

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté de génie électrique et de l'informatique

Département d'électrotechnique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme de master académique

En Electrotechnique

Option : Machines électriques

Thème

**Caractérisation d'une Machine Asynchrone à
Double Alimentation Appliquée à une Eolienne
Connectée au Réseau**

Proposé et dirigé par :

Mr : T. OTMANE-CHERIF

Mr : H. SEDIKI

Etudié par :

Mr : A. BOUDINAR

Mr : K. MESBAH

Promotion : 2010/2011

Remerciements

Nous remercions et nous rendons grâce à Dieu qui nous a bénéficié d'une volonté suffisante pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier Mr H.SDIKI et Mr T. OTMANE-CHERIF, nos promoteurs pour leur disponibilité, leur serviabilité et leurs conseils constructifs qui nous ont énormément aidés tout au long de notre travail (projet).

Nous exprimons notre gratitude aux membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Merci

Dédicaces

À la mémoire de mon père

À ma mère

À mes frères

À mes sœurs

À toute ma famille

*À mes camarades de la section, Master
Electrotechnique.*

*Je dédie ce travail à mon très cher binôme Hamid et
sa famille.*

Arezki

Dédicaces

À la mémoire de ma grand-mère

À mon père et ma mère

À mes grands-parents

À mes frères TACTAK et NASSIMA

*À mes tantes MELHA, MALIKA, H'DJILA et leurs
enfants DE MADJID à ANAYIS*

À mes oncles AREZKI, TARIK, YDIR et MOULOUD

*À toute ma famille sans oublier RACHID et toute sa
famille*

*À mes camarades de la section, Master
Electrotechnique.*

*Je dédie ce travail à mon très cher binôme AREZKI
et sa famille.*

*« A tout ceux qui ont sacrifié leur temps pour la
science et à tous ceux qui utilisent la science pour
le bien et la prospérité de l'humanité ».*

KOUSSALA

Résumé

Ce travail présente l'étude des caractéristiques de la machine asynchrone à double alimentation et l'utilisation de cette machine dans la production de l'énergie éolienne.

Pour ce faire, un modèle de la machine en régime permanent a été établi pour bien comprendre le fonctionnement de la machine.

Deux types de fonctionnements, fonctionnement à puissance réactive statorique non nulle, et fonctionnement à puissance réactive statorique nulle. Mise en équation du modèle de la turbine.

Enfin, on terminera ce travail par une simulation du système global et l'interprétation des résultats obtenus.

SOMMAIRE

III-1 -5	Influence de V'_{dr} sur le couple électromagnétique	62
III-1-6	Influence de V'_{dr} sur les puissances statoriques	63
III-1 -7	Influence de V'_{dr} sur les puissances rotoriques	64
III-1 -8	Influence de V'_{dr} sur les puissances du générateur transmise au réseau	66
III-1 -9	Influence de V'_{dr} sur le rendement de la MADA	67
III-2	Limites de fonctionnement de la MADA $Q_s=0$	68
III-2-1	limitation du courant rotorique	68
III-2-2	limitation par le glissement	68
III-2-2-1	glissements correspondant à I_{max}	68
III-2-2-2	glissement correspondant à I_{min}	69
III-3	Limitation de la tension rotorique	70
III-3-1	La tension rotorique correspondante à I_{max}	70
III-3-2	La tension rotorique correspondante à I_{min}	71
III-3-3	Limitation de la tension rotorique	72
	Conclusion	73
Chapitre IV Commande en boucle ouverte		
	Introduction	74
IV-1	calcul direct de la tension de commande	74
IV-2	calcul indirect de la tension de commande	76
	1 ^{ere} Étape : calcul de I_s	76
	2 ^{eme} Étape : calcul de V'_{dr}	77
IV-3	Modèle dynamique de simulation numérique de la MADA	78
IV-3-1	Conditions de simulation numérique	79
IV-3-2	Interprétation des résultats obtenus	80
IV-4	Partie Mécanique	81
IV-4-1	Modèle de la Turbine	82
IV-4-2	Modèle du Multiplicateur	84
IV-4-3	Equation dynamique de l'arbre	85
IV-4-4	Extraction du maximum de la puissance du vent	85
IV-4-5	Conditions de simulation numérique	87
IV-4-6	Interprétation des résultats obtenus	88
	Conclusion	88
	Conclusion générale	-

NOMENCLATURE

Nomenclature

A

as, bs, cs	phases du stator	-
Ar, Br, Cr	phases du rotor.	-

C

C_{em}	Couple électromagnétique développé par la machine	[N.m]
C_r	Couple résistant de la charge	[N.m]
C_{aer}	Couple mécanique de la turbine	[N.m]
C_p	Coefficient de puissance ou rendement de la turbine	[N.m]

D

d	axe direct du repère de Park	-
$\frac{d}{dt}(X)$	La dérivée d'une grandeur par rapport au temps	-

D

F

f_r	Coefficient de frottement visqueux	Nm.s/rad
f	fréquence du réseau	[Hz]
Φ_{ds}	Flux d'axe direct du stator	[Wb]
Φ_{qs}	Flux d'axe quadratique du stator	[Wb]
Φ_{dr}	Flux d'axe direct du rotor	[Wb]
Φ_{qr}	Flux d'axe quadratique du rotor	[Wb]
$\Phi_{as}, \Phi_{bs}, \Phi_{cs}$	Flux propres circulants au stator de la machine	[Wb]
$\Phi_{ar}, \Phi_{br}, \Phi_{cr}$	Flux propres circulants au rotor de la machine	[Wb]
$[\Phi_{dqos}]$	Vecteur flux statorique dans le repère de Park.	-
$[\Phi_{dqor}]$	Vecteur flux rotorique dans le repère de Park	-

G

g	Glissement	-
g_{min}	Glissement limite en fonctionnement générateur	-
g_{max}	Glissement limite en fonctionnement moteur	-
g_0	Glissement limite entre les deux fonctionnements	-
g^*	Glissement estimée	-
G	Rapport de multiplication	-

I

I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	Courants au stator de la machine	[A]
I_{ar}, I_{br}, I_{cr}	Courants au rotor de la machine	[A]
\bar{I}_m	Courant magnétisant	[A]

$\Im()$	Partie imaginaire	[A]
$[I_{dqos}]$	Vecteur courant statorique dans le repère de Park	[A]
$[I_{dqor}]$	Vecteur courant rotorique dans le repère de Park	[A]
I_{ds}	Courant d'axe direct du stator	[A]
I_{qs}	Courant d'axe quadratique du stator	[A]
I_{dr}	Courant d'axe direct du rotor	[A]
I_{qr}	Courant d'axe quadratique du rotor	[A]
\bar{I}_s^*	Conjugué du courant statorique	[A]
\bar{I}_r^*	Conjugué du courant rotorique	[A]
I_{max}		[A]
J		
J	Moment d'inertie des masses tournantes	[Kg.m ²]
$J_{turbine}$	Moment d'inertie de la turbine	[Kg.m ²]
$J_{machine}$	Moment d'inertie de la machine	[Kg.m ²]
K		
$K = \frac{L_s}{M}$	Le facteur de transformation de la machine	-
l		
l_s	Inductance propre	[H]
l_r	Inductance propre	[H]
$L_s = l_s - M_s$	Inductance propre cyclique du stator	[H]
$L_r = l_r - M_r$	Inductance propre cyclique du rotor	[H]
M		
M_s	Inductances mutuelles entre deux phases du stator	[H]
M_r	Inductances mutuelles entre deux phases du rotor	[H]
M_{sr}	Inductance mutuelle entre une phase du stator et une autre du rotor	[H]
$M = \frac{3}{2} M_{sr}$	Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor	[H]
N		
$N_{rr} = \sigma L_r$	Inductance de fuite totalisée au rotor	[H]
N_s, N_r		[H]
η_{gen}	Rendement de la machine en générateur	-
η_{mot}	Rendement de la machine en moteur	-
O		
Ω_s	vitesse mécanique synchrone de rotation du champ statorique	[rad/s]
Ω_r	vitesse mécanique de rotation du rotor	[rad/s]
$\Omega_{turbine}^*$	vitesse de rotation mécanique de l'ensemble estimée	[rad/s]

$\Omega_{machine}$	vitesse mécanique du générateur	[rad/s]
$\Omega_{turbine}$	vitesse mécanique de la turbine	[rad/s]
P		
P	Nombres de paires de pôles	-
P_{gen}	La puissance active totale du générateur	[W]
P_{mec}	La puissance mécanique	[W]
P_r	La puissance active du rotor	[W]
P_s	La puissance active du stator	[W]
$P_{airg} = \frac{\omega_s}{p} C_{em}$	La puissance active dans l'entrefer	[W]
$P_{jr} = \frac{R_r}{g} \bar{I}_r ^2$	Pertes joules rotoriques	[W]
$P_{js} = R_s \bar{I}_s ^2$	Pertes joules statoriques	[W]
$P(\theta)$	Matrice de Park	-
Q		
Q_{gen}	La puissance réactive totale du générateur	[Var]
Q_s	La puissance réactive du stator	[Var]
Q_r :	La puissance réactive du rotor	[Var]
q	axe quadratique du repère de Park	-
R		
R_s	Résistance du stator	[Ω]
R_r	Résistance du rotor	[Ω]
$R'_r = R_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2$	Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator	[Ω]
$\Re()$	Partie réelle	-
S		
\bar{S}_{gen}	La puissance apparente totale du générateur	[VA]
\bar{S}_s	La puissance apparente du stator	[VA]
\bar{S}_r	La puissance apparente du rotor	[VA]
$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right)$	Coefficient de dispersion	-
T		
ϑ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d	[rad]
ϑ_r	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement rotorique et l'axe d	[rad]
V		
V_{ds}	Tension d'axe direct du stator	[V]
V_{qs}	Tension d'axe quadratique du stator	[V]

V_{dr}	Tension d'axe direct du rotor	[V]
V_{qr}	Tension d'axe quadratique du rotor	[V]
$[V_{dqos}]$	Vecteur tension statorique dans le repère de Park	-
$[V_{dqor}]$	Vecteur tension rotorique dans le repère de Park.	-
$\bar{V}'_r = \left(\frac{L_s}{M}\right) \bar{V}_r$	Tension d'axe direct du rotor ramenée au stator	[V]
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	Tensions simples triphasées au stator de la machine	[V]
V_{ar}, V_{br}, V_{cr}	Tensions simples triphasées au stator de la machine	[V]
\bar{v}_s	Tension complexe du stator	[V]
V_{max}	Tensions limite en fonctionnement moteur	[V]
V_{min}	Tensions limite en fonctionnement générateur	[V]
V_0	Tensions limite entre les deux fonctionnements	[V]
V_n	V_n : Tensions nominale	[V]
V_{Vent}	Vitesse du vent	[m/s]
$V_v max$	Vitesse du vent maximale de la zone MPPT	[m/s]
$V_v min$	Vitesse du vent minimale de la zone MPPT	[m/s]
W		
ω_s	Pulsation électrique synchrone du champ tournant	[rad/s]
ω_r	Pulsation électrique du rotor	[rad/s]
X		
$X_f = \omega_s N_r' \left(\frac{L_s}{M}\right)^2$	Réactance de fuite totalisée au rotor ramenée au stator	[Ω]
X_m	Réactance de magnétisation	[Ω]
X_s	Réactance du stator	[Ω]
X_r	Réactance du rotor	[Ω]
\bar{X}	Grandeurs sous forme complexe	-

Y

Z

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie électrique est un élément crucial pour tout développement socio-économique. Elle est devenue dans la vie quotidienne des populations, notamment dans les pays développés, une forme d'énergie dont on ne peut se passer [2].

La consommation d'énergie, au courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques, en Asie en particulier[2].

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de rotation ou translation, de la transmission de signaux, de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore ... la liste est presque infinie ,en fait. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable [7].

Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, les pays industrialisés ont massivement fait recours aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques traditionnelles, mais le risque d'accident nucléaire (comme la catastrophe de Tchernobyl du 26 avril 1986 et ressèment au Japon avril 2011 qui restent gravées dans la mémoire commune), le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures [2].

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, aidés par la déréglementation, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites "Renouvelables" faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire [8].

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 12 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 4,15 GW et le Danemark avec 2,9 GW à la fin de l'année 2002. Face à ces trois "poids lourds", la France ne représente que 230 MW [8].

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (M.ADA). Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes

pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlée de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum appelé MPPT [7].

Actuellement, la majorité des projets éoliens d'une puissance supérieure à 1 MW, repose sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA). Le principal avantage à utiliser une machine asynchrone à double alimentation est la possibilité de contrôler les puissances générées autour d'un point de fonctionnement. En conséquence seule au maximum 30% de la puissance est réglée par les convertisseurs qui sont au rotor, ce qui rend le coût et le rendement de ce système éolien intéressant pour des applications en forte puissance [6].

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. C'est dans ce cadre que le présent mémoire que nous vous présentons décrit une étude sur l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation dans un système éolien [2].

Portant sur l'avantage d'utiliser une machine asynchrone à double alimentation dans un système éolien, on a choisit de traiter le thème suivant.

Caractérisation d'un générateur asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne

Ce mémoire comporte quatre chapitres

Le premier chapitre : baptisé l'état de l'art sur le système éolien et les différentes machines utilisées dans ce système.

Le deuxième chapitre : consacré à la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en régime permanent .grâce à cette modélisation on a introduit un schéma équivalent qui a permis de bien comprendre les quatre fonctionnements de la MADA.

Le troisième chapitre : étudie les caractéristiques de la MADA en régime permanent à puissance réactive statorique nulle.

Le quatrième chapitre : consacré à la simulation du système global (turbine + MADA), en appliquant la commande pour avoir la puissance réactive statorique nulle. On termine ce mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉOLIENNES

I.1 Historique

L'énergie éolienne est l'une des énergies les plus anciennes créées par l'homme en dehors de son énergie musculaire. Ce fut, sans doute, d'abord une énergie captée par la voile pour la navigation. Par la suite, sans date précise, quelque inventeur de génie, sédentaire, pense faire tourner indéfiniment la voile autour d'un axe fixe : le moulin était né. Les plus anciens connus, chinois ou perses, sont en effet constitués par des mâts verticaux entraînés par des voiles. C'est seulement plus tard que l'axe devient sensiblement horizontal, avec des ailes, pour prendre la disposition bien connue des moulins à vent. L'énergie éolienne joue un rôle économique important jusqu'au début du XIXe siècle. Ensuite, ce rôle diminue par suite de l'accroissement rapide de l'utilisation des énergies fossiles. Les éoliennes subsistent pourtant surtout dans des pays de vastes steppes (ex-URSS, Argentine, etc.) ou le long de façades maritimes (Baléares, Crète, Portugal, etc.) ; toutes sont de modèles fabriqués depuis longtemps.

Toutefois au XXe siècle, s'appuyant sur les progrès de l'aérodynamique, certaines tentatives de réalisation de nouvelles machines sont faites. Aux États-Unis, en ex-URSS, en Angleterre et en France par Électricité de France autour de 1960, des éoliennes puissantes, jusqu'à 1 000 kW environ, sont essayées. Malgré des résultats encourageants, c'est de nouveau l'abandon, le pétrole bon marché se substituant à toutes les autres formes d'énergie. L'augmentation brutale du prix du pétrole relance l'énergie éolienne. La crainte de n'utiliser qu'une seule énergie, dont l'approvisionnement peut être aléatoire, les idées écologiques orientent certains pays vers cette forme inépuisable et nationale !

Des progrès importants dans l'aérodynamique, l'arrivée de nouveaux matériaux vont permettre d'exploiter ce gisement mondial estimé à 4 TWh à partir de nouvelles machines fiables et diminuer le prix de l'énergie produite, qui ne devient plus marginale dans certains pays comme le Danemark ou certaines contrées comme la Californie.

I.2 Développements des éoliennes [3]

I.2.1 L'éolien redécouvert

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis des millénaires : navigation, moulins, pompage. Elle a joué un rôle économique relativement important au cours des siècles avant d'être supplantée par les énergies fossiles à partir du début du 19^{ème} siècle. Si quelques prototypes d'éoliennes génératrices d'électricité ont vu le jour dès le milieu du 20^{ème} siècle, notamment en France, en Grande-Bretagne et au Danemark, ce n'est que dans les années 80

que l'éolien industriel commence vraiment à se développer et dans les années 90 qu'il connaît un véritable essor dans un certain nombre de pays.

Le développement de l'éolien s'inscrit dans le cadre de la promotion des énergies renouvelables, face aux dangers que représente à l'échelle planétaire le recours massif aux énergies fossiles. D'autre part l'énergie éolienne bénéficie d'une façon générale d'une bonne image auprès du public malgré les oppositions locales qui naissent fréquemment autour des projets pour des motifs environnementaux. En fait, l'éolien industriel qui aujourd'hui ne s'impose toujours pas économiquement, voit son développement lié aux politiques plus ou moins incitatives propres à chaque pays, ce qui conduit à des situations très contrastées d'un pays à un autre.

I.2.2 La situation actuelle

L'énergie éolienne a poursuivi, en 2008 encore, sa "success story" mondiale en tant que source d'énergie la plus dynamique. Depuis 2005, l'ensemble des installations éoliennes a plus que doublé. Elles ont atteint 121 188 MW, après 59 024 MW en 2005, 74 151 MW en 2006 et 93 927 MW en 2007. Le chiffre d'affaires mondial du secteur éolien s'élève en 2008 à 40 milliards d'euros. Le marché des éoliennes neuves a montré une croissance de 42% pour atteindre un total de 27 261 MW, pour 19 766 MW en 2007 et 15 127 MW en 2006. Il y a dix ans, ce marché représentait 2 187 MW, soit moins d'un dixième du marché de 2008. Pour comparaison, aucun réacteur nucléaire n'est entré en activité en 2008, selon l'Agence Internationale de l'Energie Atomique. [13]

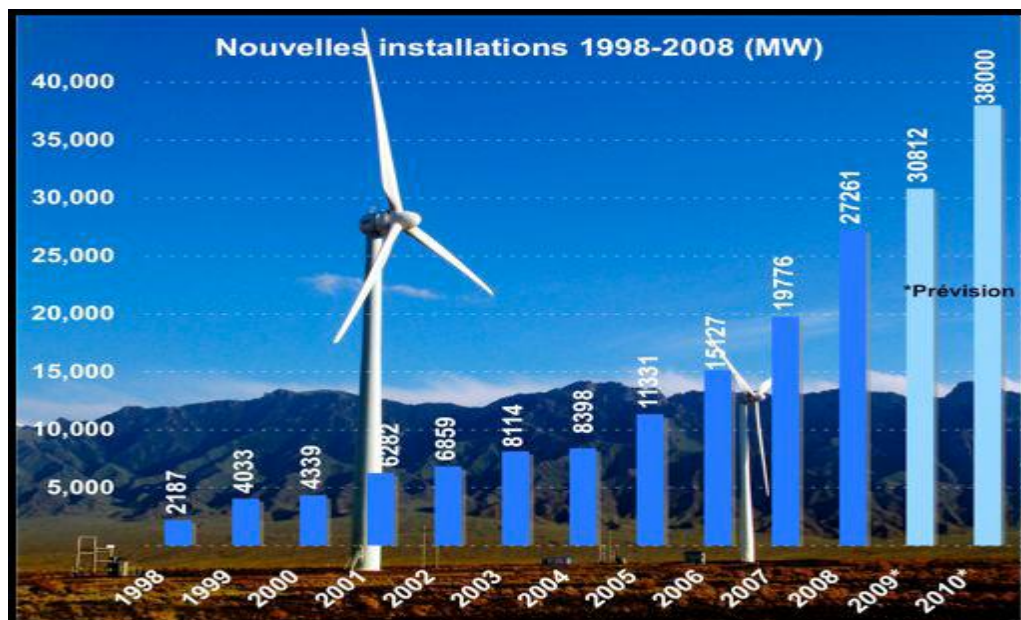


Figure (I-1.a) : Caractéristique de production de l'énergie éolienne dans le monde entre 1998 et 2008 [13]

I.2.3 Les principaux marchés en 2008

Les Etats-Unis et la Chine sont les leaders du secteur, les Etats-Unis prenant la première position à l'Allemagne et la Chine dépassant pour la première fois l'Inde. Les Etats-Unis et la Chine représentent 50.8% des ventes d'éoliennes en 2008 et les huit pays en tête du marché mondial environ 80% de ces ventes - l'an dernier, seuls cinq pays se partageaient ces 80% Le Danemark pays pionnier, est tombé à la neuvième position en terme de capacité totale, alors qu'il restait encore, il y a quatre ans, quatrième de ce classement, et ce depuis plusieurs années. Toutefois, avec une production de nouvelles capacités par l'énergie éolienne d'environ 20% de la consommation nationale, le Danemark reste un pays leader de l'éolien à l'échelle mondiale.

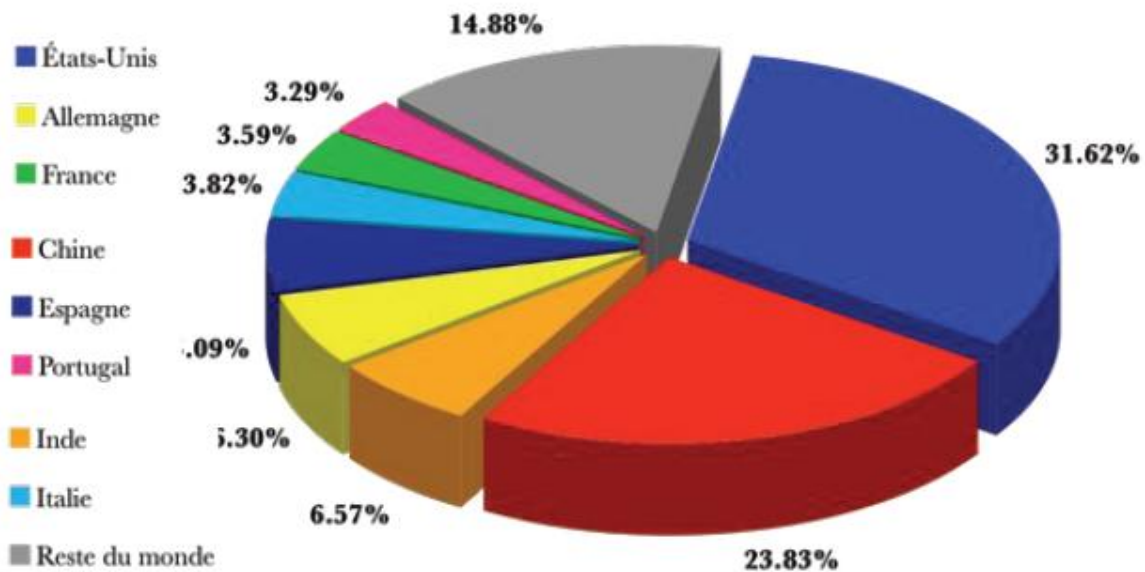


Figure (I-1.b) : Répartition par pays des nouvelles installations, 2008

I.3 Classification des éoliennes

Cependant plus généralement, on classifie les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière:

I.3.1 Selon la conception mécanique

- ✓ Eolienne à axe vertical :
- ✓ Eolienne à axe horizontal :

A / éolienne à axe vertical

Ce type d'éolienne est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT

(Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius.

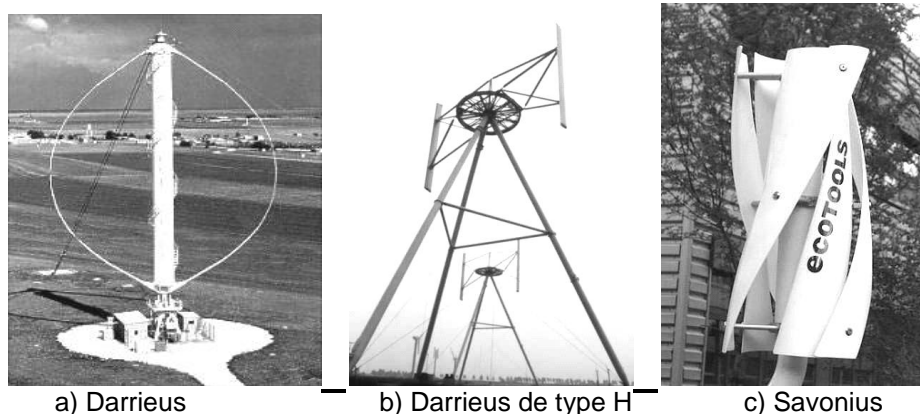


Figure (I-2) : Exemples des constructions VAWT

a. Le principe du rotor de Darrieus inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus :

- le rotor cylindrique
- le rotor tronconique
- le rotor à variation cyclique
- le rotor parabolique.

Toutes ces machines ont besoin d'être haubanées, c'est-à-dire soutenues par des câbles ou des cordages. Le comportement dynamique de la machine doit tenir compte des modes propres de vibration de tous les organes structuraux, y compris celle des haubans.

b. Le rotor de Savonius est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine. Le coefficient C_p maximal atteint 0.3. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. A titre d'exemple, des machines de plusieurs kilowatts ont été réalisées pour assurer le pompage de l'eau dans les pays du Sahel; elles démarrent à des vitesses de vent faible, voisines de 2 à 3 m/s. Ces systèmes présentent cependant beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages dans les réalisations actuelles, en particulier ils nécessitent comme les systèmes à axe horizontal parallèle « au vent » un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est en général beaucoup plus compliquée et se traduit souvent par une perte sensible du rendement global.

B/ éoliennes à axe horizontal

Les voilures à axe horizontal sont de loin les plus utilisées actuellement. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pales. Ce type d'éolienne présente un rendement aérodynamique plus élevé, démarre d'une façon autonome et possède un faible encombrement au niveau du sol.

A dimensions d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

a. Eolienne à hélice sous le vent :

Dans ce type d'éoliennes le rotor se situe derrière le pylône .l'avantage de ce montage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône ; par fort vent la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Cette éolienne a donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent, cependant, le pylône bien qu'il soit plus petit constitue un obstacle au vent ce qui augmente le risque de rupture de la pale et génère une production fluctuante d'électricité.

b. Eolienne à hélice face au vent :

Ce sont les plus répandues, le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône. A l'arrière du pylône, il ya en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylone.il est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylone.les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours face au vent.

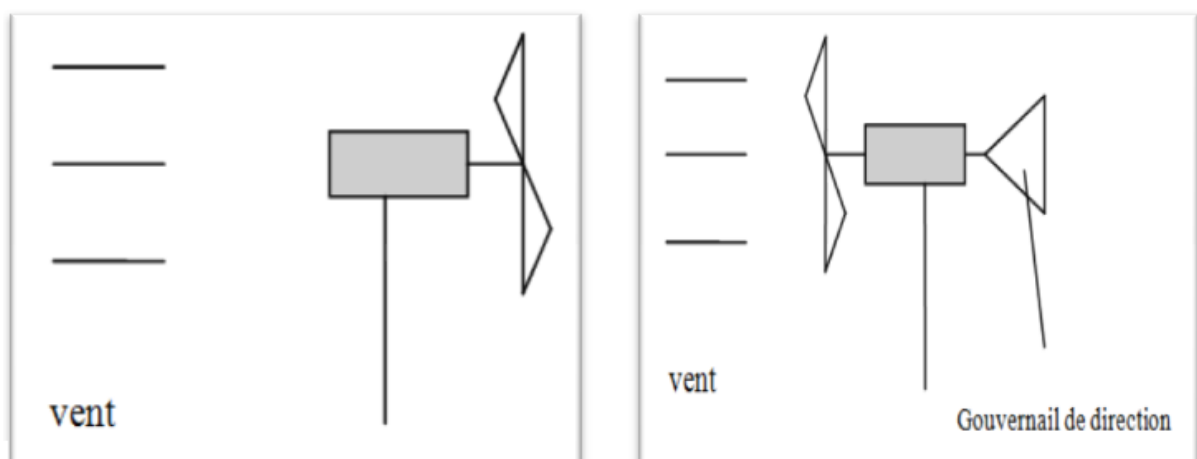


Figure : I-3 : Eolienne sous le vent (à gauche) et face au vent (à droite)

I.3.2 Selon l'utilisation

- ✓ Eolienne autonomes
- ✓ Eolienne raccordées au réseau

A/ éolienne raccordée au réseau

Les éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré ; appartenant à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Plus de 95% de la capacité mondiale d'énergie éolienne est raccordée à des grands réseaux de puissance. Ceci s'explique par les nombreux avantages du fonctionnement des centrales éoliennes sur les réseaux :

- a. La puissance des turbines éoliennes ne doit pas être nécessairement commandée en fonction de la demande instantanée d'un client spécifique,
- b. Le manque de puissance délivrée par les éoliennes est compensé par les Centrales conventionnelles,
- c. La fréquence du réseau est aussi maintenue par les autres centrales et elle peut être utilisée pour la commande de la vitesse des éoliennes.

Ainsi, le fonctionnement des turbines éoliennes connectées aux réseaux est techniquement moins complexe que son application individuelle isolée.

B /Eolienne autonome

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissances de quelques dizaines de watt à quelques dizaines de KW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage.les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou des stations météo.

Les points communs entre toutes ces productions sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateurs.

I.4/ Description du système énergétique éolien

I.4.1 constitution :

Les aérogénérateurs les plus courants sont à axe horizontal. Ils sont constitués par une tour (élément porteur) ; à son sommet se trouvent fixés la nacelle et l'ensemble rotor-pales (éléments actifs).

A/la nacelle

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et divers actionneurs de commande, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.les parties essentielles constituant la nacelle sont comme suit :

✓ **Arbre lent**

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

✓ **Multiplicateur de vitesse :**

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne.

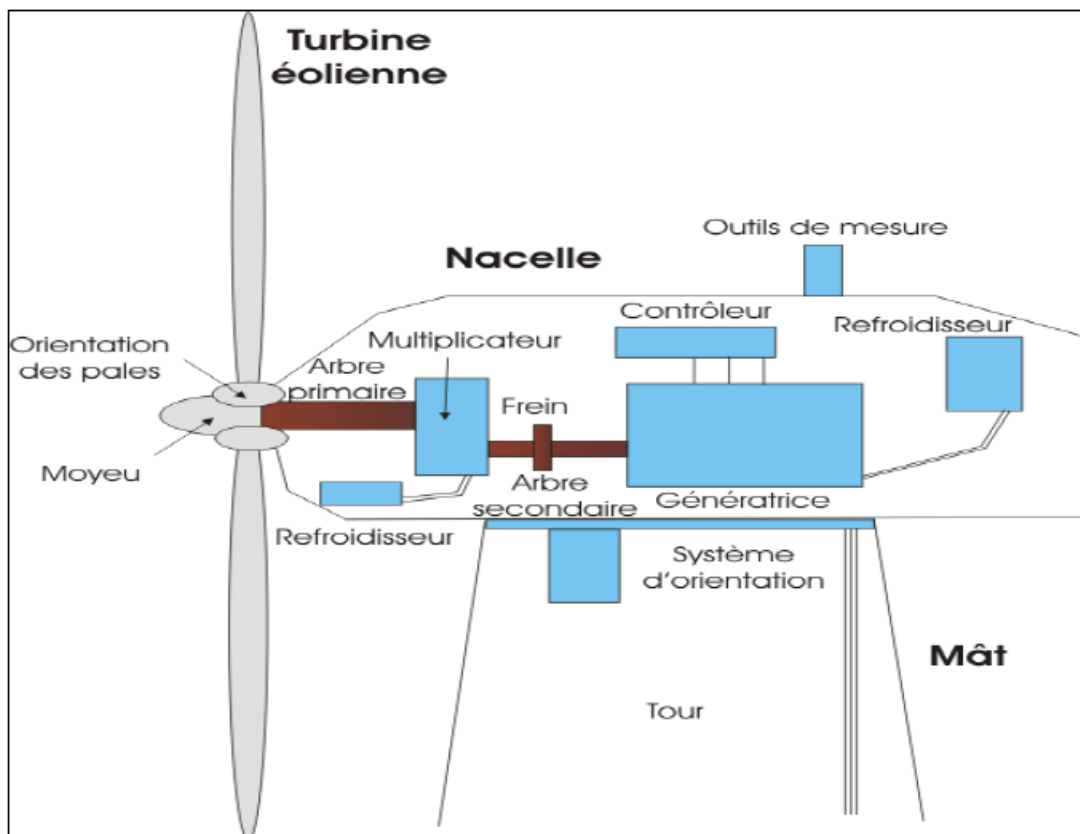


Figure (I-4) : Eléments constituant une éolienne

✓ **Le système de refroidissement :**

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. il existe certains types d'éoliennes comportant un refroidisseur à l'eau.

