

## II. Introduction

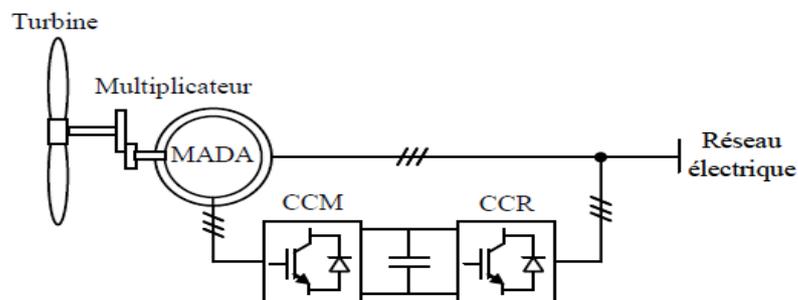
Aujourd'hui, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées par rapport à celles à vitesse constante, et la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production. Son principal intérêt est qu'elle peut fournir de la puissance active au réseau par le stator et par le rotor. Ainsi la possibilité de contrôler de puissance réactive à la production ou l'absorption par le rotor de MADA. Le courant passant au stator a la même fréquence que le courant au réseau. Il nous faut donc adapter la fréquence du courant du rotor à celle du réseau pour que le rotor fournisse de la puissance active au réseau. La stratégie utilisée pour cela est l'introduction de deux convertisseurs de puissance interfacés par un bus continu.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Dans un premier temps, on a modélisé chaque élément de ce système de conversion éolienne, tels que la turbine éolienne et ses parties mécaniques et ensuite la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur.

### II.1 Modélisation du système éolien

Dans cette partie, on modélise la chaîne de conversion éolienne directement connectée au réseau électrique de distribution à travers le stator, constituée d'une turbine éolienne, d'un multiplicateur, d'une machine asynchrone alimentation MADA à vitesse variable, tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu et un fil le montre la figure II-1.



**Figure : II-1** : Système éolien à vitesse variable basé sur une MADA.

## II.2 Modélisation de la Turbine Eolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [14].

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ , comme le montre la figure II-2.

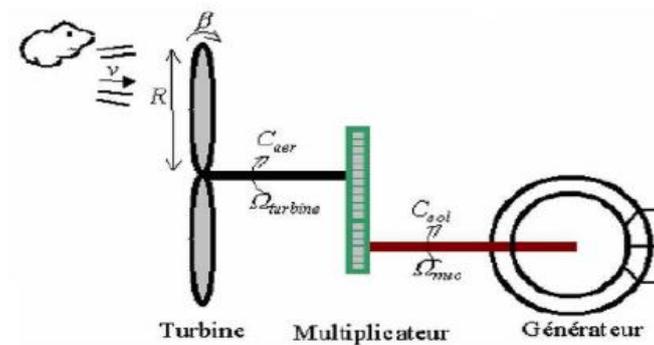


Figure : II-2 Schéma de la turbine éolienne.

### II.2.1 Modèle des pales

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante [15] :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.1)$$

Où :

$\rho$  : est la densité d'air ( $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$ ) à la pression atmosphérique (à  $15^0 \text{ C}$ ). [16] [17].

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

$v$  : la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique, qui est convertie par une turbine du vent,  $P_{aer}$  dépend du coefficient de puissance  $C_p$ . Elle est donnée par [17] :

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \quad (2.2)$$

La turbine éolienne peut seulement convertir juste un certain pourcentage de la puissance capturée du vent [18]. On représente ce pourcentage par  $C_p(\beta, \lambda)$  qui est en fonction de ratio de vitesse  $\lambda$  et l'angle de l'orientation de pale  $\beta$ .

Le ratio de vitesse  $\lambda$  est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (2.3)$$

$\Omega_t$  : la vitesse de rotation de la turbine.

$\lambda$  : Vitesse spécifique

$\beta$  : Angle d'inclinaison des pales [°].

$C_p$  : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine

$R$  : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique  $C_{aer}$  est donné par l'expression suivante :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (2.4)$$

Le coefficient de puissance est intrinsèque à la constitution de l'éolienne. Il représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. On peut modéliser le coefficient de

puissance avec une seule équation qui dépend du ratio de vitesse  $\lambda$  et l'angle d'orientation des pales  $\beta$ .

$$C_p(\beta, \lambda) = (0.35 - 0.00167) \cdot (\beta - 2) \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{14.34 - 0.3 \cdot (\beta - 2)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (2.5)$$

Dans cette formule, le paramètre  $\lambda_i$  dépend également de  $\lambda$  et  $\beta$

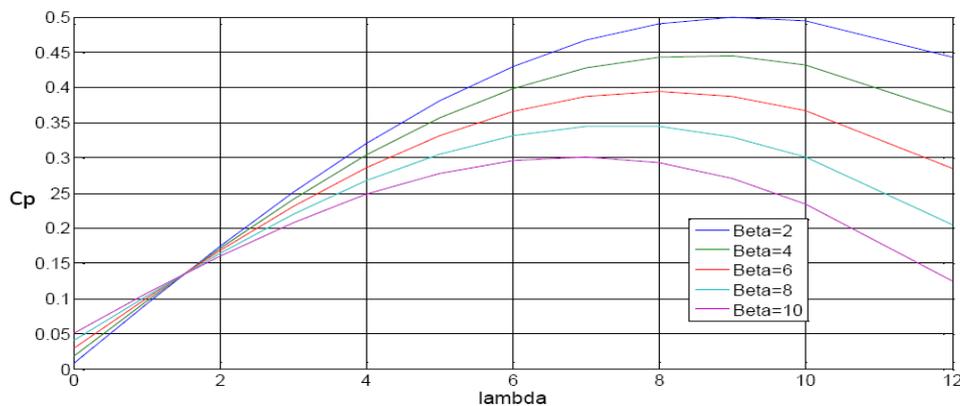
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda} + 0.08\beta - \frac{0.035}{1+\beta} \quad (2.6)$$

Les six coefficients définis,  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  dépendent de la turbine considérée sont présenté dans le tableau suivants [19]:

coefficient	valeur
C1	0.5176
C2	116
C3	0.4
C4	5
C5	21
C6	0.0068

**Tableau II-1 :** Coefficients définissant l'évolution de  $C_p$ .

La figure suivante représente la variation de coefficient  $C_p$  en fonction du ratio de la vitesse  $\lambda$  et l'angle de calage de la pale  $\beta$ .



**Figure II-3 :** Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple

On remarque que si, pour un angle constant  $\beta$ , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse  $\lambda$  constant et égal à  $\lambda_{opt}$  à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale.

Ainsi le schéma bloc des pales étudiées est représenté en figure II-4

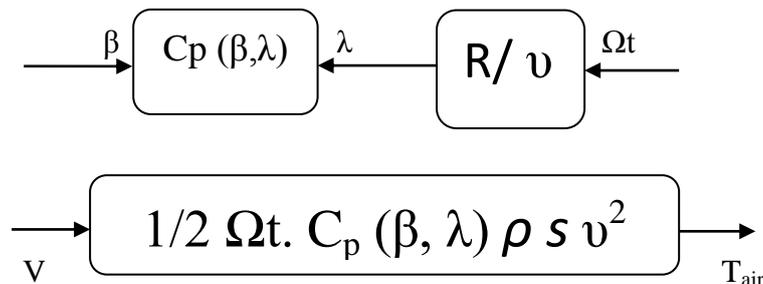


Figure II-4 : Schéma bloc du modèle des pales.

## II.2.2 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur. La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_t$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ , assez lente à celle que nécessite la génératrice  $\Omega_g$ .



Figure II-5 : Exemple mécanique du multiplicateur [21].

Le multiplicateur adapte la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à la vitesse de rotation de la MADA (arbre rapide) (Figure 1-3). En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, il est alors modélisé par les deux équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.7)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.8)$$

Avec :

$G$  : Gain de vitesse égale à  $G$  ou un gain de couple égale à  $1/G$ .

