

II.1. Introduction

Aujourd'hui, les systèmes de génération d'énergie éolienne d'une puissance moyenne et plus utilisent presque exclusivement les machines asynchrone à double alimentation (MADA). Celles-ci présentent des avantages déterminants pour la production électrique dans le marché des turbines éoliennes de grande puissance. Le système de conversion éolienne à base de la MADA (figure II.1) est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice asynchrone à double alimentation, un bus continu, deux convertisseurs statiques de puissance et un filtre triphasé de courant. [16]

La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. Le stator de cette dernière est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade à travers un bus continu. La présentation des modèles dynamiques des sous-ensembles du système éolien ainsi constitué, fera l'objet de ce deuxième chapitre. Les outils d'analyse adoptés à cet effet, à savoir le schéma bloc, y seront également abordés. [17],[18]

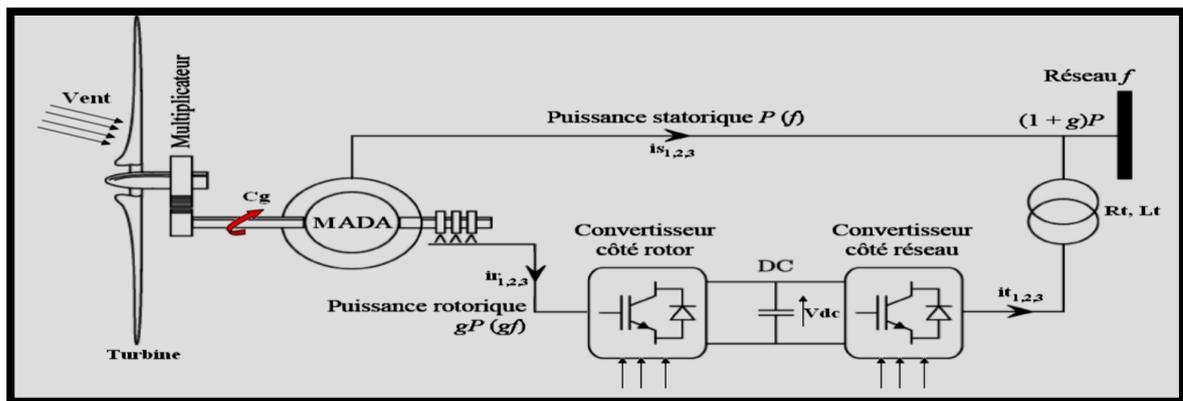


Figure II 1 Système de conversion éolienne à base de la MADA

II.2. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G Figure. II.2.

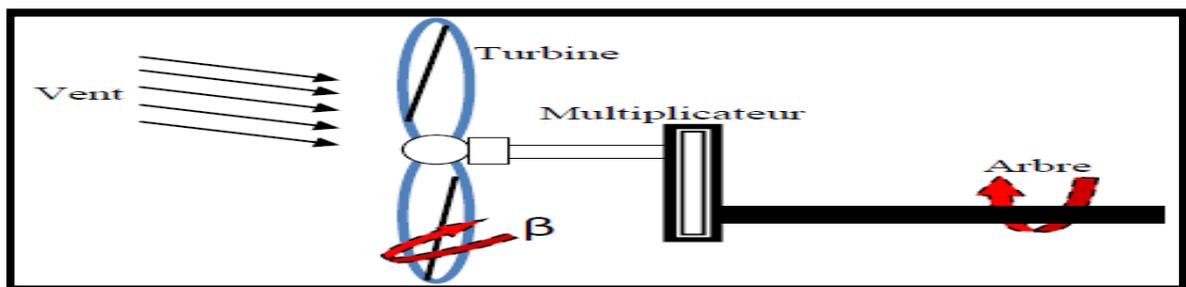


Figure II 2 Turbine éolienne

II.2.1. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent est donnée par[19]

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

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique $C_{aéro}$ est donné par l'expression suivante[13]

$$C_{aéro} = \frac{1}{2\Omega t} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II. 2})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit comme suit

$$P_{aéro} = C_p(\lambda, \beta) P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II. 3})$$

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

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega t}{V} \quad (\text{II. 4})$$

Pour une éolienne de 7.5Kw, l'expression du coefficient de puissance est donnée par

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda i}\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (\text{II. 5})$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 6})$$

Coefficient	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Valeur	0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

Table II 1 Coefficients définissent l'évolution de C_p .

En utilisant C_p , P_m et Ω (la vitesse de la turbine), Le couple C_T produit par cette éolienne est alors déduit

$$C_T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2\Omega} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_1^3 \quad (\text{II. 7})$$

La valeur maximale de C_p est atteinte pour $\beta = 0$ et $\lambda = 8.1$. Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ

L'allure du coefficient de puissance C_p de l'équation précédente est représentée dans la (Figure.II.3).

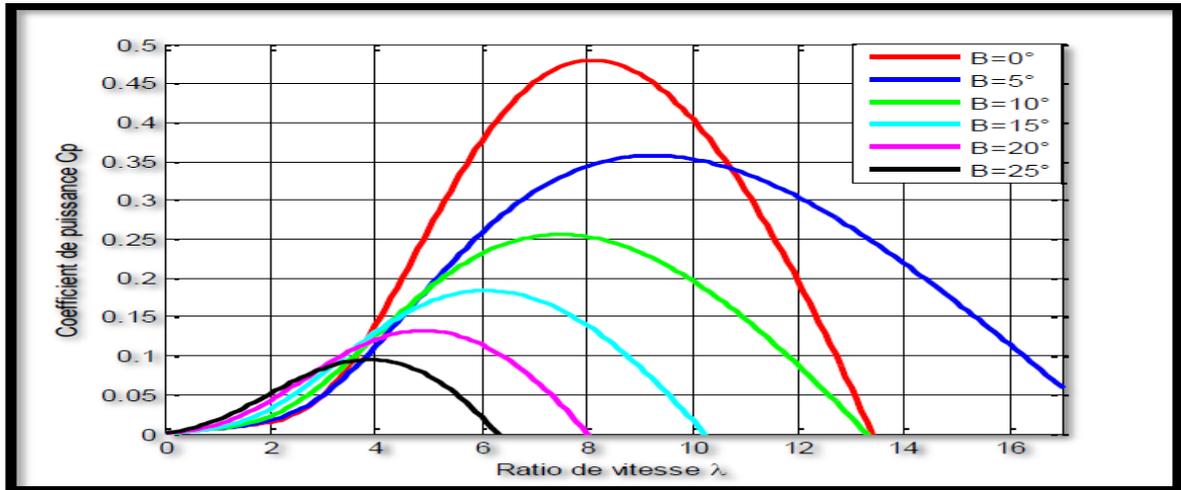


Figure II 3 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse et l'angle d'orientation de pales.

