance réactive sont les suivantes

Les puissances active et réactive sont :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \end{cases} \quad (III.11)$$

Selon la condition de direction du flux statorique, la relation entre la puissance active et la puissance réactive peut être écrite comme suit

Où la puissance active et la puissance réactive sont les suivantes :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} \end{cases} \quad (III.12)$$

En remplaçant le courant statorique par la valeur de l'équation (II.3), φ_s dans l'équation (II.3), on obtient les équations suivantes pour la puissance active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s \varphi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{rd} \end{cases} \quad (III.13)$$

En approximant φ_s par $\frac{V_s}{\omega_s}$ l'expression de la puissance réactive Q_s devient alors :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{rd} \quad (III.14)$$

L'arrangement des équations donne les expressions des tensions rotoriques selon les courants rotoriques suivante:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{rd}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \frac{di_{rq}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + g\omega_s \frac{M\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - g\omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + g\omega_s \sigma L_r i_{rd} + g\omega_s \frac{M\varphi_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

Où :

$$g\omega_s = (\omega_s - \omega) : \text{Coefficient de glissement.} \quad (\text{III.17})$$

$$\sigma = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) : \text{Coefficient de dispersion.} \quad (\text{III.18})$$

V_{dr} et V_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courant rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$ est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme $g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de trainage. Le contrôle de la synthèse devra donc prendre en compte cette erreur. Les équations (III.13 et III.15) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure III.7.

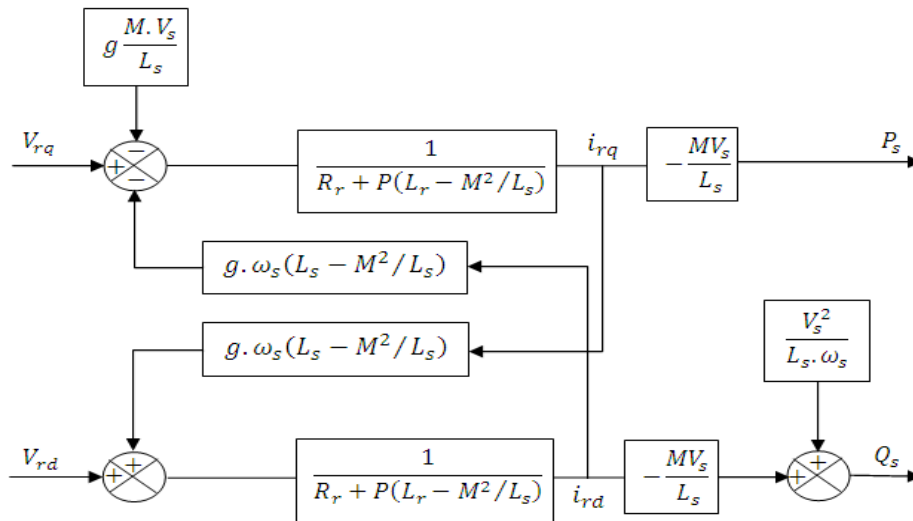


Figure. III.7. Schéma bloc du modèle simplifié de la GADA.

III.11. Structure de la commande vectorielle directe à la GADA

Le schéma de principe de la commande vectorielle directe (CVD) à flux statorique orienté sur l'axe d'est montré par la figure ci-dessous :

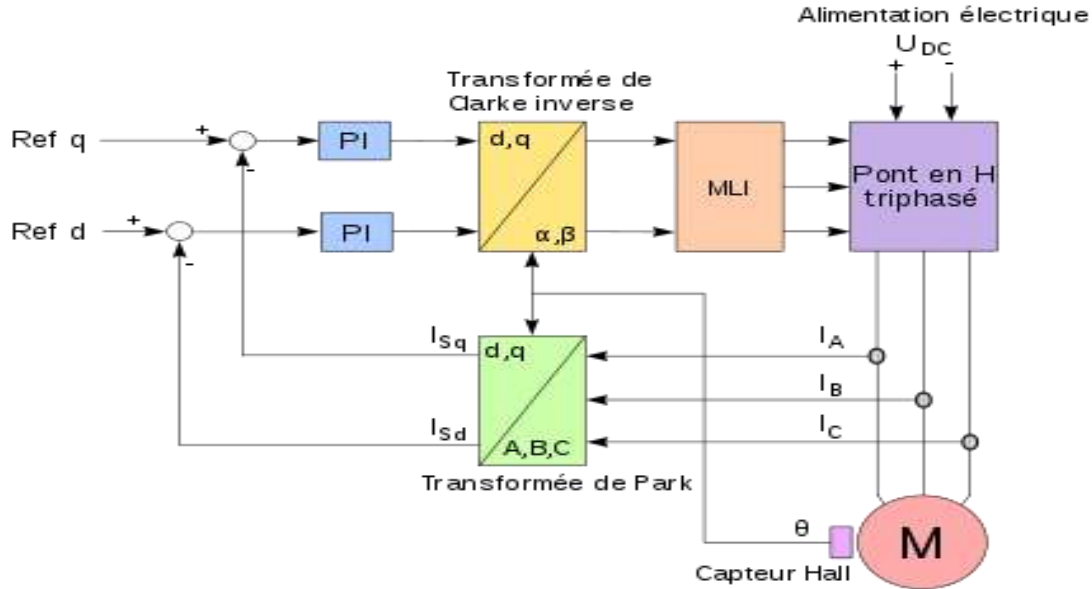


Figure. III.8. La commande vectorielle directe à flux statorique orienté du GADA.

III.12. Dé fluxage

Rappelons que le couple électromagnétique de la GADA est exprimé en fonction du flux et du courant du rotor :

$$C_e = \frac{PM}{L_s} (\varphi_{sq} i_{rd} - \varphi_{sd} i_{rq}) \quad (III.19)$$

Et selon la condition d'orientation du flux statorique ($\varphi_{ds} = \varphi_s$ & $\varphi_{qs} = 0$) cette expression du couple devient :

$$C_e = \frac{PM}{L_s} \varphi_s I_{rq} \quad (III.20)$$

$$P_e = C_e \cdot \Omega \quad (III.21)$$

La machine fonctionne normalement jusqu'aux valeurs nominales (vitesse, puissance et couple). Si la machine fonctionne à une vitesse supérieure à la vitesse nominale, la puissance nominale est dépassée et la machine est surchargée. Par conséquent, pour assurer un fonctionnement à puissance constante (nominale), le flux de la machine doit être réduit au fur et à mesure que la vitesse augmente au-dessus de la valeur nominale. Cette opération est appelée dé fluxage. Dans ces conditions, la machine peut fonctionner à une vitesse supérieure à la vitesse nominale, tandis que la force de la machine reste constante et égale à la valeur

nominale. Ainsi, les surcharges et les surchauffes de la machine peuvent être évitées. À cette fin, le flux de référence défini dans est imposé [Beb 20].

III.13. Estimation du flux statorique

Une connaissance précise de l'amplitude et de la position du vecteur flux statorique est nécessaire pour le contrôle direct du vecteur flux statorique dans la GADA dans le mode moteur de la GADA, le courant statorique et le courant rotorique sont mesurables et le flux statorique peut être estimé (calculé). L'estimation du flux magnétique est la suivante.

Être obtenu par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \sigma L_{rd} + \frac{M}{L_s} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rq} = \sigma L_{rq} + \frac{M}{L_s} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

La position du flux statorique est calculée par les équations suivantes :

$$\theta_r = \theta_s - \theta \quad (\text{III.24})$$

Tel que :

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (\text{III.25})$$

$$\theta = \int \omega dt \quad (\text{III.26})$$

$$\omega = P\Omega \quad (\text{III.27})$$

Où :

θ_s : Est la position électrique de stator.

θ : Est la position électrique de rotor [Bek 10].

III.14. Dimensionnement des régulateurs

III.14.1. Calcul des régulateurs des courants rotoriques, de flux statorique et de vitesse

Afin de s'assurer que le courant réel suit le courant de consigne, un régulateur de courant agissant sur la tension de commande est essentiel (comme dans le cas de l'alimentation en tension). L'utilisation d'un régulateur a pour but d'accroître la robustesse face aux perturbations internes et externes. Le régulateur utilisé dans cette étude est de type PI (Proportionnel Intégral) [Bek 10].