✓ **La génératrice**

Elle constitue l'élément assurant la conversion d'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de différents types de machines.

✓ **Anémomètre**

C'est un dispositif de mesure de la vitesse du vent ,ayant la possibilité d'émettre des signaux électriques qui seront utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne afin de la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. de même le système de commande électrique assure la protection de l'éolienne en provoquant un arrêt automatique si la vitesse du vent dépasse 25m/s.

✓ **Le système de contrôle-commande :**

Il permet un contrôle du dispositif éolien, en cas de danger, à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne.

B/la tour

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât 80m). la tour a une forme conique ; à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.

C/le rotor

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont-elles mêmes montées sur un moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il

représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz).

D/la pale

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profit aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée en matériau suffisamment résistant à la force de pression exercée par le vent. Pour cela, les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante. Pour une meilleure efficacité énergétique, les pales s'affinent vers l'extrémité et sont variées dans leur longueur, les principaux éléments constituant les pales sont : la longueur, la largeur, le profil, le matériau et le nombre.

✓ Longueur

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée, la détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibration, surtout pour les très longues pales.

✓ Largeur

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotations plus élevée, on préfère des pales fines et légères.

✓ Le profil

Il est choisi en fonction du couple désiré : pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (>100KW) prennent la forme d'une hélice.

✓ les matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, donc essentiellement doivent répondre à plusieurs exigences: être assez légers, résistant à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usinage simple. On rencontre plusieurs types de matériaux.

Le bois il est simple à travailler et résiste bien à la fatigue mais il est sensible à la corrosion.

Le lamellé-collé, c'est un matériau composite constitué d'empilement de lamelle de bois collée ensemble

Les alliages d'aluminiums, pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

Les matériaux composites ; leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées

✓ le nombre de pales

Les éoliennes à marche lente ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre.

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et plus simple mais elle est la source de vibration qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risque de vibration, bruit plus faible, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

E/le moyeu

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure

I.4.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de

puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public. La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs.

I.4.3 Les différents types d'éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-1 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIMÈTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tab. (I-1) : Classification des turbines éoliennes [16]

Les raisons pour choisir une grande éolienne

✓ Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une

petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.

✓ Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

✓ Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

Les raisons pour choisir une éolienne plus petite

✓ Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

✓ La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

✓ Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

✓ Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36KW)

I.4.4 Modes de fonctionnement

I.4.4.1 fonctionnement à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure (I-5)). Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine), tend à accélérer la vitesse de génératrice, cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau.

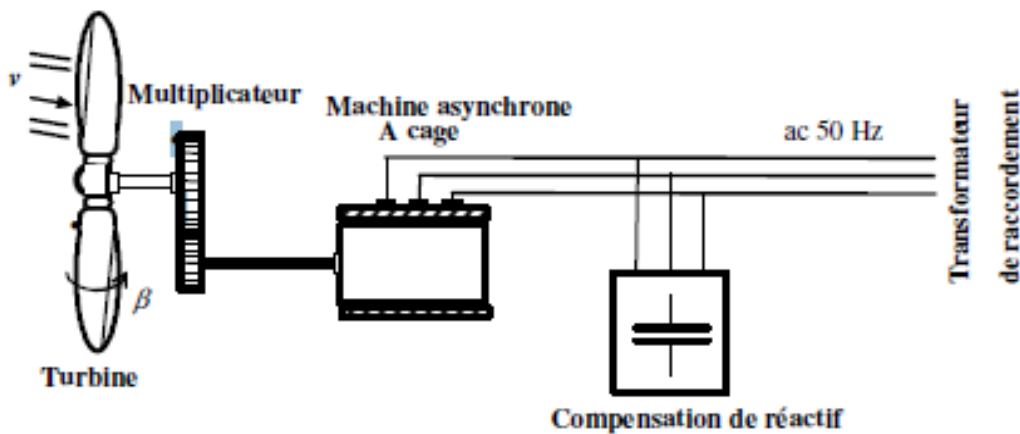


Figure (I-5) : Eolienne à vitesse fixe

I.4.4.2 Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation

La figure (I.6) représente la courbe de la puissance en fonction de la vitesse de vent. En suivant cette courbe continuellement l'éolienne recueillera toujours la puissance maximale. Ainsi, afin de maximiser la puissance convertie, la vitesse de la turbine doit donc être adaptée par rapport à la vitesse du vent. C'est pourquoi les éoliennes de forte puissance raccordées aux réseaux moyenne et haute tension fonctionnent de plus en plus fréquemment à vitesse variable.

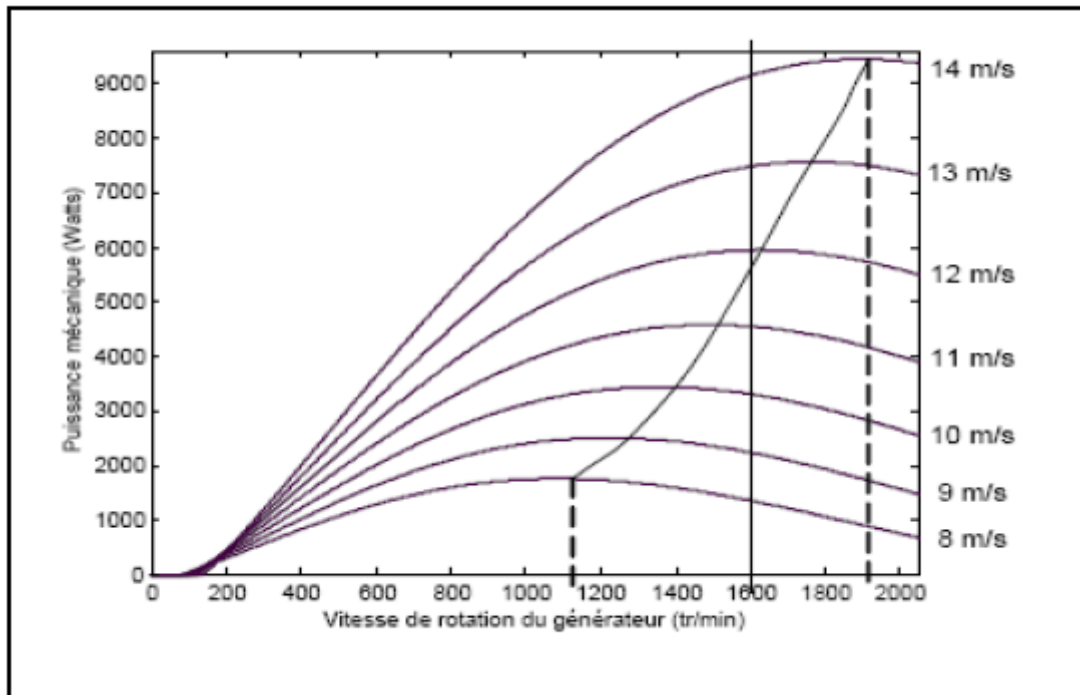


Figure (I -6) : puissance éoliennes en fonction de la vitesse de rotation pour les différentes puissance de vent [5]

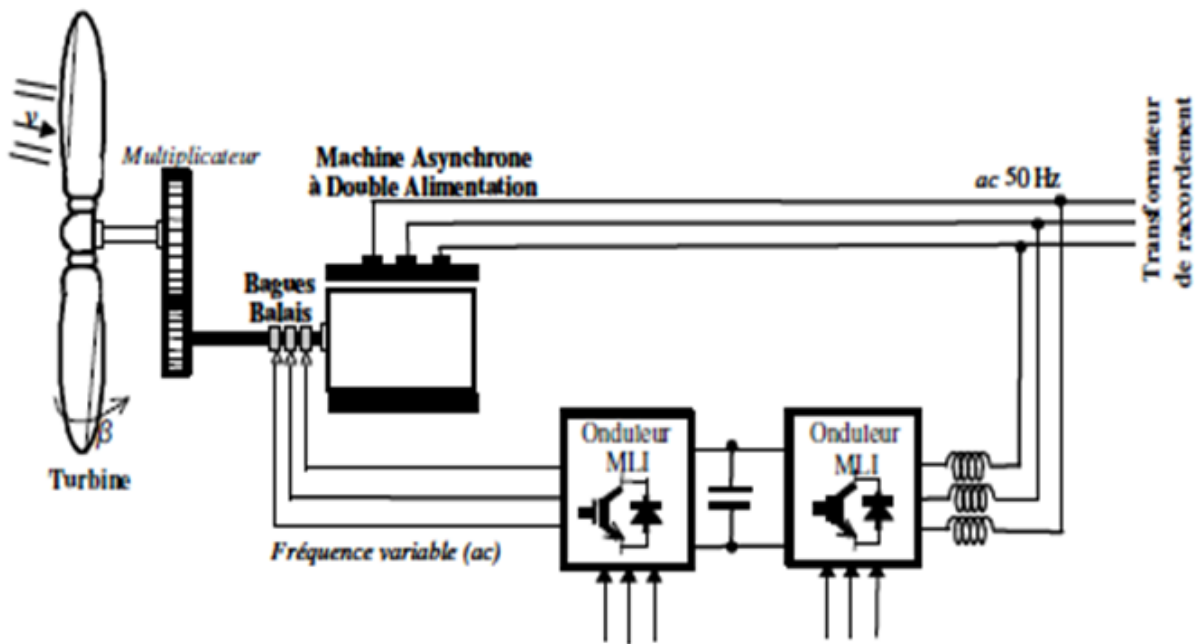


Figure (I -7) : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation

I.4.4.3 Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone

Les éoliennes basées sur une génératrice asynchrone à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessiter un système de bagues et de balais et un multiplicateur, induisant des coûts significatifs de maintenance.

Pour limiter ces inconvénients, certains constructeurs ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à grand nombre de paires de pôles et couplées directement à la turbine, évitant ainsi le multiplicateur.

Si, de plus, la génératrice est équipée d'aimants permanents ; le système de bagues et de balais est éliminé. L'inconvénient de cette structure, est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau, des convertisseurs de puissance dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vue du contrôle de l'éolienne. En effet, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci en limitant le pitch control à une fonction de sécurité par grand vent.

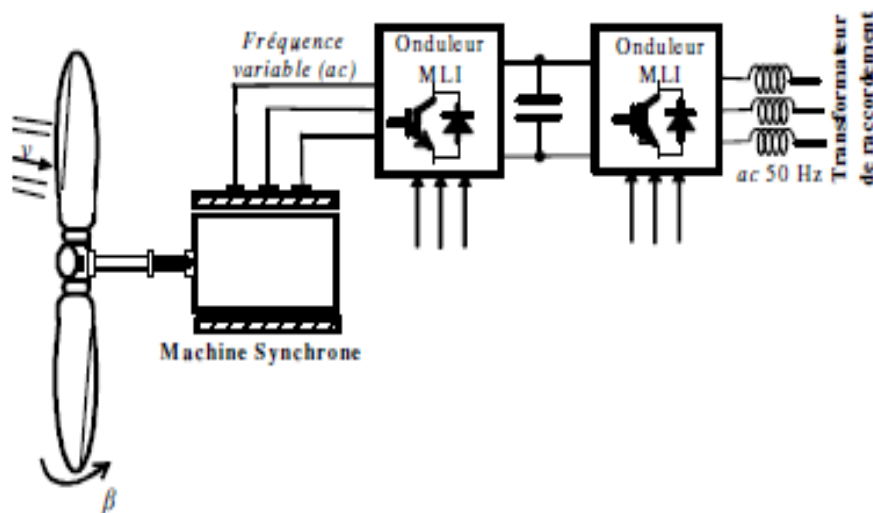


Figure (I -8) : Eolienne à vitesse variable basée sur une machine synchrone à grand nombre de paires de pôles

I.5 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier de charge pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisés dans la construction éolienne.

I.5.1 Machine asynchrone à cage

Les machines asynchrones sont les plus simples à fabriquer et moins coûteuses. Elles ont des avantages d'être standardisées fabriquées à une très grande quantité et dans une grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en terme d'entretien et présentent un taux de défaillances très peu élevés. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de configuration de bobinage du stator (nombre de pôles) et donc l'utilisation de machines de type DAHLANDER est une solution parfois utilisée, mais encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser des variateurs de fréquences, mais cette solution globalement coûteuse et donc rarement exploitée. Ces machines peuvent être facilement utilisées dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au-delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport au système à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients.

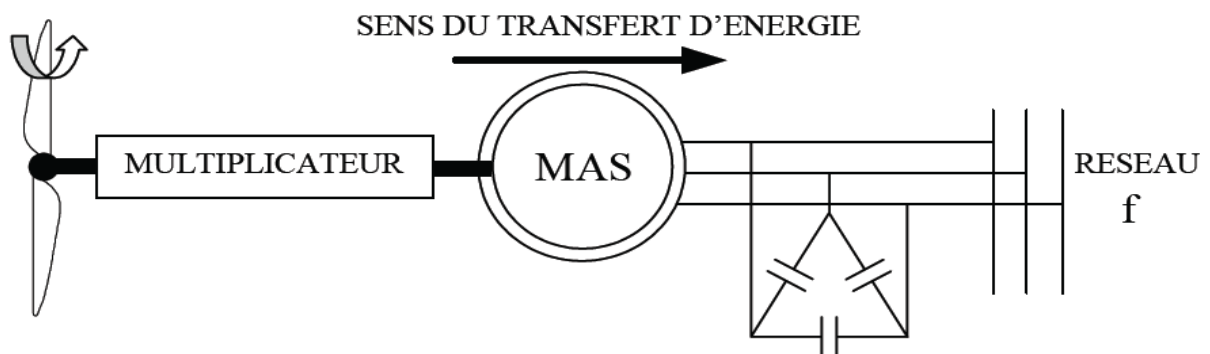


Figure (I-9) : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

I.5.2 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

La tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. La présence des convertisseurs entraîne des perturbations qui nuisent

au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur.

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre.

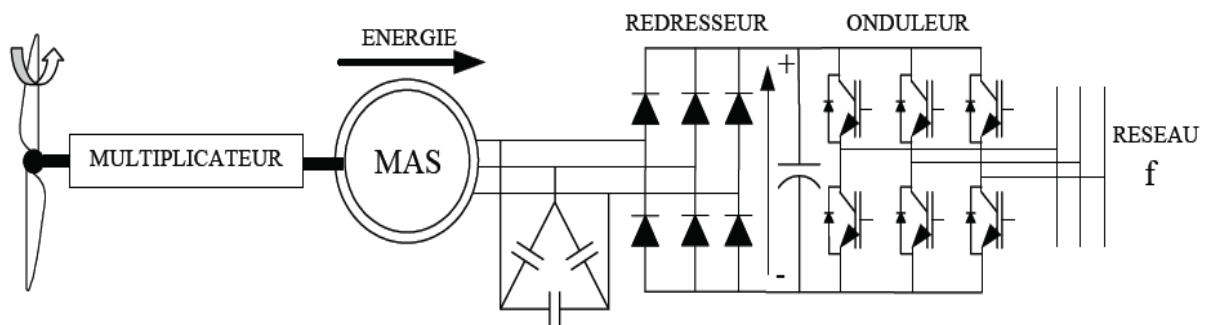


Figure (I -10) : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

I.5.3 Machine asynchrone à double alimentation MADA (rotor bobiné)

La machine asynchrone avec double alimentation MADA avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui de la machine asynchrone classique et un rotor continuant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrit ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcôt engendré par la présence de bobinage au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur les convertisseurs.

I.5.3 .1 Machine asynchrone à double alimentation MADA à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration est représentée sur la figure suivante, le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie de redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse

variable en restant dans la partie stable de la caractéristique de la machine asynchrone, le glissement est ainsi modifié en fonction de vitesse de rotation du moteur.

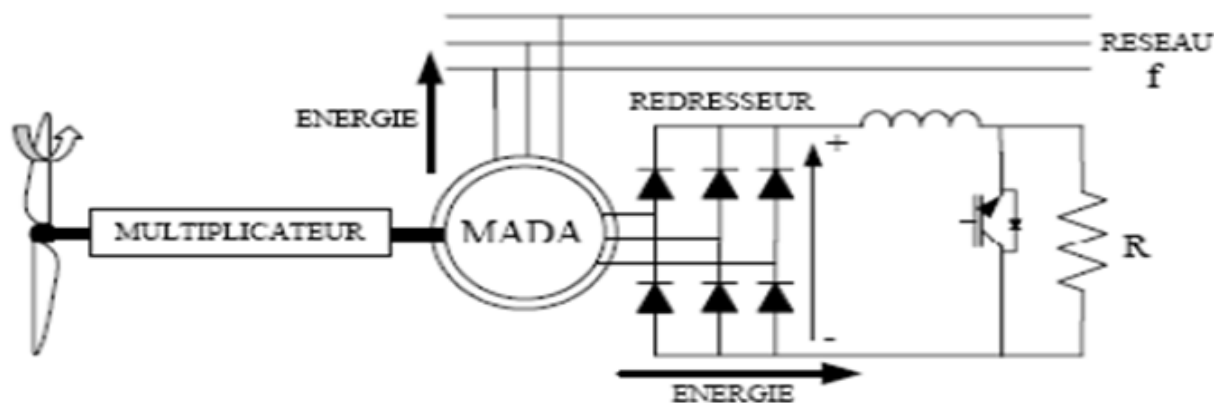


Figure (I-11) : MADA avec contrôle du glissement par énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R, ce qui nuit au rendement du système. De plus, cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Les contacts glissants sont ainsi évités, la variation maximale de glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

I.5.3.2 Machine asynchrone à double alimentation MADA-structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui envoie l'énergie de glissement vers le réseau (structure de KRAMER Figure (I-12))

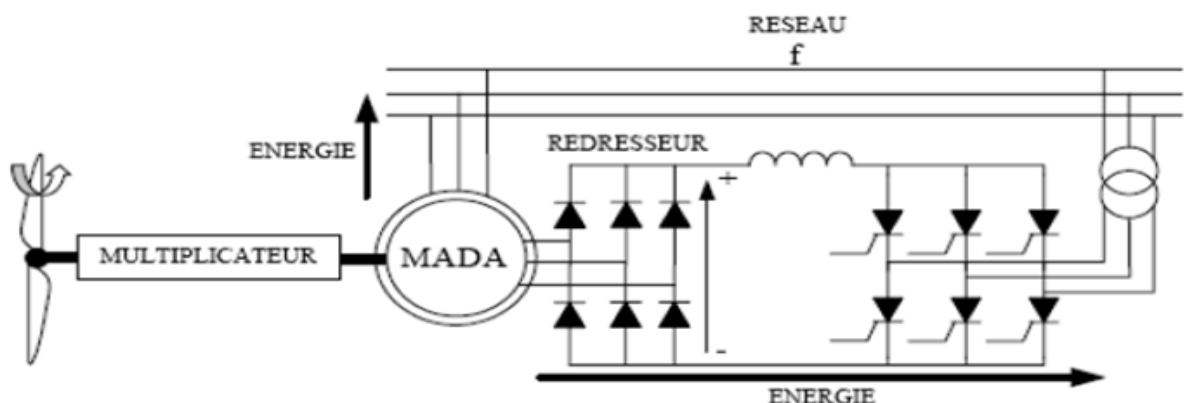


Figure (I-12) : MADA structure de KRAMER

L'ensemble redresseur - onduleur est alors dimensionné pour une fraction de puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille de

convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine .Afin de respecter cette contrainte ,le glissement est maintenir à 30% .l'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance ,de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau),donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieure au synchronisme.

I.5.3.3 Machines asynchrones à double alimentation –structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur :

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur de la Figure (I-13), l'ensemble est alors appelé structure de SCHERBIUS.

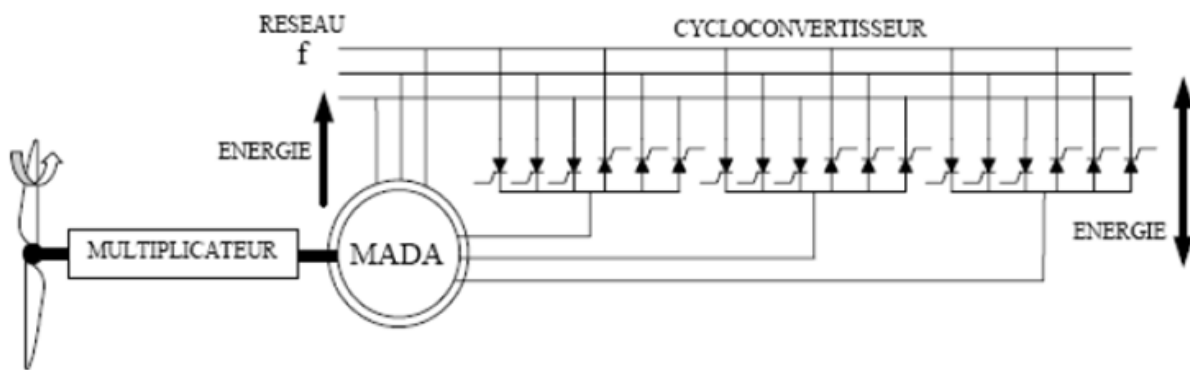


Figure (I-13) : Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur

En effet si la variation de glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hypo- synchrone) ou négative (fonctionnement hyper-synchrone).

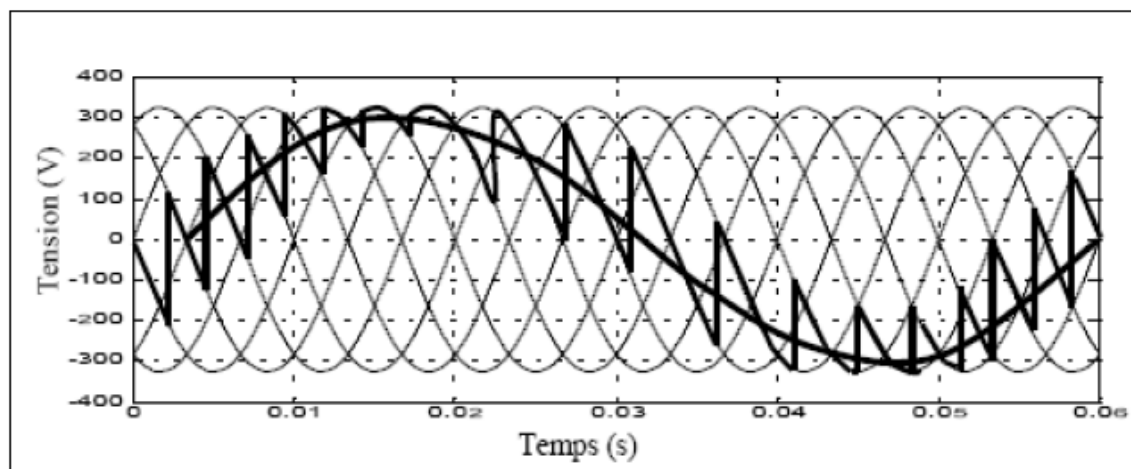


Figure (I-14) : Principe de fonctionnement de cycloconvertisseur

Le principe de cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de produire une onde de fréquence inférieure (Figure (I-14)) Son utilisation

génère par conséquent des perturbations harmoniques plus importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit en remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

I.5.3.4 Machines asynchrones à double alimentation –structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI :

Cette configuration aux mêmes caractéristiques que la structure scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistor IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle de GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsion dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal.

La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle de facteur de puissance coté réseau.

Si le glissement reste inférieur à 30% autour de synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypo-synchrone permet de produire l'énergie au stator vers le réseau, mais également du rotor vers le réseau.

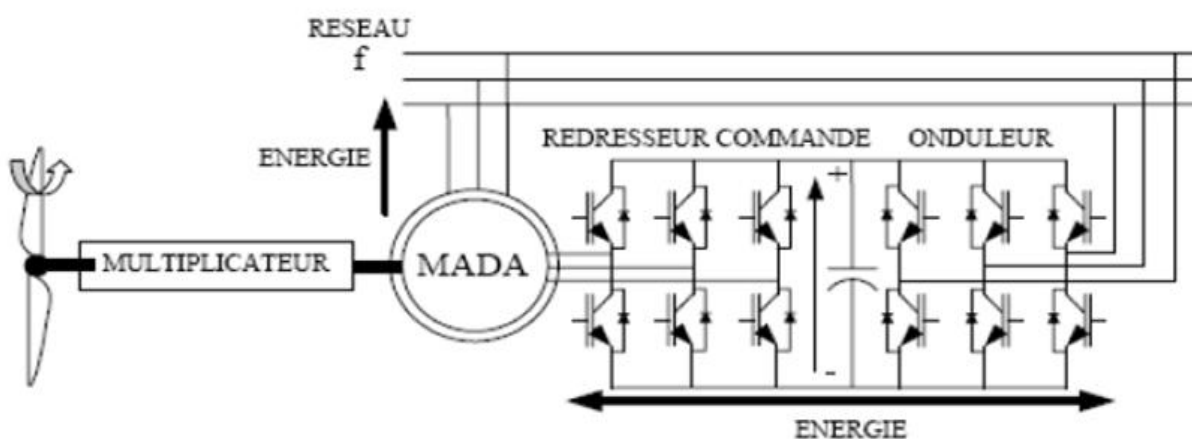


Figure (I-15) : Structure de scherbius avec convertisseur MLI

La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence de convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotorique et faire circuler des courants des fréquences élevées dans ces mêmes enroulements.

I.5.4 Génératrices synchrones

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes.

Par contre les machines synchrones sont connues pour offrir des couples plus importants à des dimensions convenables. Elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence des batteries de condensateur ou d'une source de tension indépendante, par contre la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit car étant beaucoup trop rigide. Une électronique de puissance s'impose pour toute application utilisant ce type de machine qui sont donc à vitesse variable. Le développement de matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie.

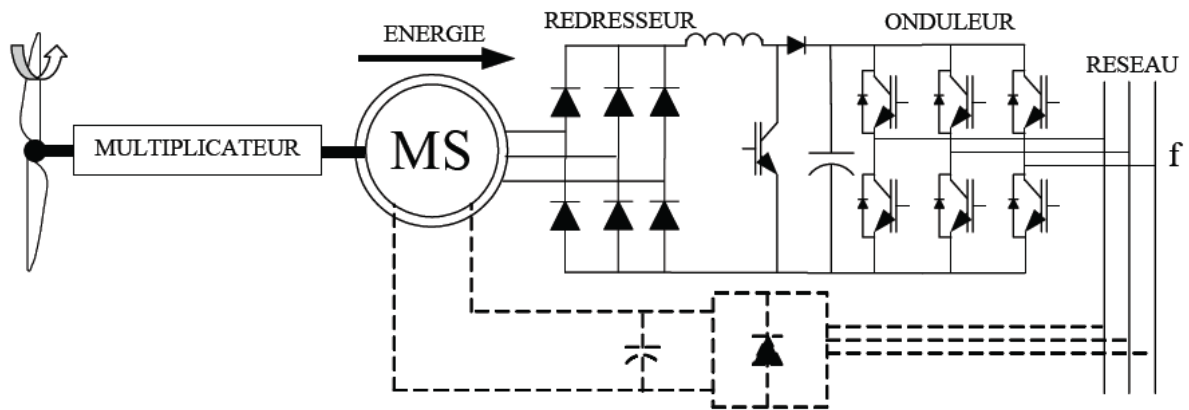


Figure (I -16) : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI

I.5.5 Machine à Courant Continu

Ce type de machine n'est utilisé que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieure à 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure.

Elles sont également utilisées sur les bateaux, en association avec des panneaux solaires.

Pour une telle machine, les équations de fonctionnement sont simples. Elle comporte un stator portant le circuit inducteur (bobinages alimentés ou aimants permanents) *excitation* et un rotor constituant le circuit induit connecté aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs.

La tension est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'éolienne et à la valeur du courant d'excitation.

I.6 Stockage d'énergie

Pour avoir une plus grande souplesse d'utilisation d'énergie et une meilleure efficacité du système éolien, il faudrait pouvoir stocker l'énergie durant les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer quand il n'y a plus de vent. Le stockage se fait le plus souvent sous une forme autre que l'énergie électrique et demande donc des conversions énergétiques ; le rendement global du stockage est donc très variable en fonction des procédés choisis.

Il existe différentes possibilités de stockage.

Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par batterie d'accumulateurs. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus.

Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre 2 réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé. Le simple pompage

de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire.

Principe : l'énergie éolienne sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie.

Le stockage thermique commence aussi à se développer, essentiellement pour le chauffage. Les différents types de stockage thermique existant sont utilisés : réservoir de fluides, chauffage de produits à haute capacité thermique, etc.

Principe : l'énergie produite est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir qui restituera pendant les périodes sans vent l'énergie stockée.

I.7 Systèmes de protection et de régulation

Quel que soit le type d'aéromoteur, il est nécessaire pour éviter sa destruction lorsque les vents sont trop violents qu'il soit équipé d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine.

Les systèmes peuvent agir de façons différentes et plus ou moins fines avec un degré d'automatisme nul ou intégral.

I.7.1 Système de freinage manuel

C'est le moyen le plus simple de préserver une machine de la destruction. Lorsque le vent atteint une certaine force un opérateur immobilise la machine soit à l'aide d'un frein, soit en plaçant l'hélice parallèle au vent (mise en drapeau), soit en modifiant le calage des pales pour obtenir un couple moteur nul (système le plus efficace).

I.7.2 Système de freinage automatique

Les deux moyens cités précédemment peuvent être automatiques par action du vent sur une « palette » de commande.

La palette annexe est parallèle et solidaire du plan de rotation de l'hélice. Lorsque la pression du vent sur cette palette, proportionnelle au carré de la vitesse et à la surface de la palette, $k SV^2$, $k \sim 0,9$, atteint un certain seuil, elle peut entraîner la commande d'un frein ou la mise en drapeau.

Ce dispositif peut être associé à un ressort qui replace l'hélice dans sa position normale lorsque l'action du vent sur la palette annexe a cessé.

Ces systèmes ne peuvent être utilisés qu'avec des aéromoteurs dont la vitesse de rotation n'a pas à être constante. D'autre part ils présentent l'inconvénient majeur d'interrompre le fonctionnement de l'aéromoteur au-delà d'une certaine vitesse de vent.

I.7.3 Système de régulation par frein aérodynamique centrifuge

Les pales principales sont fixes (calage constant). La régulation comporte 2 palettes P_1 et P_2 articulées en O_1 et O_2 sur un support normal à l'axe des pales principales. Ces palettes ont leur partie avant un peu plus longue et plus lourde que la partie arrière. Elles sont maintenues à la position repos par les tiges t_1 et t_2 et les ressorts tarés x_1 et x_2 .