Le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en Figure. II.4.

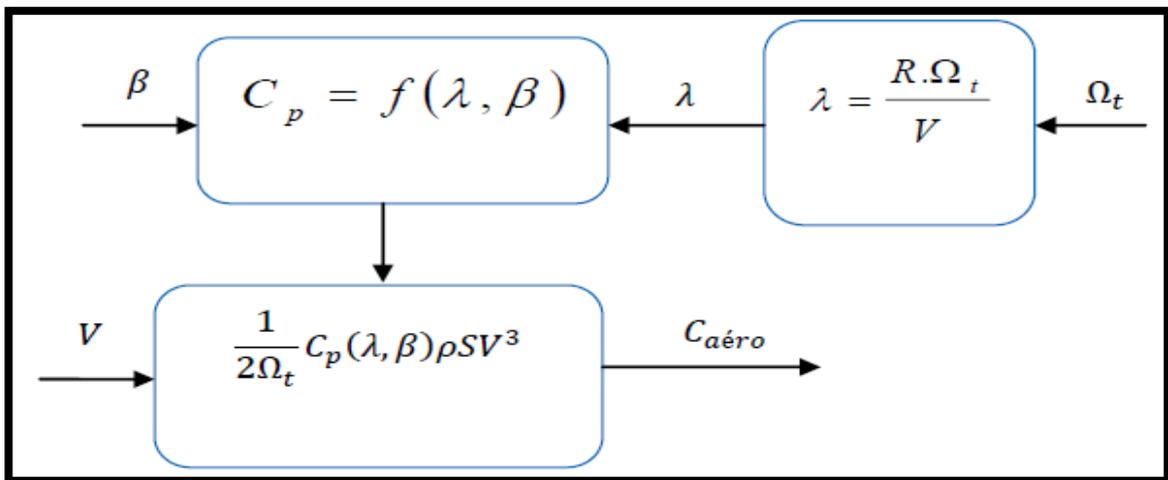


Figure II 4 Le Schéma bloc du modèle des pales.

II.2.2. Modèle du multiplicateur de vitesse

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr/mn). Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr/ mn).

Son modélisation mathématique est définie par les deux équations suivantes

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega \tag{II.8}$$

$$C_g = \frac{1}{G} C_{aéro} \tag{II.9}$$

Le schéma bloc du multiplicateur de vitesse est représenté en Figure. II.5.

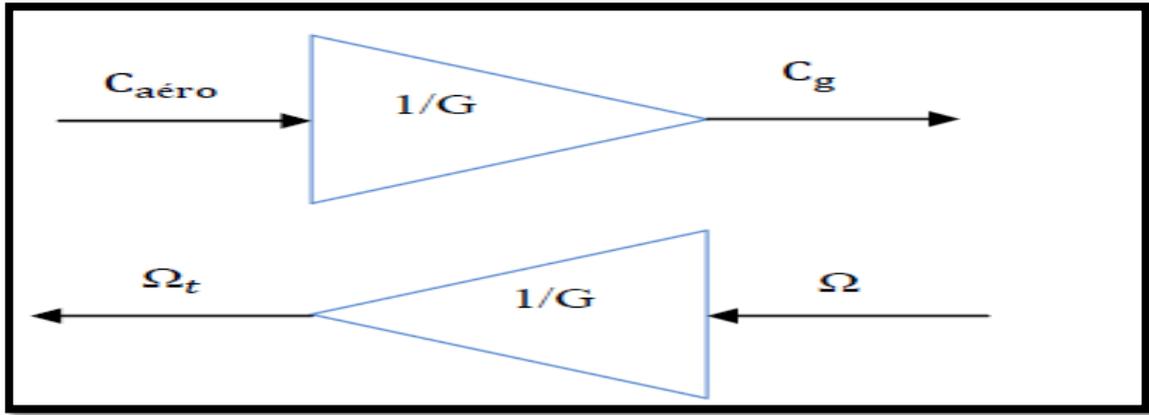


Figure II 5 Le Schéma bloc du modèle du multiplicateur de vitesse

II.2.3. Modèle de l'arbre mécanique

L'arbre est composé d'une masse correspondante à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu, et une petite inertie représentant le rotor de la génératrice. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle de la génératrice J_g et l'inertie de la turbine ramenée au rotor de la génératrice J_t

$$J = J_g + J_t G^2 \quad (\text{II. 10})$$

L'évolution de la vitesse mécanique Ω dépend du couple appliqué au rotor de la génératrice qui la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice C_{mec} , d'un couple de frottement visqueux C_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse C_g .

$$C_{mec} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II. 11})$$

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II. 12})$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux K_f

$$C_{vis} = K_f \cdot \Omega \quad (\text{II. 13})$$

En remplaçant (II.12) et (II.13) dans (II.11), nous avons

$$C_g - C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \cdot \Omega \quad (\text{II. 14})$$

A partir des équations précédentes le schéma bloc de l'arbre mécanique sont représentés comme suit