III.14.2. Régulation du courant rotorique directe

La boucle de régulation de courant I_{rd} peut se présenter par le schéma bloc

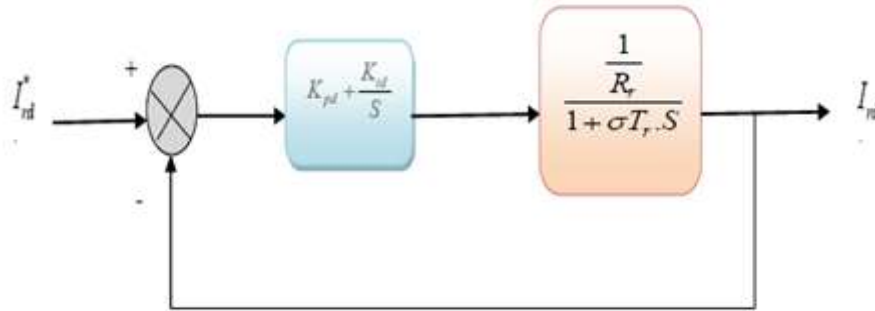


Figure. III.9. Schéma de régulation de courant I_{rd} .

$$V_{rd} = V_{rd} + E_d - \frac{M}{l_s} V_{sd} = R_r V_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} = R_r (1 + \sigma T_r s) i_{rd} \quad (\text{III.28})$$

$$\frac{i_{rd}}{V_{rdi}} = \frac{\frac{1}{R_r}}{1 + \sigma T_r s} \quad (\text{III.29})$$

Soit un régulateur PI de fonction de transfert

$$PI(s) = K_c + \frac{K_{id}}{s} \quad (\text{III.30})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure III.6 sera

$$FTBO(s) I_{nd} = \frac{k_{id}}{R_r} \left(\frac{K_{pd}}{K_{id}} \cdot s + 1 \right) \frac{1}{1 + \sigma T_r s} \quad (\text{III.31})$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_{pd}}{K_{id}} = \sigma T_r \quad (\text{III.32})$$

Alors la fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit comme suit :

$$FTBO(s) I_{rd} = \frac{k_{id}}{R_r \cdot s} \quad (\text{III.33})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est la forme :

$$G(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (\text{III.33})$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) sera :

$$FTBF(s) I_{nd} = \frac{1}{1 + \frac{R_r}{K_{id}} s} \quad (\text{III.34})$$

Par analogie de l'expression on trouve :

$$\tau = \frac{R_r}{K_{id}} \quad (III.35)$$

On a :

$$\begin{cases} K_{id} = \frac{R_r}{\tau} \\ K_{pd} = K_{id} \sigma T_r = \frac{\sigma L_r}{\tau} \end{cases} \quad (III.36)$$

La constante du temps électrique du système dans notre cas est $r_e = \sigma T_r = 0.0191s$, nous avons choisi $r = 0.001s$, pour avoir une dynamique du processus plus rapide [Ben 21].

III.14.3. Régulation du courant rotorique quadrature

La fonction de transfert du courant rotorique quadrature est obtenue à partir de l'équation(III.19) et par l'annulation de E_q .

$$V_{rq1} = V_{rq} + E_q - \frac{M}{L_s} V_{sq} = (R_r + \frac{M^2}{L_s T_s}) I_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} = K_q \left(1 + \sigma \frac{L_r}{K_q} s \right) I_{rq} \quad (III.37)$$

Où :

$$K_q = R_r + \frac{M^2}{L_s T_s} \quad (III.38)$$

Donc :

$$\frac{I_{rq}}{V_{rq1}} = \frac{\frac{1}{K_q}}{1 + \sigma \frac{L_r}{K_q} s} \quad (III.39)$$

La boucle de régulation de courant i_{qr} peut se présenter par le schéma bloc de la figure III.10

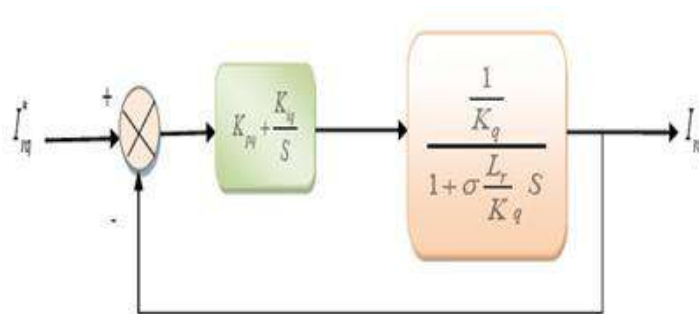


Figure. III.10. Schéma de régulation du courant I_{qr} .

Pour déterminer les deux coefficients K_{pq} et K_{iq} sera procédé de la même façon que pour le courant I_{rd} .

Alors, nous trouvons :

$$\begin{cases} k_{iq} = \frac{K_q}{\tau} = \frac{(R_r + \frac{M^2}{L_s T_s})}{\tau} \\ k_{Pq} = k_{iq} \frac{\sigma L_r}{K_q} = \frac{\sigma L_r}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

La constante du temps électrique du système dans notre cas est $\tau_e = \sigma \frac{L_r}{K_q} = 0.0086s$ pour avoir une dynamique du processus plus rapide, nous avons choisi le même τ que pour le courant I_{rd} , ($\tau = 0.001s$) [Ben 21].

III.14.4. Régulateur du flux statorique

Nous avons $V_{sd} = 0$:

$$\frac{\phi_{rd}}{I_{rd}} = \frac{M}{1 + T_s s} \quad (\text{III.41})$$

Le schéma de la boucle de régulation de flux est donné par la Figure III.11.

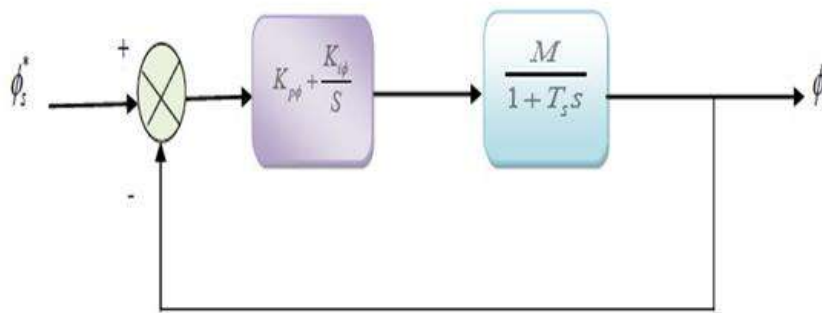


Figure.III.11. Schéma de régulation du flux statorique.

La compensation des pôles donne :

$$T_s = \frac{K_{p\phi}}{K_{i\phi}} \quad (\text{III.42})$$

La fonction de transfert du système en boucle fermée est donnée par :

$$FTBF(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{MK_{i\phi}}} \quad (\text{III.43})$$

En comparant cette expression avec l'expression (III.34) caractéristique du premier ordre, on trouve que :

$$\begin{cases} k_{i\phi} = \frac{1}{M\tau} \\ k_{P\phi} = k_{i\phi} T_s = \frac{T_s}{M\tau} \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

III.14.5. Régulation de la vitesse

D'après l'équation mécanique de la GADA nous avons :

$$W(s) = \frac{1}{Js+f} \quad (\text{III.45})$$

La littérature propose plusieurs façon pour contrôler la vitesse de rotation du moteur, on a choisipour notre étude d'utiliser deux types de régulateurs PI [Ben 21].

III.15. Régulation par un régulateur PI

Les contrôleurs de vitesse sont utilisés pour déterminer un couple de référence afin de maintenir la vitesse à une valeur de référence. Un contrôleur PI conventionnel peut être utilisé à cette fin.

Par conséquent, cette structure de contrôle de la vitesse consiste en une machine asynchrone alimentant le rotor avec un onduleur de tension ; le contrôleur PI ne fonctionne pas très bien lorsque la consigne de vitesse varie de manière significative (dépassements importants dans la réponse de la vitesse).

Les régulateurs PI sont rapides et faciles à utiliser. Ils se caractérisent par deux coefficients, l'un pour la proportionnalité et l'autre pour l'intégration. Le contrôle de la vitesse en boucle fermée est donc [Ben 21].

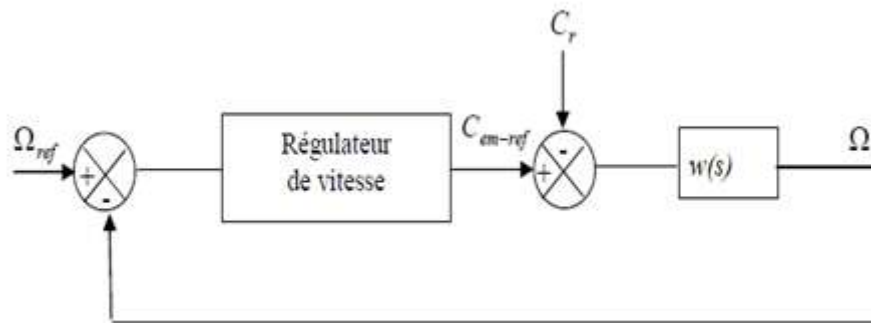


Figure. III.12. Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit :

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega^*(s)} = \frac{K_i + K_p s}{K_i + (F + K_p s) + Js^2} \quad (\text{III.46})$$

Par imposition des pôles en boucle fermée, nous obtenons le paramètre du correcteur devitesse :

$$\begin{cases} K_p = \frac{2\varepsilon}{\omega_n} - f \\ K_i = \frac{J}{\omega_n^2} \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

On prend $\varepsilon = 0.9682$ et $\omega_n = 23.493\text{rad/s}$, ce qui donne :

$$\begin{cases} K_{p\Omega} = 0.22 \\ K_{i\Omega} = 2.43 \end{cases} \quad (\text{III.48})$$

II.16. Simulation et interprétation des Résultats

Dans cette partie, ont été obtenus les résultats de simulation sous environnement MATLAB/SIMULINK, la commande indirecte avec boucles des puissances où la GADA utilise

La figure II.20 montre que Spectre d'harmonique des courants de phase statorique et phase rotorique.

Le profil du vent appliqué est donné dans la figure ci-dessous. D'après les résultats obtenus pour cette application, on distingue les remarques suivantes :

Le coefficient de puissance C_p figure II.15 ne changent pas beaucoup des valeurs, ils restent pratiquement égaux à leurs valeurs de références optimales 0.5 successivement.