Jusqu'à une certaine fréquence de rotation f_0 (c'est-à-dire la vitesse de vent correspondante V_0), les palettes restent concentriques. En formant un volant d'inertie, elles tendent à maintenir la fréquence de rotation stable lorsque la vitesse du vent varie pendant de bref instants (petites rafales).

Les pales ayant un calage fixe, la fréquence de rotation augmente avec la vitesse du vent. Lorsque cette vitesse dépasse V_0 , la fréquence de rotation dépasse f_0 , la force centrifuge et la pression de l'air sur les palettes deviennent prépondérantes. Les palettes P_1 et P_2 pivotent autour d' O_1 et O_2 et prennent la position correspondant au freinage (voir figure ci-dessous).

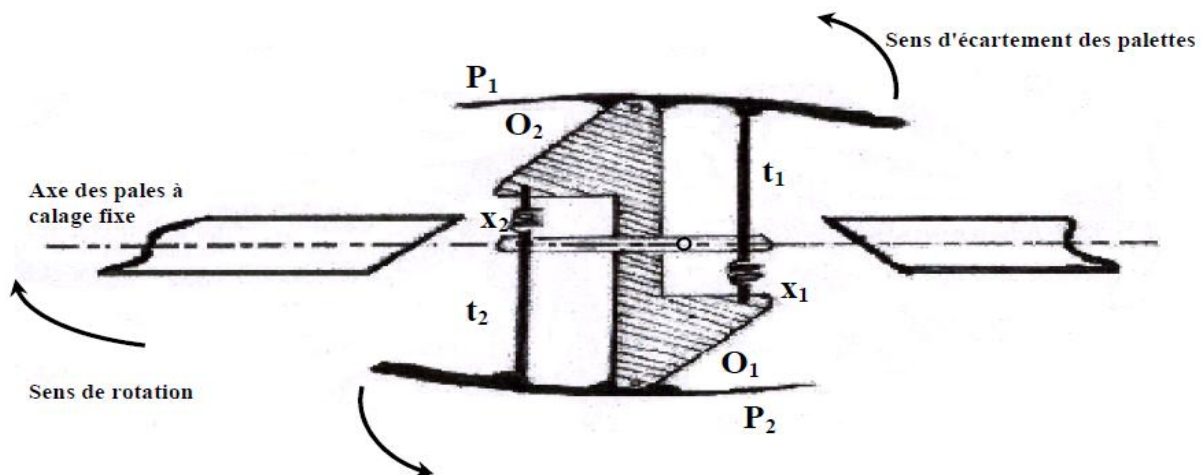


Figure (I-16) : Système de régulation par frein aérodynamique centrifuge 'frein pneumatique' [5]

La vitesse diminue alors et l'action des ressorts x_1 et x_2 redevient prépondérante, ramenant les palettes à leur position initiale. Si le vent est toujours supérieur à V_0 le processus recommence. En fait, le mouvement réel ne présente que de faibles variations de position autour d'une position d'équilibre. En fonctionnement, les palettes semblent conserver une

position d'équilibre fixe. Mais la vitesse de rotation n'est pas très stable pour toute la plage d'utilisation de vitesse du vent.

En plus de ce système de régulation, un frein peut permettre d'immobiliser la machine en cas de tempête, d'arrêt urgent ou de non-utilisation.

I.7 .4 Régulation par variation du calage des pales

La régulation consiste à conserver une fréquence de rotation constante de l'hélice pour toute une gamme de vitesses de vent. Cette régulation est obtenue en faisant varier l'angle de calage α , et par suite l'angle d'incidence i qui est l'angle entre la direction de la vitesse du vent relatif et l'axe de la pale.

✓ Régulation par mise en drapeau

Principe ; la pale est orientée en incidence légèrement négative et le profil ne porte plus.

Avantage ; limiter les contraintes sur les pales par fort vent. Les machines qui utilisent ce système exigent d'être freinées pour un vent supérieur ou égal à 36 m/s.

✓ Régulation par décrochage aérodynamique

Principe ; on provoque une diminution de α , ce qui entraîne une augmentation de l'angle d'incidence i de sorte que la traînée de la pale augmente considérablement tandis que sa portance diminue (le système charge la machine et il est source de phénomènes de fatigue). Le système garantit une bonne régulation pour des vents inférieurs ou égaux à 60 m/s.

✓ Régulation par asservissement du calage

Les deux systèmes précédents peuvent fonctionner par commande directe du calage, un vérin hydraulique dans l'arbre porte-hélice creux par exemple.

Le vérin modifie le calage des pales en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Ce système, plus souple mais techniquement plus complexe, est réservé aux grandes machines.

I.7 .5 Freinage mécanique

Les dispositifs de commande sont également nombreux : frein à main, frein à air comprimé, frein électromécanique ou électromagnétique : le frein est inséré au plus près du disque éolien lorsqu'il y a une ligne d'arbre avec multiplicateur incorporé ; il agit de façon progressive pour réduire les contraintes élevées apparaissant lors d'un freinage brutal sur une

roue de plus grande inertie. Le freinage d'une machine constitue un élément de sécurité si important que, bien souvent, on conjugue diverses solutions qui participent à la limitation en vitesse de rotation puis à l'arrêt.

I.7.6 L'éclissage

Il s'agit d'effacer plus ou moins soit le disque éolien soit la totalité du système. Soit on efface totalement ou partiellement le rotor soit l'ensemble du pylône et de la machine peut être ramené à terre grâce à un vérin hydraulique.

I.8 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de, ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des avantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.8.1 LES AVANTAGES

- ✓ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- ✓ Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable.
- ✓ Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- ✓ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

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

✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, selon l'article [35] le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.

✓ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple

I.8.2 LES INCONVENIENTS

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

✓ L'impact visuel : Ca reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.

✓ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.

✓ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien n'est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger.

Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.

✓ La source d'énergie éolienne étant stochastique [34], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance

produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

✓ Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien.

CONCLUSION

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays, afin de produire une énergie propre et durable.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons donné une vue d'ensembles des différents turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique, afin d'arriver à une meilleure compréhension de fonctionnement des turbines éoliennes. Nous avons aussi décrit de façon explicite les différents éléments constitués la turbine.

Dans la deuxième partie est consacrée au principe de fonctionnement et les différents modes de fonctionnement (fonctionnement à vitesse fixe et fonctionnement à vitesse variables).

La troisième partie présente un état de l'art sur les dispositifs électrotechniques (machines plus convertisseur) permettant de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de l'éolienne en énergie électrique.

Dans la quatrième partie nous avons donné quelques notions sur le stockage de l'énergie éolienne et les systèmes de protection et de régulation, enfin, on a parlé sur les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

CHAPITRE II

ETUDE DE LA MADA EN RÉGIME PERMANENT

Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) présente un stator triphasé identique à celui des machines classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé.

Ce type de machine est utilisé comme générateur dans la plupart des projets de centrales éoliennes afin de permettre une production optimale d'électricité quelles que soient les conditions de vent et de vitesse de l'éolienne. Cette machine présente des avantages de par son contrôle et son fonctionnement pour la production d'électricité, en plus de son prix compétitif et de sa grande robustesse.

En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. De plus, le contrôle des tensions rotoriques nous permet de maîtriser les puissances produites tant au niveau actif que réactif, ce qui est un point très intéressant pour la gestion de l'éolienne et la participation aux services systèmes.

II-1 Machine asynchrone doublement alimentée (MADA)

La MADA est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé de distribution alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le mode de fonctionnement.

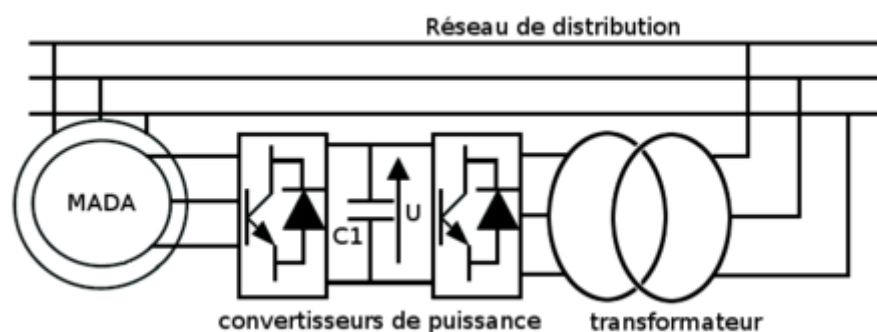


Figure (II -1) : Schéma d'une machine asynchrone doublement alimentée

II-1 -1 rôle

Le rôle de la génératrice asynchrone à double alimentation (MADA), est qu'elle est utilisée principalement pour la production de l'énergie électrique, en transformant l'énergie

mécanique fournie par l'éolienne en énergie électrique sous forme de courant alternatif qu'elle peut fournir à une installation autonome ou débiter directement sur un réseau.

II-1 -2 Constitution de la MADA

Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, et la partie tournante appelée rotor. Le stator permet de créer un champ tournant au moyen de courants alternatifs alors que le rotor va créer un champ continu qui va tourner lors de la rotation de la machine. Le couplage entre les deux champs nous permettra d'expliquer le fonctionnement du système.

II-1 -2 -a stator

C'est la partie fixe, elle comporte une carcasse en acier reformant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre creux ; ces tôles sont percées de trous à leur périphériques intérieures. L'alignement de ces trous forme des encoches ou se loge le circuit triphasé dont chaque phase notée 'a', 'b' et 'c', régulièrement espacées et orientées dans les directions $\xi = 0$, $\xi = 2\pi/3p$ et $\xi = 4\pi/3p$, et respectivement parcourues par les courants $i_a(t)$, $i_b(t)$ et $i_c(t)$.

II-1 -2 -b rotor

C'est la partie tournante de la machine. Il est réalisé, comme le stator, d'un empilement de tôles magnétiques formant un cylindre plein, monté sur un arbre en acier, capable de tourner. Le bobinage du rotor est le siège des courants induits. Il s'agit d'un circuit triphasé monté en étoile supportant de très forts courants. Dans ce cas les trois bornes sont reliées à trois bagues sur les quelles appuyant trois balais constituant les bornes fixes accessibles du rotor.

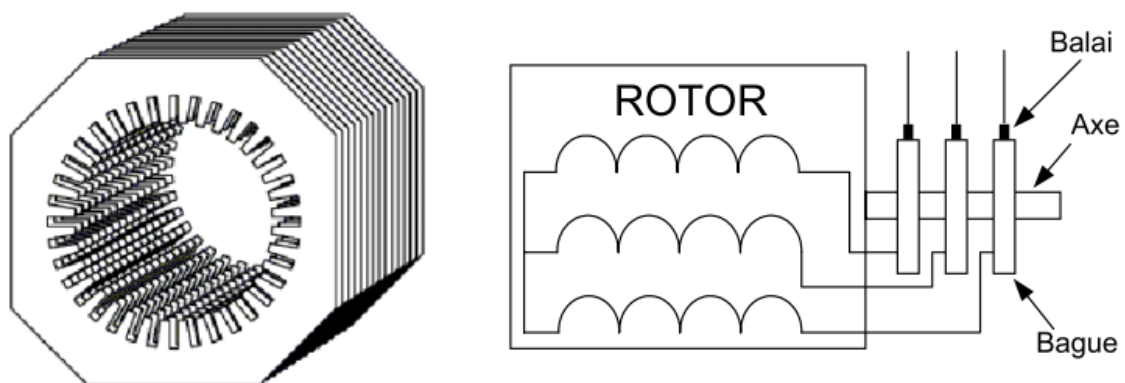


Figure (II -2) : Structure du stator et des contacts rotorique de la MADA

II-1 -2 -c La vitesse de synchronisme

On appelle vitesse de synchronisme la vitesse N_s à laquelle tourne le flux tournant c'est-à-dire le champ statorique qui est proportionnel à la fréquence de la source d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles.

$$N_s = \frac{60f}{P}$$

II-1 -2 -d Le champ tournant

Les courants statoriques créent un flux magnétique variable à travers les inductances propres et mutuelles en fonction du temps, appelé champ tournant qui tourne à la vitesse de synchronisme Ω_s [rad/s].

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{P}$$

Avec

Ω_s : vitesse mécanique synchrone du champ tournant en [rad/s].

ω_s : Pulsation électrique synchrone du champ tournant en [rad/s].

P : nombre de paires de pôles.

II-1 -2 -e Le glissement

C'est l'écart relatif de la vitesse de rotation du rotor par rapport à la vitesse de synchronisme, le rotor tourne à la vitesse N_r différente de N_s , ce que nous permet de dire que le rotor glisse vis-vis du champ tournant, ce glissement dépend de la charge et il a pour expression :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (II-1)$$

N_s : vitesse de rotation du champ statorique en [tr/min].

N_r : vitesse de rotation du rotor en [tr/min].

II-1 -2 -f Le couple

Le rotor tourne sous l'effet du couple qui est généré par le flux tournant réel qui est le flux d'entrefer résultant des deux flux rotorique et statorique appelé couple électromagnétique

II-2 Modes de fonctionnement

Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchrone car la fréquence est imposée par le réseau : la vitesse du rotor est presque constante.

Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse de vent, en effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hypersynchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. la vitesse variable permet à éolienne de fonctionner sur une plage plus large de vitesses de vent.

II-2 -1 Fonctionnement à vitesse variable

La figure (II-3) montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur. P_{res} La puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s la puissance transitant par le stator, P_r la puissance transitant par le rotor et P_{mec} la puissance mécanique.

II-2 -1 -a Fonctionnement en moteur: $P_{mec} \leq 0$

La puissance est fournie par le réseau, si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, on distingue deux types de fonctionnement (fonctionnement en hypo synchrone et fonctionnement en hypersynchrone).

Hypo- synchrone ($g \geq 0$): (La figure II-3) ; montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. Dans ce cas on a :

$$P_{mec} = \frac{1-g}{g} \{P_r - R_r |\bar{I}_r|^2\} \leq 0 \Rightarrow P_r \leq R_r |\bar{I}_r|^2 \quad (II-2)$$

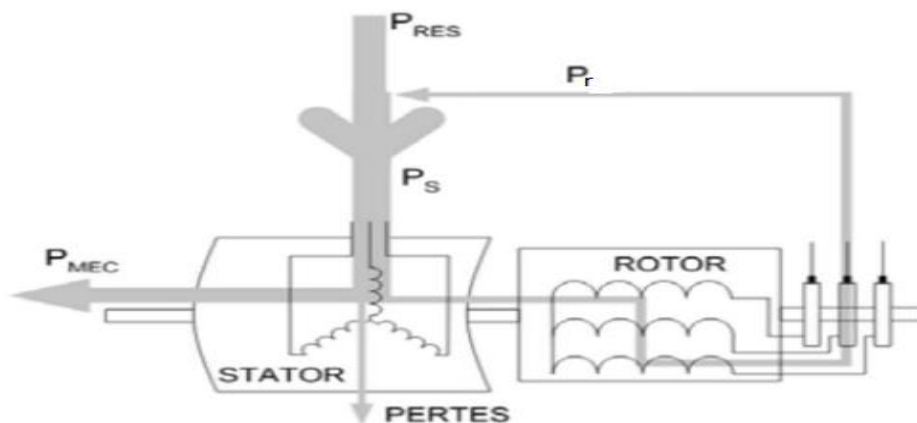


Figure (II -3) : fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

Hyper synchrone ($g < 0$): La figure (II-4) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor.

On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

Avec des hypothèses ($P_{mec} \leq 0$) et ($g < 0$) on a :

$$P_{mec} = \frac{1-g}{g} \{P_r - R_r |\bar{I}_r|^2\} < 0 \Rightarrow \{P_r - R_r |\bar{I}_r|^2\} > 0 \quad (II-3)$$

$$\Rightarrow P_r > R_r |\bar{I}_r|^2 > 0 \quad (II-4)$$

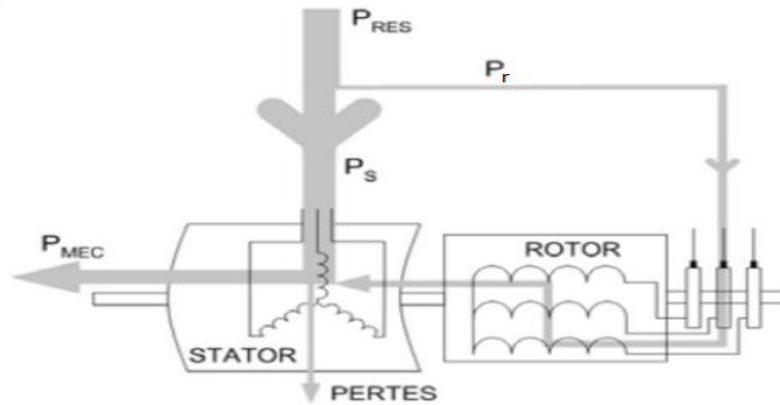


Figure (II -4) : fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

II-2 -1 -b Fonctionnement en génératrice: ($P_{mec} \geq 0$)

Le comportement est similaire au précédent, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. On distingue deux types de fonctionnement (fonctionnement en hyposynchrone et fonctionnement en hypersynchrone).

Hyposynchrone ($g \geq 0$) : La figure (II-5) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator au rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

Dans ce cas on :

$$P_{mec} = \frac{1-g}{g} \{P_r - R_r |\bar{I}_r|^2\} \geq 0 \Rightarrow P_r \geq R_r |\bar{I}_r|^2 \geq 0 \quad (II-5)$$

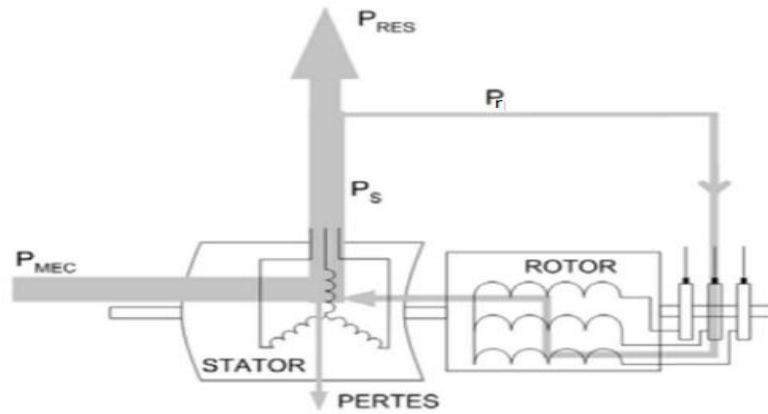


Figure (II -5) : fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

Hypersynchrone ($g < 0$): la figure (II-6) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

Dans ce cas on :

$$P_{mec} = \frac{1-g}{g} \{P_r - R_r |\bar{I}_r|^2\} \geq 0 \Rightarrow \{P_r - R_r |\bar{I}_r|^2\} < 0 \quad (II-6)$$

$$\Rightarrow P_r < R_r |\bar{I}_r|^2 < 0 \quad (II-7)$$

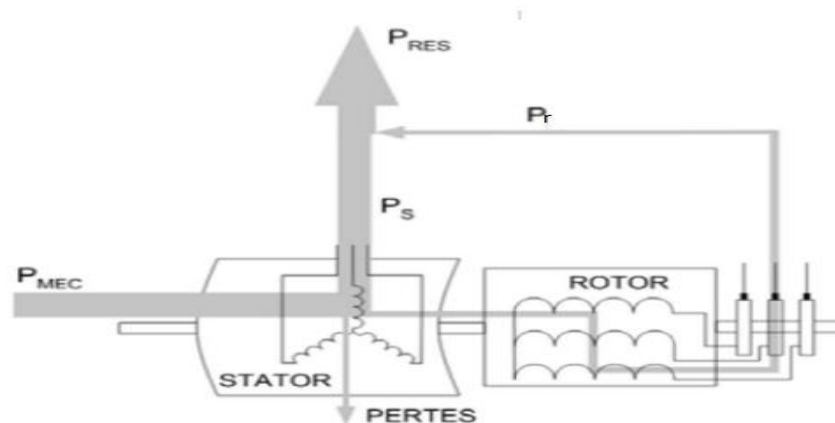


Figure (II -6) : fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

II-3 Mise en équation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation(MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant

compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter les hypothèses simplificatrices suivantes afin de pouvoir élaborer un modèle simple.

II-3 -1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation mathématique d'un système complexe, telle la machine, est éventuellement bâtie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices soigneusement formulées. Plus le nombre de ces hypothèses n'est grand, plus simple et moins précis, et ces hypothèses sont [9], [6] [17],[18]:

- La machine est symétrique et à entrefer constant
- Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté ; il résulte que les pertes fer et hystérésis sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.

La f.m.m créée dans une phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.

- L'influence de l'effet de la température n'est prise en compte, il en résulte que tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients des inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétiques.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor.
- La composante homopolaire est nulle.

II-3 -2 Conventions de signe

Bien que la machine asynchrone soit majoritairement utilisée en moteur, nous adopterons les mêmes conventions de signe pour la MADA, le rotor ou bien le stator c'est-à-dire tout les deux sont des récepteurs.

- un courant positif crée à travers sons propre enroulement un flux positif.
- une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- les angles et les vitesses sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

II-3 -3 Equation de la MADA dans le plan (abc)

II-3 -3-1 Equation électriques de la MADA

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation de la MADA et ses courants, nous considérons le modèle de la MADA idéal sur la figure (II-7).

Les trois enroulements identiques du stator et du rotor sont respectivement décalés dans l'espace d'un angle de 120°.

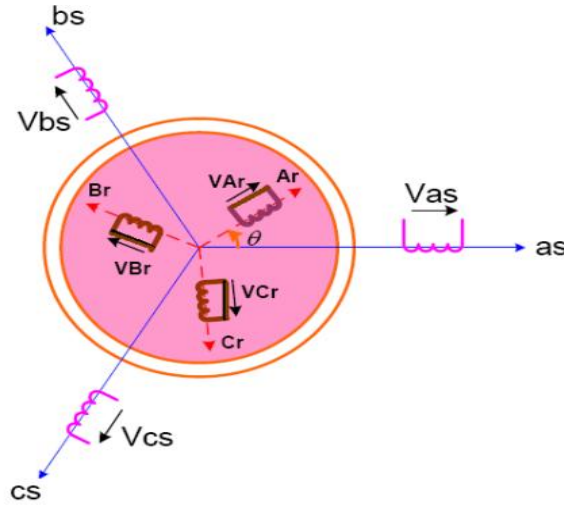


Figure (II -7) : Représentation de la MADA

as, bs, cs : phases du stator ;

Ar, Br, Cr: phases du rotor.

Les équations électriques générales de la MADA dans le stator, s'expriment de la manière suivante.

$$\begin{cases} V_{as} = R_s I_{as} + \frac{d\Phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d\Phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d\Phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (II-8)$$

Les équations électriques générales de la MADA dans le rotor, s'expriment de la manière suivante

$$\begin{cases} V_{ar} = R_r I_{ar} + \frac{d\Phi_{ar}}{dt} \\ V_{br} = R_r I_{br} + \frac{d\Phi_{br}}{dt} \\ V_{cr} = R_r I_{cr} + \frac{d\Phi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (II-9)$$

R_s et R_r sont respectivement les résistances des enroulements du stator et du rotor.

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; [R_r] = R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II-10)$$

II-3 -3-2 Equations magnétiques

Les relations entre flux et courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s & m_1 & m_2 & m_3 \\ M_s & l_s & M_s & m_3 & m_1 & m_2 \\ M_s & M_s & l_s & m_2 & m_3 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & M_r & M_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & M_r & l_r & M_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (II-11)$$

Telle que :

$$\begin{cases} m_1 = M_{sr} \cos(\theta) \\ m_2 = M_{sr} \cos(\theta - 4\pi/3) \\ m_3 = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \end{cases} \quad (II-12)$$

De cette forme matricielle, on aura :

$$(II-13)$$

Tel que:

$$[I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} ; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (II-14)$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} ; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II-15)$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (II-16)$$

$$[M_{sr}] = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (II-17)$$

Avec:

M_s : Inductances mutuelles entre deux phases du stator.

M_r : Inductances mutuelles entre deux phases du rotor.

M_{sr} : inductance mutuelle entre une phase du stator et une autre du rotor.

l_s : Inductance propre d'une phase statorique

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique

II-3 -3-3 Equations mécaniques

L'équation mécanique est donnée par la relation suivante :

$$C_e = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_r \quad (II-18)$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_e : Couple électromagnétique développé par la machine.

C_r : Couple résistant de la charge.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II-3 -4 Equation de la MADA dans le plan (dq)

II-3 -4 -1 Transformation de Park

En terme physique, la transformation de Park est la substitution aux enroulements a, b, c dont les conducteurs et les axes magnétiques sont immobiles par rapport au stator, de deux enroulements d, q dont les axes magnétiques sont solidaires du rotor et tournent avec lui. Cependant les conducteurs constituant ces nouveaux enroulements doivent être considérés comme immobiles [9] , [17].

La transformation de Park permet de faire le passage d'un système triphasé (a, b, c) vers un système (d, q, o) constitué des grandeurs diphasées équivalentes (d, q) et d'une composante homopolaire (o), qui n'est pas prise en compte dans le modèle usuel de la machine. Ainsi, les équations employées pour la modélisation de la MADA sont définies par :

$$[X_{dq0}]^t = [P(\theta)][X_{abc}]^t \quad (II-19)$$

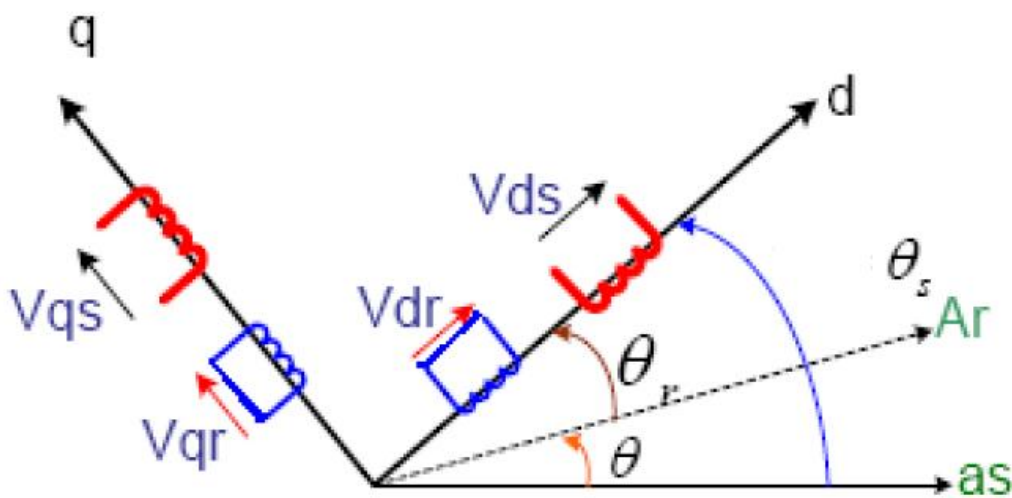


Figure (II -8) : Passage du système triphasé au système biphasé

La matrice de passage $P(\theta)$ est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-20)$$

$P(\theta)$: Est appelée la matrice de Park, le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ a été choisit pour donner une expression invariante du couple électromagnétique et de la puissance à partir de la propriété :

$$[P(\theta)^{-1}] = [P(\theta)]^t.$$

Le passage des grandeurs réelles liées au référentiel statorique X_{ABC} aux grandeurs fictives, liées au référentiel de PARK X_{dq0} , correspond aux courants, tensions et flux ainsi la matrice inverse de PARK s'écrit comme suit :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-21)$$

La transformation inverse est donnée par :

$$\begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (II-22)$$

II-3 -4-2 Equations électriques dans le plan (dq) :

$$[V_{abc}] = [R][I_{abc}] + \frac{d[\Phi_{abc}]}{dt} \quad (II-23)$$

On écrit d'autre part :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = P(\theta)^{-1}[V_{dq0}] \\ [I_{abc}] = P(\theta)^{-1}[I_{dq0}] \end{cases} \quad (II-24)$$

L'équation devient :

$$P(\theta)^{-1}[V_{abc}] = P(\theta)^{-1}[R][I_{dq0}] + \frac{d}{dt}(P(\theta)^{-1}[\Phi_{abc}]) \quad (II-25)$$

On multiplie à gauche par $P(\theta)$. On obtient alors :

$$[V_{abc}] = [R][I_{dq0}] + P(\theta) \frac{d}{dt}(P(\theta)^{-1})[\Phi_{abc}] + \frac{d\Phi_{dq0}}{dt} \quad (II-26)$$

On a:

$$P(\theta) \frac{dP(\theta)^{-1}}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (II-27)$$

En appliquant la transformation de Park aux équations de la MADA, On trouve :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II-28)$$

L'équation peut s'écrire au stator et au rotor sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (II-29)$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (II-30)$$

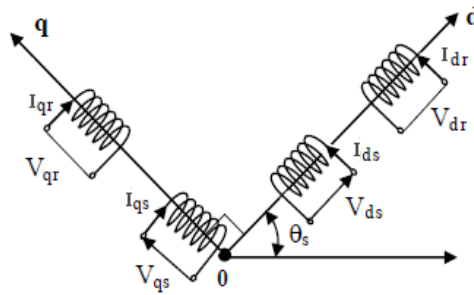


Figure (II -9) : Modèle de la MADA dans le repère de Park

II-3 -4-3 Equation magnétique

En appliquant la transformation de Park aux équations donnant le flux. On obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{dr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} \Phi_{qs} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (II-31)$$

Le système matriciel peut être écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr} \\ \Phi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr} \end{cases} \quad (II-32)$$

Avec :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance propre cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance propre cyclique du rotor.

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

II-4 Modèle de la MADA en régime permanent :

Le modèle de la MADA en régime permanent est obtenu en annulant les dérivés par rapport au temps dans le système d'équations électriques (II-28)

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II-33)$$

En remplaçant les flux par leurs expressions respectives données par le système (II-32) et le système deviennent.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_r L_r I_{qr} - \omega_r M I_{qs} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r L_r I_{dr} + \omega_r M I_{ds} \end{cases} \quad (II-34)$$

Pour transformer ce système de quatre équations en un système à deux, une pour le stator et l'autre pour le rotor en introduisant les phaseurs tension et courant suivant :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = V_{ds} + jV_{qs} \\ \bar{V}_r = V_{dr} + jV_{qr} \\ \bar{I}_s = I_{ds} + jI_{qs} \\ \bar{I}_r = I_{dr} + jI_{qr} \end{cases} \quad (II-35)$$

On posera

$$\begin{cases} X_s = \omega_s L_s \\ X_r = \omega_r L_r \\ X_m = \omega_s M \\ w_r = g \omega_s \end{cases} \quad (II-36)$$

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s I_{ds} - \omega_s L_s I_{qs} - \omega_s M I_{qr} + j(R_s I_{qs} + \omega_s L_s I_{ds} + \omega_s M I_{dr}) \\ \bar{V}_r = R_r I_{dr} - \omega_r L_r I_{qr} - \omega_r M I_{qs} + j(R_r I_{qr} + \omega_r L_r I_{dr} + \omega_r M I_{ds}) \end{cases} \quad (II-37)$$

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s (I_{ds} + jI_{qs}) + j\omega_s L_s (I_{ds} + jI_{qs}) + j\omega_s M (I_{dr} + jI_{qr}) \\ \bar{V}_r = R_r (I_{dr} + jI_{qr}) + j\omega_r L_r (I_{dr} + jI_{qr}) + j\omega_r M (I_{ds} + jI_{qs}) \end{cases} \quad (II-38)$$

$$\begin{cases} \bar{V}_s = (R_s + jX_s) \bar{I}_s + jX_m \bar{I}_r \\ \frac{\bar{V}_r}{g} = (\frac{R_r}{g} + jX_r) \bar{I}_r + jX_m \bar{I}_s \end{cases} \quad (II-39)$$

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

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \frac{\bar{V}_r}{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + jX_s) & jX_m \\ jX_m & (\frac{R_r}{g} + jX_r) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \quad (II-40)$$

II-4 -1 Les différents schémas équivalents de la MADA

II-4 -1-1 Schéma équivalent aux inductances couplées

A partir du système d'équations précédant (II-39) on peut aboutir à un schéma équivalent par phase dans lequel les inductances L_s et L_r sont couplés par la mutuelle inductance cyclique L_m

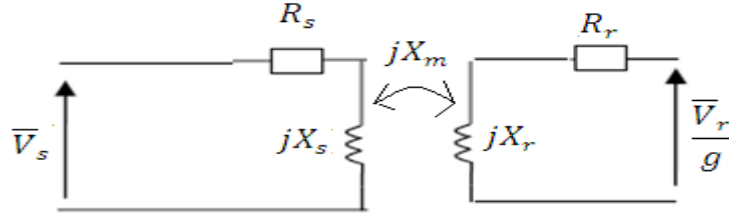


Figure (II -10) : Schéma équivalent aux inductances couplées

II-4 -1-2 Schémas équivalent en T

Pour arriver à ce schéma, on transforme le système d'équation (II-37) en ajoutant puis retranchant, respectivement au stator puis au rotor, les termes $jgX_m\bar{I}_s$ et $jX_m\bar{I}_r$.