$\Omega_{mec}$  : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).

L'équation mécanique exprime l'accélération de l'arbre de la génératrice en fonction du

Couple total mécanique appliqué :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.9)$$

$J$  et  $\Omega_m$  sont respectivement l'inertie et la vitesse mécanique de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$  [22] [23] [24]

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.10)$$

Les frottements des pâles, du moyeu, ainsi que de l'arbre, sont groupés dans un seul coefficient de frottement ramené sur l'arbre de la génératrice et appelé  $f$ .

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.11)$$

D'après les équations (2.9), (2.10) et (2.11) nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la MADA par :

$$C_g - C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.12)$$

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur.

Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées :

La coupole du multiplicateur, la coupole électromagnétique fournie par la génératrice.

Figure II-6 montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- ✚ L'angle de la pale et la coupole électromagnétique de la génératrice.
- ✚ La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice à ce système.

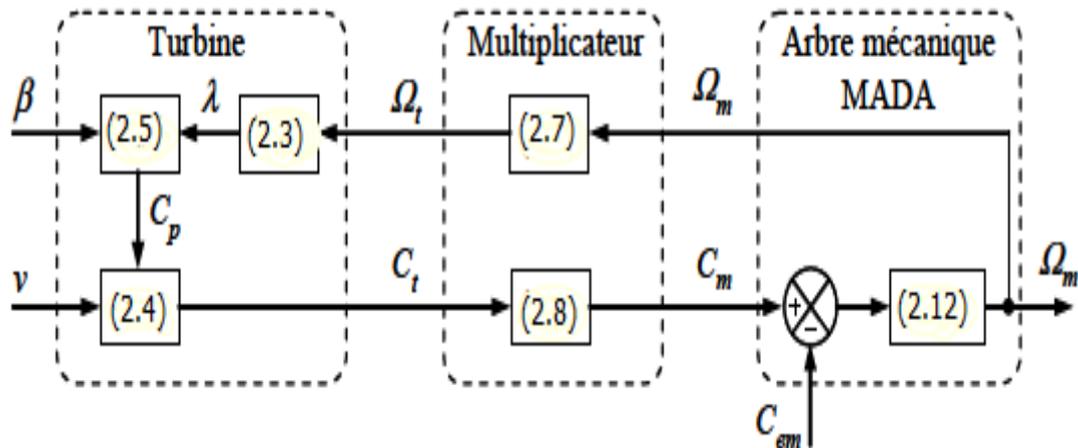


Figure II-6 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne

## II.2.3 Extraction du maximum de la puissance du vent

### II.2.3.1 Principe de la MPPT

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

Nous parlons alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais Maximiser Power Point Tracking). Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice.

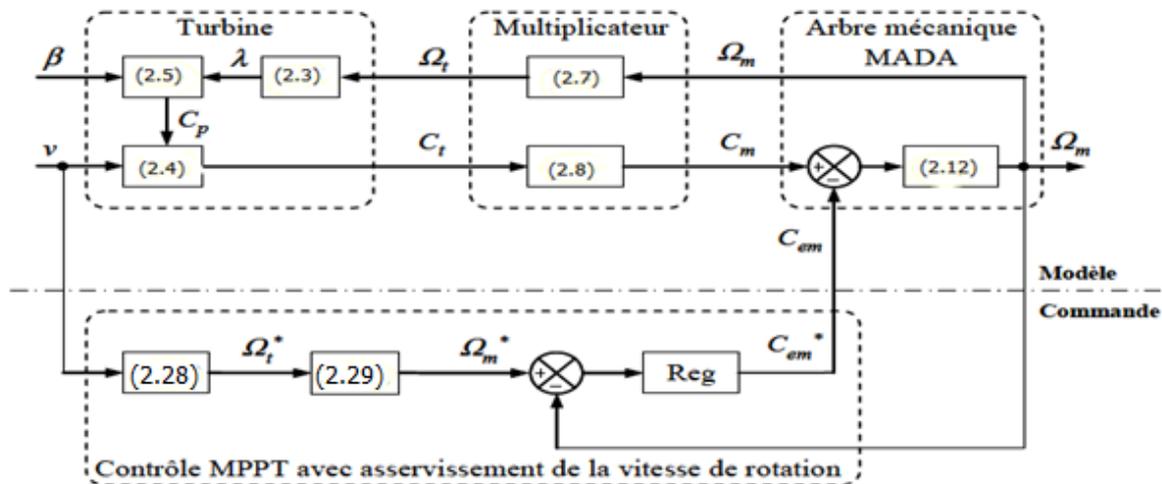
Il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la MADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle. [20] :

- le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation,
- le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que la MADA et le CCM sont idéaux : quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par la MADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

### II.2.3.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation

La première méthode de contrôle consiste à régler le couple électromagnétique sur l'arbre de la MADA de manière à fixer la vitesse de rotation de celle-ci à une vitesse de référence. Pour réaliser ceci, un asservissement de la vitesse de rotation de la MADA doit être effectué, comme le montre la Figure II-15.

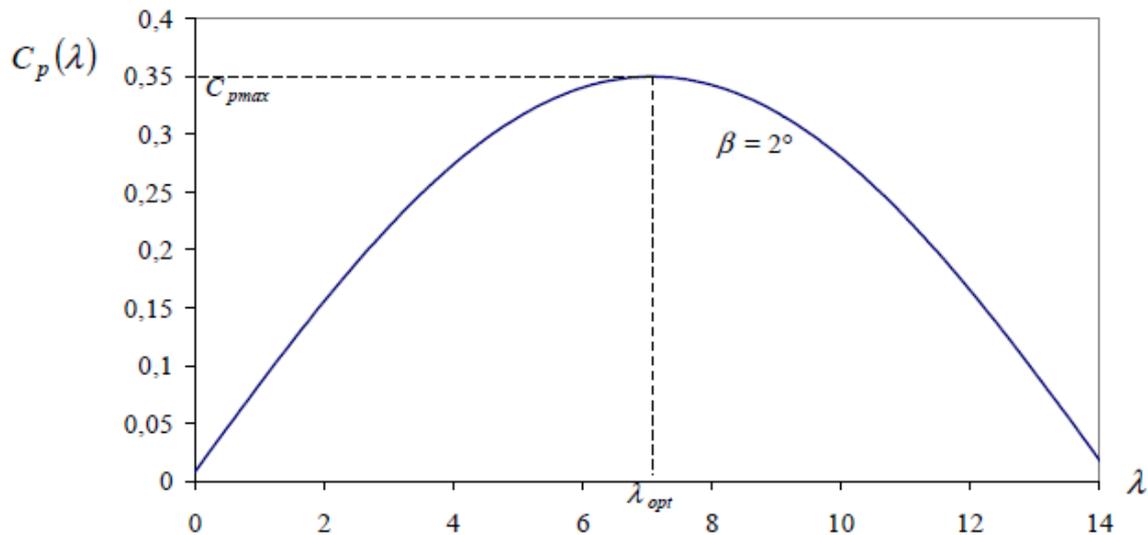


**Figure II-7 :** Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation.

Le couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$  permettant d'obtenir une vitesse de rotation  $\Omega_m$  égale à sa valeur de référence  $\Omega_m^*$  est obtenu en sortie du régulateur de vitesse ("Reg" sur la Figure II-15). Ce régulateur, de type Proportionnel Intégral (PI), permet ainsi d'asservir la vitesse de rotation et d'atténuer l'effet du couple mécanique  $C_m$  considéré comme une perturbation.

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient

$C_p$ . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative  $\lambda$  est égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  (pour  $\beta$  constant et égal à  $2^\circ$ ), comme le montre la Figure II-16.



**Figure II-8:** Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour  $\beta = 2^\circ$ .

La vitesse de rotation de référence de la turbine  $\Omega t^*$  est obtenue à partir de l'équation (1.2) et est définie par :

$$\Omega t^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{R} \quad (2.28)$$

Nous en déduisons la référence de vitesse de rotation de la MADA en prenant en compte le gain du multiplicateur par :

$$\Omega m^* = G \cdot \Omega t^* \quad (2.29)$$

L'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Ainsi, une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, la plupart des turbines éoliennes installées sont contrôlées sans asservissement de la vitesse de rotation. Ce mode de contrôle est étudié à la section suivante. Il sera retenu dans la suite de nos travaux.