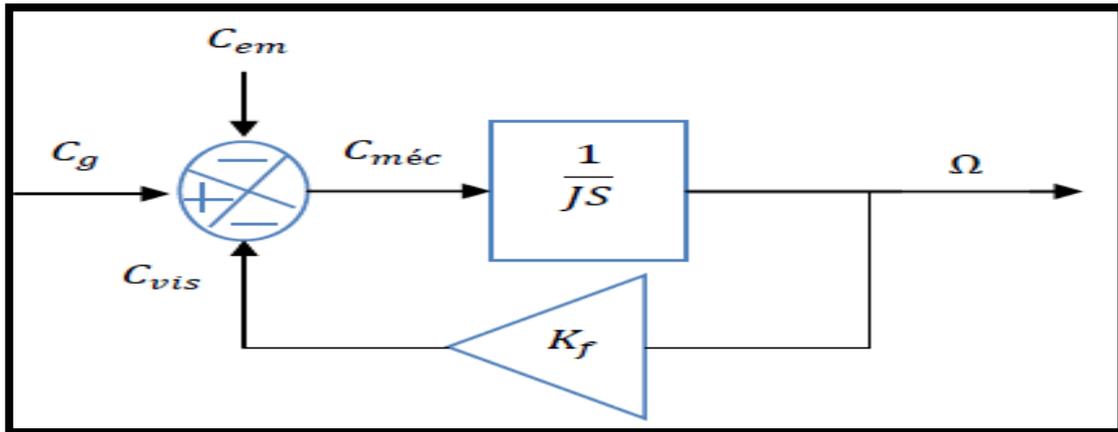


Figure II 6 Le Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique

Le schéma bloc représentant le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine figure II.7

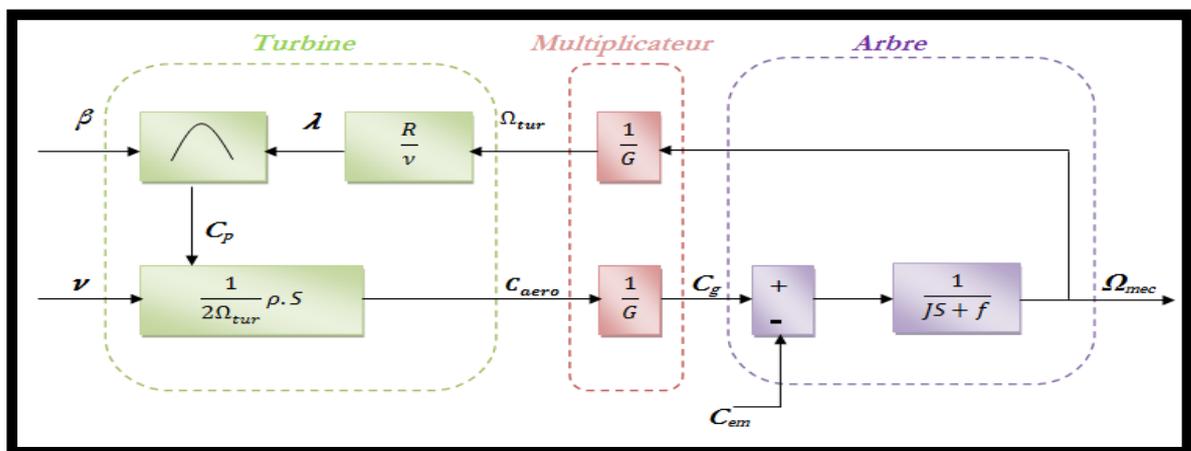


Figure II 7 le modèle de la turbine

Cette figure montre que la turbine produit un couple aérodynamique $C_{aéro}$ à partir de la puissance cinétique P_v du vent et par action de l'angle d'orientation des pales β . Le multiplicateur de vitesse transforme le couple aérodynamique $C_{aéro}$ de la turbine en couple du multiplicateur C_g et en même temps, il transforme la vitesse mécanique Ω en vitesse de la turbine Ω_t

La vitesse mécanique de l'arbre de la génératrice Ω résulte de l'application du couple moteur disponible à la sortie du multiplicateur C_g auquel s'oppose le couple électromagnétique C_{em} . Le contrôle de cette dernière peut donc être effectué soit par action sur l'angle d'orientation des pales soit à travers le couple électromagnétique de la génératrice.[20]

II.3.Simulation de la turbine

La figure (II-8) ci-dessous représente le schéma bloc de la turbine de l'éolienne sous MATLAB SIMULINK.

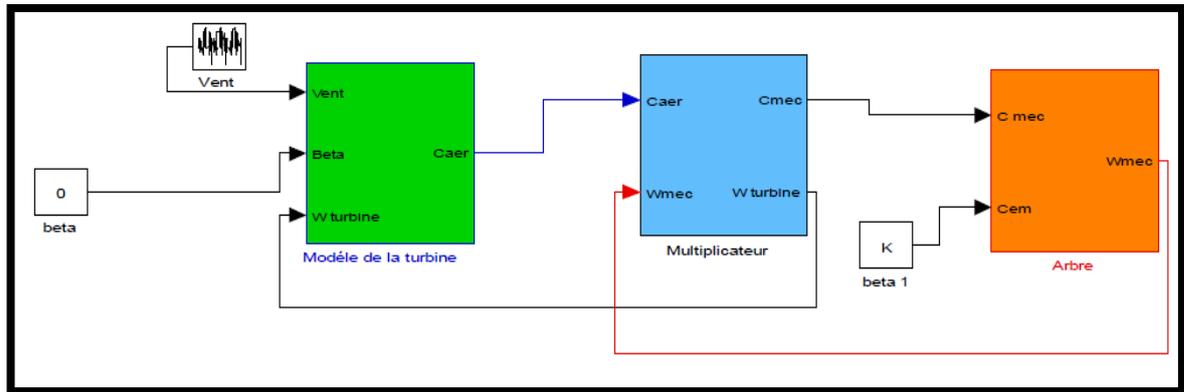


Figure II 8 Schéma bloc du modèle de la turbine

II.4.Stratégie de commande MPPT

Le système de contrôle le plus répandu des éoliennes traditionnelles directement connectées au réseau électrique de distribution, est basé principalement sur la technique d'extraction du maximum de puissance (MPPT) et ce sans supervision centralisée. Celles-ci doivent se déconnecter du réseau électrique lorsqu'un défaut survient sur ce dernier. Par conséquent, elles n'offrent aucune capacité de réglage quant à leur production et ne peuvent en aucun cas contribuer aux services système. Nous présenterons dans cette section la stratégie de commande MPPT sans mesure de vitesse du vent.