La puissance active et réactive statorique figure II.16 suit sa référence optimale et possède la même allure que le profil du vent appliqué, cette allure est conforme aussi à celle du couple éolien du côté de la GADA.

La figure (III.17 et III.18) montre que les courants obtenus au stator et au rotor sont des formes sinusoïdales, La figure III.19 montre que Spectre d'harmonique des courants de phase statorique et phase rotorique.

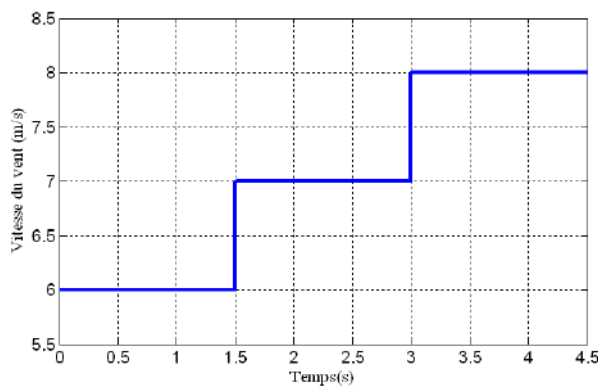


Figure. III.13. Profil du vent appliqué.

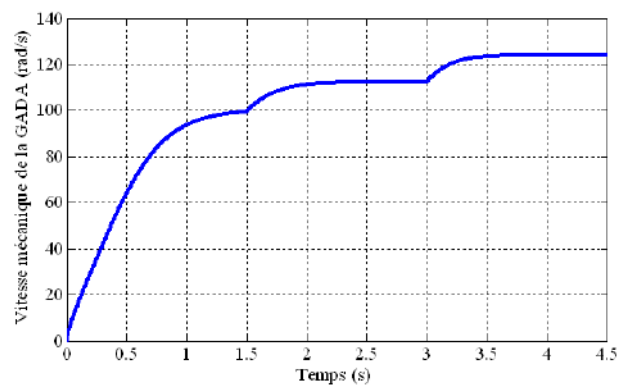


Figure. III.14. Vitesse mécanique.

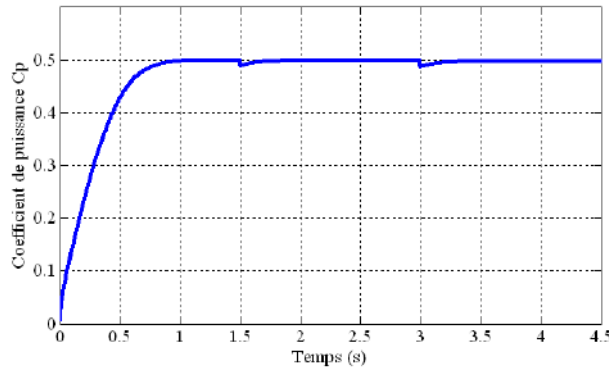


Figure. III.15. Variation de coefficient de puissance.

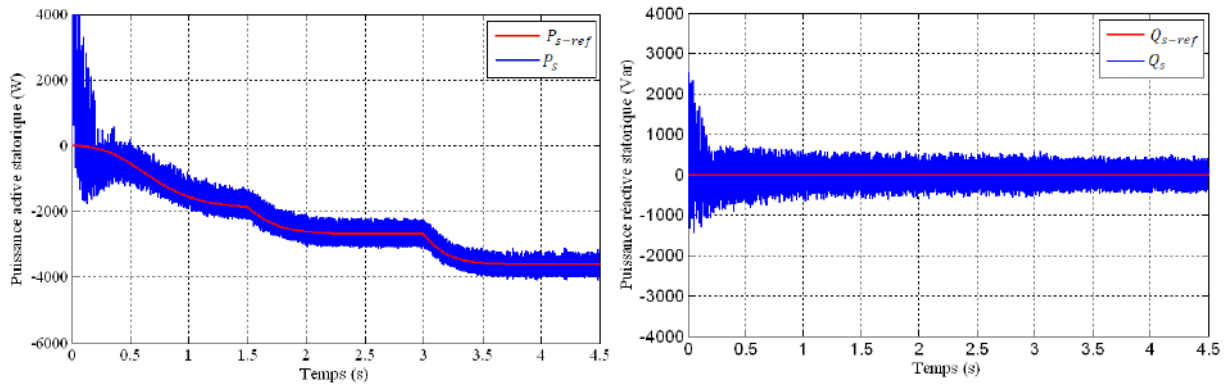


Figure. III.16. La puissance active et réactive statorique.

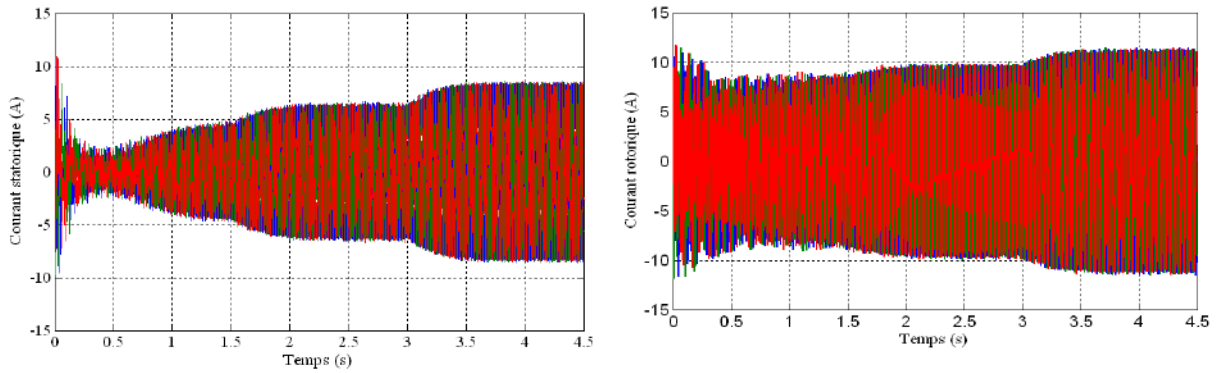


Figure. III.17. Les courants statoriques et rotoriques triphasés.

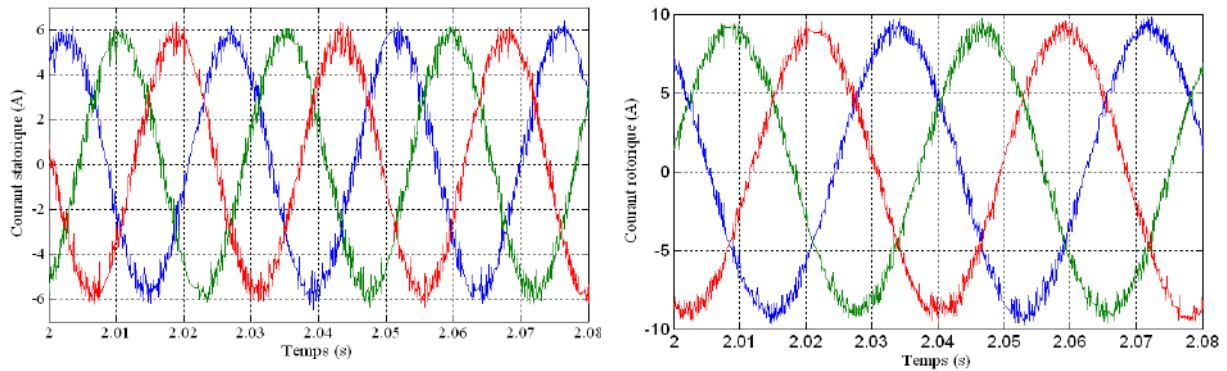


Figure. III.18. Les courants statorique et rotorique avec zoom.

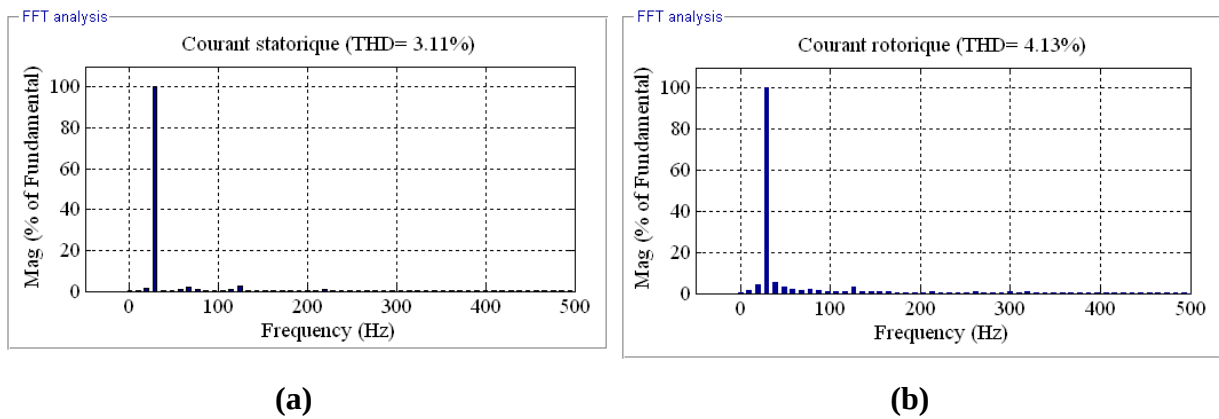


Figure. III.19. Spectre d'harmonique des courants : (a) phase statorique, (b) phase rotorique.