### II.2.3.3 Contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation

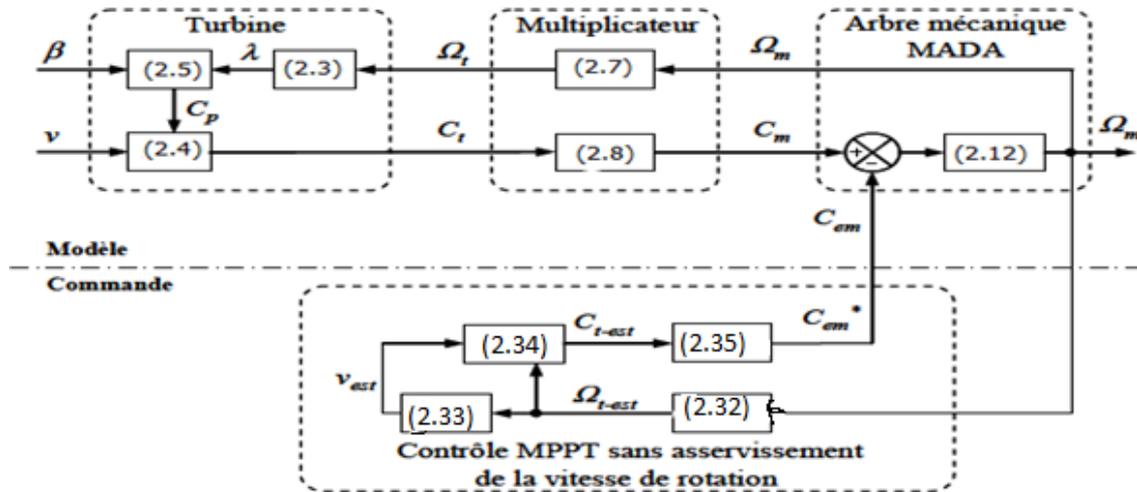
Ce mode de contrôle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul. Dans ce cas, à partir de l'équation (1.12), nous pouvons écrire :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + fv \cdot \Omega_m = Cm - Cem = 0 \quad (2.30)$$

De plus, si l'on néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux ( $fv \cdot \Omega_m = 0$ ) par rapport au couple mécanique  $C_m$ , on peut alors écrire :

$$C_m = Cem \quad (2.31)$$

La Figure II-17 présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.



**Figure II-9 :** Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation

Une estimation de la vitesse de rotation de la turbine, notée  $\Omega_{t-est}$ , est obtenue à partir de la mesure de la vitesse de rotation de la MADA :

$$\Omega_{t-est} = \frac{\Omega_m}{G} \quad (2.32)$$

Une mesure précise de la vitesse du vent étant difficile, une estimation de celle-ci, notée  $v_{est}$ , est obtenue à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine :

$$v_{est} = \frac{\Omega t - est. R}{\lambda} \quad (2.33)$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut s'exprimer par :

$$C_{t-est} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega t - est} \cdot v_{est}^3 \quad (2.34)$$

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

$$C_{em}^* = \frac{C_{t-est}}{G} \quad (2.35)$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum  $C_{pmax}$ . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par :

$$C_{em}^* = K \cdot \Omega m^2 \quad (2.36)$$

## II.3 Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

### II.3.1 Description de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies de contacts glissants d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

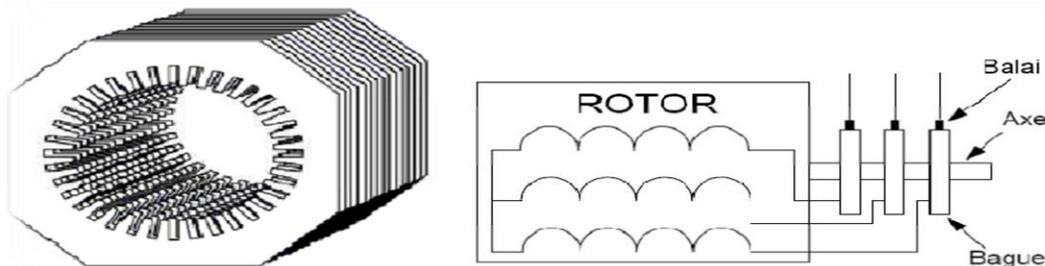
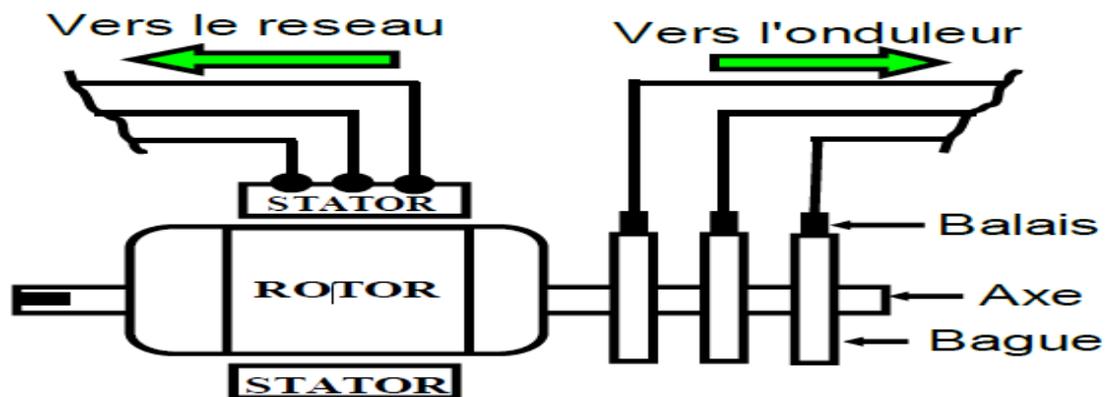


Figure II-10 : Structure Stator et rotor de la MADA [27].

La machine asynchrone à double alimentations se compose principalement de deux parties, stator et rotor. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine, il est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator et du rotor sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) avec pour seule différence le circuit électrique du rotor qui lui, est relié à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. Les trois enroulements du stator (A, B et C) sont parallèles aux enroulements du rotor et sont distribués sinusoïdalement, décalés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre.



**Figure II-11 :** Machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.

### II.3. 1.1 Avantages et inconvénients de la MADA

Nous allons aborder dans ce paragraphe quelques avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable

#### II.3.1.a Avantages de la MADA

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6).

- Le partage des fréquences entre le stator et le rotor: en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement [28] [29].

### II.3.1.b Inconvénients de la MADA

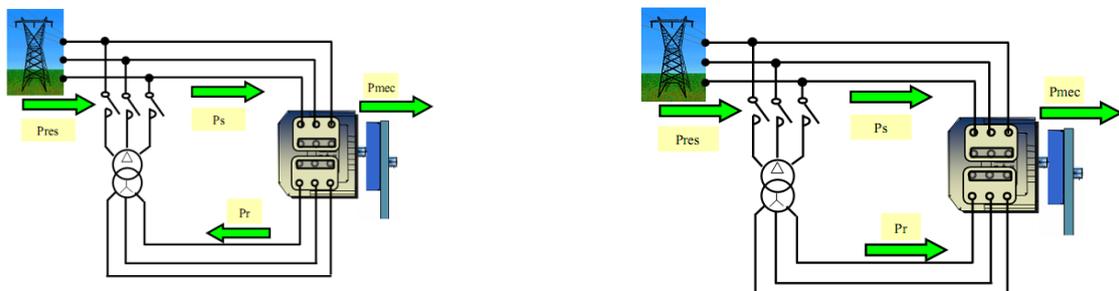
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Machine plus volumineuse que celle à cage, à cause des balais.