On obtient :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s\bar{I}_s + j(X_s - X_m)\bar{I}_s + jX_m(\bar{I}_s + \bar{I}_r) \\ \frac{\bar{V}_r}{g} = \frac{R_r}{g}\bar{I}_r + j(X_r - X_m)\bar{I}_r + jX_m(\bar{I}_s + \bar{I}_r) \end{cases} \quad (II-41)$$

Posant

$$\begin{cases} N_s = L_s - L_m \\ N_r = L_r - L_m \\ \bar{I}_m = \bar{I}_s + \bar{I}_r \end{cases} \quad (II-42)$$

Avec

N_s, N_r : Inductances de fuites cycliques statorique et rotorique respectivement.

\bar{I}_m : Courant magnétisant.

Le Système devient :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s\bar{I}_s + j\omega_s N_s \bar{I}_s + jX_m\bar{I}_m \\ \frac{\bar{V}_r}{g} = \frac{R_r}{g}\bar{I}_r + j\omega_s N_r \bar{I}_r + jX_m\bar{I}_m \end{cases} \quad (II-43)$$

Les équations précédentes (II-43) peuvent être traduites par un schéma équivalent en T qui est le suivant :

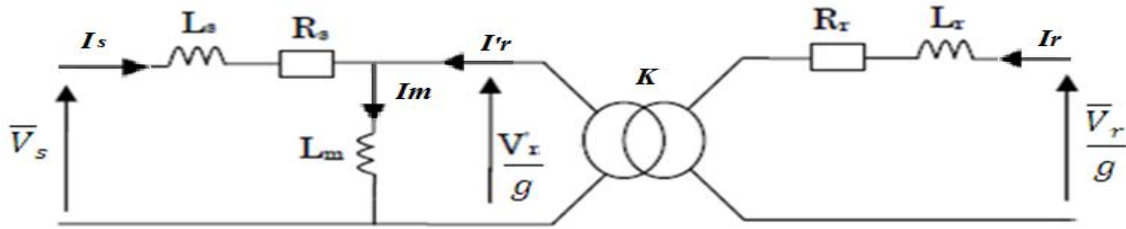


Figure (II -11) : Schéma équivalent en T

II-4 -1-3 Schéma équivalent ramené au stator avec fuites magnétiques totalisées au stator :

Soit les tensions \bar{V}'_s et \bar{V}'_r définies par :

$$\begin{cases} \bar{V}'_s = j\omega_s L_s \bar{I}_s + j\omega_s M \bar{I}_r \\ \bar{V}'_r = j\omega_s L_r \bar{I}_r + j\omega_s M \bar{I}_s \end{cases} \quad (II-44)$$

De la première équation on tire

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}'_s}{j\omega_s L_s} - \frac{L_s}{M} \bar{I}_r \quad (II-45)$$

On pose $\frac{L_s}{M} \bar{I}'_r = \bar{I}_r = K \bar{I}'_r$ (II-46)

$$\bar{V}'_r = j\omega_s L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \bar{I}_r + \frac{M}{L_s} \bar{V}'_s \quad (II-47)$$

En remplaçant \bar{I}_s donné par (II-45) dans (II-39), on obtient :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_s (\bar{I}_s + \bar{I}'_r) \\ \frac{L_s}{M} \cdot \frac{\bar{V}_r}{g} = \frac{R_r}{g} \left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \bar{I}'_r + j\omega_s N_{rr} \left(\frac{L_s}{M}\right)^2 \bar{I}'_r + j\omega_s L_s (\bar{I}_s + \bar{I}'_r) \end{cases} \quad (II-48)$$

On introduisant \bar{I}'_r dans système (II-41) et on multipliant la deuxième équation du même système par $K = \frac{L_s}{M}$ ou est le facteur de transformation de la machine.

Le système devient :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_s L_s (\bar{I}_s + \bar{I}'_r) \\ K \frac{\bar{V}_r}{g} = K^2 \frac{R_r}{g} \bar{I}'_r + j\omega_s K^2 N_r \bar{I}'_r + j\omega_s L_s (\bar{I}_s + \bar{I}'_r) \end{cases} \quad (II-49)$$

On Posant :

$\sigma = (1 - \frac{M^2}{L_s L_r})$ Coefficient de dispersion.

$N_{rr} = \sigma L_r$ Inductance de fuite totalisée au rotor

$R'_r = R_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2$ Résistance d'une phase rotorique ramenée au stator

$X_f = \omega_s N'_r \left(\frac{L_s}{M}\right)^2$ Réactance de fuite totalisée au rotor ramenée au stator.

$\bar{V}'_r = \left(\frac{L_s}{M}\right) \bar{V}_r$ Tension d'alimentation du rotor ramenée au stator.

$$\begin{cases} \bar{V}_s = R_s \bar{I}_s + jX_s (\bar{I}_s + \bar{I}'_r) \\ \frac{\bar{V}'_r}{g} = \frac{R'_r}{g} \bar{I}'_r + jX_f \bar{I}'_r + jX_s (\bar{I}_s + \bar{I}'_r) \end{cases} \quad (II-50)$$

Sous forme matricielle on aura :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \frac{\bar{V}'_r}{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + jX_s) & jX_s \\ jX_s & (\frac{R'_r}{g} + jX_f + jX_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}'_r \end{bmatrix} \quad (II-51)$$

Le dernier système nous conduit vers le schéma équivalent suivant :

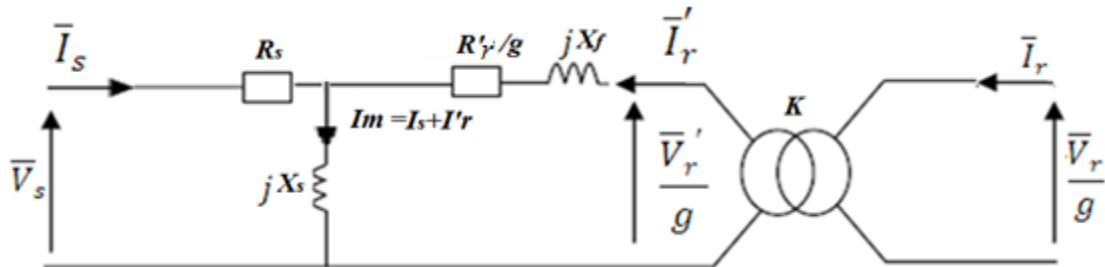


Figure (II -12) : Schéma équivalent ramené au stator avec fuites magnétiques totalisées au rotor

II-4 -2 Expression des courants rotorique et statorique :

Pour trouver les courants on inverse la matrice des impédances (II-51) et on trouve :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}'_r \end{bmatrix} = \frac{1}{(R_s R'_r - g X_s X_f) + j(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \begin{bmatrix} (R'_r + jg(X_s + X_f)) & -jgX_s \\ -jgX_s & jg(X_f - R_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \frac{\bar{V}'_r}{g} \end{bmatrix} \quad (II-52)$$

En décomposant la forme complexe de \bar{I}_s et \bar{I}'_r en Partie réelle et imaginaire et on aura le système suivant :

$$\Re(\bar{I}_s) = I_{ds} = \frac{(R_s R_r' - g X_s X_f) * (R_r' V_{ds} - g(X_s + X_f) V_{qs} + X_s V_{dr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} + \frac{(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_r' V_{qs} + g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \quad (II-53)$$

$$\Im(\bar{I}_s) = I_{qs} = \frac{(R_s R_r' - g X_s X_f) * (R_r' V_{qs} + g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} - \frac{(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_r' V_{ds} - g(X_s + X_f) V_{qs} + X_s V_{dr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \quad (II-54)$$

$$\Re(\bar{I}_r') = I'_{dr} = \frac{(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_s V_{dr}' - g X_s V_{ds} + X_s V_{dr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} + \frac{(R_s R_r' - g X_s X_f) * (R_s V_{dr}' + g X_s V_{qs} - X_s V_{qr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \quad (II-55)$$

$$\Im(\bar{I}_r') = I'_{qr} = \frac{(R_s R_r' - g X_s X_f) * (R_s V_{qr}' - g X_s V_{ds} + X_s V_{dr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} - \frac{(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_s V_{dr}' + g X_s V_{qs} - X_s V_{qr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \quad (II-56)$$

II-4 -3 Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (I_{sq} \phi_{rd} - I_{sd} \phi_{rq}) \quad (II-57)$$

En remplaçant les flux par leurs expressions données par (II-32) on obtient

$$C_{em} = pM(I_{sq} I_{rd} - I_{sd} I_{rq}) = -pL_s \Im(\bar{I}_s^* \cdot \bar{I}_r') \quad (II-58)$$

II-4 -4 Puissance active produite par la MADA

La puissance active P_{gen} produite par le générateur est définie, avec les conventions adoptées pour le rotor et le stator par :

$$P_{gen} = P_s + P_r \quad (II-59)$$

La puissance statorique P_s est elle-même la somme de la puissance p_{js} perdue par effet joule dans la résistance statorique R_s et de la puissance électromagnétique transmise au rotor P_e .

$$P_s = P_e + p_{js} = -(P_r + P_{mec} - R_r |\bar{I}_r|^2) + R_s |\bar{I}_s|^2 + P_r \quad (II-60)$$

Enfin, on déduit que P_{gen} vaut :

$$P_{gen} = P_s + P_r = -(P_r + P_{mec} - R_r |\bar{I}_r|^2) + R_s |\bar{I}_s|^2 + P_r \quad (II-61)$$

$$= -P_{mec} + R_r |\bar{I}_r|^2 + R_s |\bar{I}_s|^2 \quad (II-62)$$

$$= -P_{mec} + p_{js} \quad (II-63)$$

II-4 -5 Puissance réactive produite par la MADA

Rappelons que le rotor d'une MADA est généralement alimenté par un onduleur à MLI. La tension du bus continu de cet onduleur, qui se trouve aux bornes d'une capacité C , est maintenue constante par une commande adéquate d'un redresseur MLI. Ce dernier est alimenté par le réseau triphasé via un transformateur. De plus, la commande du redresseur

assure un facteur de puissance égale à l'unité et la puissance réactive consommée coté rotor est considérée nulle. On défini alors la puissance réactive Q_{gen} du générateur comme étant celle fournie uniquement au stator.

$$Q_{gen} = Q_s$$

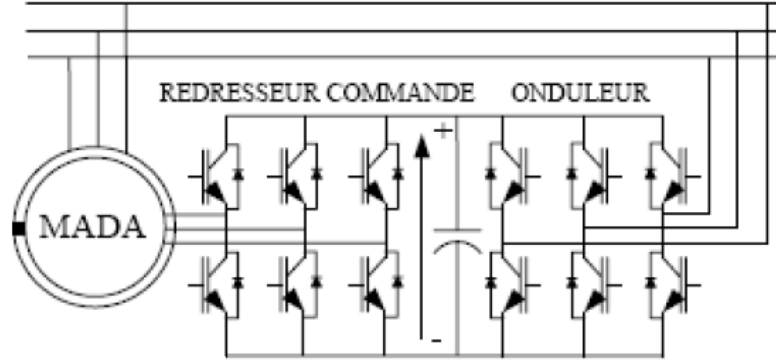


Figure (II -13) : schéma global pour un fonctionnement d'une MADA

II-4 -6 Puissance apparente produite par la MADA

La puissance apparente produite par la MADA est la somme vectorielle de la puissance apparente produite au stator et celle produite au rotor. Comme au rotor la puissance réactive est considérée comme nulle, la puissance apparente coté rotor sera identique à sa puissance active.

$$\bar{s}_{gen} = \bar{s}_s + \Re(\bar{s}_r) = \bar{s}_s + P_r = \bar{V}_s \bar{I}_s^* + \Re(\bar{v}_r * \bar{I}_r^*) \quad (II-64)$$

II-4 -7 Puissance échangée au stator et au rotor

Côté stator

$$\begin{cases} P_s = \Re(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = \Im(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (II-65)$$

$$\begin{cases} P_s = R_s(I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \omega_s M(I_{dr} I_{qs} - I_{qr} I_{ds}) \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (II-66)$$

➤ Côté rotor :

$$\begin{cases} P_r = \Re\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) = \frac{V_{dr}}{g} I_{dr} + \frac{V_{qr}}{g} I_{qr} \\ Q_r = \Im\left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) = \frac{V_{qr}}{g} I_{dr} - \frac{V_{dr}}{g} I_{qr} \end{cases} \quad (II-67)$$

$$\begin{cases} P_r = \frac{R_r}{g} (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) + \omega_s M (I_{dr} I_{qs} - I_{qr} I_{ds}) \\ Q_r = \frac{(V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr})}{g} \end{cases} \quad (II-68)$$

$$\begin{cases} P_r = \frac{R_r}{g} |\bar{I}_r|^2 + \frac{\omega_s}{p} C_{em} \\ Q_r = \frac{(V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr})}{g} \end{cases} \quad (II-69)$$

On pose :

$P_{airg} = \frac{\omega_s}{p} C_{em}$ La puissance dans l'entrefer

$p_{jr} = \frac{R_r}{g} |\bar{I}_r|^2$ Pertes joule rotoriques

$p_{js} = R_s |\bar{I}_s|^2$ Pertes joule statoriques

D'où

$$P_r = p_{jr} + P_{airg} \quad (II-70)$$

$$P_{airg} = P_r - p_{jr} \quad (II-71)$$

$$P_{airg} = \Re \left(\frac{\bar{V}_r}{g} \cdot \bar{I}_r^* \right) - p_{jr} \quad (II-72)$$

$$P_{airg} = -R_r |\bar{I}_r|^2 + \Re \left(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^* \right) + \frac{1-g}{g} \left\{ \Re \left(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^* \right) - R_r |\bar{I}_r|^2 \right\} \quad (II-73)$$

D'autre part

$$P_{airg} = \Re \left(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^* \right) - p_{jr} + P_{mec} \quad (II-74)$$

Par identification

$$P_{mec} = \left\{ P_r - R_r |\bar{I}_r|^2 \right\} \cdot \frac{1-g}{g} \quad (II-75)$$

D'où le schéma équivalent de figure (II-8) devient

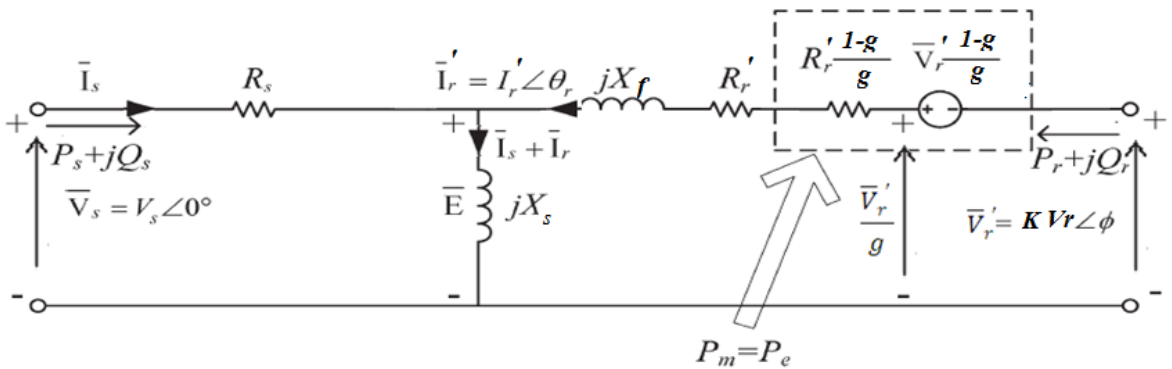


Figure (II -14) : Schéma équivalent en T réaliste [19][17]

Le schéma équivalent de la figure (II-14) est devenu plus réaliste en donnant une interprétation physique sur la source fictive $\frac{\bar{V}_r'}{g}$ et la résistance fictive $\frac{R_r'}{g}$ et cela en raisonnant sur les différentes puissances transisant par le rotor

D'après ce schéma équivalent de la figure (II-14), on peut conclure que la puissance électromagnétique P_e transmise au stator est égale à la puissance fournie par la source $\frac{\bar{V}_r'}{g}$ moins les pertes joule dissipées dans la résistance fictive $\frac{R_r'}{g}$:

$$P_e = \Re\left(\frac{\bar{V}_r'}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - \frac{R_r'}{g} |\bar{I}_r|^2 \quad (II-76)$$

D'une coté la puissance électromagnétique P_e est la somme de la puissance active P_r fournie par la source réelle \bar{V}_r , plus la puissance mécanique P_{mec} moins la puissance perdue par effet joule dans la résistance réelle R_r .

$$P_e = \Re\left(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^*\right) - P_{jr} + P_{mec} \quad (II-77)$$

En faisant membre à membre l'égalité entre les deux équations, on aboutit à l'expression de la puissance mécanique suivante :

$$P_e = \Re\left(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^*\right) - P_{jr} + P_{mec} = \Re\left(\frac{\bar{V}_r'}{g} \cdot \bar{I}_r^*\right) - \frac{R_r'}{g} |\bar{I}_r|^2 \quad (II-78)$$

$$\Rightarrow P_{mec} = \frac{1-g}{g} \Re\left(\bar{V}_r \cdot \bar{I}_r^*\right) - \frac{1-g}{g} R_r |\bar{I}_r|^2 = \frac{1-g}{g} [P_r - R_r |\bar{I}_r|^2] \quad (II-79)$$

On constate d'après la dernière équation que la puissance mécanique est composée de deux termes ; le premier terme, est une partie de la puissance fournie par la source qui se transforme en puissance mécanique, le second terme, représente la puissance mécanique fournie de l'extérieur. On tenant compte des pertes joule dans la résistance.

II-4 -8 Rendement de la MADA

✓ *Fonctionnement en générateur :*

Dans le cas ou la MADA fonctionne en générateur ($P_{mec} > 0$), le rendement η_{gen} est défini comme étant le rapport entre la puissance électrique produite P_{gen} et la puissance mécanique absorbée P_{mec} .

$$\eta_{gen} = \frac{P_{gen}}{P_{mec}} = \frac{P_s + P_r}{P_{mec}} = \left| \frac{-P_{mec} + p_j}{P_{mec}} \right| = \left| \frac{R_s |\bar{I}_s|^2 + R_r |\bar{I}_r|^2}{\left\{ P_r - R_r |\bar{I}_r|^2 \right\} \frac{1-g}{g}} - 1 \right| \quad (II-80)$$

✓ *Fonctionnement en moteur :*

Dans le cas où la MADA fonctionne en moteur ($P_{mec} < 0$), le rendement η_{mot} est défini, contrairement au fonctionnement en générateur, comme étant le rapport entre la puissance électrique produite P_{mec} et la puissance mécanique absorbée P_{gen} .

$$\eta_{mot} = \frac{1}{\eta_{gen}} \quad (II-81)$$

II-5 Influence de la tension rotorique sur les caractéristiques de la MADA

Pour voir l'influence de la tension rotorique sur les différentes caractéristiques de la MADA une fois on fixe $V_{dr} = 0$ et on varie V_{qr} entre $-0.2V_{max}$ et $0.2V_{max}$, une autre fois on varie V_{dr} entre $-0.2V_{max}$ et $0.2V_{max}$ et $V_{qr} = 0$.

Rappelant que dans notre cas $V_s = V_{ds}$ et $V_{qs} = 0$ imposée par le réseau donc V_s est fixe et les expressions vont se simplifier comme suit :

II-5 -1 Influence de V'_{dr} et V'_{qr} sur les courants rotorique et statorique

Les formes simplifiées des courants dans le cas où $V_{qs} = 0$ seront comme suit :

$$I_{ds} = \frac{\left((R_s R_r' - g X_s X_f) * (R_r' V_{ds} + X_s V_{qr}') \right) + \left((R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (g (X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}') \right)}{\left(R_s R_r' - g X_s X_f \right)^2 + \left(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f) \right)^2} \quad (II-82)$$

$$I_{qs} = \frac{\left((R_s R_r' - g X_s X_f) * (g (X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}') \right) - \left((R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_r' V_{ds} + X_s V_{qr}') \right)}{\left(R_s R_r' - g X_s X_f \right)^2 + \left(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f) \right)^2} \quad (II-83)$$

$$I'_{dr} = \frac{\left((R_s R_r' - g X_s X_f) * (g (X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}') \right) - \left((R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_r' V_{ds} + X_s V_{qr}') \right)}{\left(R_s R_r' - g X_s X_f \right)^2 + \left(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f) \right)^2} \quad (II-84)$$

$$I'_{qr} = \frac{\left((R_s R_r' - g X_s X_f) * (R_s V_{qr}' - g X_s V_{ds} + X_s V_{dr}') \right) - \left((R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_s V_{dr}' - X_s V_{qr}') \right)}{\left(R_s R_r' - g X_s X_f \right)^2 + \left(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f) \right)^2} \quad (II-85)$$

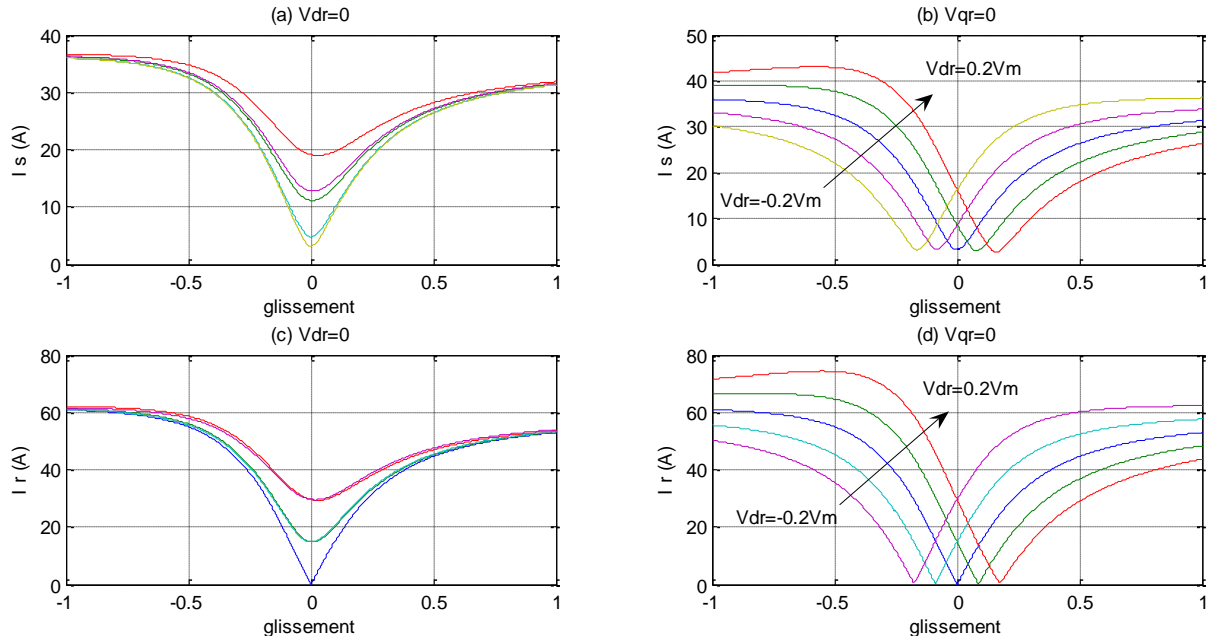


Figure (II -15) : Modules des courants du stator et du rotor en fonction du glissement et des tensions du rotor

On comparant les allures données aux figures (II-15), on constate que si on regarde deux à deux les figures a-b puis c-d, on verra que le courant statorique est l'image de celui du rotor, la différence qui existe entre les deux est l'amplitude qui est due au rapport de transformation 'K'. Et si on compare celles de gauche (a et c) et celles de droite (b et d), on remarque qu'on variant le courant à tendance à augmenter rapidement surtout pour des fonctionnements où le glissement est important. Et si on varie V_{dr} les caractéristiques des courants se déplacent du glissement négatif au glissement positif on augmentant V_{dr} du (- $0.2V_{max}$ et $0.2V_{max}$).

II-5 -2 Influence de V'_{dr} et V'_{qr} sur les puissances statorique

Du schéma équivalent précédant on tire les expressions de P_s et de Q_s données par (II-74)

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} \\ Q_s = -V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (II-86)$$

Puisque $V_{ds} = V_s = C_{st}^s$, ces puissances, les images des courants I_{ds} et I_{qs} , et pour avoir leurs expressions en fonction V_{dr} et V_{qr} on ne fait qu'à remplacer les courants par leurs expressions données par (II-69) et (II-70) et on obtient :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \left(\frac{((R_s R_r - g X_s X_f) * (R_r V_{ds} + X_s V_{qr})) + ((R_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (g (X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}))}{(R_s R_r - g X_s X_f)^2 + (R_r X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \\ Q_s = -V_{ds} \left(\frac{((R_s R_r - g X_s X_f) * (g (X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr})) - (R_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_r V_{ds} + X_s V_{qr})}{(R_s R_r - g X_s X_f)^2 + (R_r X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \end{cases} \quad (II-87)$$

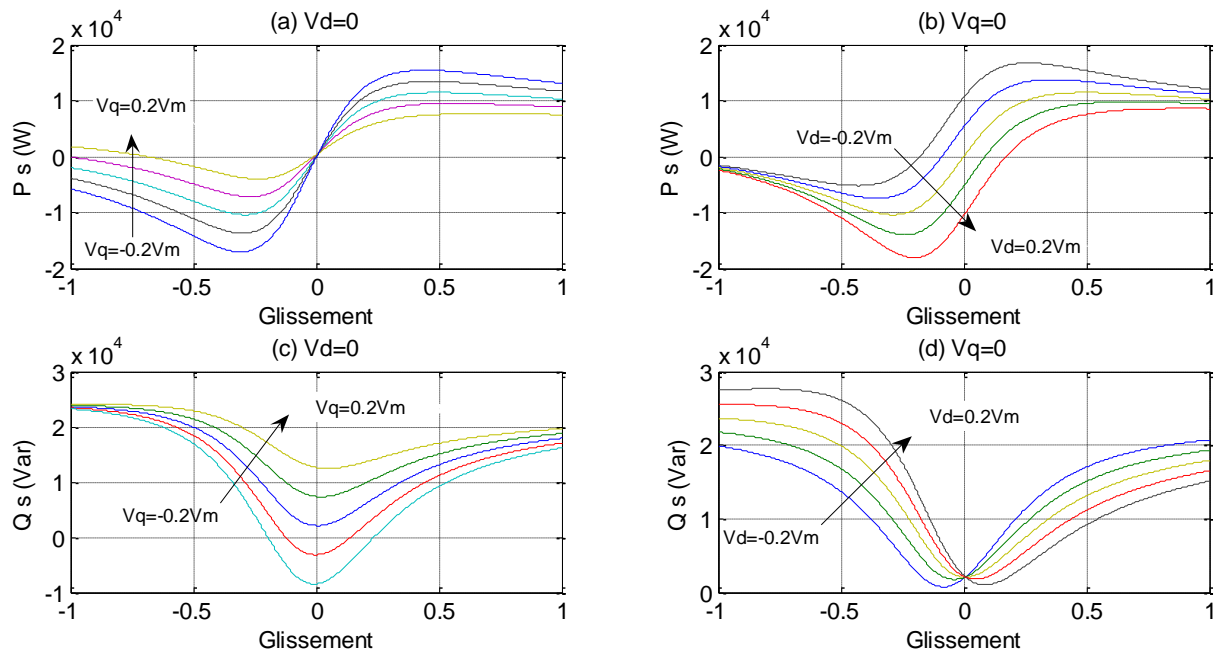


Figure (II -16) : Puissance active et réactive du stator en fonction du glissement et des tensions du rotor

On voit que d'après la courbe ci-dessus que la puissance réactive Q_s varie très sensiblement quand V_{qr} varie et V_{dr} nulle. Lorsqu'on varie V_{dr} et on annule V_{qr} , on voit que P_s tend à devenir négative si on augmente V_{dr} en valeurs négatives se qui veut dire que la machine a tendance à fonctionner en générateur cote stator et si au contraire on diminue V_{dr} on le pousse à fonctionner en moteur. On remarque aussi lorsque on varie V_{dr} ou V_{qr} la puissance réactive reste toujours positive, donc notre machine tout le temps fait appel à cette puissance ; ce qui n'est pas bénéfique pour le réseau car cette demande en puissance réactive engendre des chute de tension dans le réseau et du moment que la magnétisation provient du rotor, on doit s'intéresser dans la suite de ce chapitre uniquement au fonctionnement de la MADA en puissance réactive statorique nulle.