III.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter la modélisation de GADA et son alimentation. Ensuite, nous abordons une discussion théorique sur le contrôle vectoriel.

Il existe trois types de directions de flux magnétique : le flux du rotor, le flux du stator et le flux magnétisant. L'orientation du flux statorique a été choisie pour permettre un découplage complet entre le flux et le couple électromagnétique.

Cela simplifie non seulement le modèle de la machine, mais permet également de découpler le contrôle du couple du contrôle du flux. Cela garantit que la forme du couple du moteur GADA est proche de celle de la machine à courant continu MCC.

Chapitre IV

IV.1. Introduction

La commande directe du couple est basée sur la régulation directe du couple en appuyant divers vecteurs de tension à un onduleur. Les variables contrôlées sont le flux du rotor et le couple électromagnétique contrôlés par un contrôleur à hystérésis.

La DTC ou (Direct Torque Control) est une régulation du couple de la machine asynchrone double alimentation, par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur, qui détermine son état. Les variables commandées sont le flux statorique et le couple électromagnétique, elles sont habituellement contrôlées par des régulateurs à hystérésis et sont maintenues à l'intérieur de leurs bandes d'hystérésis. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur de tension de l'onduleur optimal à appliquer à chaque instant de commutation. Dans ce chapitre, nous décrirons en détail cette technique de contrôle.

IV.2. Généralité sur commande directe du couple DTC "Classique"

La commande directe du couple (en anglais, Direct Torque Control DTC) de machine asynchrone est une manière de plus en plus utilisée pour contrôler les ensembles tension-onduleur, basée sur une alimentation modulée en largeur d'impulsion (MLI) et basée sur le flux magnétique et le couple moteur. Dans les références associées au stator, les valeurs instantanées du flux statorique et du couple électromagnétique sont évaluées à partir des grandeurs statoriques. En utilisant des comparateurs à hystérésis, le flux et le couple sont contrôlés directement et séparément avec une sélection appropriée de la vectrice tension imposée par l'onduleur [Sal 15].

IV.3. Caractéristiques générales du contrôle direct du couple

- ✓ La commande directe du couple et du flux, est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur;
- ✓ L'obtention des flux et des courants rotoriques proches de formes sinusoïdales;
- ✓ La commande indirecte des intensités et tensions de la machine;
- ✓ Une réponse dynamique de la machine très rapide. - L'existence des oscillations du couple qui dépend, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis;
- ✓ Le flux rotorique et le couple électromagnétique est les variables de contrôle de la DTC;
- ✓ La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes à hystérésis;
- ✓ La commande par DTC basée sur les régulateurs à hystérésis et table de commutation;

Chapitre IV **Commande Directe du Couple (DTC) de la GADA**

- ✓ La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide;
- ✓ L'existence des oscillations du couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.

IV.4. Principe de la commande DTC

La méthode de contrôle direct du couple DTC consiste à contrôler directement la fermeture et l'ouverture de l'interrupteur de l'onduleur en fonction du changement de la valeur du flux du stator du moteur et du couple électromagnétique.

Le contrôleur hystérétique généralement contrôlé Les variables de contrôle sont (flux stator et couple électromagnétique). Le problème est de maintenir ces deux grandeurs immédiates dans une plage autour de la valeur souhaitée. Le vecteur tension onduleur optimal est déterminé par la sortie de ces régulateurs à appliquer à chaque instant de commutation [Idj 05]

Le contrôle direct du couple des moteurs à induction est basé sur la détermination directe de la séquence de contrôle appliquée aux commutateurs du convertisseur de puissance statique pour appliquer les niveaux de couple et de flux souhaités. Par conséquent, la séquence de commande de commutation provient directement des régulateurs de flux et de couple, généralement des régulateurs à hystérésis. Par conséquent, ce caractère de méthode est classifié dans la classification du contrôle d'amplitude, plutôt que des lois de commande de durée basées sur l'adaptation de la valeur moyenne de la tension par modulation de largeur d'impulsion [Abd 07]

IV.5. Structure du système de contrôle directe de couple à la GADA

Le contrôle de la DTC est une commande d'échantillonnage que la période d'échantillonnage T_e est très petite vis-à-vis la constante de temps de la machine.

Le vecteur V_c est distingué à chaque période d'échantillonnage T_e et, de plus, l'amplitude du courant stator est filtrée pour limiter le bruit sur le signal de flux compté et l'effet d'échantillonnage.

L'un des éléments essentiels de cette composition est la table de commutation, qui admet de choisir de définir le vecteur V_r sans recourir à la position du rotor qui nécessite normalement un capteur de vitesse. C_e dernier associé à un comparateur Hystérésis, tableau de commutation pour les générateurs PWM représentant des structures alternatives. Contrôle classique de l'onduleur de tension PWM. De plus, en usant ce catégorie de contrôle, les besoins de régulateur de courant, de régulateur de flux P_I et de couple sont éliminées, améliorant ainsi les avantages dynamiques du

Les largeurs de la bande d'hystérésis ont un effet sur la pousse du redresseur en particulier, sur la distorsion du courant harmonique, et sur la fréquence norme de commutation. Le régulateur à hystérésis à deux niveaux pour le flux rotorique peut être décrit :

$$\Delta\varphi_r > H_{\varphi_r} \Rightarrow 1$$

$$-H_{\varphi_r} \leq \Delta\varphi_r \leq H_{\varphi_r} \text{ et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} > 0 \Rightarrow d_{\varphi_r} = 0$$

$$-H_{\varphi_r} \leq \Delta\varphi_r \leq H_{\varphi_r} \text{ et } \frac{d\Delta\varphi_r}{dt} < 0 \Rightarrow d_{\varphi_r} = 1$$

$$\Delta\varphi_r < -H_{\varphi_r} \Rightarrow d_{\varphi_r} = 0$$

Le identique principe de un régulateur hystérésis du flux. Le schéma du principe de la figure (III.3) donne un correcteur à hystérésis à deux niveaux pour terminer le réglage du couple. Où le couple examiné la valeur évaluée par la valeur de référence. Et d'autre part conduire le couple vers leurs valeurs de référence de façon parfaite avec une réponse rapide de couple [Tou 08]. L'influencé par l'erreur $\Delta C_{em} = C_{em}^* - C_{em}$ pour le couple électromagnétique.

Inversement au flux, le couple électromagnétique peut être positif ou négatif. Deux solutions peuvent alors être envisagées :

- Un correcteur à hystérésis à deux niveaux.
- Un correcteur à hystérésis à trois niveaux.

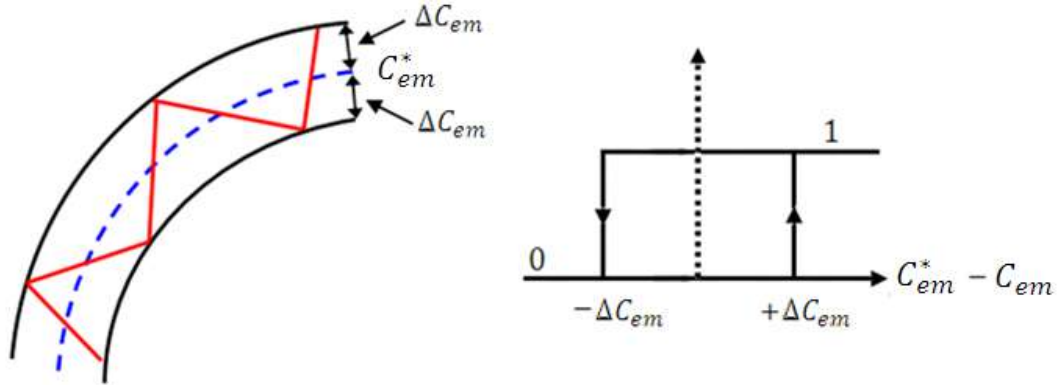


Figure. IV.3. Contrôle du couple à l'aide d'un comparateur à hystérésis à deux niveaux.

Le régulateur à hystérésis à deux niveaux du couple électromagnétique peut être décrit comme suit :

$$\Delta C_{em} > H_{C_{em}} \Rightarrow 1$$

$$-H_{C_{em}} \leq \Delta C_{em} \leq H_{C_{em}} \text{ et } \frac{d\Delta C_{em}}{dt} > 0 \Rightarrow d_{C_{em}} = 0$$

$$-H_{C_{em}} \leq \Delta C_{em} \leq H_{T_{em}} \text{ et } \frac{d\Delta C_{em}}{dt} < 0 \Rightarrow d_{C_{em}} = 1$$

$$\Delta C_{em} < -H_{C_{em}} \Rightarrow d_{C_{em}} = 0$$

Une fois les valeurs de $\Delta\varphi_r$ et ΔC_{em} sont obtenues et sachant le secteur où se trouve le vecteur de la tension, alors le choix du mode de commutation optimal est donné par le tableau de commutation (IV.1):

IV.5.1. Elaboration de la table de commutation

Le contrôle par DTC est sélectionné par les vecteurs de tension appropriés, basé sur le régulateur hystérésis peuvent être sélectionnés pour une combinaison donnée du flux et du couple [Bak 14]-[Idj 10], et le choix du vecteur de tension à appliquer dépend du signe de l'erreur entre les valeurs de référence et sa valeur estimée.