## II.4 Modes de fonctionnement de la MADA

Cette machine présente quatre modes de fonctionnement : [30] [31] [32]:

- En moteur : Hypo-synchrone ( $g > 0$ ,  $P_s > 0$ ,  $P_{mec} > 0$ ,  $P_r = g \cdot P_s > 0$ )  
ou hyper-synchrone ( $g < 0$ ,  $P_s > 0$ ,  $P_{mec} > 0$ ,  $P_r = g \cdot P_s < 0$ )
- En génératrice : Hypo ( $g > 0$ ) ou hyper-synchrone ( $g < 0$ )

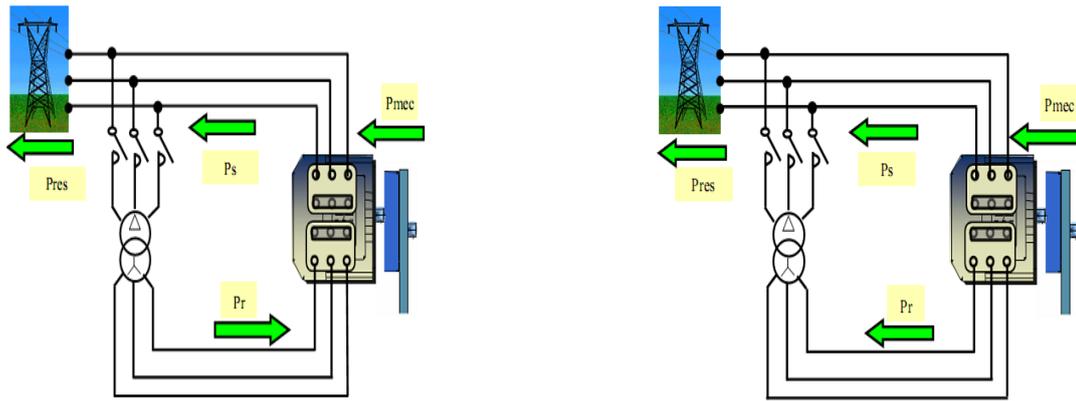
La MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants (Figure 2.9). C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur. Contrairement à la machine à cage alimentée à fréquence fixe, ce n'est pas uniquement la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement mais la combinaison des fréquences de rotation, d'alimentation du rotor et du stator, et du signe de la puissance mécanique



a) Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

b) Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

Figure II-12 : Fonctionnement en mode moteur

c) *Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone*d) *Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone***Figure II-13 :** *Fonctionnement en mode générateur*

Où :

$P_s$  : Puissance statorique.

$P_r$  : Puissance rotorique.

$P_m$  : Puissance mécanique.

**a-** Lors du fonctionnement de la MADA en moteur, la puissance  $P_s$  est fournie par le réseau au stator de cette dernière. Durant le mode hypo-synchrone, où la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement  $P_r$  transite à travers les deux convertisseurs pour être réinjectée au réseau.

**b-** Pendant le mode hyper-synchrone, le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA. La puissance de glissement transite par les deux convertisseurs pour être absorbée par le rotor de la MADA entraînant par ceci un fonctionnement du moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme et le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est alors en opposition de phase avec celui du stator.

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

**c-** En mode hypo-synchrone une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

**d-** Lorsque la machine tourne au-dessus de la vitesse de synchronisme, la puissance mécanique est réinjectée au réseau à travers le stator et le rotor. La MAS à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules.

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quel que soit la vitesse de rotation (hypo ou hyper-synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement

## **II.5 Modélisation de la MADA**

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

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou des aimants permanents mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de "machine synchrone à excitation alternative" [27] [37]. La figure (II.11) représente l'enroulement de la MADA.

La théorie de la machine asynchrone à double alimentation est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations statoriques et rotoriques triphasé, La transformation de Park permet le passage d'un repère triphasé à un modèle biphasé. Ce qui réduit considérablement la complexité du modèle en vue de sa commande

### **II.5.1 Hypothèses simplificatrices**

- Les pertes dans le fer seront négligées.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- La saturation du circuit magnétique, hystérésis et courant de Foucault sera négligée.

- De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

### ❖ La machine asynchrone à double alimentation comporte

-trois bobines statoriques ( $S_a, S_b, S_c$ ) décalées entre elles par un angle de  $(2\pi/3)$ .

-trois bobines rotoriques identiques de répartition similaire à celles du stator ( $R_a, R_b, R_c$ ).

La figure (II-12) représente la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre ( $P$ ) de paires de pôles par phase).

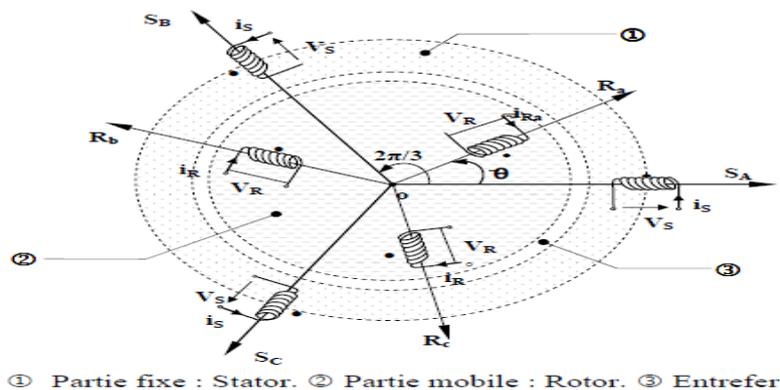


Figure II-14 : Représentation simplifiée de la MADA.

$S_a, S_b, S_c$ : phases du stator

$R_a, R_b, R_c$  : phases du rotor

## II.5.2 Equations électriques de la MADA

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

- Pour le stator :

$$[V_s] = [R_s] + I_s + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.13)$$

- Pour le rotor :

$$[V_r] = [R_r] + I_r + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.14)$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

- $[V_s]$  : Tensions simples triphasées au stator de la machine.
- $[V_r]$  : Tensions simples triphasées au rotor de la machine.
- $[I_s]$  : Courants statoriques de la machine.
- $[I_r]$  : Courants rotoriques de la machine.
- $[\varphi_s]$  : Flux statoriques de la machine.
- $[\varphi_r]$  : Flux rotoriques de la machine.

Où :  $R_s$  et  $R_r$  sont respectivement les résistances statoriques et rotoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

### II.5.3 Equations magnétiques

Les équations des flux statoriques et rotoriques sont :

$$\begin{aligned} [\Phi_s] &= [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] &= [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \end{aligned} \quad (2.15)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & R_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où :

$-M_{sr}$  représente la matrice des inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotoriques.

$-l_s, l_r$  sont respectivement les inductances propres statoriques et rotoriques.

$-m_s, m_r$  sont respectivement les inductances mutuelles statoriques et rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles (ou matrice de couplage rotor- stator) est donnée

Par :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La matrice des inductances  $[M_{sr}]$  dépend de l'angle  $\theta$  ce qui rend le système régissant la MADA un système non linéaire.

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \left( \frac{d}{dt} [L_s] \cdot [I_s] \right) + \left( \frac{d}{dt} [M_{sr}] \cdot [I_r] \right) \quad (2.17)$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \left( \frac{d}{dt} [L_r] \cdot [I_r] \right) + \left( \frac{d}{dt} [M_{rs}] \cdot [I_s] \right) \quad (2.18)$$

Où :  $[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques. ;

### II.5.4 Equation mécanique

L'équation dynamique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.19)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie de partie tournante de la machine.

$C_r$  : le couple résistant.