II-5-3 Influence de V'_{dr} et V'_{qr} sur les puissances rotorique

Et de même que précédemment pour le coté rotor

$$\begin{cases} P_r = \frac{V'_{dr}}{g} I_{dr} + \frac{V'_{qr}}{g} I_{qr} \\ Q_r = \frac{V'_{qr}}{g} I_{dr} - \frac{V'_{dr}}{g} I_{qr} \end{cases} \quad (II-88)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_r = \left(\frac{V_{dr}' (R_s R_r' - g X_s X_f) \cdot (g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}') - (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) \cdot (R_r' V_{ds} + X_s V_{qr}')}{g (R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right. \\ \left. + \frac{V_{qr}' (R_s R_r' - g X_s X_f) \cdot (R_s V_{qr} - g X_s V_{ds} + X_s V_{dr}') - (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) \cdot (R_s V_{dr} - X_s V_{qr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \\ Q_r = \left(\frac{V_{qr}' (R_s R_r' - g X_s X_f) \cdot (g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V_{dr}') - (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) \cdot (R_r' V_{ds} + X_s V_{qr}')}{g (R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right. \\ \left. - \frac{V_{dr}' (R_s R_r' - g X_s X_f) \cdot (R_s V_{qr} - g X_s V_{ds} + X_s V_{dr}') - (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) \cdot (R_s V_{dr} - X_s V_{qr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \end{array} \right. \quad (II-89)$$

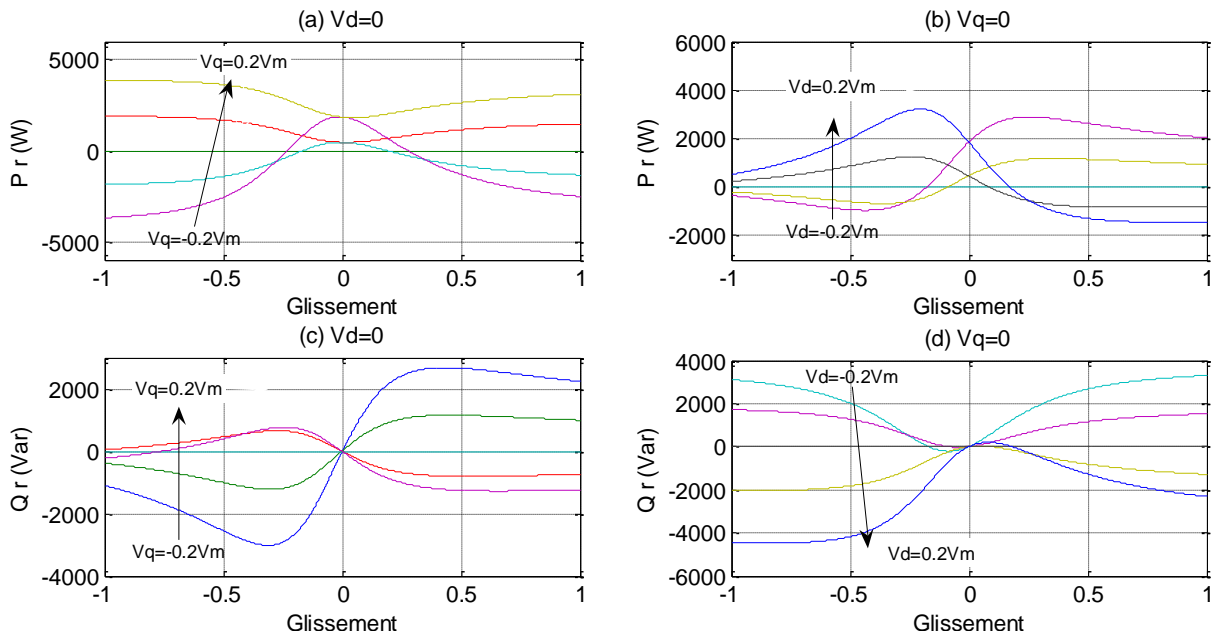


Figure (II -17) : Puissance active et réactive du stator en fonction du glissement et des tensions du rotor

On sait que pour la machine à induction classique, le rotor est en court circuit et aucune puissance électrique peut être échangée avec le réseau dans les deux fonctionnements soit moteur ou générateur, la puissance électrique au rotor se réduit uniquement aux pertes joules.

Dans le cas de la machine à double alimentation, on alimente le stator et le rotor au même temps, donc on a une puissance au niveau de rotor en plus les pertes joules rotoriques.

La figure (II-17) montre l'allure de la puissance active échangée avec le rotor et le réseau, cette dernière est fortement liée à l'amplitude et le signe de la tension V_{dr} .

Pour une tension V_{dr} donnée, la puissance peut changer de signe si la valeur du glissement g change.

II-5 -4 Influence de V'_{dr} et V'_{qr} sur le couple électromagnétique

De l'expression précédente (II-59) et celles des courants nous trouverons l'expression du couple en fonction du glissement suivante :

$$C_{em} = pM(I_{sq}I'_{dr} - I_{sd}I'_{qr}) \tag{II-82}$$

$$C_{em} = pM \left\{ \begin{aligned} & \left[\left(\frac{((R_s R'_r - g X_s X_f) * (g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V'_{dr})) - ((R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R'_r V_{ds} + X_s V'_{qr}))}{(R_s R'_r - g X_s X_f)^2 + (R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \right. \\ & \cdot \left. \left(\frac{((R_s R'_r - g X_s X_f) * (g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V'_{dr})) - ((R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R'_r V_{ds} + X_s V'_{qr}))}{(R_s R'_r - g X_s X_f)^2 + (R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \right] \\ & - \left[\left(\frac{((R_s R'_r - g X_s X_f) * (R'_r V_{ds} + X_s V'_{qr})) + ((R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V'_{dr}))}{(R_s R'_r - g X_s X_f)^2 + (R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \right. \\ & \cdot \left. \left(\frac{((R_s R'_r - g X_s X_f) * (R'_r V'_{qr} - g X_s V_{ds} + X_s V'_{dr})) - ((R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * (R_s V'_{dr} - X_s V'_{qr}))}{(R_s R'_r - g X_s X_f)^2 + (R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} \right) \right] \end{aligned} \right\} \tag{II-89-a}$$

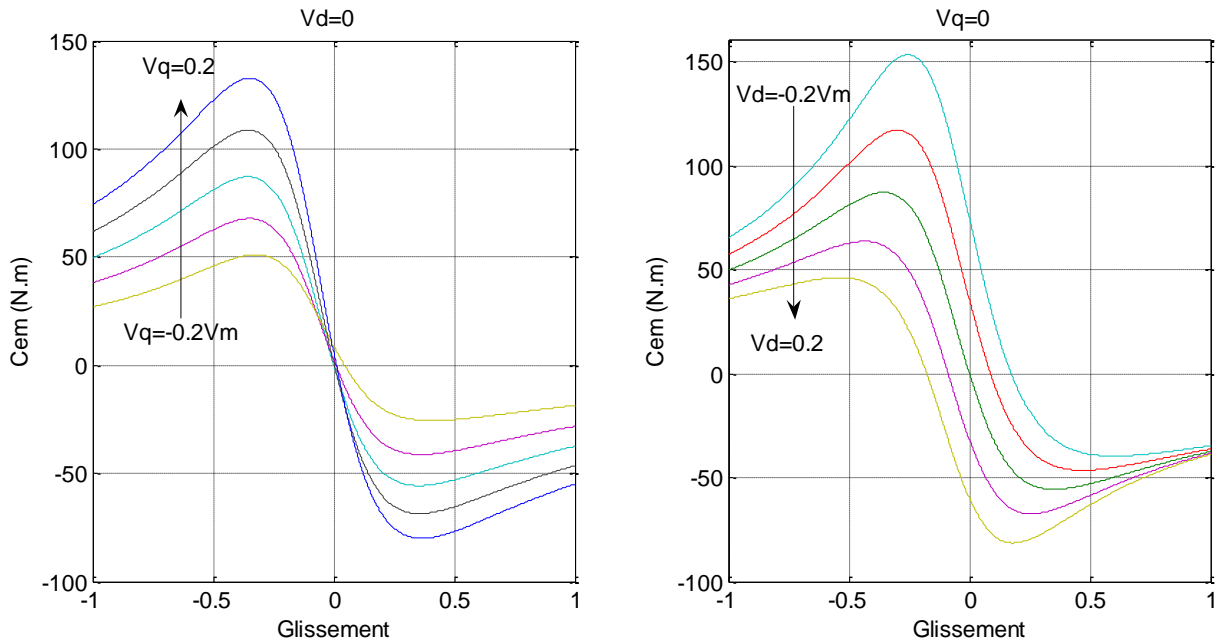


Figure (II -18) : Couple électromagnétique en fonction du glissement et des tensions du rotor

Dans le cas d'une machine à induction classique, la caractéristique couple-vitesse est d'une grande importance car elle nous indique les différents points de fonctionnement de la machine et les zones de fonctionnement stables et instables.

Dans le cas d'une MADA, l'amplitude et la phase de la tension rotorique agit directement sur les différentes puissances échangée avec le réseau et le couple électromagnétique disponible sur l'arbre de la machine comme il nous permet de distinguer les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA. Dans le cas de la machine à induction classique ($V_{dr} = V_{qr}=0$ et $g=0$), le couple électromécanique est toujours nul (voir la courbe)

Tandis que une MADA peut fonctionner à des couples non nuls pour un glissement nul, cela est dû à une partie de la puissance active fournie au rotor qui se transforme en puissance mécanique.

La figure (II-18) montre l'allure du couple électromagnétique de la MADA, pour V_{dr} varie entre $(-0.2V_{max}$ et $0.2V_{max})$ et $V_{qr}=0$, on remarque que la tension V_{dr} agit amplement sur le couple, nous constatons de plus que pour V_{dr} positive, la MADA est stable dans un fonctionnement en hypo synchrone et le couple peut être positif ou négative suivant la valeur de glissement g . D'après l'allure des courbe, on remarque que la MADA peut fonctionner à des glissements importants qui peuvent aller jusqu'à 30%. Lorsque la tension V_{dr} est négative, la MADA doit être dans un fonctionnement en hypo synchrone pour être stable, le couple dans ce cas peut être positif ou négative suivant la valeur de glissement.

La figure (II-18) montre l'allure du couple électromagnétique de la MADA, pour V_{qr} varie entre $(-0.2 V_{max}$ et $0.2 V_{max})$ et $V_{dr} = 0$, on constate que le couple électromagnétique varie très peu dans la zone ou les courants statoriques et rotoriques sont admissibles.

II-5 -5 Influence de V'_{dr} et V'_{qr} sur les puissances transmises au réseau

Les puissances active et réactive totales produite par la MADA sont la somme des puissances du stator et du rotor

$$\begin{cases} P_{gen} = P_s + P_r \\ Q_{gen} = Q_s + Q_r \end{cases} \quad (II-90)$$

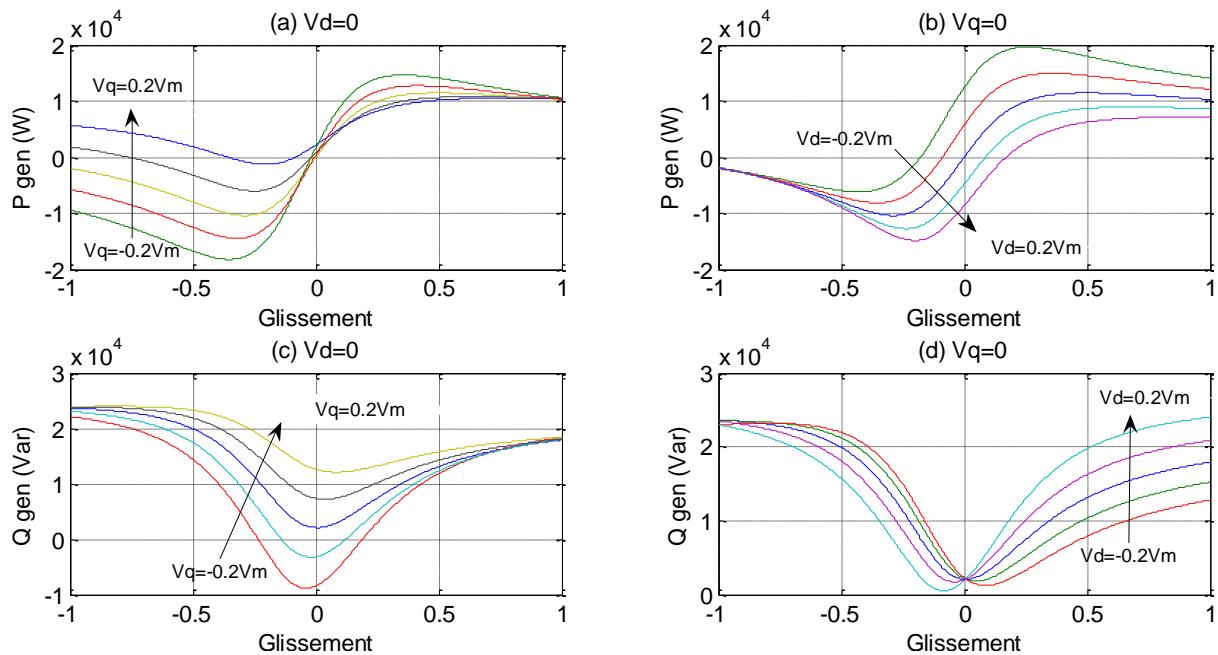


Figure (II -19) : Puissance active et réactive de la MADA en fonction du glissement et des tensions du rotor

Dans le cas de la machine à induction classique, la puissance active est toujours consommée dans le fonctionnement moteur, tandis que en fonctionnement générateur, il ya tout le temps de production d'une puissance active, cette derrière est renvoyée vers le réseau.

Dans le cas d'une MADA, en hypo synchronisme, la puissance active du générateur peut être positive ou négative (consommée ou fournie) suivant le signe et la valeur des tensions V_{dr} et V_{qr} , de même pour le fonctionnement en hyper synchrone. D'où les quatre fonctionnements de la machine.

De la figure (II-19), nous remarquons que si on augmentant V_{dr} en valeurs négatives, on pousse le fonctionnement en moteur. et si au contraire on le pousse en générateur.

La puissance réactive totale Q_{gen} , dans le cas d'une machine à induction classique est tout le temps une puissance qui est consommée au niveau de la machine et cela pour créer le flux de magnétisation ainsi les différents flux de fuites.

Dans le cas d'une MADA, la puissance réactive totale Q_{gen} peut être positive ou négative (consommée ou fournie) suivant la variable qu'on touche V_{dr} ou V_{qr} , d'où sont utilisation en compensateur asynchrone de la puissance réactive dans les réseaux électriques.

Remarque :

❖ La puissance réactive rotorique n'est pas transmise au réseau car le convertisseur statique a un facteur de puissance unitaire donc la puissance réactive transmise au réseau seulement celle du stator, c'est-à-dire que l'expression (II-90) devienne comme suit :

$$\begin{cases} P_{gen} = P_s + P_r \\ Q_{gen} = Q_s \end{cases} \quad (II-91)$$

❖ Les puissances rotorique sont très inférieures en comparaison avec celles du stator, sont de l'ordre de 10% ce qu'on appelle par la puissance du glissement.

❖ Lorsque, on fait varier la tension V_{dr} , on joue sur la puissance active soit consommée ou produite par la MADA et la puissance réactive reste toujours consommée. Et quand, on fait varier la tension V_{qr} , on joue sur la puissance réactive de la MADA peut être fournie ou bien consommée.

II-5 -6 Influence de V'_{dr} et V'_{qr} sur les pertes joules :

D'après les expressions (II-60) on a constaté que les pertes joules sont l'image des courants qui les créent donc leurs sont assimilable à celles des courants comme on le voit dans les figures suivantes :

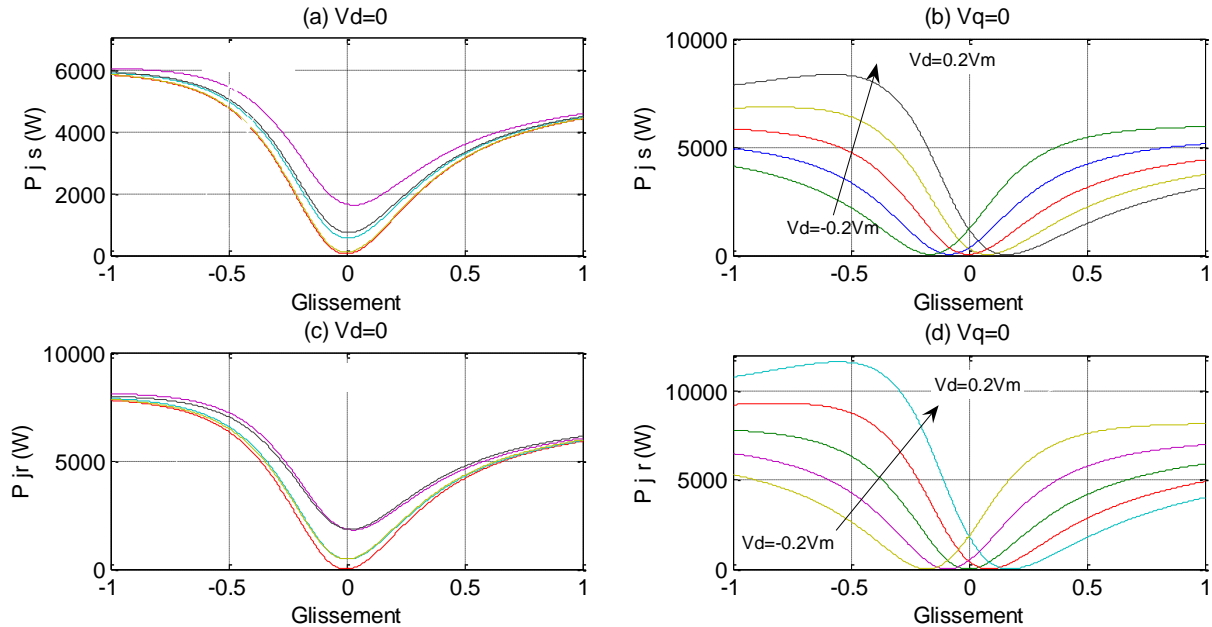


Figure (II -20) : Pertes joules de la MADA en fonction du glissement et des tensions du rotor

III/Conclusion

Dans ce chapitre, on a rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère (a, b, c), qui est non linéaire et fortement couplé. Pour contourner cette difficulté, on fait appel aux hypothèses simplificatrices et à la transformer de PARK.

En utilisant la transformer de PARK, nous allons simplifier la tâche pour construire le modèle dynamique de la machine, puis il a été donné les différents schémas équivalant en régime permanent.

A partir des équations de la MADA en régime permanent, on a établi un schéma équivalent qui permet de bien comprendre le fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants.

Par la suite on s'est intéressé à l'étude et au tracé des différentes expressions et caractéristiques de la M.A.D.A, en montrant l'évolution des différentes puissances soient statorique ou rotoriques en fonction du glissement.

Enfin, l'étude est consacrée sur l'influence des tensions rotoriques V'_{dr} et V'_{qr} sur les différentes caractéristiques de la machine.

CHAPITRE III

FONCTIONNEMENT DE LA MADA A PUISSANCE RÉACTIVE STATORIQUE NULLE

Introduction

Dans le cas des éoliennes, on utilise la MADA parce qu'elle peut fonctionner comme moteur, ou bien générateur à l'aide une interface d'électronique de puissance. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur).

Comme le facteur de puissance de ces derniers est unitaire. Pour cette raison, on peut poser la puissance réactive statorique nulle

Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée, et nous ramène aussi à simplifier l'étude de la machine, en suite et grâce au logiciel MATLAB, on peut étudier les caractéristiques de la machine en fonction du glissement en faisant varier les tensions rotoriques.

III-1 Fonctionnement de la MADA à puissance réactive nulle :

Le fonctionnement de la MADA à puissance réactive nulle implique que le courant statorique en quadrature est nul c'est-à-dire

$$\begin{cases} P_s = V_{ds}I_{ds} \\ Q_s = -V_{ds}I_{qs} = 0 \end{cases} \quad (III-1)$$

Pour satisfaire cette condition tout le temps il faut imposer le courant statorique en quadrature nul c'est-à-dire $I_{qs}=0$

III-1 -1 Influence des tensions rotorique sur la MADA

En posons dans l'expression précédente (II-70) I_{qs} nul nous aurons :

$$\frac{(R_s R_r' - g X_s X_f) \cdot (g(X_s + X_f)V_{ds} - X_s V_{dr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} - \frac{(R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) \cdot (R_r' V_{ds} + X_s V_{qr}')}{(R_s R_r' - g X_s X_f)^2 + (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f))^2} = 0$$

Donc pour avoir ce fonctionnement, il faut satisfaire cette égalité

$$(R_s R_r' - g X_s X_f) \cdot (g(X_s + X_f)V_{ds} - X_s V_{dr}') = (R_r' X_s + g R_s (X_s + X_f)) \cdot (R_r' V_{ds} + X_s V_{qr}')$$

Dans le but de voire l'influence de V_{dr}' sur les différentes caractéristiques de la MADA, on fait varier V_{dr}' entre -40% et 40% de la valeur nominale du fonctionnement.

III-1 -2 Influence de V'_{dr} rotorique sur V'_{qr} et $|\bar{V}_r|$

De cette dernière égalité nous allons extraire l'expression V'_{qr} en fonction V'_{dr} et du glissement

$$V'_{qr} = \frac{(R_s R'_r - g X_s X_f) \cdot (g(X_s + X_f) V_{ds} - X_s V'_{dr}) - R'_r (R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) \cdot V_{ds}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) X_s} \quad (III-2)$$

$$V'_{qr} = \frac{\{g R_s (X_s + X_f) (R'_r - R'^2_r X_s) - g^2 X_s X_f\} V_s - X_s (R_s R'_r - g X_s X_f) V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) X_s} \quad (III-2bis)$$

$$V'_{qr} = \frac{\{R_s (X_s + X_f) (R'_r - R'^2_r X_s)\} V_s + X_s^2 X_f V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) X_s} g - \frac{X_f V_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} g^2 - \frac{R_s R'_r V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \quad (III-3)$$

De ces deux dernières équations (III-2) et (III-2bis) on constate que V'_{qr} est liée à V'_{dr} . Donc pour avoir un fonctionnement où la puissance réactive statorique est nulle le choix de la tension V'_{dr} impose la tension V'_{qr} pour les différents glissements.

Dans les figures suivantes (III-1.a) et (III-1b) nous avons tracé la variation de V'_{qr} et de $|\bar{V}_r|$ en fonction du glissement pour des tensions V'_{dr} prises dans l'intervalle $-0.4V_n < V'_{dr} < 0.4V_n$, dans ceux d'en bas (III-1c) et (III-1d) on a fait zoomer des zones de fonctionnement où les tensions sont admissibles.

Sachant que le module \bar{V}_r est donné par :

$$|\bar{V}_r| = \frac{|\bar{V}'_r|}{K} = \frac{\sqrt{V'^2_{dr} + V'^2_{qr}}}{K} \quad (III-4)$$

De la figure (III-1.a), on remarque qu'il y a un couplage entre V'_{dr} et V'_{qr} et si on fixe la valeur de V'_{dr} on remarque que $V'_{qr} = f(g)$ prend l'allure d'une parabole. De la figure (III-1.c), on peut dire que la variation V'_{dr} agit sur les points de fonctionnement, c'est-à-dire si on augmente V'_{dr} en valeurs négatives, la machine a tendance à fonctionner en hyper synchrone, si au contraire la tension V'_{dr} on tend vers le fonctionnement hypo synchrone. Dans le cas où on néglige $g R_s (X_s + X_f)$ dans l'expression (III-3), on trouve que l'allure de $V'_{qr} = f(g)$ est une parabole d'équation :

$$V'_{qr} = \left(\frac{\{R_s (X_s + X_f) (1 - R'_r X_s)\} V_s}{X_s^2} + \frac{X_f V'_{dr}}{R'_r} \right) g - \frac{X_f V_s}{R'_r X_s} g^2 - \frac{R_s V'_{dr}}{X_s} \quad (III-5)$$

De la figure (III-1.d), on constate que l'allure $|\bar{V}_r|$ en fonction de g est une parabole contenant à un plateau horizontal « $|g| < 50\%$ » là où le module est indépendant du glissement donc le module ne dépend que du V'_{dr} , ce là signifie que dans cette plage de variation du glissement V'_{qr} est négligeable devant V'_{dr} d'où $|\bar{V}_r| = V'_{dr}$.

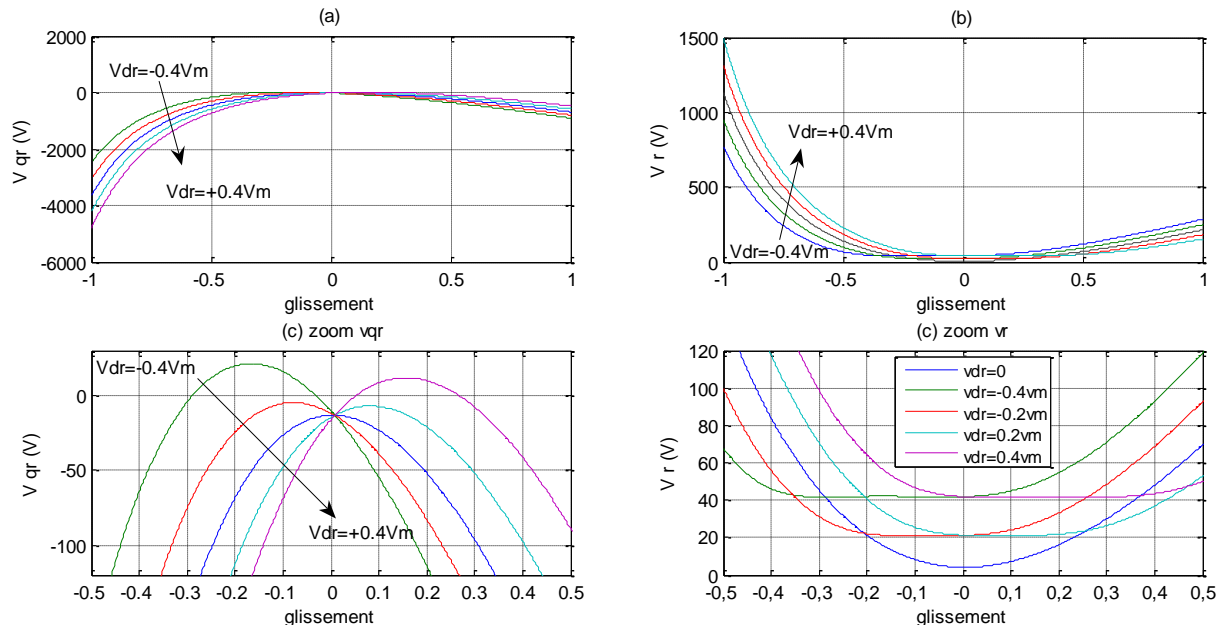


Figure (III -1) : les caractéristiques de V'_{qr} et de $|\bar{V}_r|$ en fonction du glissement pour $-0.4V_n < V'_{dr} < 0.4V_n$ et le zoom des zones de fonctionnement.

III-1 -3 Influence de V'_{dr} sur le courant statorique

En remplaçant V'_{qr} par son expression (III-2) dans l'expression de I_{qs} pour avoir une expression plus simple de \bar{I}_s

$$\bar{I}_s = I_{sd} = \frac{g(X_s + X_f) * V_s - X_s V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \dots \dots \dots (III-6)$$

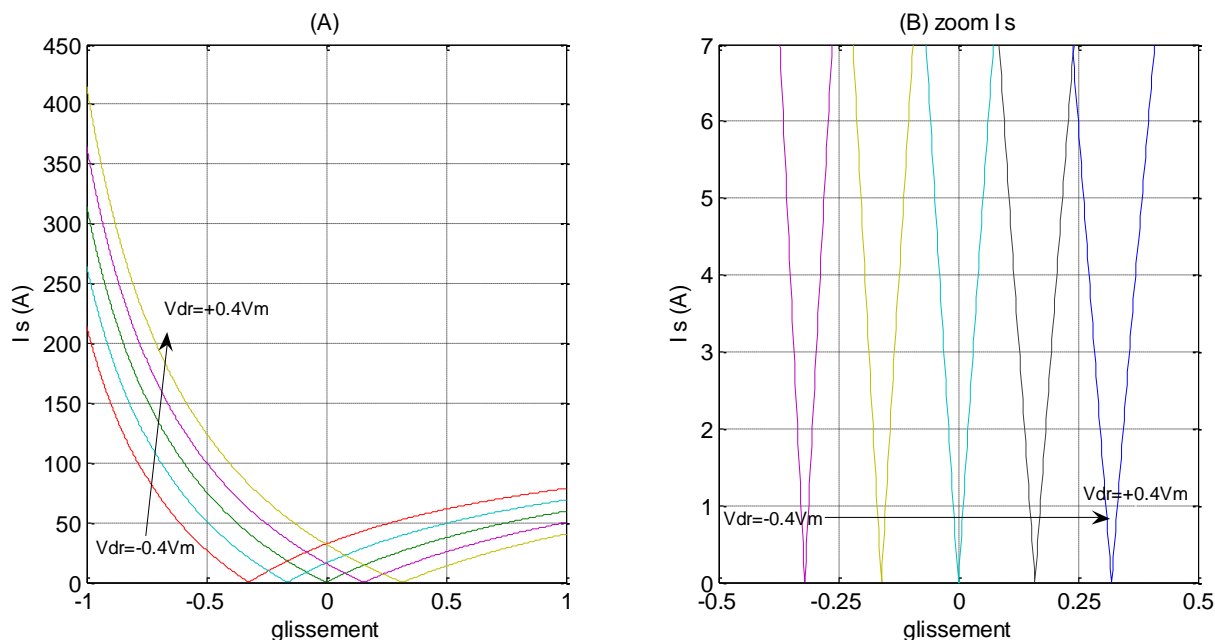


Figure (III -2) : Caractéristiques de $|\bar{I}_s|$ en fonction du glissement pour $-0.4Vn < V'_{dr} < 0.4Vn$ et le zoom dans les zones de fonctionnement.

De l'expression (III-6), $\bar{I}_s = f(V'_{dr})$ est une droite de pente qui dépende de g et qui égale à $\frac{-X_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))}$. D'où la figure (III-2.a) présente les allures du module de I_s en fonction de g

lorsque V'_{dr} prend des valeurs entre -0.4 et $+0.4Vn$. Et si fait un zoom pour la zone de fonctionnement figure (III-2.b), on remarque que les allures sont assimilées à deux segments de droites pour chaque valeur de V'_{dr} . L'un correspond au fonctionnement générateur et l'autre au fonctionnement moteur. De cette figure on remarque aussi que pour chaque valeur de V'_{dr} , on a une plage de variation de g que nous devons limiter dans la suite de ce chapitre.

Les allures des courants statoriques dans zones de fonctionnement sont assimilées à des segments de droites car dans ce cas la variation du dénominateur est négligeable devant l'énumérateur i-e qu'on peut considérer le dénominateur comme constant, dans ce cas l'équation (III-6) devient

$$\bar{I}_s = \frac{(X_s + X_f)V_s}{(R'_r X_s)} g - \frac{X_s}{R'_r} V'_{dr} \tag{III-7}$$

III-1 -4 Influence de V'_{dr} sur le courant rotorique

Du schéma équivalent de la figure (II -9) on peut écrire :

$$\bar{I}'_r = \bar{I}_m - \bar{I}_s \tag{III-8}$$

$$\bar{I}_m = \frac{-j(V_s - R_s I_{sd})}{X_s} = j \left(\frac{-V_s}{X_s} + \frac{R_s}{X_s} \left(\frac{g(X_s + X_f)V_s - X_s V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right) \right) \tag{III-9}$$

En remplaçant \bar{I}_m et \bar{I}_s par leurs expressions dans (III-8)

$$\bar{I}'_r = j \left(\frac{-V_s}{X_s} + \frac{R_s}{X_s} \left(\frac{g(X_s+X_f)V_s - X_s V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right) \right) + \frac{X_s V'_{dr} - g(X_s + X_f)V_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \quad (III-10)$$

$$\bar{I}'_r = j \frac{-(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} + \frac{X_s V'_{dr} - g(X_s + X_f)V_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \quad (III-11)$$

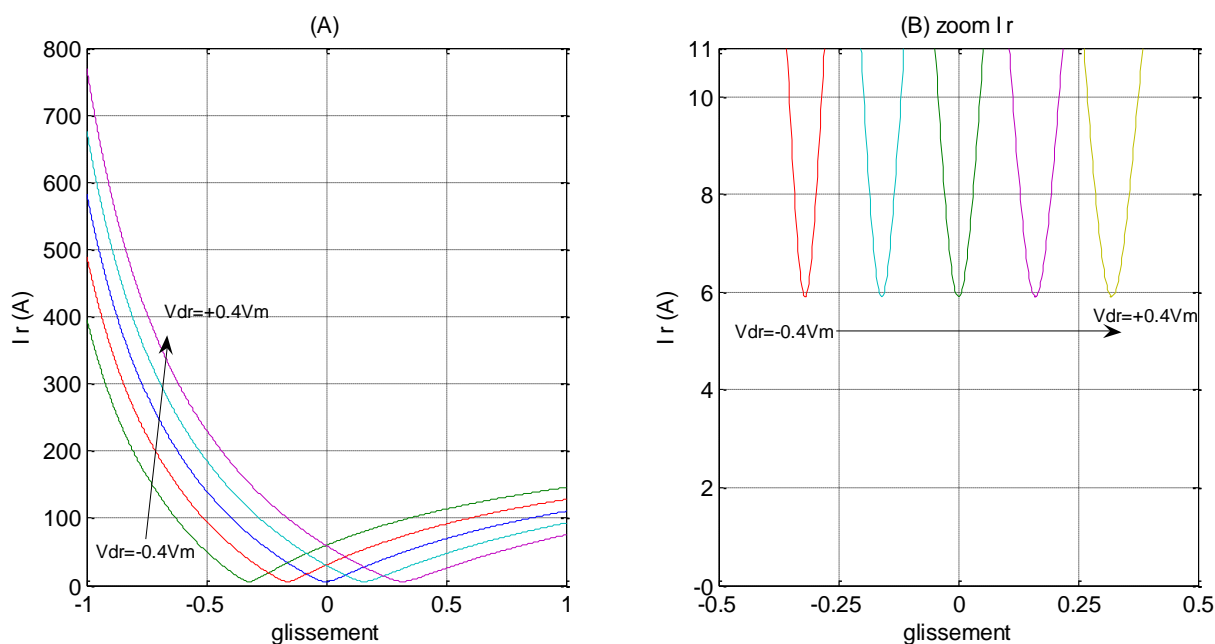


Figure (III -3) : Caractéristiques de $|\bar{I}'_r|$ en fonction du glissement pour $-0.4Vn < V'_{dr} < 0.4Vn$ et zoom sur les zones de fonctionnement.