La table de commutation de la structure de contrôle a été développée en utilisant une technique relativement simple. Elle consiste à sélectionner le vecteur tension approprié à chaque instant d'échantillonnage en fonction de l'état des comparateurs de flux rotorique le couple, le secteur où se trouve le vecteur flux rotorique φ_r dans le plan (α, β) , et selon la position δ du vecteurs de flux rotorique [Dje 15]-[Ben 13]. Afin de pouvoir maintenir le module du flux rotorique et le couple électromagnétique à l'intérieur des bandes de tolérance définies que peut être contrôlé, on utilise la table logique de commutation optimale. Le partage du plan complexe en six secteurs angulaires peut être déterminé, pour chaque secteur donné [Dje 15]-[Idj 10].

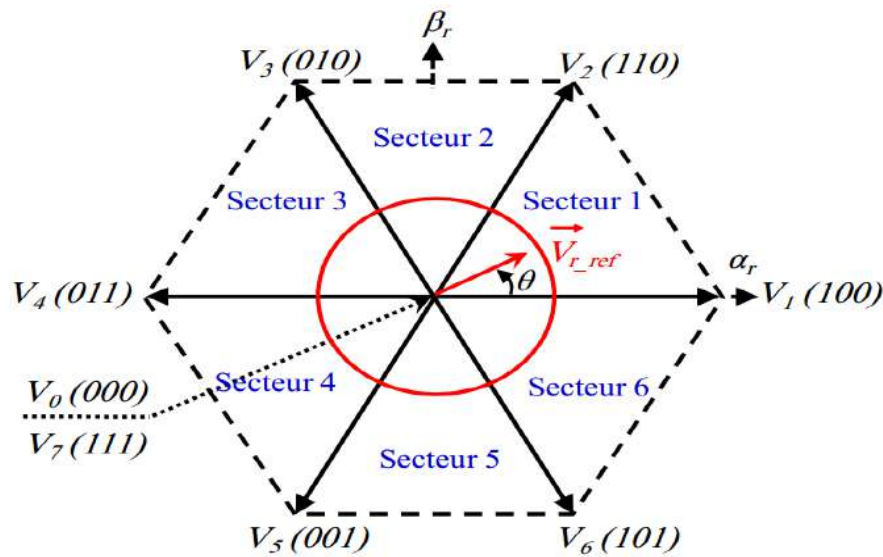


Figure. IV.4. Représentation des vecteurs de tension.

L'objectif est le choix de l'état de l'onduleur est réalisé dans une table de commutation construite en fonction de l'état des variables (φ_r) et (C_{em}) et de la zone du secteur de flux rotorique. En choisissant le vecteur de tension à tout intervalle d'échantillonnage a pour but maintenir le flux et le couple dans les limites des deux bandes à hystérésis [Ham 13]-[Chi 13]. La table de commutation définie par I. TAKAHASHI [Tak 89]-[Ham 13] et donnée par le tableau suivant:

N		1	2	3	4	5	6	Comparateur
$C_{flx}=1$	$C_{cpl}=1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	$\left. \begin{array}{l} \text{2 niveaux} \\ \text{2 niveaux} \end{array} \right\} 3 \text{ niveaux}$
	$C_{cpl}=0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	
	$C_{cpl}=-1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	
$C_{flx}=0$	$C_{cpl}=1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	$\left. \begin{array}{l} \text{2 niveaux} \\ \text{2 niveaux} \end{array} \right\} 3 \text{ niveaux}$
	$C_{cpl}=0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	
	$C_{cpl}=-1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	

Tableau. IV.1. Table de commutation de la commande directe du couple.

En sélectionnant l'un des vecteurs nuls, la rotation du flux statorique est arrêté et entraîne ainsi une décroissance du couple. Nous choisissons V_0 ou V_7 de manière à minimiser le nombre de commutation d'un même interrupteur de l'onduleur [Llo 04].

IV.5.2. Estimation du flux rotorique

A partir des mesures des courants et tensions de la machine (grandeurs rotoriques) on peut réaliser l'estimateur du flux, l'équation suivante donne l'expression du flux rotorique dans le référentiel lié au rotor de la machine :

$$\varphi_r(t) = \int_0^t (V_r - R_r I_r) dt \quad (IV.1)$$

On obtient les composants α, β du vecteur φ_r

$$\varphi_r = \varphi_{r\alpha} + j\varphi_{r\beta} \quad (IV.2)$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \int_0^t (V_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha}) dt \\ \varphi_{r\beta} = \int_0^t (V_{r\beta} - R_r i_{r\beta}) dt \end{cases} \quad (IV.3)$$

Chapitre IV Commande Directe du Couple (DTC) de la GADA

$\varphi_{r\alpha}$ et $\varphi_{r\beta}$ cela nécessite la connaissance des constituantes des vecteurs courants et tension rotorique ($i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ et $V_{r\alpha}, V_{r\beta}$).

À partir de l'application de transformation de Concordia, on obtient les constituants (α, β) des vecteurs de courant aux des composantes triphasées mesurées i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} suivante :

$$\begin{cases} i_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{ra} \\ i_{r\beta} = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} (i_{rb} - i_{rc}) \right] \end{cases}$$

(IV.4)

À partir les états des interrupteurs les composants des vecteurs de tension rotorique est obtenu

$$\begin{cases} v_{r\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{DC} \left(S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ v_{r\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \end{cases}$$

(IV.5)

Pour l'estimation de flux rotorique en utilisant l'équation (IV.3)

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = \sigma L_r i_{r\alpha} + \frac{M}{L_s} \varphi_s \\ \varphi_{r\beta} = \sigma L_r i_{r\beta} \end{cases} \quad (IV.6)$$

On écrire le module de flux rotorique et sa phase à partir de l'équation (III.6) comme suit:

$$\begin{cases} \varphi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \\ \theta_r = \arctg \frac{\varphi_{r\beta}}{\varphi_{r\alpha}} \end{cases} \quad (IV.7)$$

IV.5.3. Estimation du couple électromagnétique

On a estimé le couple électromagnétique seulement en fonction des grandeurs rotoriques (flux et courant) à partir de leurs constituantes (α, β) le couple peut se poser sous la forme :

$$C_{em} = p(i_{r\beta}\varphi_{r\alpha} - i_{r\alpha}\varphi_{r\beta}) \quad (IV.8)$$

IV.5.4. La structure générale de la commande par DTC-Classique à la GADA

La commande par DTC est utilisé pour optimiser les conséquences du couple électromagnétique et le flux rotorique à la GADA figure (IV.5), pour régulier le flux rotorique et le couple électromagnétique en utilisant la tension d'axe direct V_{rd} et la tension d'axe en quadrature V_{rq} respectivement [Ben 19]-[Tou 15]-[Bou 16].

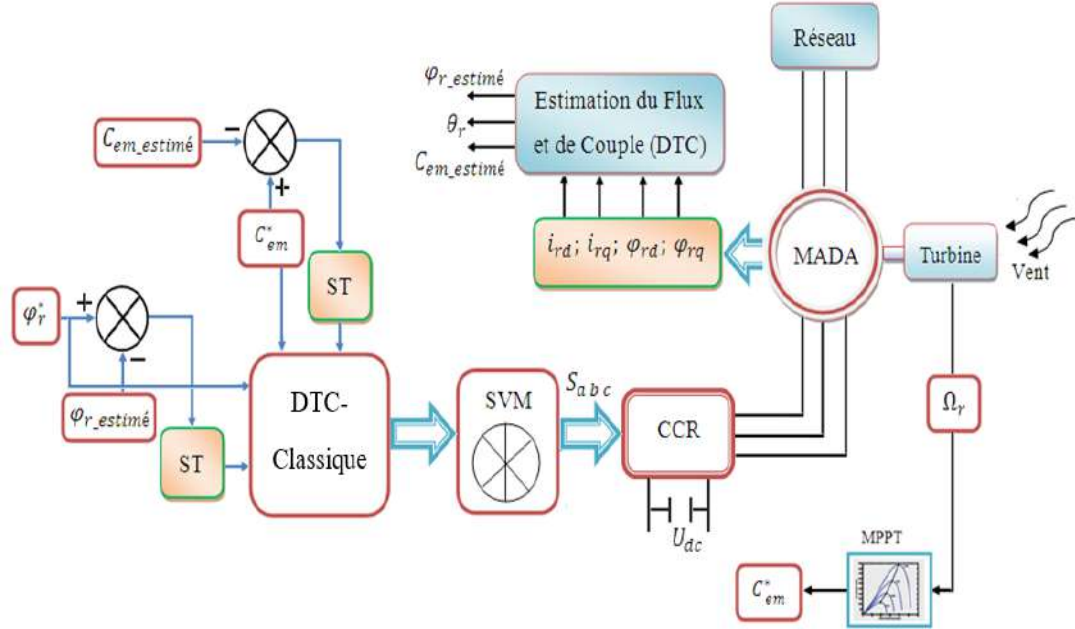


Figure. IV.5. Structure de la commande du système de conversion d'énergie éolienne.