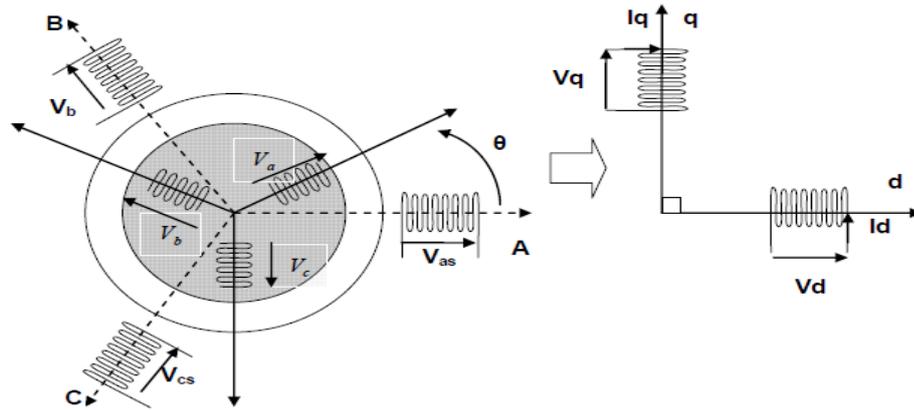
$f$  : le coefficient de frottement visqueux.

$C_{em}$  : couple électromagnétique.

$\Omega$  : vitesse angulaire de rotation.

### II.5.5 Transformation de Park

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux (courants, tensions, et flux) permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants. La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées définie par la matrice de rotation donnée sous la forme suivante :



**Figure II-15:** Modèle de PARK de la MADA

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\text{Et } [P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Si l'on applique la transformation de Park aux tensions, flux, et courants de la MADA on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.23)$$

Avec :

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  : vitesse du repère statorique par rapport au référentiel d, q (imposée par le réseau 50Hz).

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$  : vitesse du repère rotorique par rapport au référentiel d, q (influencée par le convertisseur coté rotor).

### II.5.6 flux statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M_{sr} I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \end{cases} \quad (2.25)$$

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  peut être exprimé, à partir des flux et des courants statoriques, par :

$$C_{em} = p(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \quad (2.26)$$

Il peut également s'exprimer en fonction des courants rotoriques et des flux statoriques par :

$$C_{em} = p \cdot \frac{m \cdot L_m}{L_s} (\Phi_{ds} I_{qr} - \Phi_{qs} I_{dr}) \quad (2.27)$$

## II.6 Stratégie de commande de la turbine

Une turbine éolienne est un dispositif qui capture une partie de l'énergie du vent et la convertir en un travail utile. En particulier, un système de conversion d'énergie éolienne relié à un réseau d'énergie électrique doit être conçu pour réduire au maximum le coût de production et d'assurer une exploitation sûre en respectant les normes de la qualité d'énergie.

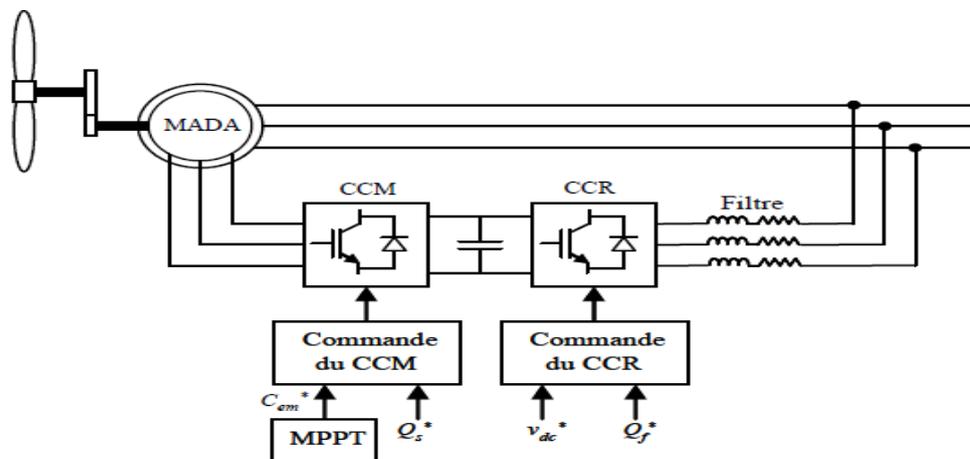
### II.6.1 Objectifs de la commande

La minimisation du coût d'énergie implique une série d'objectifs étroitement liés et parfois en conflit. Par conséquent, ils ne devraient pas être poursuivis séparément. La question est de trouver un compromis bien équilibré entre eux. Ces objectifs peuvent être arrangés de la manière suivante [25] [26] :

- **Capture de l'énergie** : Maximisation de la capture d'énergie en tenant compte des restrictions d'exploitation sûre telles que la puissance nominale et la vitesse nominale.
- **Charges mécaniques** : protection du système éolien des charges mécaniques excessives.
- **Qualité de l'énergie** : production de l'énergie conformément aux normes d'interconnexion.

### II.6.2 Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure II-14. Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien.



**Figure II-16** : Architecture de commande du système éolien.

D'après la Figure II-14, trois commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

- la commande d'extraction du maximum de puissance du vent par un contrôle dit

“MPPT” (Maximum Power Point Tracking),

- la commande du CCM en contrôlant le couple électromagnétique et la puissance réactive statorique de la MADA,
- la commande du CCR en contrôlant la tension du bus continu et les puissances active et réactive échangées avec le réseau.

Où  $K$  est une constante définie par :

$$K = \frac{C_p \max. \rho. \pi. R^5}{2. G^3. \lambda_{opt}^3} \quad (2.37)$$

### II.7 Commande vectorielle

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines à courant alternatif. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes ( $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$ ) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon que l'une des composantes ( $I_{qs}$ ) commande le couple et l'autre ( $I_{ds}$ ) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu, à excitation séparée .

$$\Phi_{sd} = \Phi_s \quad (2.39)$$

$$\Phi_{sq} = 0 \quad (2.40)$$

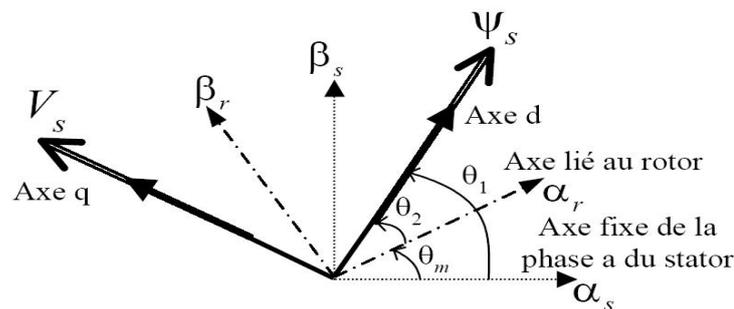


Figure II-16 : vecteurs courant et flux dans le système d'axe choisi.

## II.8 Choix du référentiel

Le choix du référentiel se fait selon le problème étudié [18]

### II.8.1 Référentiel lié au stator

Il est exprimé par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (2.41)$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

### II.8.2 Référentiel lié au rotor

On trouve :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad (2.42)$$

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor où la vitesse est supposée constante.

### II.8.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est caractérisé par :

$$\omega_s = \omega_r + \omega = g \cdot \omega_s + \omega \quad (2.43)$$

Où : g est le glissement définit par :

$$g = (\omega_s - \omega) / \omega_s \quad (2.44)$$

Avec :

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$ : Les tensions direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\varphi_{sq}, \varphi_{sd}, \varphi_{rq}$  et  $\varphi_{rd}$  : Les flux direct et en quadrature statoriques, respectivement rotoriques.

$\omega_r$  et  $\omega_s$ : La pulsation statorique, rotorique respectivement

Il est préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine car les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent.

Nous allons considérer tout au long de ce mémoire que l'axe d du repère de Park est lié au champ tournant, donc les seules équations (ci-dessous) qui seront utilisées.

Le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \\ J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = p(\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) - C - f\Omega_{mec} \end{cases} \quad (2.45)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont définies comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \\ P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (2.46)$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} \cdot \theta_s I_{qr} \quad (2.47)$$

les flux rotoriques devient :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \end{cases} \quad (2.48)$$

Afin de montrer que la commande par orientation du flux statorique permet d'avoir un découplage effectif des grandeurs réelles (couple, vitesse) de la MADA, on considère les tensions rotoriques  $V_{dr}$ ,  $V_{qr}$  comme variable de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques  $I_{dr}$ ,  $I_{qr}$  comme variable d'état. Ces grandeurs sont fonction des grandeurs de consigne  $P_{ref}$  et  $Q_{ref}$ .