L'objectif de cette stratégie est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance[21]

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 par l'intermédiaire de l'angle de calage des pales ou électrique par la commande de la machine électrique via l'électronique de puissance, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.[22]

Actuellement, les stratégies adoptées visent à extraire le maximum de puissance du vent. Cette puissance est extraire lorsque la turbine fonctionne au coefficient de puissance maximale. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance. Dans notre travail, nous représentons deux stratégies de maximisation de la puissance.[13]

- Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse ;
- Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

II.4.1. Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.

Cette technique consiste à ajuster la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice afin d'obtenir le maximum de puissance générée, donc le maximum du couple électromagnétique, qui correspond à la zone II de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne.[20]

La puissance mécanique de la génératrice est donnée par

$$P_{méc} = C_{méc} \Omega_{méc} \quad (II.15)$$

On suppose que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence **C_{em}=C_{em-ref}**.

Le couple électromagnétique de référence **C_{em-réf}** permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence **Ω_{réf}** est donné par la relation suivante.

$$C_{em-ref} = R_{eg} (\Omega_{ref} - \Omega_{méc}) \quad (II.16)$$

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer **Ω_{tur-ref}** pour maximiser la puissance extraite. En tenant en compte du gain du multiplicateur, on a donc

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{tur-ref} \quad (II.17)$$

La référence de la vitesse de la turbine permettant d'obtenir une valeur maximale du couple, le coefficient de puissance **C_{pmax}** est obtenue à partir de l'équation suivante

$$\Omega_{tur-ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (II.18)$$

L'action des correcteurs de vitesse doit accomplir deux tache ;

- Asservis la vitesse mécanique à sa valeur de référence ;
- Atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la Figure. II.9

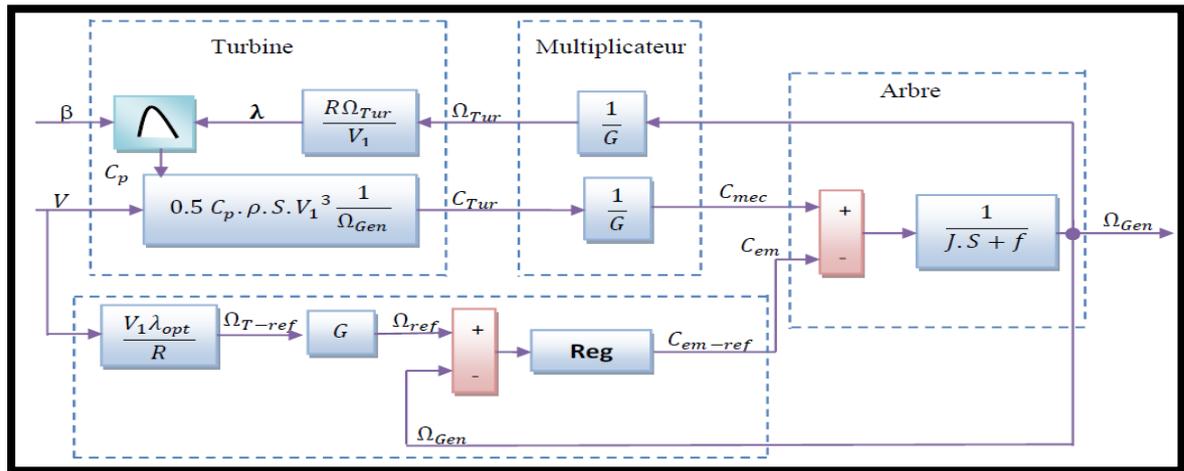


Figure II 9 Contrôle MPPT avec Asservissement de la vitesse mécanique

II.4.1.1. Asservissement de vitesse de la turbine

En générale, l'objectif d'un système de commande est de minimiser l'écart $e(t)$ entre la sortie d'un système et une valeur de consigne désirée. Cet écart peut être dû, soit à un changement de consigne, soit à des perturbations agissant sur le système. Pour choisir un bon réglage du régulateur, on prend en compte l'amplitude maximum de l'écart et la durée nécessaire pour qu'il s'annule après une perturbation ou un changement de consigne. Dans notre travail, le réglage de vitesse est réalisé par régulateur PI

II.4.1.1.1. Réglage de vitesse par régulateur PI

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, un correcteur proportionnel intégral est utilisé (MADA). Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur, la vitesse à régler se définit à partir de l'équation mécanique, la structure du régulateur de vitesse est montrée sur la figure II.10

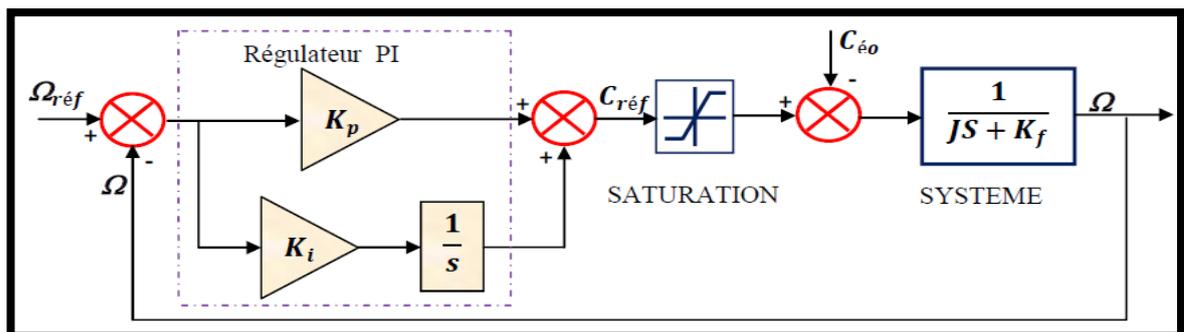


Figure II 10 Schéma bloc de la régulation de vitesse par régulateur PI

La partie mécanique du système est représentée par l'équation de transfert établie à partir de l'équation mécanique de la machine utilisée. Le calcul des paramètres du régulateur (les deux gains K_p et K_i sont réalisés en spécifiant une réponse en boucle fermée).[20]

Les expressions des paramètres du régulateur sont alors calculées selon

$$K_p = 2j\rho - f \tag{II. 19}$$

$$K_i = 2j\rho^2 \tag{II. 20}$$

En prenant $S_{1,2} = -\rho \mp \rho j$ (II. 21)

Afin d'éviter que l'intégrale accumule l'écart au-delà de valeurs pouvant conduire à des saturations, il est judicieux de limiter le couple entre T_{max} et T_{min} définis au préalable.