Comme dans le cas du courant statorique, le courant rotorique a la même allure puisque la seule différence qui existe c'est le courant magnétisant I_m qui prend une valeur constante.. De la figure (III-3.B) on notera qui est effectivement constant et vaut 5.9A. Si $\frac{R_s}{X_s}$ est négligée on aura les expressions (III-9) et (III-10) qui vont s'écrire :

$$\bar{I}_m = \frac{-jV_s}{X_s} \quad (III-12)$$

$$\bar{I}'_r = j \left(\frac{-V_s}{X_s} \right) + \frac{(X_s + X_f)V_s}{(R'_r X_s)} g - \frac{X_s}{R'_r} V'_{dr} \quad (III-13)$$

III-1-5 Influence de V'_{dr} sur le couple électromagnétique

De l'expression précédente du couple (II-78) nous aurons :

$$C_{em} = -pM(I_{sd}I'_{qr}) \quad (III-14)$$

$$C_{em} = pM \left(\frac{(R_r'V_s + R_sV_{dr}') (g(X_s + X_f)V_s - X_sV_{dr}')}{(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))^2} \right) \quad (III-15)$$

$$C_{em} = -pM \left((X_s + X_f) \frac{R_sV_sV_{dr}' + R_r'V_s^2}{(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))^2} g - \frac{R_r'X_sV_sV_{dr}' + R_sX_sV_{dr}'^2}{(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))^2} \right) \quad (III-16)$$

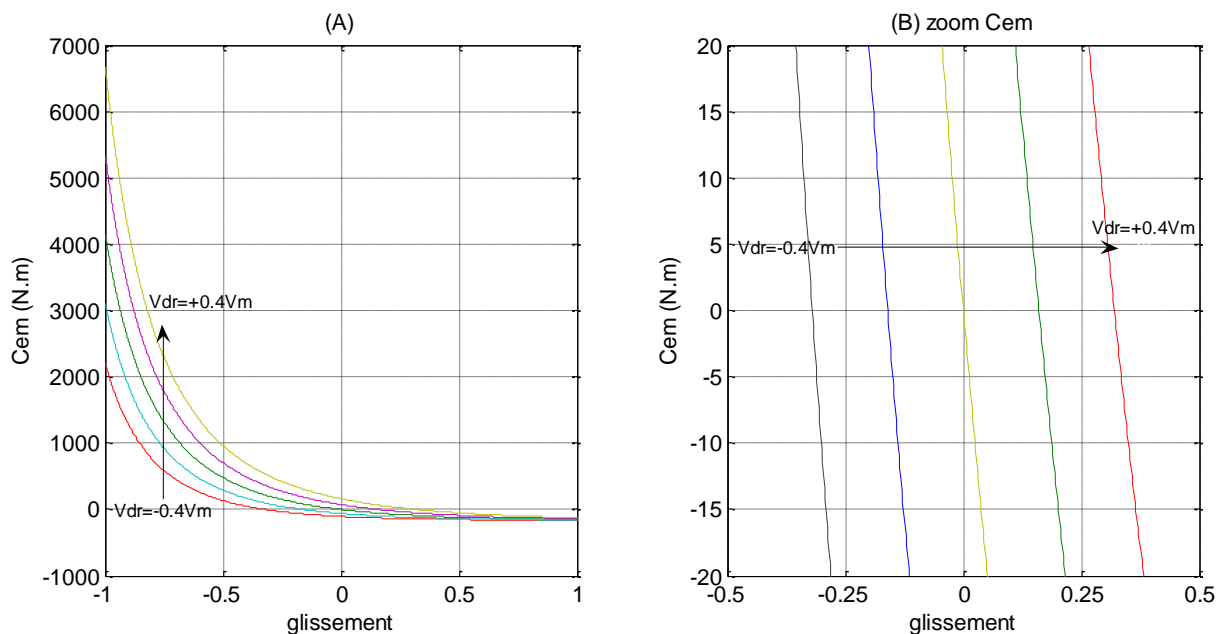


Figure (III -4) : Caractéristiques de C_{em} en fonction du glissement pour $-0.4Vn < V_{dr}' < 0.4Vn$ et zoom dans les zones de fonctionnement.

La figure (III-4.A) donne l'allure du couple électromagnétique pour différentes tensions V_{dr}' . Si on fait un zoom sur ces caractéristiques dans les zones de fonctionnement admissible, on voit que, sur la figure (III-4.B), ces caractéristiques en fonction du glissement sont assimilées à des droites de pente négative et si on fait une analyse à l'expression (III-14) tout en sachant que $I_{qr}=I_m = \text{cst}$, nous verrons que V_{dr}' agit sur C_{em} de la même manière que I_s .

Dans ces zones de fonctionnement l'expression du couple peut s'écrire :

$$C_{em} = -pM \left((X_s + X_f) \frac{R_sV_sV_{dr}' + R_r'V_s^2}{(R_r'X_s)^2} g - \frac{R_r'V_sV_{dr}' + R_sV_{dr}'^2}{R_r'^2 X_s} \right) \quad (III-17)$$

III-1 -6 Influence de V_{dr}' sur les puissances statoriques

En remplaçant le courant statorique \bar{I}_s par son expression (III-5) dans (III-1) on aura

$$\begin{cases} P_s = V_s \frac{g(X_s + X_f) \cdot V_s - X_s V_{dr}'}{(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))} \\ Q_s = -V_s I_{qs} = 0 \end{cases} \quad (III-18)$$

La puissance statorique a la même allure que le courant I_s . Quand ce dernier est positif alors la MADA consomme de l'énergie par le stator, elle a tendance à fonctionner en moteur. Dans le cas où il est négatif la MADA restitue de l'énergie au réseau on a donc un fonctionnement en générateur. Dans la figure suivante (III-5.A), nous avons représenté les allures de la puissance statorique en faisant le zoom sur la zone de fonctionnement figure (III-5.B).

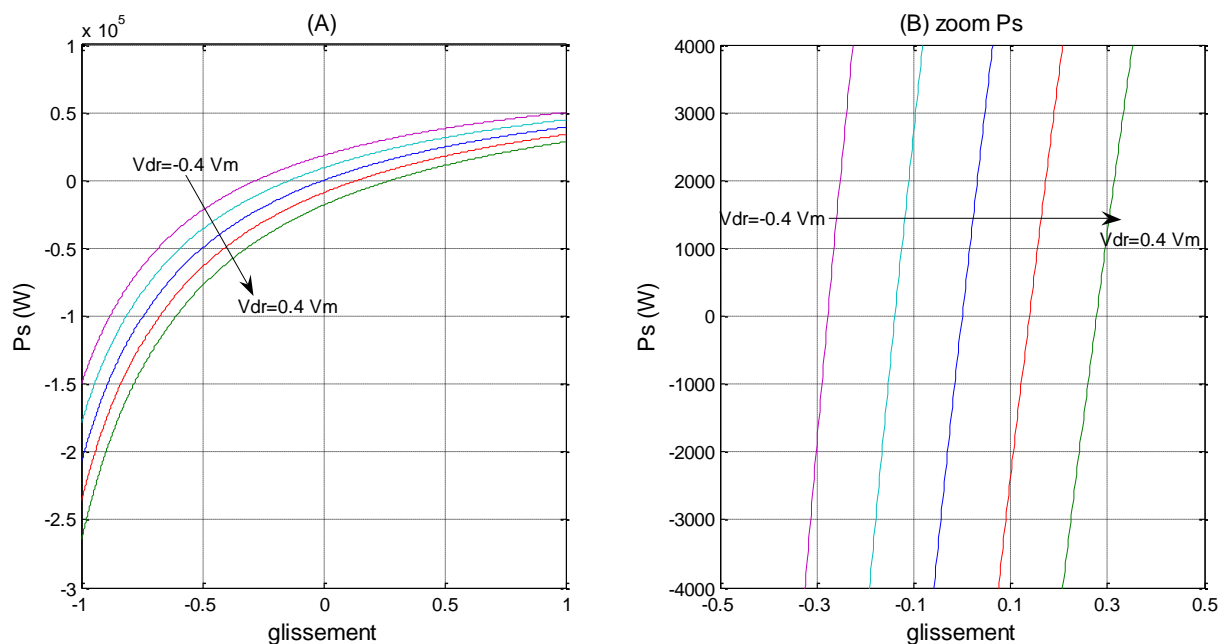


Figure (III -5) : les caractéristiques de la puissance active statorique en fonction du glissement pour $-0.4V_n < V'_{dr} < 0.4V_n$ et le zoom des zones de fonctionnement.

III-1 -7 Influence de V'_{dr} sur les puissances rotoriques

De même pour celles du rotor, en suite en remplaçant V'_{qr} par (III-2) dans (II-76)

$$\begin{cases} P_r = V'_{dr} \left(\frac{X_s V'_{dr} - g(X_s + X_f) V_s}{R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)} \right) + V'_{qr} \left(\frac{-(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)} \right) \\ Q_r = V'_{qr} \left(\frac{X_s V'_{dr} - g(X_s + X_f) V_s}{R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)} \right) - V'_{dr} \left(\frac{-(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)} \right) \end{cases} \quad (III-19)$$

$$\begin{cases} P_r = V'_{dr} \left(\frac{X_s V'_{dr} - g(X_s + X_f) V_s}{R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)} \right) - \frac{(\{g R_s (X_s + X_f) (R'_r - R_r'^2 X_s) - g^2 X_s X_f\} V_s - X_s (R_s R'_r - g X_s X_f) V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * X_s} \left(\frac{(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right) \\ Q_r = \frac{(\{g R_s (X_s + X_f) (R'_r - R_r'^2 X_s) - g^2 X_s X_f\} V_s - X_s (R_s R'_r - g X_s X_f) V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * X_s * g} \left(\frac{X_s V'_{dr} - g(X_s + X_f) V_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right) + \frac{V'_{dr}}{g} \left(\frac{(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right) \end{cases} \quad (III-20)$$

En vue de la complexité de l'expression (III-20), on utilisera de préférence l'expression (II-61) qui est plus simple et qui exprime P_r en fonction des pertes joule au niveau du rotor et de la puissance dans entre-fer. Et si on néglige l'influence des pertes joule statorique dans des zones de fonctionnement admissible (sont minimales), on obtiendra une expression simple de P_r en fonction de V'_{dr} .

De la figure (III-6.B), on déduit que Q_r est faible dans les limites de fonctionnement, mais elle n'est pas nulle, Cette puissance sert à la magnétisation de la machine.

La figure (III-7.a), montre l'allure de la puissance P_r en fonction de g pour différentes tensions V'_{dr} , on remarque que pour une même valeur de la tension, P_r change de signe si le glissement ou la vitesse change. Et se déplace du fonctionnement hyper synchrone au fonctionnement hypo synchrone en variant V'_{dr} du $-0.4V_n$ au $0.4V_n$.

De la figure (III-7.b), on voit que Q_r dépend du module et du signe de V'_{dr} . Et de l'équation (III-19), nous remarquons que lorsque nous négligeons $gR_s(X_s + X_f)$ effectivement que P_r à l'allure d'une parabole (fonction paire).

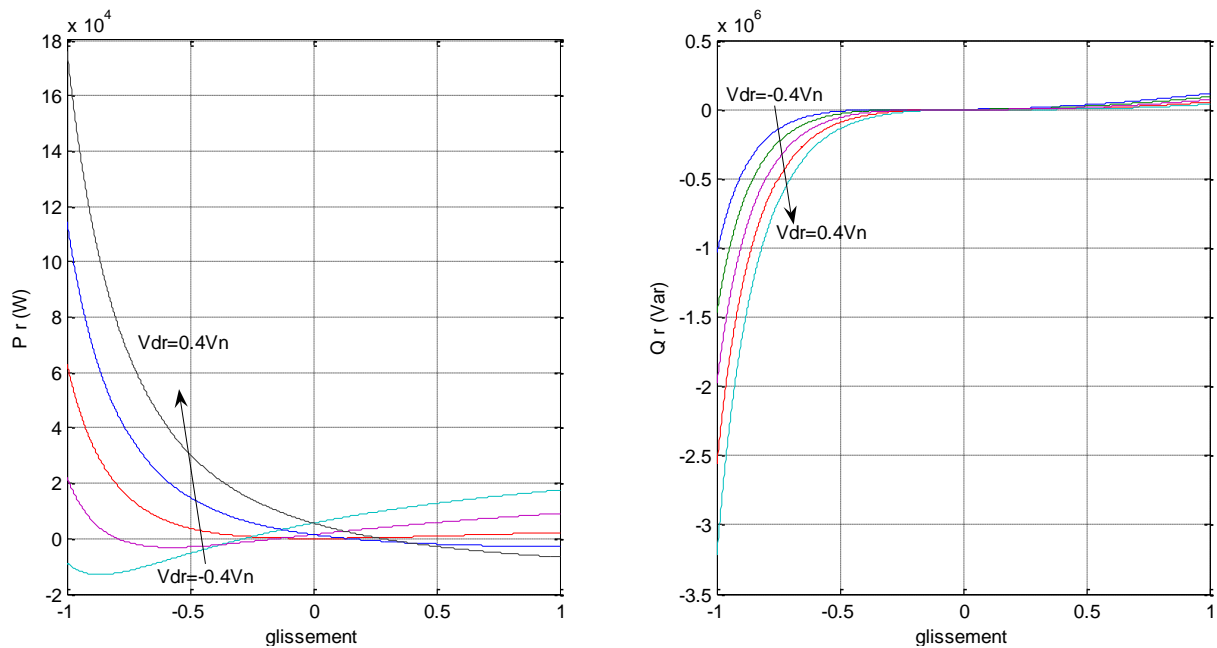


Figure (III -6) : les caractéristiques de la puissance active et réactive rotorique en fonction du glissement pour $-0.4V_n < V'_{dr} < 0.4V_n$ et le zoom des zones de fonctionnement.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_r = \left(\left(\left(\frac{-(R_r'V_s + R_sV_{dr}')}{(R_r'X_s)} \right) \frac{\{R_s(X_s + X_f)(R_r' - R_r'^2 X_s)\}V_s + X_s^2 X_f V_{dr}'}{(R_r'X_s) * X_s} - \frac{(X_s + X_f)V_s V_{dr}'}{(R_r'X_s)} \right) g \right. \\ \left. - \left(\frac{-(R_r'V_s + R_sV_{dr}')}{(R_r'X_s)} \right) \frac{X_f V_s}{(R_r'X_s)} g^2 - \left(\frac{-(R_r'V_s + R_sV_{dr}')}{(R_r'X_s)} \right) \frac{R_s V_{dr}'}{X_s} + \frac{V_{dr}'^2}{R_r'} \right) \\ Q_r = \left(\frac{\{R_s(X_s + X_f)(R_r' - R_r'^2 X_s)\}V_s + X_s^2 X_f V_{dr}'}{(R_r'X_s) * X_s} g - \frac{X_f V_s}{(R_r'X_s)} g^2 - \frac{R_s V_{dr}'}{X_s} \right) \left(\frac{X_s V_{dr}' - g(X_s + X_f) * V_s}{(R_r'X_s)} \right) \\ - V_{dr}' \left(\frac{-(R_r'V_s + R_sV_{dr}')}{(R_r'X_s)} \right) \end{array} \right. \quad (III-21)$$

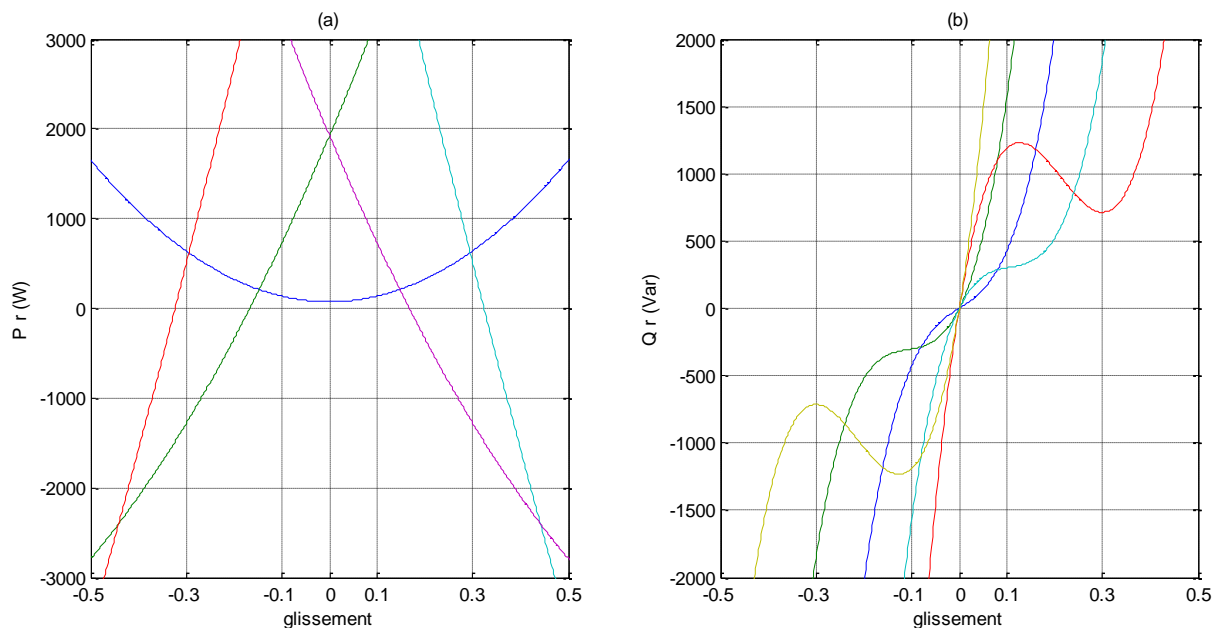


Figure (III -7) : le zoom des caractéristiques de la puissance active et réactive rotorique en fonction du glissement pour $-0.4V_n < V_{dr}' < 0.4V_n$ lorsque $R_s=0$.

III-1 -8 Influence de V_{dr}' sur la puissance du générateur

Rappelant que les puissances transmises au réseau sont seulement les puiances actives rotorique et statorique etant donné que Q_s est nulle et le facteur de puissance des convertiseurs statiques est unitaire. La puissance produite par le générateur est :

$$P_{gen} = P_s + P_r \quad (III-22)$$

$$P_{gen} = \frac{(X_s + X_f)(V_s - V_{dr}')V_s}{(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))} g - \frac{(V_s - V_{dr}')X_s V_{dr}'}{(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))} + V_{qr}' \left(\frac{-(R_r'V_s + R_sV_{dr}')}{(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))} \right) \quad (III-23)$$

On annulant $gR_s(X_s + X_f)$, on aura l'expression suivante

$$P_{gen} = \frac{(X_s + X_f)(V_s - V_{dr}')V_s}{(R_r'X_s)} g - \frac{(V_s - V_{dr}')V_{dr}'}{R_r'} + V_{qr}' \left(\frac{-(R_r'V_s + R_sV_{dr}')}{(R_r'X_s)} \right) \quad (III-24)$$

La figure (III-8.B) nous montre que la zone de fonctionnement se déplace du fonctionnement hyper synchrone au fonctionnement hypo synchrone en fonction de l'augmentation de la tension appliqué au rotor.

Comme elle nous montre aussi que les différentes zones de fonctionnement sont des droites de pente positive qui tende vers l'infini en diminuant V_{dr} , c'est-à-dire on s'approche de l'instabilité de la machine en diminuant V_{dr} . Et la dernière expression (III-24) nous que P_{gen} est une droite de pente qui dépend de V_{dr} et qui égale à $\frac{(X_s+X_f)(V_s-V'_{dr})V_s}{(R'_r X_s)}$.

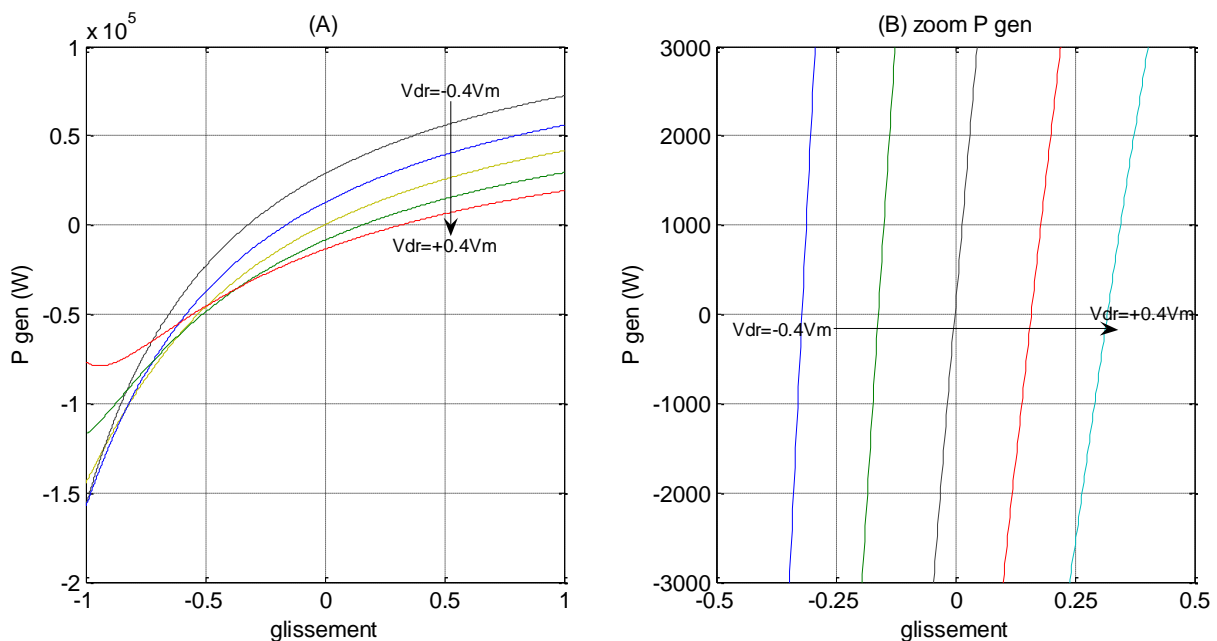


Figure (III -8) : les caractéristiques de la puissance active totale du générateur en fonction du glissement pour $-0.4V_n < V'_{dr} < 0.4V_n$ et le zoom des zones de fonctionnement.

III-1 -9 Influence de V'_{dr} sur le rendement de la MADA

Nous avons tracé dans la figure (III-9) le rendement de la MADA en fonction de glissement g pour des différentes tensions V_{dr} et nous constatons d'après cette figure que dans la zone de fonctionnement normale le rendement est très bon puisqu'il oscille entre 0.8 et 0.95 pour des glissements compris entre -0.5 et 0.5. Nous remarquons aussi qu'il est d'autant plus meilleur que la machine tourne plus vite.

Et aussi pour avoir un meilleur rendement, il faut bien choisir la tension d'alimentation pour une valeur du glissement donnée. Pour cet intérêt nous allons consacrer la suite de ce chapitre au calcul des limites de fonctionnement et les tensions d'alimentation.

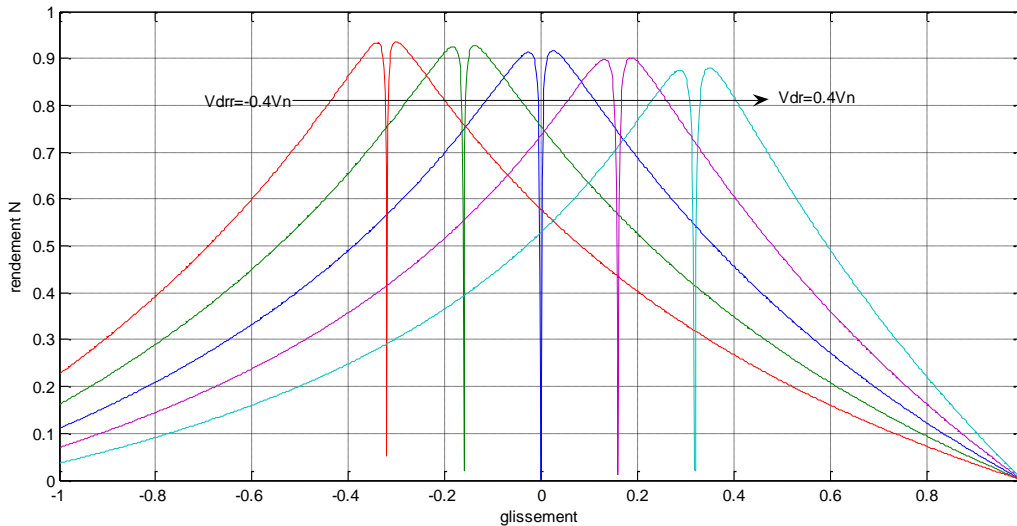


Figure (III -9) : les caractéristiques du rendement de la machine en fonction du g pour $-0.4V_n < V_{dr}' < 0.4V_n$.

III-2 Limites de fonctionnement de la MADA à $Q_s=0$:

III-2-1 limitation du courant rotorique

Pour qu'on puisse maintenir le fonctionnement de la MADA dans les limites admissibles il faut veiller à limiter les courants statorique et rotorique à ne pas dépasser leurs valeurs nominales dans le but d'éviter l'échauffement excessif des enroulements de la machine.

De l'équation précédant (III-11), nous remarquons que le courant rotorique est la somme du courant magnétisant de la machine et du courant statorique. Donc il suffit seulement de contrôler celui du rotor et l'autre est limité automatiquement.

III-2-2 limitation par le glissement

Dans la figure (III-3), on voit que pour chaque tension appliquée le courant passe par un minimum de coordonnées (g_0, I_{min}) qui correspond au point où la machine change de fonctionnement en génératrice au fonctionnement en moteur. Et si on limite ce courant au courant nominal comme nous l'avons déjà dit, c'est-à-dire: $\bar{I}_r = \bar{I}_n = \bar{I}_{max}$

Cette limite nous donne deux plages de variation du glissement, l'une est $[g_{min}, g_0]$ pour le fonctionnement en génératrice et l'autre est $[g_{min}, g_0]$ pour le fonctionnement en moteur.

III-2-2-1 glissements correspondant à \bar{I}_{max}

Pour calculer les deux glissements limites, il suffit de résoudre l'équation donnant le module de I_r égal à I_{max} , ce qui donne :

$$|\bar{I}_r|^2 = \left(\frac{-(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right)^2 + \left(\frac{X_s V'_{dr} - g (X_s + X_f) V_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right)^2 = \bar{I}_{max}^2 \quad (III-25)$$

L'équation à résoudre est donc une équation de second ordre dont les racines correspondent à g_{min} et g_{max} .

Après développement et calcul on obtient:

$$g_{min} = \frac{\left(-\left(V_s X_s - R_s \sqrt{I_{max}^2 (R_s^2 + X_s^2) - V_s^2} \right) V_{dr} + (R_r V_s) \sqrt{I_{max}^2 (R_s^2 + X_s^2) - V_s^2} - I_{max}^2 R_r R_s X_s \right)}{(X_s + X_f) (I_{max}^2 R_s^2 - V_s^2)} \quad (III-26)$$

$$g_{max} = \frac{\left(\left(V_s X_s + R_s \sqrt{I_{max}^2 (R_s^2 + X_s^2) - V_s^2} \right) V_{dr} + (R_r V_s) \sqrt{I_{max}^2 (R_s^2 + X_s^2) - V_s^2} + I_{max}^2 R_r R_s X_s \right)}{(X_s + X_f) (I_{max}^2 R_s^2 - V_s^2)} \quad (III-27)$$

Pour travailler avec des courants qui ne présentent aucun danger pour la machine, il faut veiller à ce que g soit compris dans l'intervalle $[g_{min}, g_{max}]$ pour chaque tension d'alimentation V_{dr} donnée.

III-2-2-2 glissement correspondant à \bar{I}_{min}

Et pour séparer entre les deux fonctionnements, on doit calculer la valeur de g_0 pour chaque valeur de V_{dr} ce qui revient à calculer le glissement qui correspond au courant rotorique minimal. Dans cet intérêt il suffit de résoudre l'équation de la dérivée du carré de \bar{I}_r par rapport à g soit nulle. Ce qui donne :

$$\frac{d|\bar{I}_r|^2}{dg} = \frac{d \left(\left(\frac{-(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right)^2 + \left(\frac{X_s V'_{dr} - g (X_s + X_f) V_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right)^2 \right)}{dg} = 0 \quad (III-28)$$

$$\Rightarrow \frac{-2(X_s + X_f)(R'_r V_s + R_s V'_{dr})((X_s^2 + R_s^2)V'_{dr} + (R'_r R_s - g X_s X_f - g X_s^2)V_s)}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))^3} = 0 \quad (III-29)$$

Pour que la dérivée soit nulle, il faut que l'énumérateur de l'expression précédente soit nul, ce qui donne:

$$\Rightarrow (X_s^2 + R_s^2)V'_{dr} + (R'_r R_s - g X_s (X_s + X_f))V_s = 0 \quad (III-30)$$

$$\Rightarrow g_0 = \frac{(X_s^2 + R_s^2)V'_{dr} + R'_r R_s V_s}{V_s X_s (X_s + X_f)} \quad (III-31)$$

La figure suivante nous présente les tracés des limites du glissement pour les deux fonctionnements (moteur et générateur) et le point intermédiaire pour chaque valeur de la tension rotorique à appliquer.