**Figure II-17:** Bloc de contrôle à flux orienté.

$$\begin{cases} P_{s-ref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq-ref} \\ Q_{s-ref} = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd-ref} \end{cases} \quad (2.49)$$

Compte tenu du repère choisi et des approximations faites, et si l'on considère l'inductance magnétisante  $\mathbf{M}$  comme constante, le système obtenu liée de façon proportionnelle à la puissance active au courant rotorique d'axe  $\mathbf{q}$  et la puissance réactive au courant rotorique d'axe  $\mathbf{d}$ .

On pourrait exprimer les tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.5)$$

Où :

$g$  correspond au glissement de la MADA.

$\left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right)$  : est le terme de couplage entre les deux axes.une synthèse adéquate des régulateur dans la boucle de commande permettra de les compenser.

$g \frac{V_s M_{sr}}{L_s}$  : représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

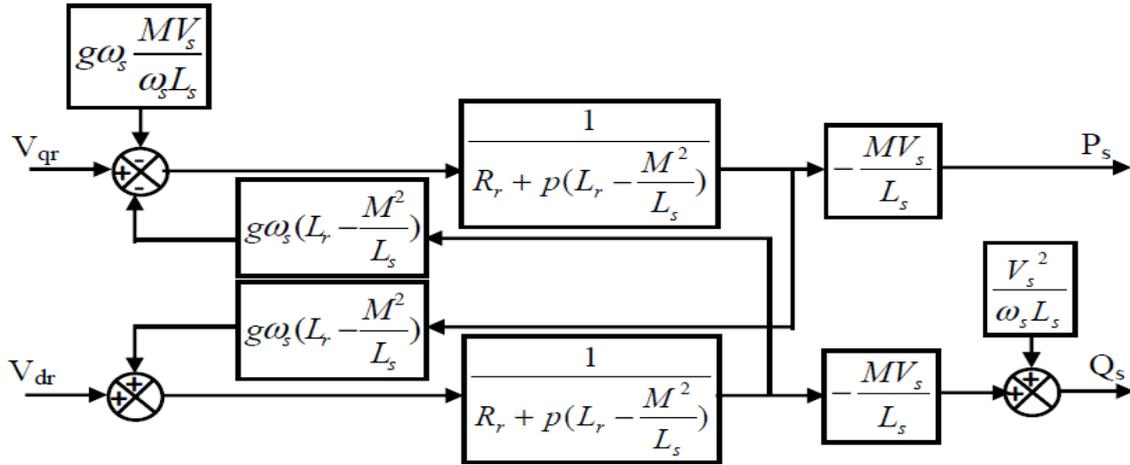


Figure II-18: Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

### II.8.4 Contrôle indépendant des puissances actives et réactives

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA, il suffit maintenant d'inverser ses blocs pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances actives et réactives de référence.

### II.8.5 Commande vectorielle indirecte

Elle se base sur les équations régissant le fonctionnement de la machine défini au paragraphe précédent ; tout en gardant les mêmes hypothèses.

En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances. On reproduit ainsi le schéma bloc du système en sens inverse en aboutissant à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens et qui contient tous les éléments du schéma bloc de la MADA.

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques [38].

Nous aurons donc un bloc de commande constitué de deux sous-systèmes. Le premier calcule les courants de référence à partir des consignes (Puissances actives et réactives), le deuxième calcule les tensions de référence à partir des courants rotoriques calculés par le premier sous-système [39].

A partir du bloc de commande nous pouvons élaborer deux structures, l'une utilise une boucle régulant le courant, et l'autre se base sur la première en lui ajoutant une boucle régulant les puissances.

### III.8.6 Commande sans boucle de puissance

Dans le souci de garantir une bonne stabilité du réseau, nous introduisons une boucle de régulation des courants rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine [38].

On établit alors le système de régulation donné par la figure (III.27).

Les régulateurs de cette structure sont calculés de la même façon que pour la commande directe. Ils sont identiques pour chaque axe. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans.

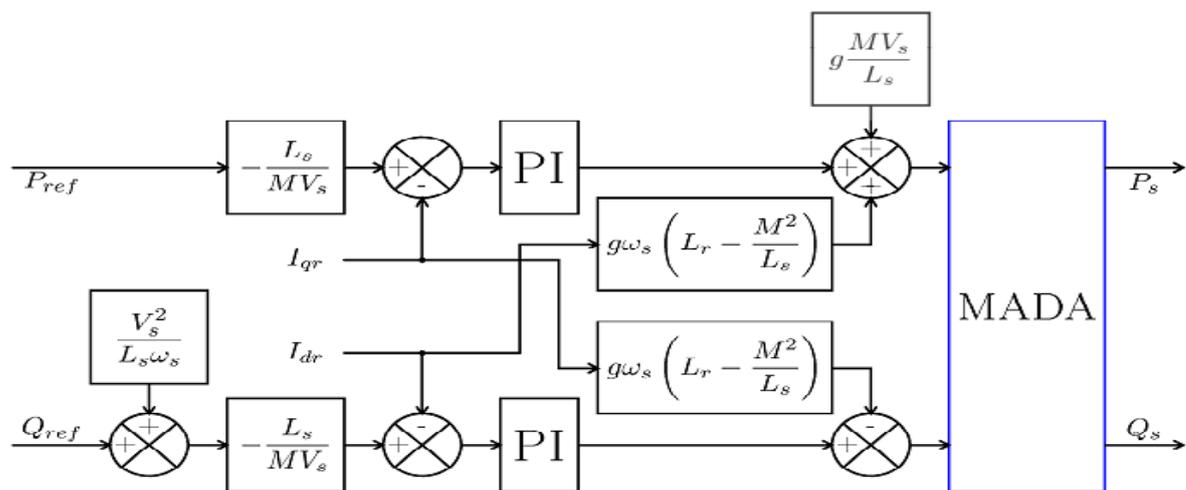


Figure II-19: schéma bloc de la commande indirecte.

Le régulateur de type proportionnel Intégral (PI) utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre et offrant des performances acceptables C'est pour cela qu'il retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolienne.

## II.9 Contrôle du convertisseur coté rotor

L'onduleur de tension représente aujourd'hui un composant essentiel dans les systèmes d'interface avec le réseau. Son utilisation vient du fait qu'il permet entre autre de contrôler les puissances actives et réactives échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas. Il reçoit les puissances actives et réactive de référence,  $P_{sref}$ ,  $Q_{sref}$  de l'unité de supervision locale de chaque éolienne et envoie les ordres de commande au convertisseur.

La Figure II-19 représente le schéma bloc de la commande du CCM. Cette commande permet de contrôler indépendamment les courants rotoriques d'axes  $dq$  et donc les puissances active et réactive statoriques de la MADA.

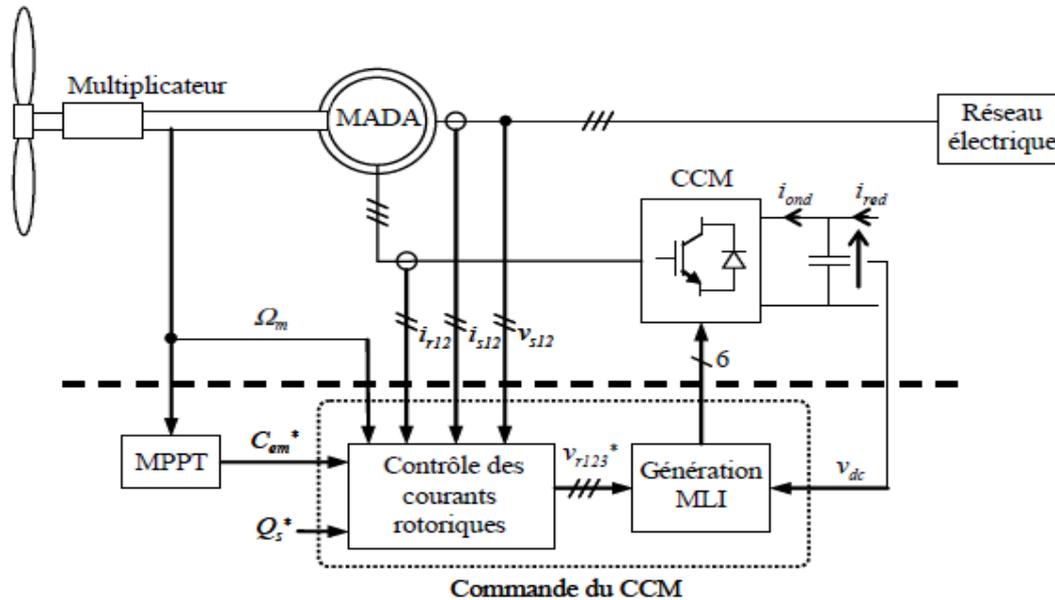


Figure II-20: Commande du CCM.