II.4.1.2.Résultats de simulation

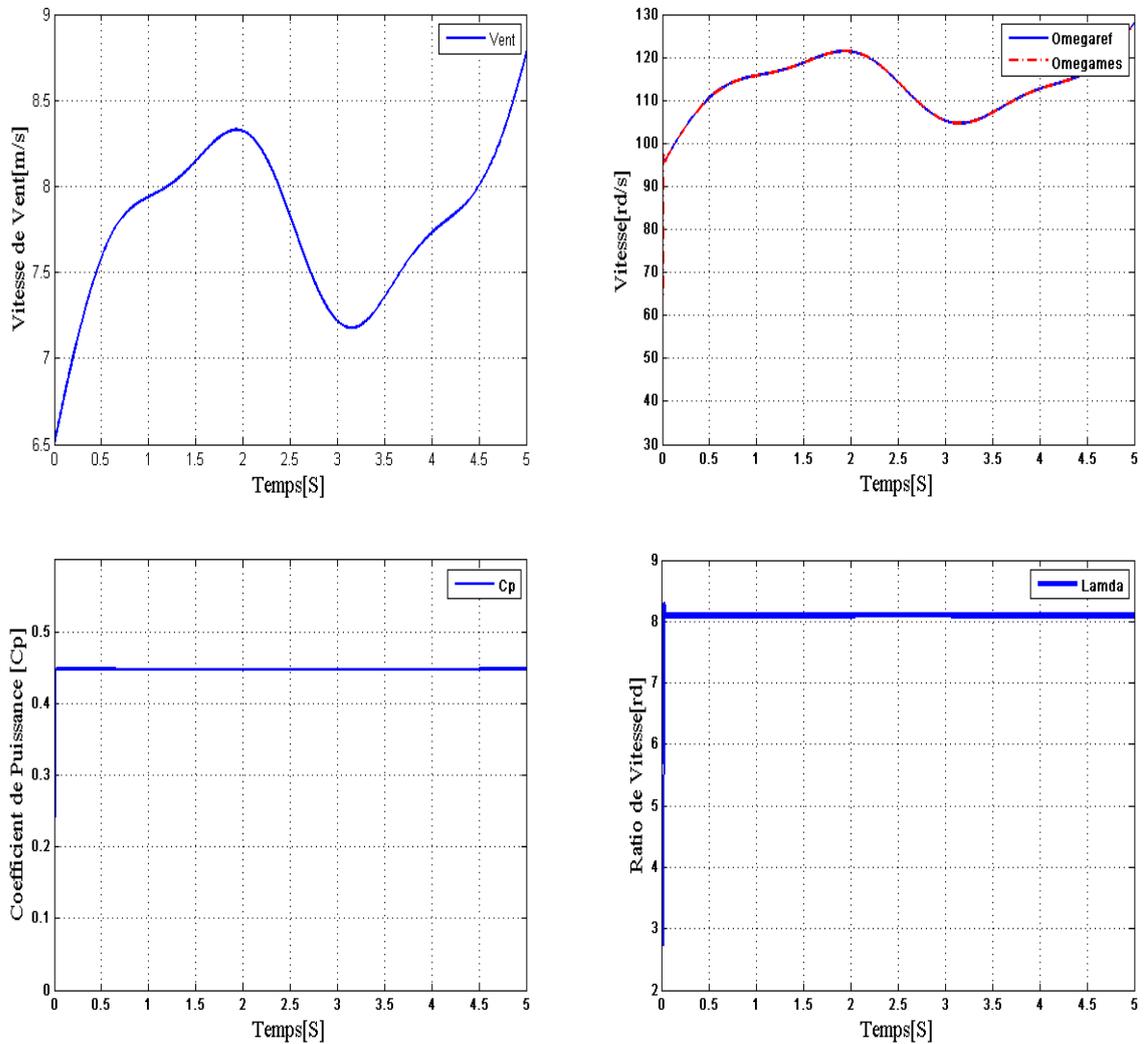


Figure II 11 Résultats du MPPT obtenus avec régulateur PI

II.4.2. Stratégie de maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Le principe de cette stratégie consiste à supposer que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Ce qui revient à négliger l'effet du couple des frottements visqueux $C_{vis}(C_{em}=0)$ Dans ces conditions, on aura

$$C_{em} = C_{tur}. \quad (II. 22)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir du couple éolien estimé, tel que

$$C_{em - ref} = \frac{C_{t - estime}}{G} \quad (II. 23)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique

$$C_{t - estimé} = \frac{1}{2\Omega_{t - estimé}} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_{1estime}^3. \quad (II. 24)$$

La vitesse estimée de la turbine est donnée par la relation suivante

$$\Omega_{tur - estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II. 25)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue

$$V_{estime} = R \frac{\Omega_{tur - estimé}}{\lambda} \quad (II. 26)$$

En regroupant ces quatre dernières équations ; on obtient une relation de contrôle

$$C_{em - ref} = 0.5 \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_p}{\lambda^3 G^2} \cdot (\Omega_{mec})^2 \quad (II. 27)$$

Le couple électromagnétique doit être réglé à la valeur du couple de référence suivante

$$C_{em - ref} = 0.5 \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3 G^2} \cdot (\Omega_{mec})^2 \quad (II. 28)$$

Cette expression montre que le couple de référence est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice. Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la Figure. II.12.