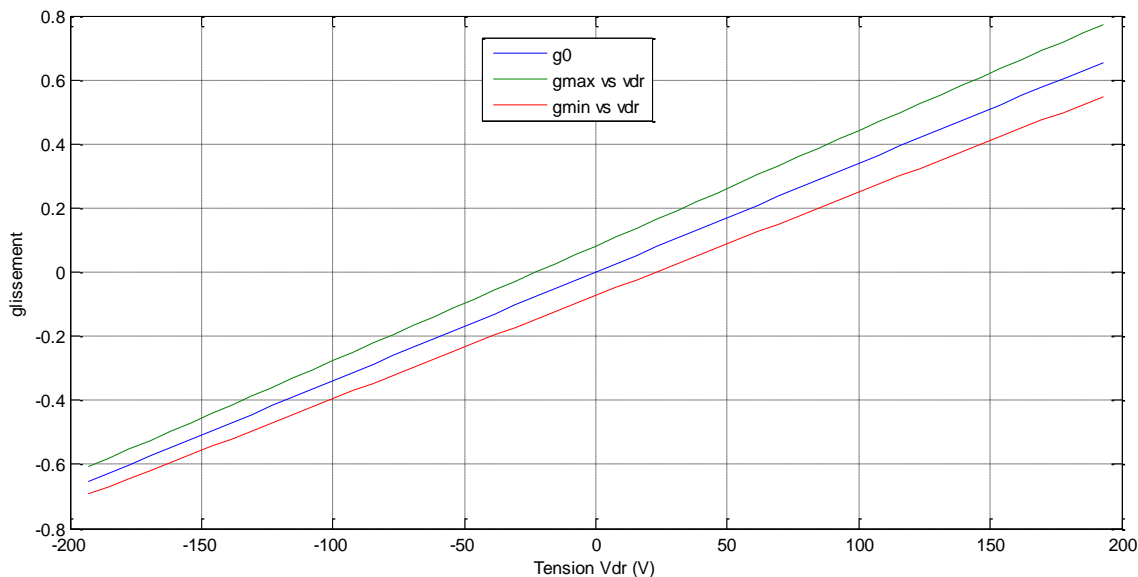


Figure (III -10) : caractéristiques des limites du glissement en fonction de la tension d'alimentation V_{dr} .

Dans cette figure nous remarquons que ces limites sont des droites de pentes positives non parallèles et que les glissements limites que nous obtenons pour les différents modes de fonctionnements nominaux sont inférieurs à 0.4 en valeur absolue.

III-3 Limitation de la tension rotorique

III-3-1 La tension rotorique correspondante à \bar{I}_{max}

Nous allons dans cette partie trouver les limites de la tension V_{dr} à appliquer au rotor pour que la MADA soit en fonctionnement nominal où le glissement g est un paramètre susceptible de varier.

Pour cet intérêt, nous allons suivre la même démarche que précédemment i-e la résolution de l'équation (III-26), mais cette fois ci les racines seront V_{dmin} et V_{dmax} qui correspondent respectivement aux fonctionnements moteur et générateur.

$$(III-26) \Rightarrow (R_s^2 + X_s^2)V_{dr}'^2 + 2(R_r R_s - gX_s(X_s + X_f))V_s V_{dr}' + (R_r'^2 + g^2(X_s + X_f)^2)V_s^2 - (R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f))^2 \bar{I}_{max}^2 = 0 \quad (III-32)$$

Les deux racines sont :

$$V_{dmax} = \frac{\left(\sqrt{I_{max}^2(R_s^2 + X_s^2) - V_s^2(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f)) - (R_r'R_s - gX_s(X_s + X_f))V_s} \right)}{(R_s^2 + X_s^2)} \quad (III-33)$$

$$V_{dmin} = \frac{\left(-\sqrt{I_{max}^2(R_s^2 + X_s^2) - V_s^2(R_r'X_s + gR_s(X_s + X_f)) - (R_r'R_s - gX_s(X_s + X_f))V_s} \right)}{(R_s^2 + X_s^2)} \quad (III-34)$$

Nous remarquons que ces deux racines en fonction de g sont des droites de pentes déférentes,

la première est égale à $\frac{\left(\left(R_s \sqrt{I_{max}^2(R_s^2+X_s^2)}-V_s^2+X_s V_s\right)(X_s+X_f)\right)}{\left(R_s^2+X_s^2\right)}$ et l'autre égale à $\frac{\left(\left(R_s \sqrt{I_{max}^2(R_s^2+X_s^2)}-V_s^2-X_s V_s\right)(X_s+X_f)\right)}{\left(R_s^2+X_s^2\right)}$ et les résultats sont illustrés dans la figure (III-12).

III-3-2 La tension rotorique correspondante à \bar{I}_{min}

A fin de chercher la limite entre les deux fonctionnements, revient à calculer la tension V'_{dr} qui correspond à \bar{I}_{min} ou au glissement g_0 . Ce là revient à chercher l'optimum du courant I_r de la même manière qu'on a fait pour g_0 , mais cette fois ci la dérivée de I_r soit calculer par rapport à V'_{dr} et on cherche son expression pour que cette dérivée soit nulle.

$$\frac{d|\bar{I}_r|^2}{dV'_{dr}} = \frac{d\left(\left(\frac{-(R'_r V_s + R_s V'_{dr})}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))}\right)^2 + \left(\frac{X_s V'_{dr} - g(X_s + X_f) V_s}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))}\right)^2\right)}{dV'_{dr}} = 0 \tag{III-35}$$

$$\frac{d|\bar{I}_r|^2}{dV'_{dr}} = \frac{(2(R_s^2 + X_s^2)V'_{dr} + 2(R_r R_s - g X_s (X_s + X_f))V_s)}{\left((R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))\right)^2} = 0 \tag{III-36}$$

$$V'_{dr0} = V_s \frac{(X_s (X_s + X_f) g - R_r R_s)}{(R_s^2 + X_s^2)} \tag{III-37}$$

On que $V'_{dr0} = f(g)$ est une droite de pente constante positive et qui égale à $V_s \frac{X_s (X_s + X_f)}{(R_s^2 + X_s^2)}$ et le résultat est illustré dans la figure (III-13).

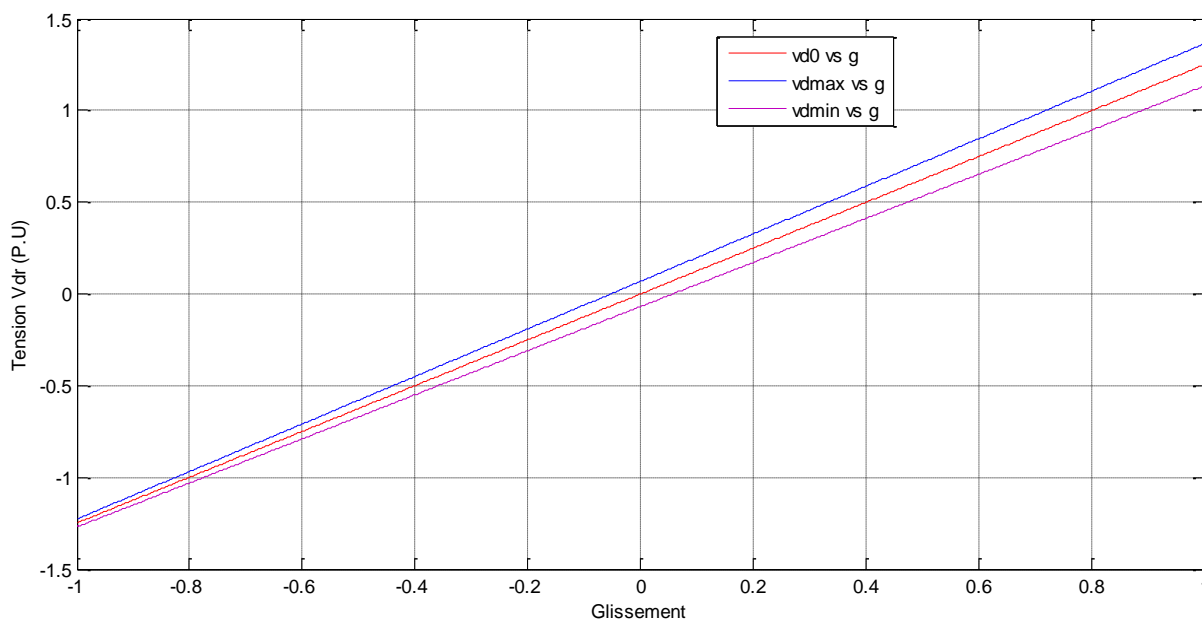


Figure (III -11) : limites des tensions d'alimentation de la machine V_{dr} en fonction du glissement

Cette figure nous montre que les limites sont des droites et pour chaque valeur du glissement on a deux plages de variation de la tension à appliquer l'une pour qu'on soit en mode générateur qui est délimitée par les deux droites celle du milieu et celle d'en haut, pour l'autre mode la plage est délimitée par celui du milieu et ce d'en bas.

De la même figure nous remarquons aussi que si on exclu la région au voisinage de zéro, les limites sont positives en hypo synchrone, par contre en hyper synchrone elles deviennent négatives.

III-3-3 Limitation de la tension rotorique V'_{dr}

La tension de commande rotorique $|\bar{V}_r|$ générée par l'onduleur ne doit pas dépasser la tension nominale indiquée sur la plaque signalitique, c'est-à-dire on toujours assurer l'inégalité suivante

$$|\bar{V}_r|^2 \leq |\bar{V}_{rn}|^2 \quad (III-38)$$

L'expression (III-4) donne la relation la tension d'alimentation réelle $|\bar{V}_r|$ et la valeur ramenée au stator $|\bar{V}'_r|$ et cette dernière s'exprime en fonction de V'_{dr} et de V'_{qr} qui sont au même temps liées entre eux par l'expression (III-2), donc pour cela on remplace V'_{qr} par son expression donnée par (III-2) dans l'expression (III-4), en suite le tout dans l'inégalité (III-38) et on trouve

$$V'_{dr}{}^2 + \left(\frac{(R_s R'_r - g X_s X_f) \cdot (g(X_s + X_f) V_s)}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f)) * X_s} - \frac{(R_s R'_r - g X_s X_f) V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} - \frac{R'_r}{X_s} V_s \right)^2 \leq |\bar{V}_{rn}|^2 K^2 \quad (III-39)$$

Si on fait l'approximation $R_s = 0$, $X_f = 0$ dans l'inégalité (III- ??), on aboutie à :

$$V'_{dr}{}^2 + \left(\frac{R'_r}{X_s} V_s \right)^2 \leq K^2 |\bar{V}_{rn}|^2 \Rightarrow V'_{dr}{}^2 \leq K^2 |\bar{V}_{rn}|^2 - \left(\frac{R'_r}{X_s} \right)^2 V_s^2 \quad (III-40)$$

On voit que le terme $\left(\frac{R'_r}{X_s} \right)^2$ est négligeable et par la suite le terme $\left(\frac{R'_r}{X_s} \right)^2 V_s^2$ est aussi négligeable devant $V'_{dr}{}^2$, de là on peut conclure que la tension V'_{dr} peut être variée théoriquement de 0 jusqu'à la valeur $K \cdot |\bar{V}_{rn}|$ en valeurs positives ou négative.

Mais en pratique V'_{dr} ne peut pas dépasser les 40% de la valeur nominale du fait que le glissement est déjà limité entre $\mp 40\%$, par la taille des convertisseurs statiques.

Conclusion

Dans ce chapitre on a abordé le fonctionnement de la MADA tout en assurant un facteur de puissance unitaire en imposant la puissance réactive du stator nulle. La chronologie de l'étude est répartie en trois parties principales qui sont :

La première partie est consacrée à la modélisation et à la simulation numérique de la MADA en régime permanent dans le cas du fonctionnement à puissance réactive statorique nulle, il a été présenté les résultats qui décrivent le comportement de la MADA vis-à-vis les variations des amplitudes de tension rotoriques appliquées et du glissement qui a été imposé. La deuxième est consacrée pour la recherche des limites du glissement et de la tension appliquer au rotor pour rester dans la zone de fonctionnement admissible de la machine limitant le courant dans les enroulements rotorique et statorique.

CHAPITRE IV

COMMANDE EN BOUCLE OUVERTE

DE LA MADA

Introduction

Dans ce chapitre on s'intéressera à la commande en boucle ouverte de la MADA. La commande à pour objectif principal de répondre à la question fondamentale suivante : quelles sont les tensions à appliquer au rotor sachant que le couple appliqué est connu et la vitesse de rotation souhaité est aussi connue, ajouté à cela la contrainte de fonctionner à puissance réactive nulle. Cette commande en boucle ouverte nécessitera désormais uniquement le capteur mécanique pour assurer l'autopilotage de la machine.

Pour tester la validité de la commande présentée, il sera donné les résultats de simulation numérique où la commande est appliquée sur le modèle réel dynamique de la machine. Des contraintes telles que la limitation des dépassements en courant, et les frottements mécaniques seront pris en considération pour compléter cette étude.

IV-1 calcul direct de la tension de commande

La réponse que apportons tout de suite est qu'elle est la tension appliquée au rotor pour que la M.A.D.A impose un couple électromagnétique C_{em} qui sera égale au couple mécanique C_m pour un fonctionnement à glissement g bien déterminé. Dans cet objectif nous opterons à deux méthodes de calcul, la méthode directe et l'autre est indirect.

De l'expression (II-66) on tire celle du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{P_{air}g}{\Omega_s} = -\frac{P_s - R_s I_{ds}^2}{\Omega_s} \quad (IV-1)$$

$$C_{em} = \frac{P_{air}g}{\Omega_s} = -\frac{V_s}{\Omega_s} \frac{g(X_s + X_f) * V_s - X_s V_s^2 V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} + \frac{R_s}{\Omega_s} \left(\frac{g(X_s + X_f) * V_s - X_s V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right)^2 \quad (IV-2)$$

$$C_{em} = \frac{P_{air}g * p}{\omega_s} = -\frac{V_s * p(1-g)}{\omega_r} \frac{g(X_s + X_f) * V_s - X_s V_s^2 V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} + \frac{R_s * p(1-g)}{\omega_r} \left(\frac{g(X_s + X_f) * V_s - X_s V'_{dr}}{(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f))} \right)^2 \quad (IV-3)$$

Pour tirer la tension à appliquer, cela revient à résoudre l'équation du second ordre (IV-3). Après le calcul on aboutie à deux racines suivantes :

$$V'_{dr1} = \frac{1}{2X_s R_s} \left(\sqrt{V_s^2 + 4C_{em} \Omega_s R_s} \left(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f) \right) - \left(R'_r X_s - g R_s (X_s + X_f) \right) V_s \right) \quad (IV-4)$$

$$V'_{dr2} = \frac{1}{2X_s R_s} \left(-\sqrt{V_s^2 + 4C_{em} \Omega_s R_s} \left(R'_r X_s + g R_s (X_s + X_f) \right) - \left(R'_r X_s - g R_s (X_s + X_f) \right) V_s \right) \quad (IV-5)$$

La deuxième solution, c'est-à-dire V'_{dr2} , est à écarter puisque elle nous donne des valeurs importantes et de signe négatif, ce qui ne correspond pas au fonctionnement normal de la M.A.D.A.

Nous avons donc tracé à la figure (IV-1) la tension V'_{dr1} à appliquer à la machine pour un point de fonctionnement dont les couple appliquée variant dans l'intervalle $[-30\text{N.m} ; 30\text{N.m}]$, et pour des glissement balayant la plage $[-1 ; 1]$. Ces point résumant les quatre quadrant de fonctionnement de la MADA.

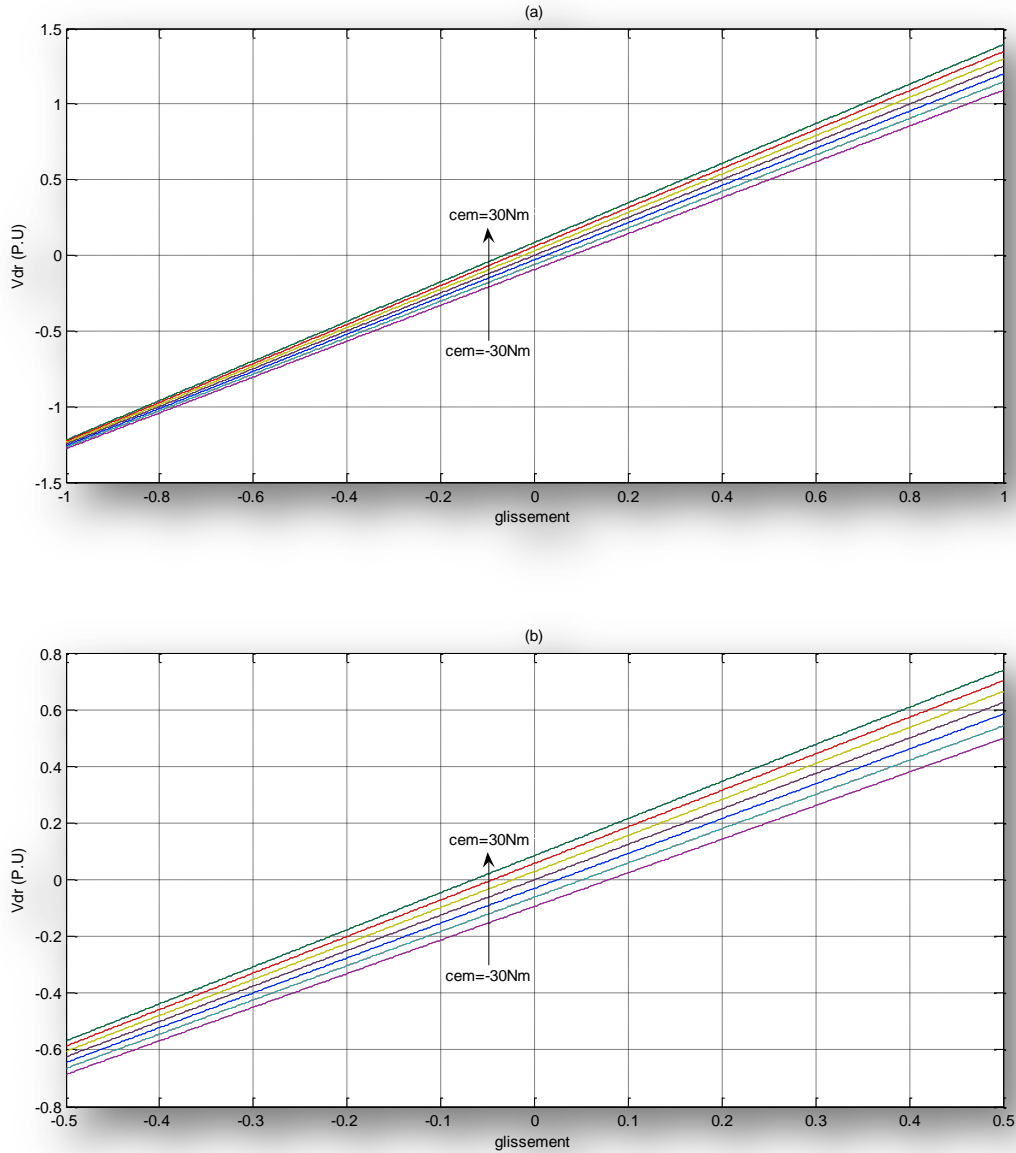


Figure (IV-1) : Caractéristiques de $V'_{dr1}=f(g, Ce)$ obtenus par la méthode directe

D'après ces figures on constate que la caractéristique $V'_{dr1} = f(g)$ est une droite de pente positive dépendant du couple appliquée et d'un terme indépendant de g mais dépendant lui aussi du couple.

$$V'_{dr1} = \frac{\left(R'_r \sqrt{V_s^2 + 4C_{em}\Omega_s R_s} - R'_r V_s \right)}{2R_s} + \frac{(X_s + X_f) \left(\sqrt{V_s^2 + 4C_{em}\Omega_s R_s} + V_s \right)}{2X_s} g \quad (IV-6)$$

On remarque aussi que l'écart entre les caractéristiques se resserre de plus en plus on rapprochant du fonctionnement hyper-synchrone, ce qui veut dire que la machine devienne difficilement commandable par la tension rotorique en se rapprochant de cette région.

IV-2 calcul indirect de la tension de commande

Dans cette méthode le calcul de la tension V'_{dr1} à appliquer se déroule en deux étapes : on calcule d'abord le courant I_s qui en fonction du couple appliquée puis calculer la tension qui en fonction du glissement.

1^{ère} Étape : calcul de I_s en fonction de C_e

On rappelle que le couple de la M.A.D.A peut s'exprimer comme suit

$$C_{em} = \frac{P_{airg}}{\Omega_s} = -\frac{P_s - R_s I_{ds}^2}{\Omega_s} = -\frac{V_s I_s - R_s I_{ds}^2}{\Omega_s} \quad (IV-7)$$

Pour trouver la valeur de I_s correspondante, on résout l'équation du second ordre (IV-7), et on aboutit aux résultats suivants :

$$I_{s1} = \frac{1}{2R_s} \left(V_s - \sqrt{V_s^2 + 4C_{em}\Omega_s R_s} \right) \quad (IV-8)$$

$$I_{s2} = \frac{1}{2R_s} \left(V_s + \sqrt{V_s^2 + 4C_{em}\Omega_s R_s} \right) \quad (IV-9)$$

La deuxième racine est à écarter puisque elle est tout le temps positive.

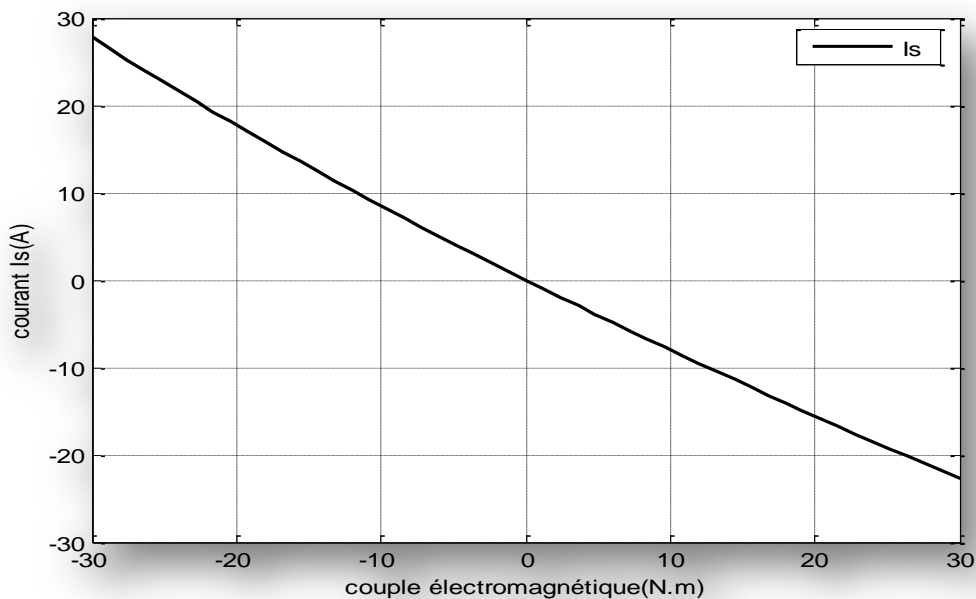


Figure (IV-2) : Caractéristiques de $I_s=f(C_e)$ obtenus par la méthode indirecte

La caractéristique $I_s=f(C_e)$, est presque droite de pente négative, pour un couple nul, I_s nul.

2^{eme} Étape : calcul de V'_{dr}

On rappelle que l'expression liant I_s à V'_{dr} est donnée par

$$\bar{I}_s = I_{sd} = \frac{g(X_s + X_f)V_s - X_s V'_{dr}}{(R'_r X_s + gR_s(X_s + X_f))}$$

De l'expression précédente on peut tirer la valeur de la tension à appliquer et on trouve :

$$V'_{dr} = \frac{(X_s + X_f)(V_s - R_s I_s)}{X_s} g - R'_r I_s \tag{IV-10}$$

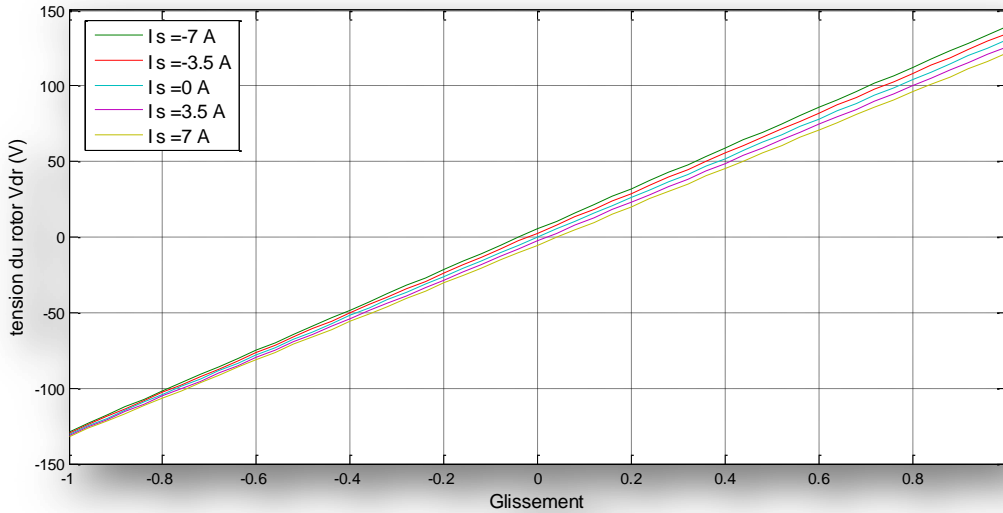


Figure (IV-3) : Caractéristiques de $V_{dr}=f(I_s)$ obtenus par la méthode indirecte

Si on remplace I_s par son expression donnée par (IV-8) dans (IV-10), on trouve

$$V'_{dr} = \frac{(X_s + X_f) \left(V_s + \sqrt{V_s^2 + 4C_{em}\Omega_s R_s} \right)}{2X_s} g - \frac{R'_r}{2R_s} \left(V_s - \sqrt{V_s^2 + 4C_{em}\Omega_s R_s} \right) \tag{IV-11}$$

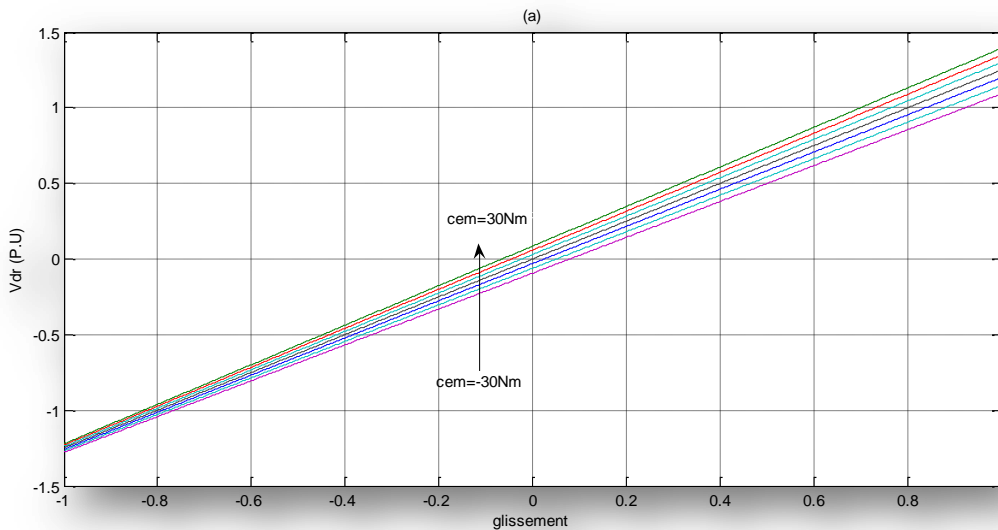


Figure (IV-4) : Caractéristiques de $V_{dr}=f(Cem)$ obtenus par la méthode indirecte

L'intérêt de la seconde méthode est qu'elle peut nous permettre de contrôler le courant du stator et ne pas dépasser sa valeur nominale.

IV-3 Modèle dynamique de simulation numérique de la MADA

Le modèle de la MADA adopté pour la simulation Numérique est dérivé du modèle de Park où les courant rotoriques et statorique et la vitesse mécanique sont pris comme variables d'état, et les tensions rotoriques sont considérées comme des variables de commande.

Rappelant le modèle de la MADA dans le repère dq de PARK est donné par le système d'équations (II-28) dans le chapitre II

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\vartheta_s}{dt} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\vartheta_s}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\vartheta_r}{dt} \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \frac{d\vartheta_r}{dt} \Phi_{dr} \end{cases} \quad (IV-12)$$

Les différents flux dans la machine sont donnés par le système suivant

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = M I_{ds} + L_r I_{dr} \\ \Phi_{qr} = M I_{qs} + L_r I_{qr} \end{cases} \quad (IV-13)$$

L'équation dynamique de la machine est donnée par l'équation (II-18) et celle du couple électromagnétique par (II-58). En remplaçant cette dernière dans la première et nous obtenons :

$$pM(I_{sq}I_{rd} - I_{sd}I_{rq}) = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_r \quad (IV-14)$$

En remplaçant les flux par leurs expressions respectives en fonction des courants on aboutit au système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{ds} = \frac{1}{L_s} V_{ds} - \frac{R_s}{L_s} I_{ds} - \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} I_{dr} + \omega_s \left(I_{qs} + \frac{M}{L_s} I_{qr} \right) \\ \frac{d}{dt} I_{qs} = \frac{1}{L_s} V_{qs} - \frac{R_s}{L_s} I_{qs} - \frac{M}{L_s} \frac{d}{dt} I_{qr} - \omega_s \left(I_{ds} + \frac{M}{L_s} I_{dr} \right) \\ \frac{d}{dt} I_{dr} = \frac{1}{L_r} V_{dr} - \frac{R_r}{L_r} I_{dr} - \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} I_{ds} + \omega_r \left(\frac{M}{L_r} I_{qs} + I_{qr} \right) \\ \frac{d}{dt} I_{qr} = \frac{1}{L_r} V_{qr} - \frac{R_r}{L_r} I_{qr} - \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} I_{qs} - \omega_r \left(\frac{M}{L_r} I_{ds} + I_{dr} \right) \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{pM}{J} (I_{sq}I_{rd} - I_{sd}I_{rq}) - \frac{f\Omega}{J} - \frac{1}{J} C_r \end{cases} \quad (IV-15)$$

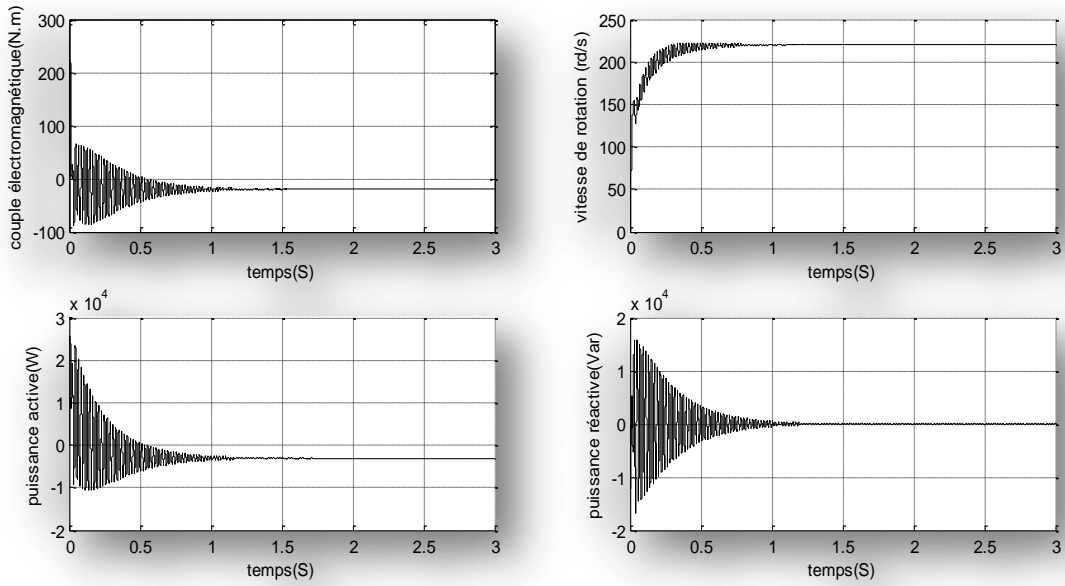


Figure (IV -5) : caractéristique couple,vitesse,puissances en fonction de temps

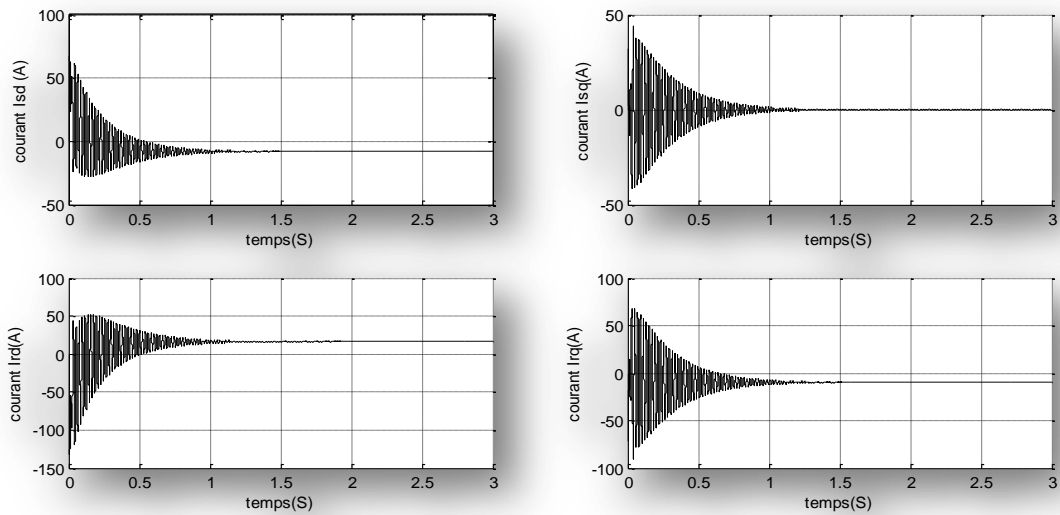


Figure (IV -6) : caractéristique des différents courants en fonction de temps

IV-3-2 Interprétation des résultats obtenus :

Nous avons donné aux figures ci-dessous les résultats de simulation numérique obtenus. Nous constatons tout de suite que :

En régime permanent la machine a bien atteint le point de fonctionnement souhaité, elle développe un couple électromagnétique de 20Nm (aux frottements près) et tourne avec une vitesse de glissement de 0.3. On remarque aussi que cette commande assure bien une puissance réactive statorique nulle.