L'estimation du couple électromagnétique et du flux rotorique illustré par la figure si dessous.

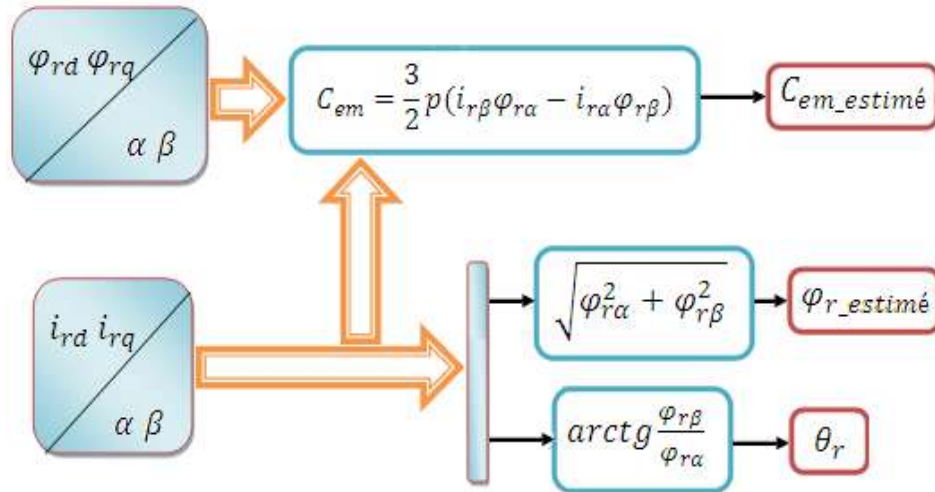


Figure. IV.6. L'estimation du couple et du flux.

IV.5.6. DTC-Classique au Contrôle du couple électromagnétique et le flux rotorique

Après avoir exposé la théorie de la DTC-classique avec les différentes structures de la commande non linéaire, nous allons analyser dans cette partie l'application de la commande au générateur asynchrone à double alimentation GADA pour valider l'approche exposée par des résultats de simulation.

IV.6. Résultats des simulations

Cette partie expose les résultats des simulations dans MATLAB/SIMULINK de commande indirecte de la GADA. On connaît que la machine est utilisée avec une puissance de 4 Kw. Les paramètres de la machine à induction à double alimentation en mode générateur (GADA) utilisée dans la simulation se trouvent dans l'annexe.

Les résultats de simulation pour valider la commande directe du couple de la GADA, avec l'utilisation d'un onduleur commandé par le technique SVM, et deux contrôleurs à hystérésis l'un au niveau du flux et l'autre au niveau du couple, l'amplitude de la tension référence est fixée au début à une valeur constante d'entrée de l'onduleur.

Les figures IV.7 et IV.8, montrent respectivement : la vitesse de rotation du générateur, la vitesse relative λ ainsi que le coefficient de puissance de la turbine.

La figure (IV.9) illustrée la coulpe électromagnétique et le flux rotorique suit parfaitement sa référence avec une bonne performance dynamique, moins d'oscillations et dépassement de consigne.

Le figure (IV.10) montrent que le contrôle par DTC-Classique obtenus en régime transitoire, est corrige la trajectoire du flux rotorique en un temps très court, tout en garantissant une bonne stabilité et précision.

Le figure (IV.11 et IV.12) illustre le courant rotorique à flux fixe par phase sans et sa spectres des harmoniques avec ajustement de la technique proposé.

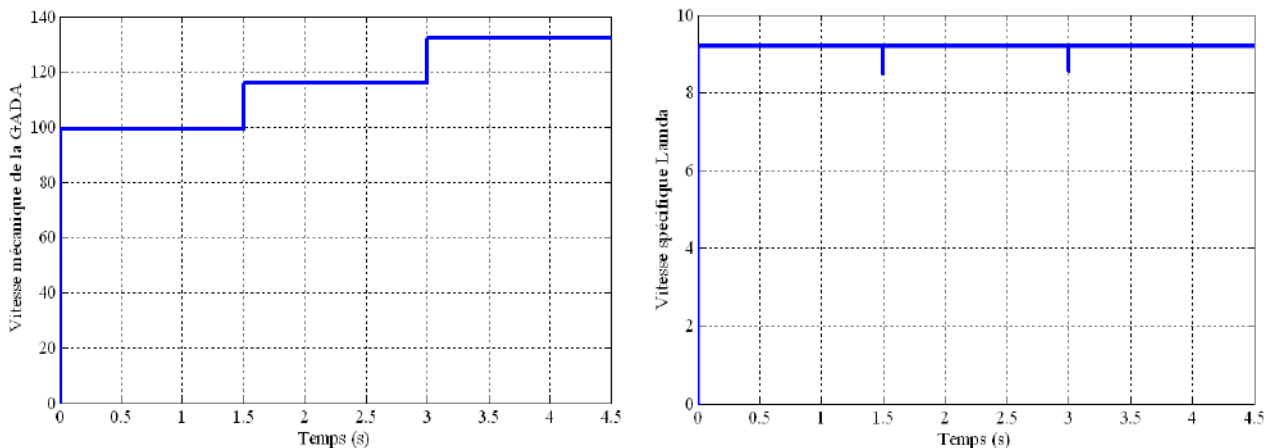


Figure. IV.7. La vitesse mécanique de la GADA et la vitesse spécifique.

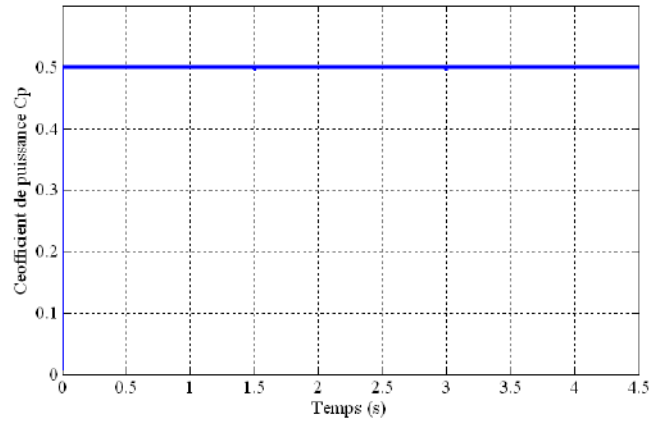


Figure. IV.8. Le coefficient de puissance.

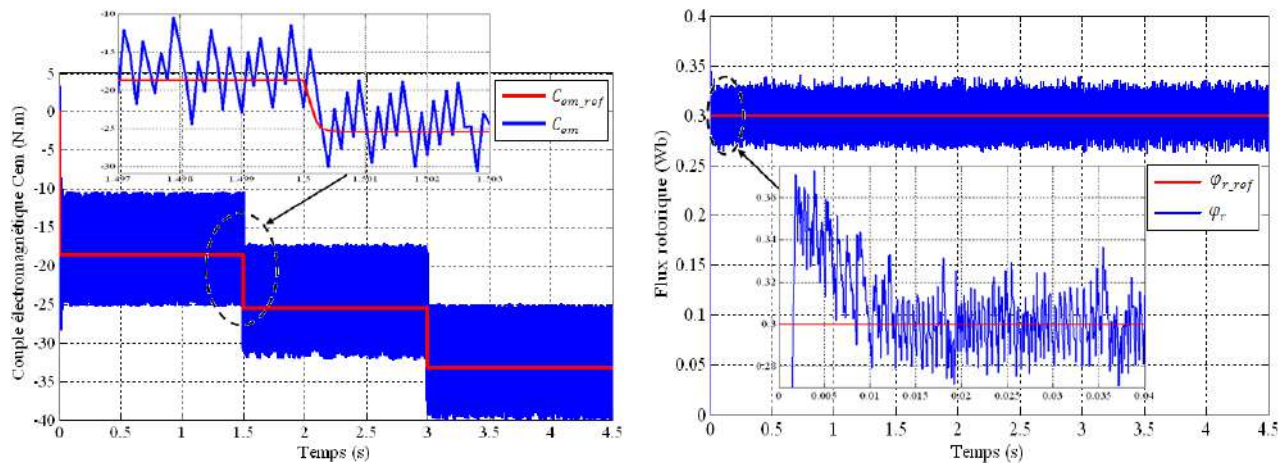


Figure. IV.9. Le couple électromagnétique et le flux rotorique.

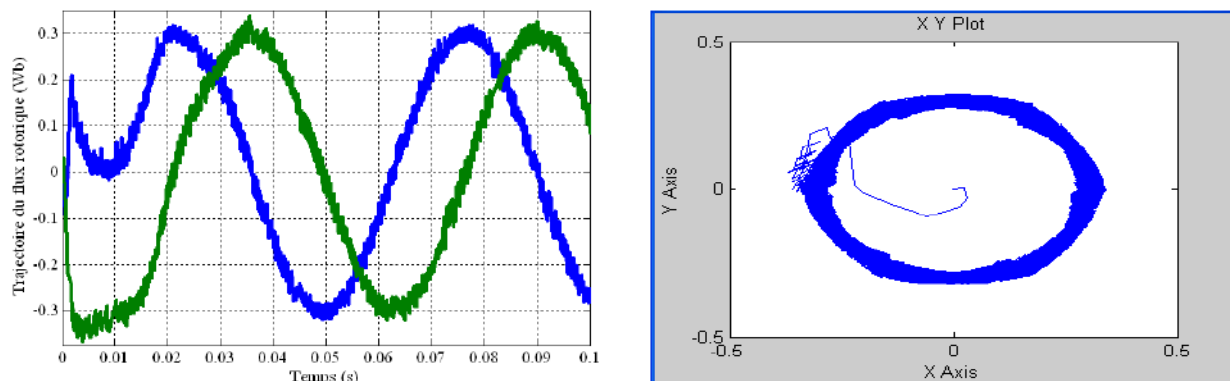


Figure. IV.10. Trajectoire du flux rotorique de la GADA.