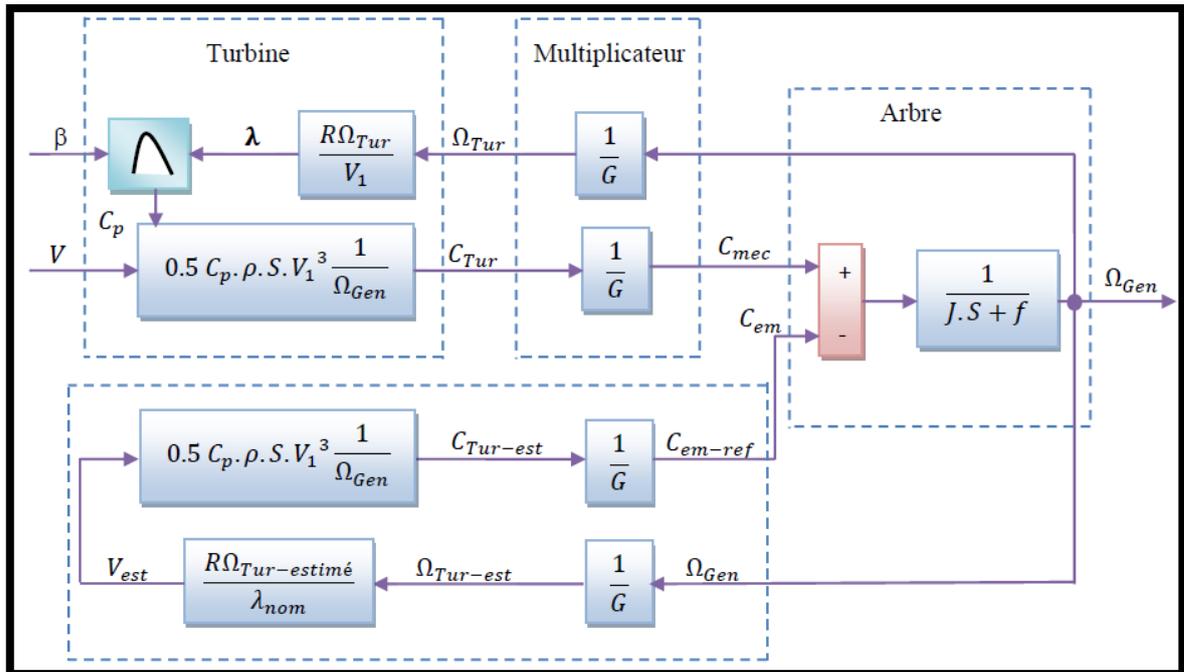


Figure II 12 Contrôle MPPT sans Asservissement de la vitesse mécanique

II.4.2.1. Résultats de simulation

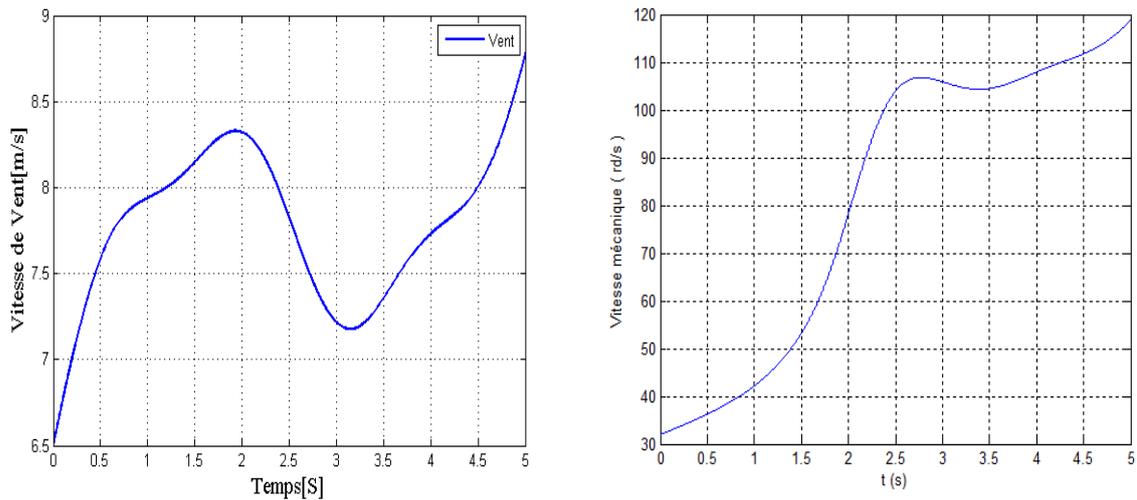


Figure II 13 Résultats du MPPT obtenue sans asservissement de vitesse

La variation de la vitesse mécanique sont adapté à la variation de la vitesse de vent mais avec une dynamique lente.

II.5. Présentation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

II.5.1. Constitution de la MADA

La génératrice se situe dans la nacelle de l'éolienne. Elle est entraînée par un arbre mécanique. La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. 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 point de fonctionnement. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu.

Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution[23]