## II.10 Contrôle du convertisseur côté Réseau

L'objectif du contrôle du convertisseur coté réseau consiste à réguler la tension du bus continu et à contrôler les puissances active et réactive transitant à travers ce dernier. Le facteur de puissance peut être fixé à 1 en imposant simplement une puissance réactive nulle.

Un contrôle vectoriel avec l'orientation du repère de Park selon le vecteur de tension réseau est utilisé pour permettre un découplage entre le contrôle de la puissance active et réactive.

Le contrôle du convertisseur CCR connecté au réseau électrique est réalisé pour les deux fonctions suivantes :

- Le contrôle des courants circulant dans le filtre RL.
- Le contrôle de la tension du bus continu.

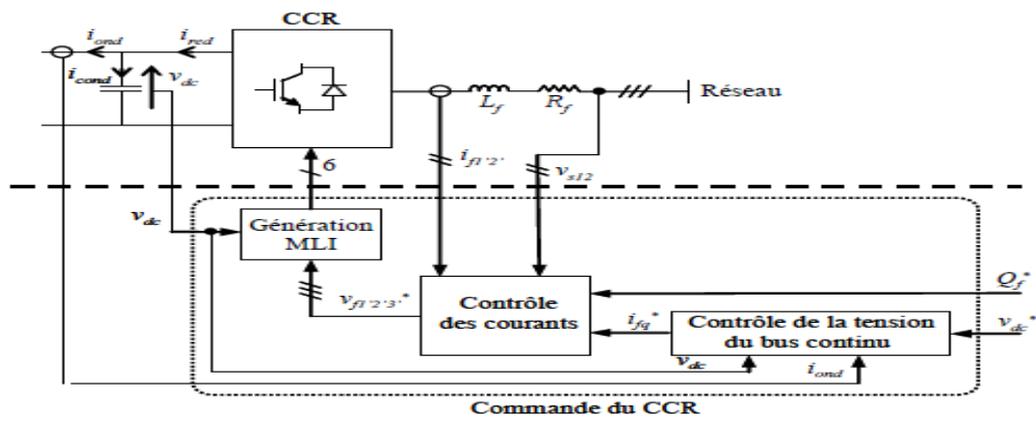
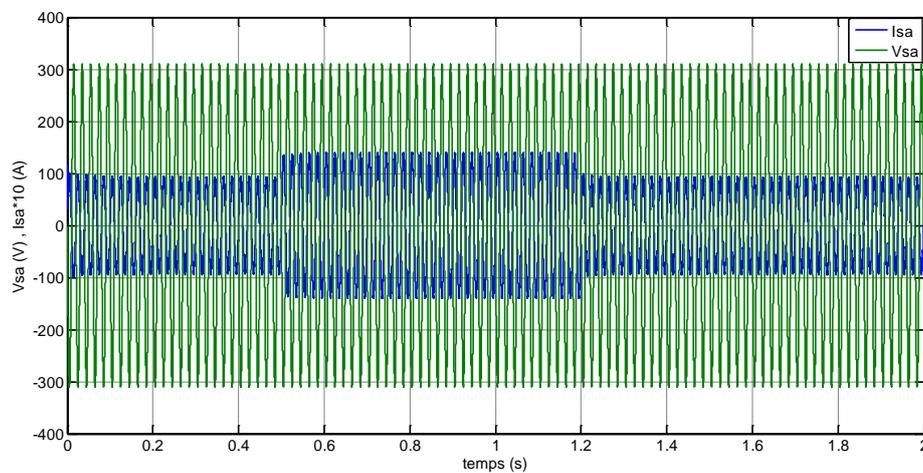


Figure II-21: convertisseur coté Réseau

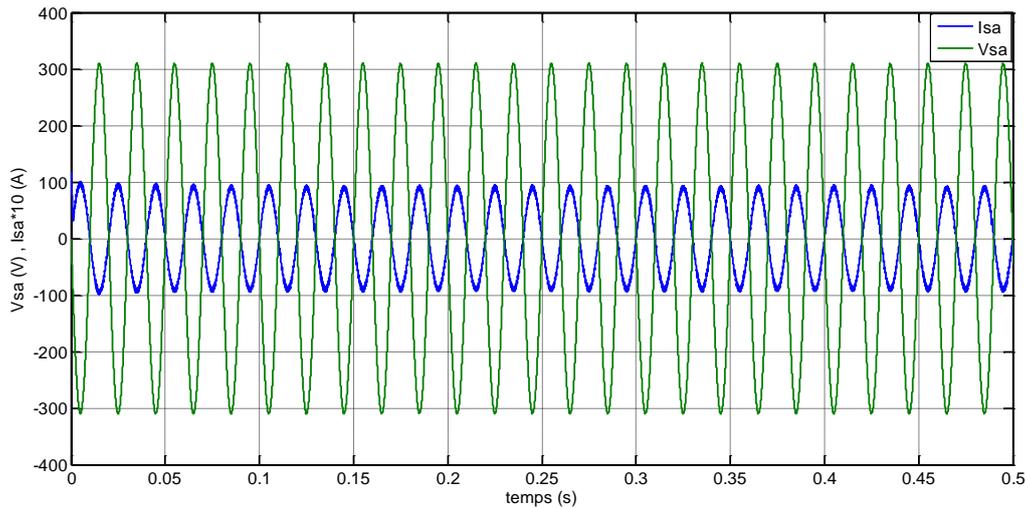
### II.11 Type du régulateur

Dans plusieurs structures de commande comme par exemple utilisée dans [18] des régulateurs PI ont été utilisé pour commander la MADA. On adopte à l'utiliser pour sa simplicité, sa rapidité et sa facilité à mettre en œuvre notamment que ses performances sont suffisamment acceptables. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

### II.12 Résultats de simulation et interprétations

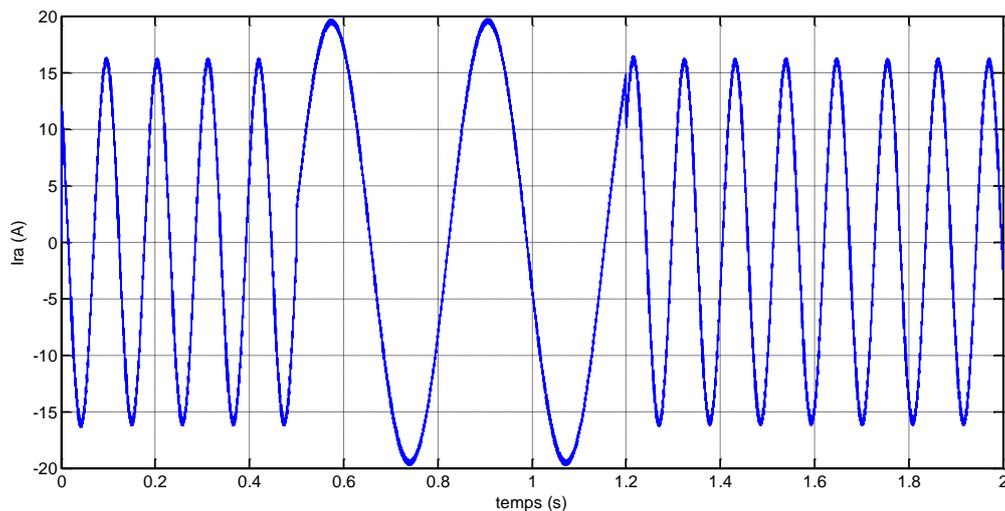


FigureII-22 : Allure du courant et la tension statorique par phase (a).