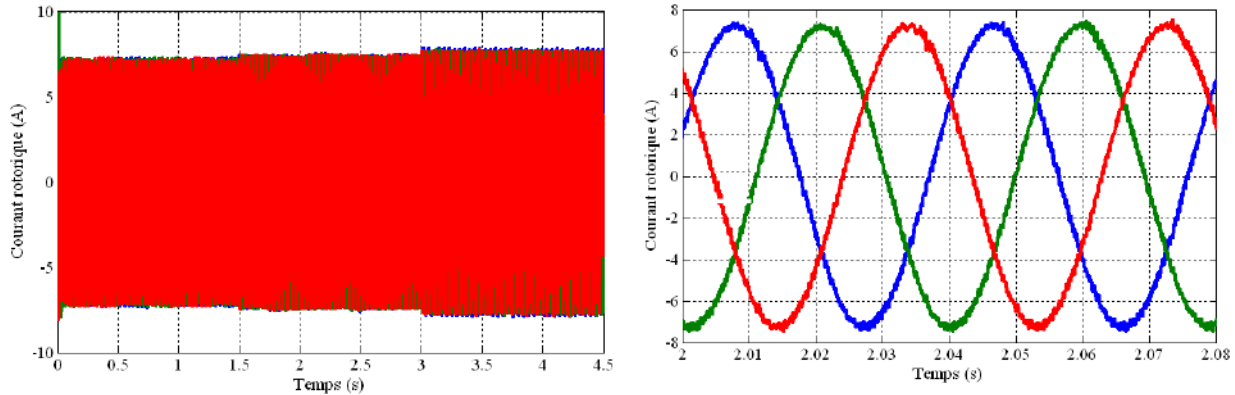


Figure. IV.11. Le courant rotorique à flux fixe dans les deux cas de contrôle.

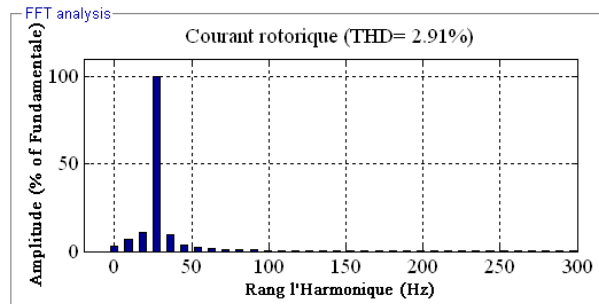


Figure. IV.12. Rang l'harmonique du courant rotorique.

IV.7. Conclusion

Les résultats de simulation montrent que le DTC classique a une bonne performance de poursuite grâce au principe de régulation hystérétique du couple électromagnétique et du flux rotorique.

Pourtant, il oscille solidement au niveau de ces deux grandeurs du fait des changements de fréquence de découpage. Pour surmonter la limitation du temps de calcul et améliorer les limitations des techniques DTC classiques, nous avons développé une technique pour réduire les oscillations de couple et de flux en imposant une fréquence de modulation constante. Nous appelons cette technologie DTC à modulation de fréquence constante DTC-classique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif visé par nos travaux et l'amélioration des performances locales et le développement de l'énergie éolienne, puis réaliser une commande vectorielle et la commande par technique de DTC classique pour la régulation de la vitesse du générateur asynchrone à double alimentation (GADA), après de réaliser la commande vectorielle classique par régulateur PI, la commande par DTC classique de faire une étude comparative entre les deux types de commande précédentes par les résultats de simulation numérique en utilisant l'environnement SIMULINK du logiciel MATLAB.

Le premier chapitre, nous permet de formuler un ensemble de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique à l'aide d'éoliennes. Après avoir rappelé les concepts de base nécessaires à la compréhension des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement sont décrits. Nous introduisons ensuite différentes combinaisons machine-convertisseur statique pour la conversion de l'énergie éolienne.

Dans le **deuxième chapitre**, l'intérêt est porté sur la modélisation de MADA. Dans cette partie la génératrice asynchrone double alimentation sont destinés à la production d'énergie dans le secteur de l'énergie éolienne, il est donc utile de les considérer d'un point de vue énergétique.

Dans la **troisième chapitre**, permet d'établir des lois de commande vectorielle appliquées aux la génératrice asynchrone double alimentation. Cette technique reste la méthode la plus largement utilisée pour découpler le contrôle du flux et du couple. Il est possible de rendre la forme de couple du moteur asynchrone à double alimentation similaire à celle du moteur à courant continu. Dans ce chapitre, nous adoptons la stratégie basée sur le contrôle vectoriel orienté flux stator, nous introduisons également la structure de contrôle de vitesse du moteur asynchrone à double alimentation et flux stator orienté, équipé d'un régulateur PI classique et on remarque qu'avec la régulation PI avec le contrôleur, le système est très insensible aux changements de vitesse de marche arrière et de vitesse à pleine charge.

Le **quatrième chapitre**, expose la technologie classique GADA Control directe de couple (DTC). Les résultants de la simulation GADA nous ont permis de juger de la qualité de la régulation, caractérisée par l'absence de dépassement par rapport au point de consigne, de faibles oscillations transitoires et des temps de réponse courts. De plus, la fréquence de commutation est variable et difficile à contrôler en raison de l'utilisation d'un contrôleur hystérétique. C'est l'un des principaux inconvénients du DTC.

D'après les résultats obtenus et des observations enregistrées, des perspectives de

recherche et de réalisation pratique intéressantes pouvant contribuer à mieux exploiter le moteur asynchrone à double alimentation (MADA) sont envisageables :

- Application d'autres techniques de commande robuste, telles que : la commande adaptative, les réseaux de neurones, commande par la méthode du backstepping, le feedback linearization ;
- Combinaisons entre les différentes techniques associées à la commande par mode de glissement, à titre d'exemples : la commande par mode de glissement adaptative, la commande floue adaptative ;
- L'utilisation des algorithmes génétiques pour optimiser les différents gains des régulateurs IP, PI et floue-PI et gains du mode de glissement.

Références

A

- [Abd 13] Sabrina ,ABDEDAIM, "Optimisation de deux Systèmes de Génération Renouvelable (Photovoltaïque et Éolienne) connectés au réseau", *Thèse Doctorat en sciences en Génie Electrique, Université Mohamed Khider-Biskra, 19 Décembre 2013.*
- [Abd 12] Lilia Abdelhalim, "Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement ",*Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Maîtrise des Energies, Université Hadj Lakhdar de Batna,26 Avril2012.*
- [Abd 00] E. S. Abdin, W. Xu "Control design and dynamic performance analysis of wind turbine-induction generator unit" *IEEE Trans. on Energy Converse, Vol. 15, No. 1, pp. 91-96, 2000.*
- [Abd 07] T.Abdelhalim, "Contribution à l'application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série ", *These Doctorat, Ecole National Polytechnique, Alger, 2007*
- [Ard 16] Sid Ahmed el Mehdi ARDJOUN, "commande d'un système d'énergies renouvelables multi sources relié au réseau électrique", *Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Djillali Liabes - Sidi-Bel-Abbes, 18 Avril 2016.*
- [Azz 19] Said.Azzouz, "Amelioratin de la commande d'un système eolien a base dune machine MADA utilisant les techniques intelligentes" , *Thèse Doctorat en électrotechnique Université de M'sila (2019).*

B

- [Beb 20] Bebboukha. Ali," *Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à double alimentation(MADA)*, Master Academique, De Technologie Departement De Genie Mecanique" Université Faculte Echahid Hamma Lakhdar D'el-Oued 2020.
- [Bek 14] Youcef BEKAKRA,"Contribution à l'Etudeet à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation ", *thèse l'obtention Doctoraten sciences, Réseaux Electriques, Université Mohamed Khider Biskra, 21 Octobre2014.*
- [Bec 12] Ali M. BECHOUCH, "Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone : Application à une éolienne", *Thèse Doctorat en électrotechnique de l'Université, 22/04/2013.*
- [Bel 10] B. BELTRAN, "Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur", *Thèse Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 2010.*

- [Ben 10] L. BENALIA, "Commande en tension des moteurs à induction double alimentés", thèse doctorat, Université de Batna. 02/06/2010.
- [Ben 13] Afaf .BENAMOR, "Commande Directe des Puissances d'une Machine synchrone à Double Alimentation Intégrée dans un Système Éolien Connecté au Réseau", Thèse Magister en Électrotechnique, Maîtrise d'énergies électriques, Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, 08 Octobre 2013.
- [Ben 19] Benamor.A " Contribution à la Modélisation à la Commande et au Contrôle des Systèmes de Production de l'Energie Électrique Renouvelable"(Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra) (2019).
- [Ben 12] F. BENCHABANE, A. TITAOUINE, O. BENNIS, K. YAHIA, D. TAIBI, "Sensorless fuzzy sliding mode control for permanent magnet synchronous motor fed by AC/DC/AC converter", International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 3, N° 3, pp. 221-229, 2012
- [Ben 12] Bennour, C. "Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation "(Doctoral dissertation, université de biskra) (2012).
- [Bek 14] Youcef , BEKAKRA, "Contribution à l' Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation ", Thèse l'obtention Doctorat en sciences, Réseaux Electriques, Université Mohamed Khider Biskra, 21 Octobre 2014
- [Bek 10] Bekakra, Y.." Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées (Doctoral dissertation, "Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, (2010)

C

- [Cam 03] Haritza CAMBLONG, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génératrice d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables", Thèse Doctorale, Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers Centre de Bordeaux, 18 Décembre 2003.
- [Car 01] P.W. Carlin, A.S. Laxson, E.B. Muljadi, "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology", NREL/TP-500-28607, Février 2001.
- [Cou 08] V. COURTECUISSÉ, "Supervision d'une centrale multisources à base

d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique", Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, le 20 Novembre 2008.