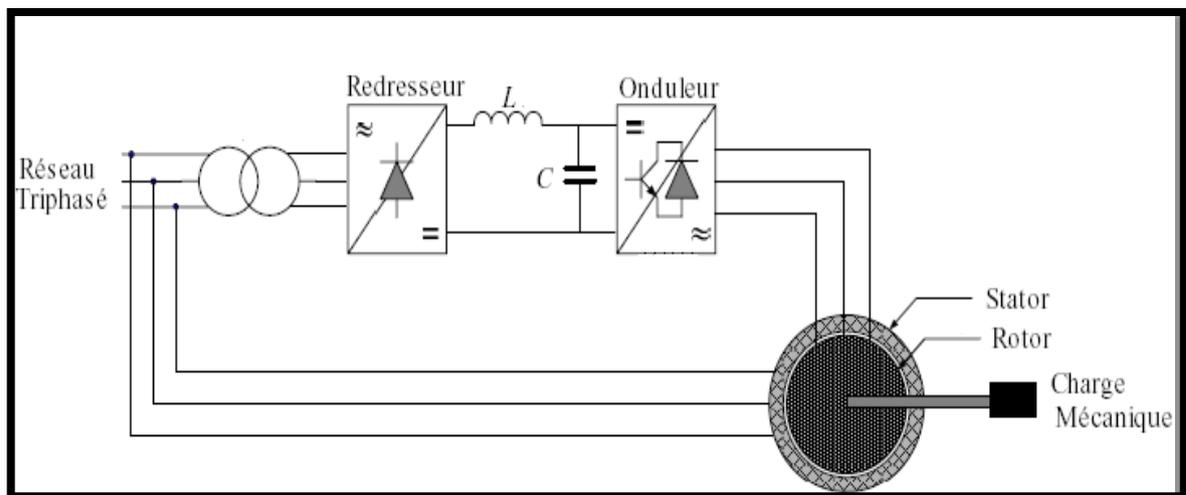


Figure II 14 Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté Par un seul convertisseur statique

II.5.2. Fonctionnement de la MADA

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Par contre dans le cas de la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur[24], [7]. Notons qu'en fonctionnement génératrice la puissance P_s absorbée par le stator et la puissance du réseau sont négatives.

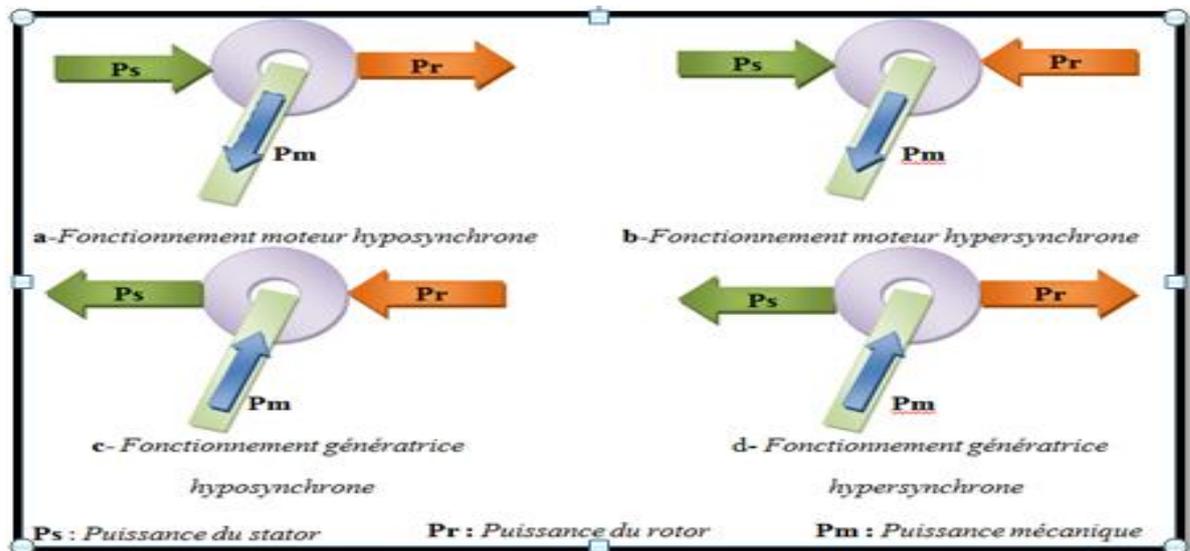


Figure II 15 Les quatre quadrants du fonctionnement de la MADA

a. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure (II.15.c) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s alimente le réseau). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. 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. [7],[23]

b. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure (II.15.d) 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. [7],[23]

C. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure (II.15.a) 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. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes joules dans le rotor.

d. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure (II.15.b) 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.

II.6. Avantages et inconvénients de la MADA

II.6.1. 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 .

II.6.2. 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.7. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation

La machine est représentée par son modèle de Park[20],[13] dont les équations sont établies dans un référentiel où les puissances sont conservées. Les équations de la MADA dans un repère tournant à la vitesse électrique \mathbf{Ws} et pour un rotor tournant à la vitesse électrique $\mathbf{P}\mathbf{\Omega}$ sont données comme suit.

a. Equations électriques

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Les flux

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Les puissances

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \\ P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (II.31)$$

a. Equation mécanique

Le couple électromagnétique est exprimer en fonction des flux statoriques et courants rotoriques

$$C_{em} = p(\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (II.32)$$

II.7.1.Modèle de la MADA avec choix de repère

La transformation de Park appelée souvent transformation des deux axes, fait corresponde (indice d) et d'axe en quadrature (indice q). Cette transformation s'écrit : Indre aux variables réelles leurs composantes homopolaires (indice0), d'axe direct.