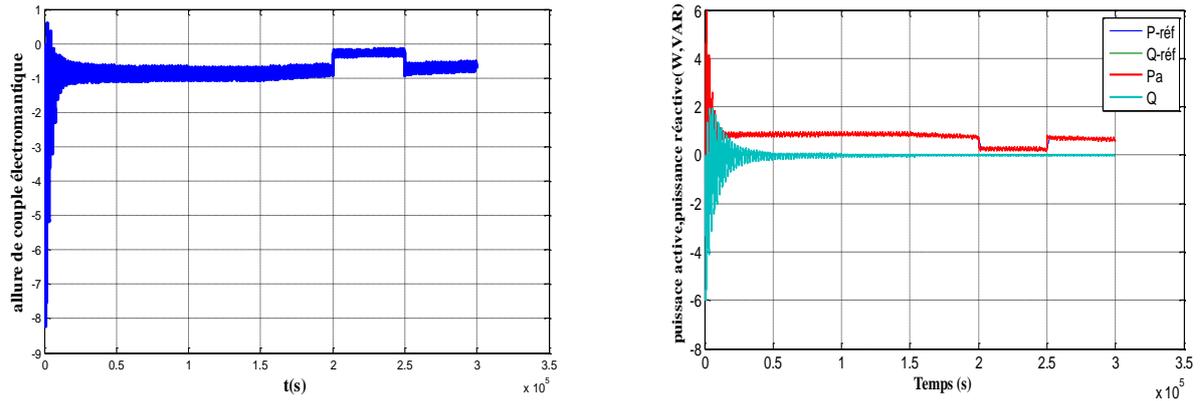


**FigureII-23 :** Allure du courant et la tension statorique par phase (a) en zoom.

On constate ainsi l'importance des courants statoriques et tension pendant le démarrage. Sur la figure (II-24) on constate que le courant statorique a une fréquence constante qui est celle du réseau ( $f=50\text{Hz}$ ) cependant son amplitude est bien adaptée à la variation de la puissance active de manière proportionnelle. En outre, on voit clairement que le déphasage entre la tension et le courant statorique est de  $(-\pi)$ , c.à.d. ils sont en opposition de phase ce qui confirme que la composante imaginaire de puissance est nulle ( $Q_s = 0$ ), est un fonctionnement à facteur de puissance unitaire est bien assuré.



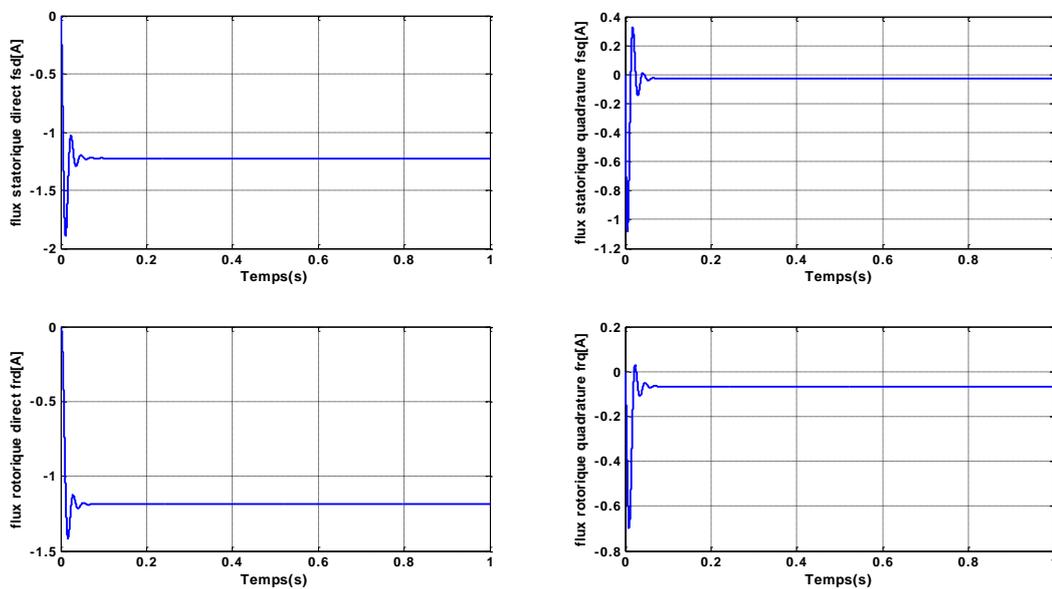
**FigureII-24:** Allure du courant rotorique par phase (a).



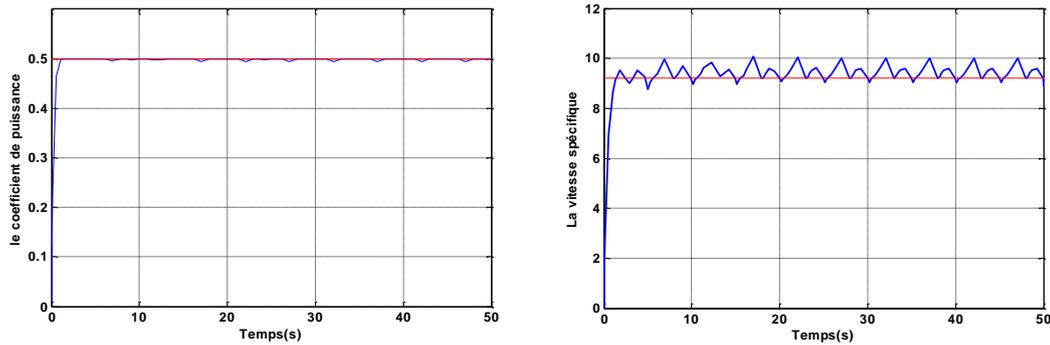
**Figure II-25 :** allure de couple électromagnétique, puissance ( $P, Q$ )

On constate un bon suivi de consigne pour les puissances active et réactive statorique. A

$t=0s$ , un échelon négatif de (-6 MW) est appliqué, et à  $t=0.3s$ , on fait un changement de signe pour la même consigne, la puissance active statorique réelle suit toujours sa référence et obéit au changement de signe. L'échelon de consigne pour la puissance réactive statorique est maintenu nul, la puissance réactive réelle produite par la MADA oscille autour de cette consigne (0VAR).



**Figure II-26 :** Flux statorique et rotorique ( $d, q$ )



**Figure II-27** : Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique.

A travers l'évolution du coefficient de puissance Figures (I.27), nous pouvons remarquer que celui ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique. Ce coefficient est obtenu pour un angle de calage  $\beta$  fixe ( $\beta=20$ ) qui nous donne un  $\lambda$  optimale. On remarque que l'atteint une valeur maximale de 0.5, Cette résultats de simulation montre que la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent

### Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation, la simulation et l'analyse d'un système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation fonctionnant à vitesse variable. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation en vue d'une alimentation triphasée sinusoïdale pour un fonctionnement en générateur qui est obtenu par des transformations de passage d'un système triphasé à un système biphasé puis on applique la transformation de Park, sur la base d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Du point de vue de la modélisation, le modèle d'état de la machine obtenu est un modèle non linéaire fortement couplé. Ainsi Un fonctionnement stable du système éolien a été obtenu avec l'application de la stratégie d'extraction de maximum de puissance (MMPT). concerne deuxième partie de ce chapitre qui nous a permis d'établir la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en fonctionnement génératrice. La stratégie de commande des convertisseurs côté machine (CCM), et côté réseau (CCR).