D

- [Dje 15] DJERIRI, Youcef, et al." Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle" Thèse de doctorat .Université SIDI-BEL-ABBES. 2015.

E

- [Ela 04] S. El AIMANI,"Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lille, "Université des Sciences et Technologies de Lille,06 Décembre2004.
- [Ela 03] , "Modelling and simulation of doubly fed induction generator for variable speed wind turbines integrated in a distribution network", *In: 10th European*, 2003.

F

- [Fer 17] Ferkous, K., & Bentounsi, A." Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne" Université Mentouri constantina faculte des SCIENCES sciences exactes departement de physique (2017).

G

- [Gho 01] R. GHOSN, "Contrôle Vectoriel de la Machine Asynchrone à Rotor Bobiné à Double Alimentation", Thèse Doctorat, ENSEEIHT, Institut National Polytechnique de Toulouse ,Octobre 2001.
- [Ghe 11] T. GHRNNAM, "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation", Thèse Doctorat, l'Ecole Centrale de Lille et l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2011.

H

- [Had 09] A. Hamida HADRI, A. ALLAG, M. Y. HAMMOUDI , S. M. MIMOUNE , S. ZEROUALI, M. Y. AYAD, M. BECHERIF, E. MILIANI, A. MIRAOUI,"nonlinear adaptive backstepping approach applied to a three phase PWM AC–DC converter feeding induction heating", Elsevier, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 14, N°. 4, pp. 1515-1525, 2009.

I

- [Idj 05] K. Idjdarene, "Analyse et control d'une chaine de conversion électrique par énergie éolienne, Mémoire Magister en Electrotechnique," université de Bejaia 2005
- [Idj 10] M. Kassa IDJDARENE,"Contribution à l'Etude et la Commande Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes

Autonomes", Thèse Doctorat en Sciences en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira-Béjaia et Lille 1(France),23 Mai 2010.

K

- [Kan 07] Kandouli ,fairouz "Modélisation et commande des machines électriques",2007
- [Kha 14] Abdeloahab KHATTARA, "Modélisation, Commande et Gestion de l'énergie d'un Générateur Eolien", Thèse Doctorat en Science, Génie Electrique, Université Mohamed Khider–Biskra, 01 Décembre 2014.

L

- [Llo 04] A. LLOR, B. ALLARD, L. XUEFANG, J. M. RETIF, "Comparison of (DTC) implementation for Synchronous machines", Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. IEE 35 th annual, Vol. 5, N°. 20-25, pp. 3581-3587,June 2004.
- [Lop 07] M. Lopez, "contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production sole,"Thèse Doctorat, Université de Paris-Sud11,France,2007.
- [Lou 16] Mourad .Loucif , "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur", Thèse Doctorat 3^{ème} Cycle Génie Electrique ,Université A Boubakra Belkaïd – Tlemcen, 12 May2016.

M

- [Mek 14] Mekki, Idriss. "commande vectorielle de la machine asynchrone a double alimentation «mada» a base d'un régulateur flou. "thèse de doctorat. université mohamed boudiaf-m'sila. 2014.
- [Men 07] A. Menacer, "Contribution à l'identification des paramètres et des états d'une machine à indication pour diagnostic et développement de commande robuste ; robuste vis-à-vis de défaut", Thèse Doctorat, Université de Batna Décembre 2007.
- [Mon 12] P. Monjean, "Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et on shore équipées de liaisons encontinu",Thèse Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2012

N

- [Nec 20] Necib Mohamed Khalil. "Réglage par mode glissant d'ordre deux d'une machine asynchrone double alimentation." Thème de Master Académique.

P

- [Poi 03] Frederic POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau", Thèse Doctorat en Sciences en Electronique et Génie Electrique, Université de Nantes Français, 19 décembre 2003.
- [Poi 03] Poitiers, Frédéric."Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone a cage autonome-machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau." Diss. Université de Nantes, 2003.

R

- [Red 17] Redouani, fares. "Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée MADA. Thème de Master Académique." Université d'El-Oued. 2017.
- [Ram 00] D. RAMUZ, "Machine Généralisée Alimentée par Deux Convertisseurs", Thèse Doctorat, UFR des Science Techniques et Gestion de l'industrie, Université de Franche-Comté- Mai 2000.
- [Rou 16] Riyadh ROUABHI, "Contrôle des puissances générées par un système éolien à ", vitesse variable basé sur une machine asynchrone double alimentée Thèse Doctoraten Sciencesen Electrotechnique, Université Batne2,01 Décembre2016.
- [Ria 17] Lea RIACHY, "Contribution à la commande d'un onduleur multi niveaux, destinéeaux énergies renouvelables, en vue de réduire le déséquilibre dans les réseauxélectriques ", Thèse Doctorat en Génie Electrique, Université le Havre Normandie,15Décembre2017

S

- [Seg 06] Guy. SEGUIER, "Convertisseurs De l'électronique De Puissance: La Conversion Alternative-Continue", Vol.1, 3ème éditions, Technique et Documentation Lavoisier, Paris, 2006.
- [Sag 98] C. SAGET, "La variation électronique de vitesse au service de la production d'énergie électrique par éolienne", REE, N°. 7, pp. 42-48, Juillet 1998.
- [Sal 15] SALEM, O. M., & MOHAMED, S "Commande Directe du Couple (DTC) d'une Machine Asynchrone à Cage "(Doctoral dissertation, université ghardaia) 2015.
- [Sed 09] Seddiki, Arezki." Contribution au contrôle direct du couple (DTC) d'une machine asynchrone à cage alimentée par un onduleur multi niveaux". université Diss, Boumerdès 2009.

T

- [Tam 09] Azzouz TAMAARAT "Modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une

machine asynchrone à double alimentation",thèse Doctoraten Sciences en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra 2009.

[Tam 15] Azzouz.TAMAARAT, "Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA",Thèse Doctoraten Sciences en Electrotechnique, Université Mohamed Khider Biskra, 08Décembre 2015.

[Tou 08] Riad .TOUFOUTI, "Contribution a la commande directe du couple de la machine asynchrone», Thèse Doctorat en sciences, en électrotechnique , machines électriques, Université Mentour Constantine, 02 Juin2008

[Tii 95] P. TIITINEN, P. POHJALAINEN, J. LALU," The next generation motor control method: Direct Torque Control (DTC)", EPE Journal, March 1995, vol.5, n°1, pp 14-18

W

[Wan12] Y.WANG,"Evaluationde laPerformancedesRéglagesdeFréquencesdesEoliennes à l'Echelle du Système Electrique : Application à un Cas Insulaire", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille. 20Novembre2012

Y

[You 21] B.Yousfi, I., Bakou, E. E., &Yaichi, I. "Commande Direct Du Couple Dtc-Svm Dune Gada Intégré Dans Un Système Eolien" (Doctoral Dissertation, Universite Ahmed Draia-Adrar) 2021.

Z

[Zeg 19] Zeghlache. hemza Etude Comparative enter differents techniques de commande appliquee sur un système eolien a vitesse variable a base diune MADA,), Master Academique, Université de M'sila(2019).

[Zem 17] ZEMMIT, A, Contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) par les techniques intelligentes, (Doctoral dissertation, Université de M'sila) 2017.

Annexe

Annexe

1. Paramètres du système éolien

Tableau. 1. Paramètres de la turbine éolienne.

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
Nombre des pales	3
Rayon du rotor R	3m
Gain du multiplicateur de vitesse G	5.4
Moment d'inertie total J	$0.2Kg\ m^2$
Coefficient de frottement visqueux f	$0.001N.m\ s/rad$
Valeur de la densité d'air ρ	$1.22Kg/m^3$

Tableau. 2. Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation.

<i>Nom et symbole des paramètres</i>	<i>Valeur numérique</i>
Puissance nominale P_n	4kW
Courant nominal I_n	15/8.6A
Tension nominale statorique V_s	220/380V
Fréquence nominale statorique f	50Hz
Vitesse nominale	1440tr/min
Résistance statorique R_s	1.2Ω
Résistance rotorique R_r	1.8Ω
Inductance statorique L_s	0.1554H
Inductance rotorique L_r	0.1568H
Inductance mutuelle M	0.15H
Nombre de paires de pôles p	2