Par contre on s’aperçoit qu’il ya des dépassements important au niveau des courants et au moment du démarrage de la machine. Pour palier à ce problème nous avons pensé à ne pas

imposer à la référence du glissement une variation brusque mais d'effectuer un démarrage en douceur de la machine en lui imposant une pente négative faible de 0.1. En procédant de cette manière, nous avons réduit énormément les dépassements mais bien sur en allongeant un peu le temps de démarrage. Ces résultats sont montrés à la Figure (IV -6) et Figure (IV -7).

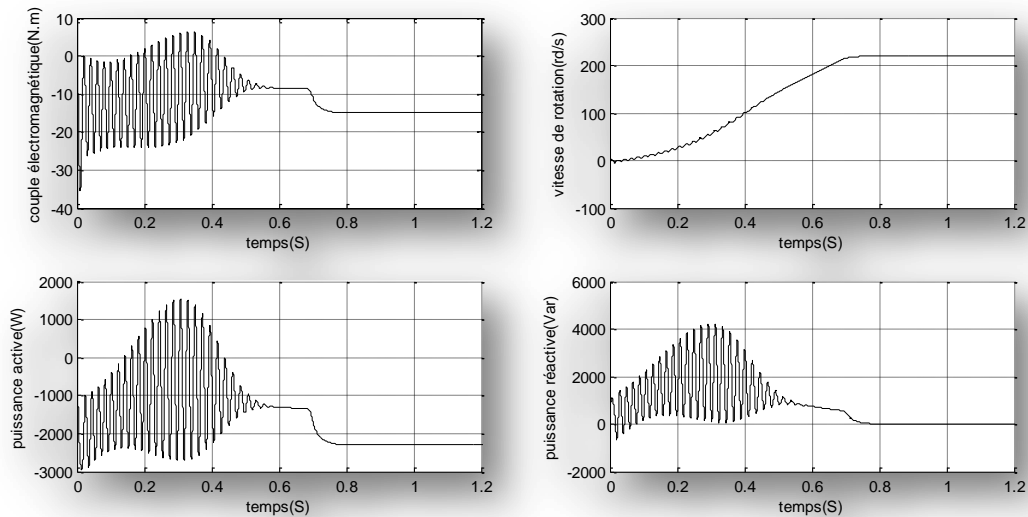


Figure (IV -7) : caractéristique couple,vitesse,puissances en fonction de temps

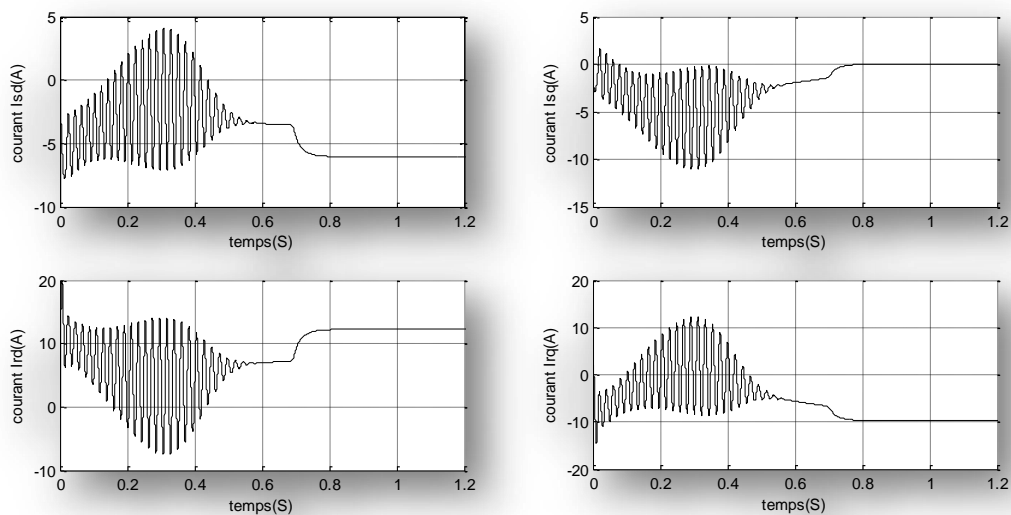


Figure (IV -8) : caractéristique des différents courants en fonction de temps

IV-4 Partie Mécanique

Dans cette partie, il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice : la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables; le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr / mn).

IV-4-1 Modèle de la Turbine

L'équation mathématique suivante représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite .

$$P_{Vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{Vent}^3 \quad (IV-19)$$

Où :

V_{Vent} : est la vitesse du vent.

$\rho = 1.25 \text{ Kg}/\text{m}^3$: Masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance C_p) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{Vent}^3 \quad (IV-20)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (IV-11) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . Le rapport de vitesse λ est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_{Vent}} \quad (IV-21)$$

Le couple exercé par le vent sur la turbine (ou couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_{aer} = \frac{P_{turbine}}{\Omega_{turbine}} \quad (IV-22)$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous deux formes déjà utilisées dans les 2 références [10], [14] respectivement :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\pi \frac{(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta$$

$$C_p(\lambda) = 7.95633 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001$$

Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance C_p est donné dans la référence [33] par la relation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\pi \frac{(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (IV-23)$$

La Figure (IV -9) illustre les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg) obtenues par la relation (IV-23).

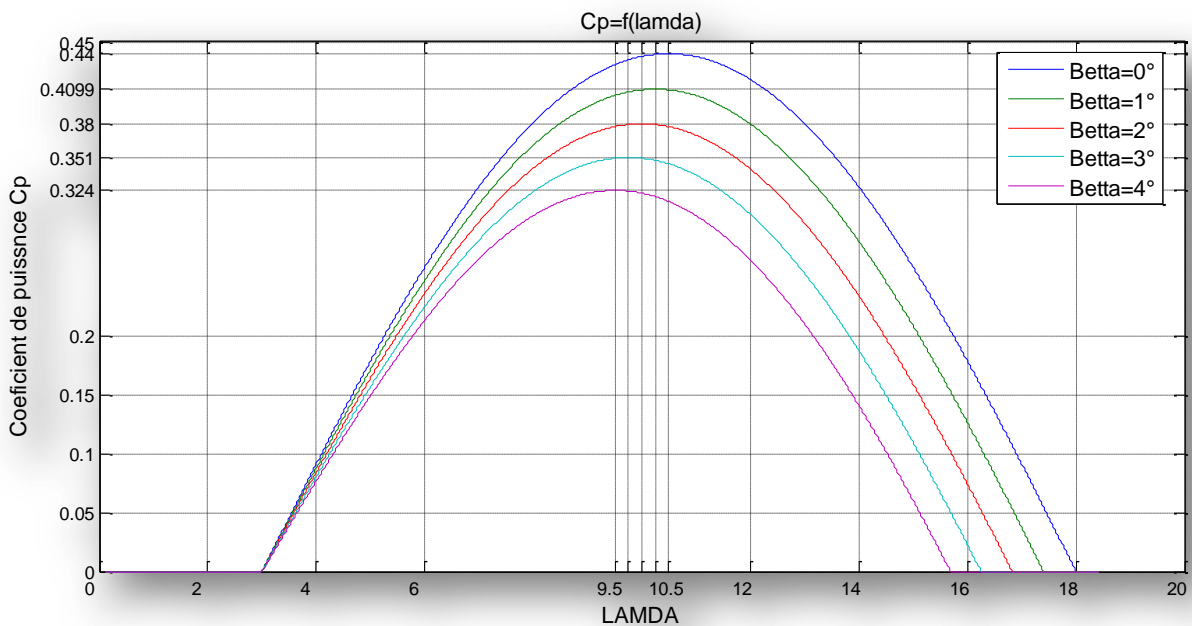


Figure (IV -9) : les caractéristiques $C_p = f(\lambda, \beta)$ pour des différentes valeurs de β

Sur la Figure (IV -9), plusieurs courbes sont représentées mais nous nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda = 10.5, C_p = 0,44, \beta = 0^\circ$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. On peut déterminer la caractéristique puissance en fonction de la vitesse de rotation, $\Omega_{turbine}$ pour un vent, V_{vent} donné.

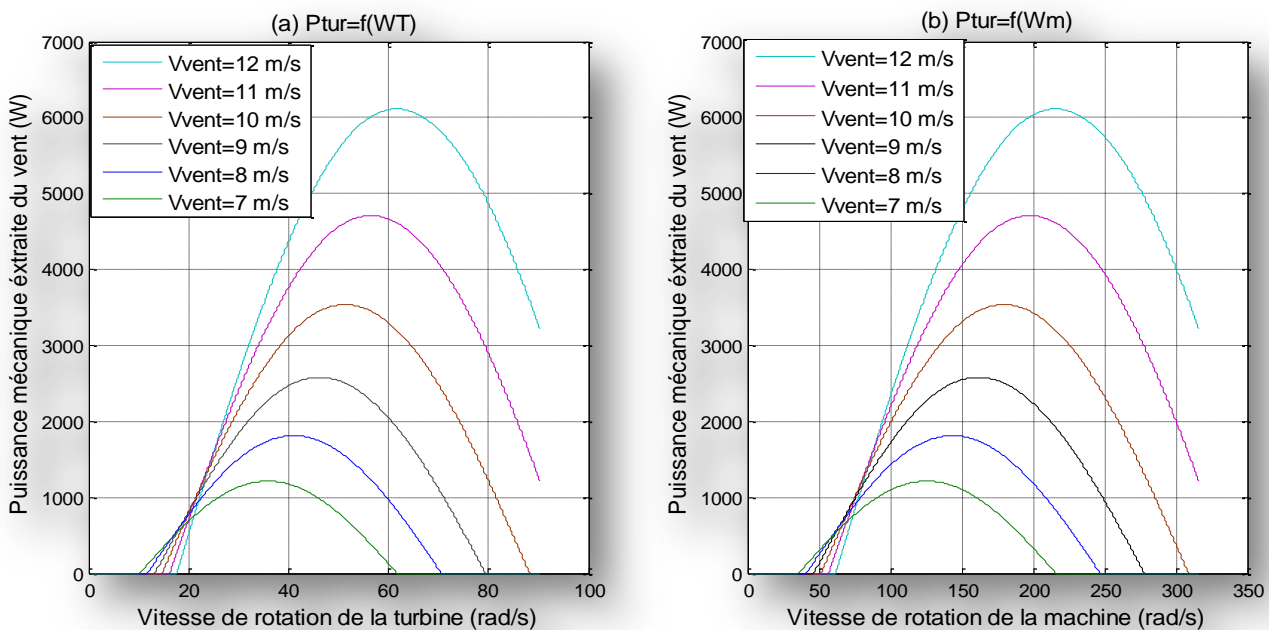


Figure (IV -10) : les caractéristiques $P_{tur} = f(\Omega_{tur})$ pour des différentes valeurs de V_{vent}

Au vu de la caractéristique suivante (Figure IV-10), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de

puissance ne sont pas exploités. C'est-à-dire, pour exploiter ces points max, la turbine doit tourner à une vitesse bien déterminée pour chaque vitesse du vent (MPPT).

De cette figure, on remarque aussi que les vitesses de rotation de la turbine et celle de la machine sont différentes et qu'on sait qu'elles doivent être compatibles. Pour faire face à ce problème on doit insérer un multiplicateur qui est chargé de cette tâche.

IV-4-2 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur. La figure suivante explique très bien la conception de l'arbre [10]

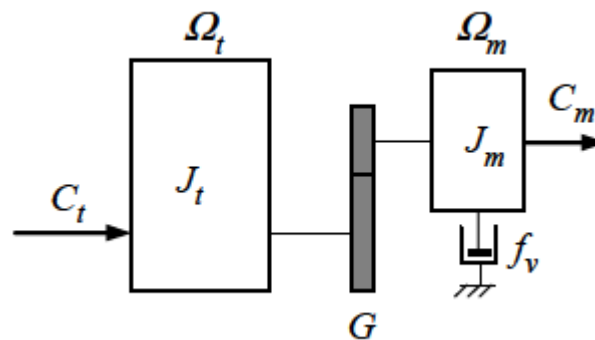


Figure (IV -11) : Modèle mécanique de la turbine éolienne

Donc le multiplicateur est caractérisé par un simple gain G qui va nous permettre d'obtenir les expressions suivantes.

$$C_m = \frac{C_{aer}}{G} \quad (IV-24)$$

$$\Omega_{machine} = G \cdot \Omega_{turbine} \quad (IV-25)$$

Où :

G = Rapport de multiplication.

C_m = Couple mécanique du générateur en (N.m)

C_{aer} = Couple mécanique de la turbine en (N.m)

$\Omega_{machine}$ = vitesse mécanique du générateur (rad/s).

$\Omega_{turbine}$ = vitesse mécanique de la turbine (rad/s).

IV-4-3 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Comme nous le montre la Figure (IV -11).

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_{turbine} \quad (IV-26)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_m) appliqué au rotor

$$J \frac{d}{dt} \Omega_{machine} = C_m \quad (IV-27)$$

Où :

J : est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

IV-4-4 Extraction du maximum de la puissance du vent

Le fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable peut être défini selon trois zones, comme l'illustre la Figure (IV -10) [4]

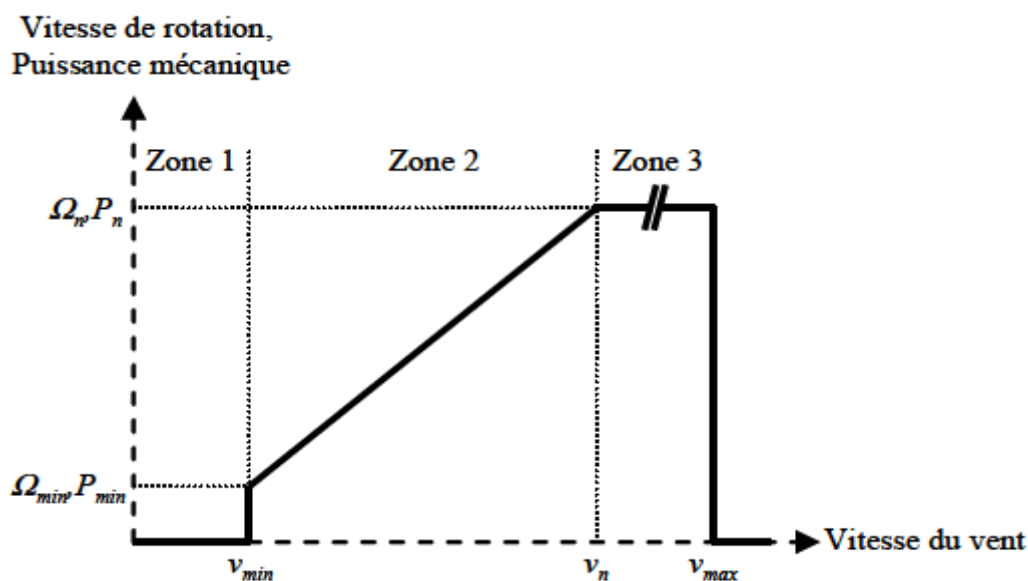


Figure (IV -12) : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable.[4]

➤ Zone 1 : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro,

➤ Zone 2 : le vent atteint une vitesse minimale $V_{v\ min}$ pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale $V_{v\ n}$ correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n .

➤ Zone 3 : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de

ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale $V_{v\ max}$, une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2 qui est limitée par un intervalle de vitesse du vent suivant $[V_{v\ min} ; V_{v\ max}] = [6 ; 10]$ (m/s). En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales est constant ($\beta=0^\circ$).

Dans la Figure (IV -9), on a déduit la valeur de λ optimal qui nous donne la valeur max de C_p pour n'importe qu'elle valeur de V_{Vent} et qui est donné par :

$$\lambda_{optimal} = 10.5 = C_{st}$$

Et pour assurer cette condition il faut assurer la condition suivante

$$\begin{aligned} \lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V_{Vent}} = \lambda_{optimal} &\Rightarrow \frac{\Omega_{turbine}}{V_{Vent}} = \frac{\lambda_{optimal}}{R} = C_{st} \\ &\Rightarrow \Omega_{turbine}^* = \frac{\lambda_{optimal}}{R} V_{Vent} \end{aligned} \quad (IV-28)$$

Pour avoir le glissement estimé, on remplace Ω_r par $\Omega_{mécannique}^*$ dans la relation (II-1)

$$\Omega_{mécannique}^* = G \cdot \Omega_{turbine}^* \quad (IV-29)$$

$$g^* = \frac{\Omega_s - \Omega_{mécannique}^*}{\Omega_s} \quad (IV-30)$$

$\Omega_{turbine}^*$: vitesse de rotation mécanique de l'ensemble estimée

g^* : Glissement estimée

Du moment que $\frac{\lambda_{optimal}}{R}$ est constant la caractéristique $\Omega_{turbine}^* = f(V_{Vent})$ est une droite de pente positive et qui est égale à $\frac{\lambda_{optimal}}{R}$.

Donc le couple mécanique à donner à la machine est imposé par la turbine et la vitesse du vent, par contre le glissement ou la vitesse de rotation de l'ensemble (turbine +machine) est imposée par le bloc de commande MPPT. Et les résultats de simulation seront donnés dans la suite.

IV-4-5 Conditions de simulation numérique

La simulation numérique a été effectuée avec le logiciel Matlab-Simulink sous les conditions suivantes : la machine étant à l'arrêt ($g=1$), le couple moteur appliqué sur l'arbre de la MADA est imposé par la commande MPPT, et le glissement est imposé par la turbine.

A partir de ces conditions, on tombe dans un fonctionnement en générateur en hypo synchrone.

Le stator de la machine est connecté au réseau et alimentée par un système de tension triphasé fixe 220/380V de fréquence 50 hz. Rappelons que, la commande que nous allons appliquer au rotor doit assurer une puissance réactive statorique nulle.

Comme on a des dépassements important au niveau des courants et au moment du démarrage de la machine. Pour palier à ce problème nous avons pensé à ne pas imposer directement le glissement de la turbine, une variation brusque mais d'effectuer un démarrage en douceur de la machine en lui imposant une pente négative faible de 0.1. En procédant de cette manière, nous avons réduit énormément les dépassements mais bien sur en allongeant un peu le temps de démarrage. Ces résultats sont montrés à la Figure (IV -13) et Figure (IV -14).

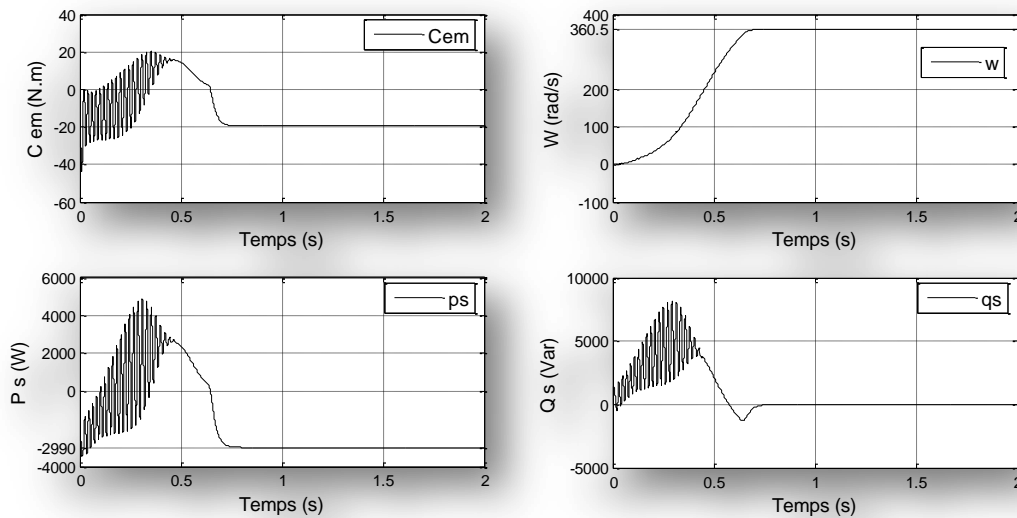


Figure (IV -13) : caractéristique couple,vitesse,puissances en fonction de temps

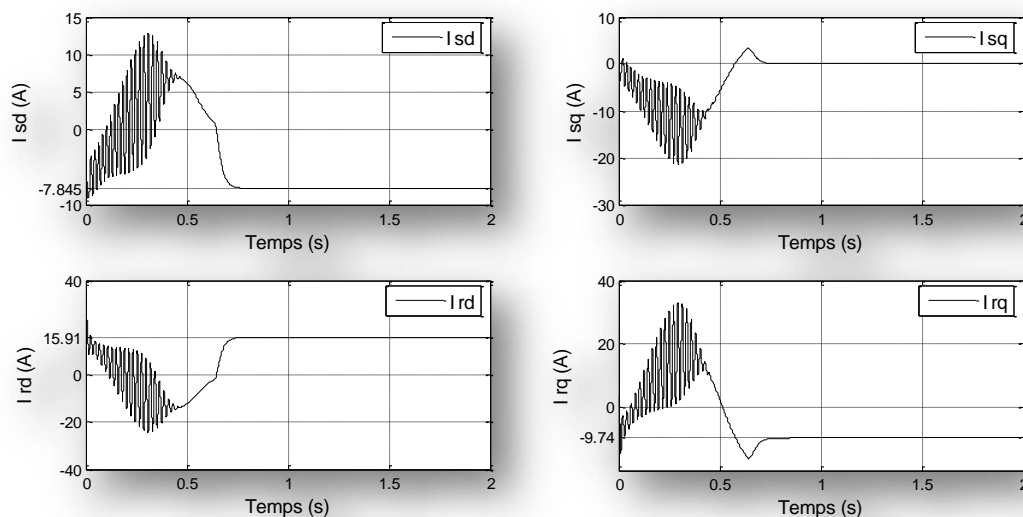


Figure (IV -14) : Cractéristique des différents courants en fonction de temps

IV-4-6 Interprétation des résultats obtenus :

Nous avons donné aux figures ci-dessous les résultats de simulation numérique obtenus. Nous constatons tout de suite que :

En régime permanent la machine a bien atteint le point de fonctionnement souhaité, elle développe un couple électromagnétique de 20Nm (aux frottements près). On remarque aussi que cette commande assure bien une puissance réactive statorique nulle.

On remarque d'après la figure (IV-13) et figure (IV-14) que le temps de démarrage est allongé et le dépassement est réduit grâce au démarrage en douceur de la machine en lui imposant une pente négative faible de 0.1.

Conclusion

Dans ce chapitre, on s'intéressera, à la commande en boucle ouverte de la MADA en régime dynamique, en appliquant au rotor la condition d'avoir la puissance réactive statorique nulle.

Après avoir déterminé les limites de fonctionnement de la MADA, l'étude est consacrée à la modélisation du système éolien (multiplicateur-turbine) et la recherche de MPPT.

Enfin, on terminera ce chapitre par la modélisation du tout le système (turbine+MADA) et l'interprétation les résultats de simulation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Notre étude dans ce mémoire a porté sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) de 3Kw, son stator est connecté directement au réseau, par contre le rotor est connecté à un onduleur dont le bus continu est alimenté par un redresseur MLI.

L'objectif principal du travail est d'étudier le comportement de la MADA en régime permanent en agissant sur les tensions de commande rotoriques et pour les différentes vitesses de rotation et du couple appliqué au bout d'arbre

Le premier chapitre, nous avons donné un état de l'art des systèmes éoliens et les différentes machines électriques utilisées.

Le deuxième chapitre, est consacré à la modélisation de la MADA en régime permanent, où on a établi un schéma équivalent qui nous permet de bien comprendre le fonctionnement de la machine dans les quatre quadrants. La suite du chapitre est consacrée aux multiples expressions et des différentes grandeurs ainsi que les caractéristiques retraçant les points de fonctionnement de la MADA, d'après les résultats on constate que V_{dr} influe directement sur la puissance active statorique, et que la puissance réactive statorique est sensible à la variation de V_{qr} .

Le troisième chapitre, la première partie de ce chapitre est consacrée au fonctionnement de la MADA à puissance réactive statorique nulle, où on a donné l'expression de V_{qr} en fonction de V_{dr} , et les différentes expressions qui en découlent de ce fonctionnement particulier.

La deuxième partie du chapitre consiste à étudier en détail les limites de fonctionnement de la MADA en agissant sur les tensions rotoriques et le glissement imposées à la machine pour avoir un fonctionnement admissible.

Le quatrième chapitre consiste à étudier une commande simple en boucle ouverte ; qui nous a permis d'intégrer facilement notre étude dans un système globale turbine+MADA dans la production de l'énergie éolienne, d'après les résultats de simulations on remarque que, on a atteint l'objectif d'avoir la puissance réactive statorique nulle.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] R. Azaizia, « *Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur à trois multi-niveaux* », mémoire magister, Laboratoire de recherche sur l'électrification des entreprises industrielles en collaboration avec l'Université de Boumerdès, 2008.
- [2] M. Abdoulaziz, S. Ibrahim, « *Etude sur générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne* », Ecole nationale polytechnique, El-Harrach, 2007.
- [3] Rapport, « *Energie éolienne par le groupe de réflexion sur l'énergie et l'environnement au XXIème siècle* » (sous l'égide de la Société Française de l'Énergie Nucléaire (SFEN)), 2005.
- [4] A.GAILLARD, « *Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service* », Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2010.
- [5] k. Laid, « *Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée* », mémoire magister, Université deBatna, 2007
- [6] M.ABBAS, M.MECHENTEL, « *Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux application à l'énergie éolienne* », mémoire ingénieur, Ecole nationale polytechnique, El-Harrach, 2006.
- [7] A. BOYETTE, « *Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne* », Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2006.
- [8] F. POITIERS, « *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne* », Thèse de doctorat de l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [9] Barret, Philippe « *Régime transitoire des machines électriques* » collection de la direction des études et recherches ,deuxième édition, Paris, eyrolles, 1987.
- [10] K. FERKOUS, « *Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne* », mémoire en physique Ecole doctorale « Energies renouvelables », Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2009.
- [11] K. Belmokhtar, Mamadou Lamine Doumbia, Kodjo Agbossou, « *Modélisation et commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation pour la fourniture de puissances au réseau électrique* » Département de génie électrique et de génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières Trois-Rivières, Canada (Quatrième Conférence Internationale sur le Génie Electrique CIGE'10, 03-04 Novembre 2010, Université de Bechar, Algérie)
- [12] Shuhui Li, Sitanshu sinha, « *A Simulation Analysis of Double-Fed Induction Generator for Wind Energy Conversion Using PSpice* » article, 1-4244-0493-2/06/\$20.00 IEEE, 2006.

- [13] Rapport Mondial 2008 sur l'Energie Eolienne, « *L'énergie éolienne pour les îles* » 8èmes Conférence et Salon Mondiaux de l'Energie Eolienne, Corée du Sud, 23-25 juin 2009.
- [14] N. MEKKAOUI, « *Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée* », mémoire magister, Université de Batna, Algérie, 2004.
- [15] A. MIRECKI, « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* », docteur de l'Institut national polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [16] R.REDJEM, « *Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne* », mémoire magistère, Université de Constantine, Algérie, 2009.
- [17] P. Maye, « *Aide-mémoire d'électrotechnique* » pages 223-2 35, édition, Dunod, Paris, année2006.ISBN 2 10 049578 X
- [18] T.Windit, G.Sybille, « *livre d'électrotechnique* » bibliothèque nationale de paris, quatrième édition, France, 2005, ISBN PUL 2-7637-8185-3.
- [19] Chien-Hung Liu and Yuan-Yih Hsu, " *Effect of Rotor Excitation Voltage on Steady-State Stability and Maximum Output Power of a Doubly Fed Induction Generator* " artciel IEEE, 2010, N° 0278-0046/\$26.00 2010 IEEE, VOL. 58, page 1099.

ANNEXE

Paramètres de la turbine

Puissance nominale : $P_n = 3.5 \text{ kW}$.

Rayon de l'éolienne : $R = 2.04 \text{ m}$.

Gain du multiplicateur de vitesse : $G = 3,5$.

Inertie de l'arbre : $J = 0.5 \text{ Kg.m}^2$.

Vitesse du vent : $v = 10 \text{ m/s}$.

Paramètres de la machine

Puissance nominale : $P_n = 3 \text{ kW}$.

Courant nominal statorique $I_{ns} = 6.8 \text{ A}$

Courant nominal rotorique $I_{nr} = 11 \text{ A}$

Tension nominale statorique $V_{ns} = 220/380 \text{ V}$

Tension nominale rotorique $V_{nr} = 104/180 \text{ V}$

$p=2$

$R_s=1.45 \Omega$

$R_r=0.7 \Omega$

$T_r=0.099$

$L_s=0.26 \text{ H}$

$\delta =0.0872$

$J=0.037 \text{ Kg.m}^2$.

$f_r =0.0125 \text{ Nm. s/rad}$

$f = 50 \text{ Hz}$