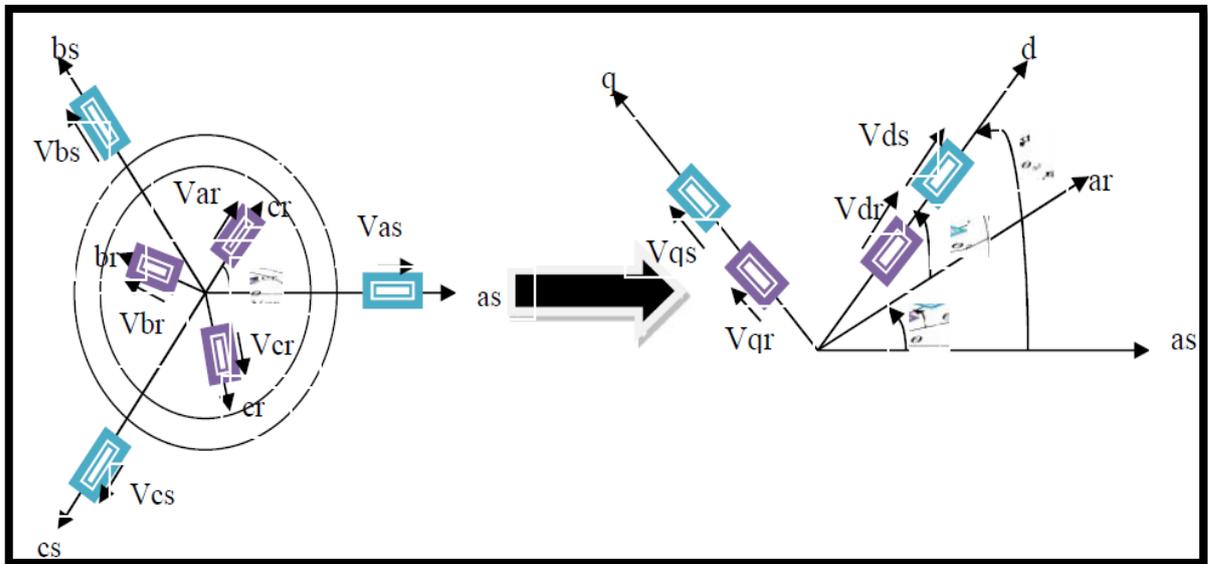


Figure II 16 Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle θ_{obs} entre l'axe d'une phase statorique et le système d'axes (u,v,o), Il existe deux matrices permettant cette transformation, celle qui conserve les puissances et celle qui conserve les amplitudes, dans ce travail nous ne utiliserons que la transformation qui conserve les puissances et son inverse données respectivement par [25],[26],[27]

A partir de cette transformation, on définit une matrice appelée matrice de Park donnée par

$$[A] = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

La matrice de Park inverse donnée par

$$[A]^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Le changement de variable relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Après l'application de la transformation de Park on trouve le système d'équation qui représente le modèle de la MADA dans le repère **(d, q)**.

a. Équations des tensions

Pour le stator

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Pour le rotor

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \\ V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

b. Équations des flux

Pour le stator

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{os} = L_s i_{os} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Pour le rotor

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \\ \phi_{or} = L_r i_{or} \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

Si on élimine la composante homopolaire, les équations des flux dans la machine s'expriment sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Avec

$$(M = \frac{3}{2} M_{max}) \quad , \quad (\omega = \omega_s - \omega_r).$$

c. Le couple électromagnétique

Le couple électromagnétique de la machine peut s'exprimer sous différentes formes, en choisie l'équation suivant

$$C_e = \frac{3PM}{2L_s} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.41})$$

M: Inductance mutuelle.

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par

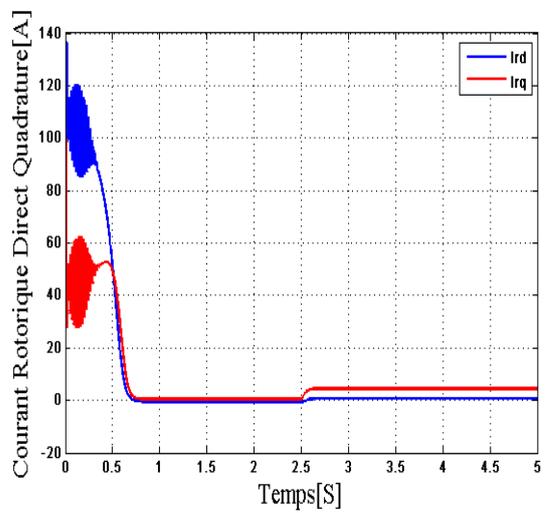
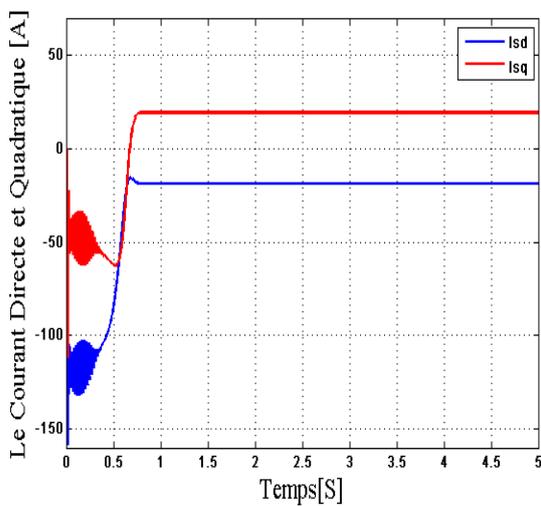
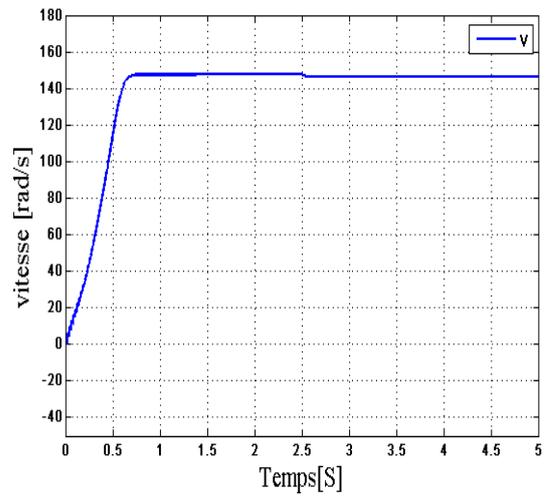
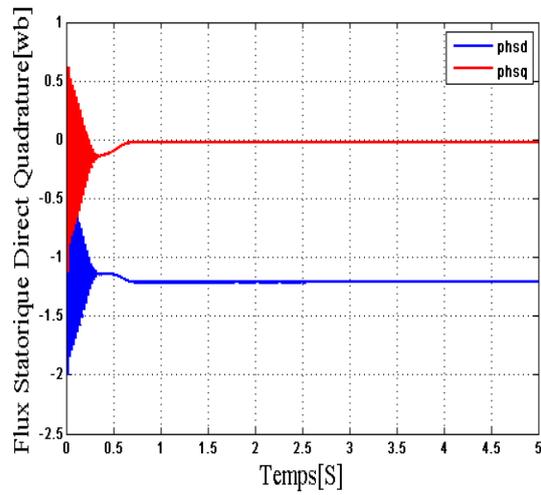
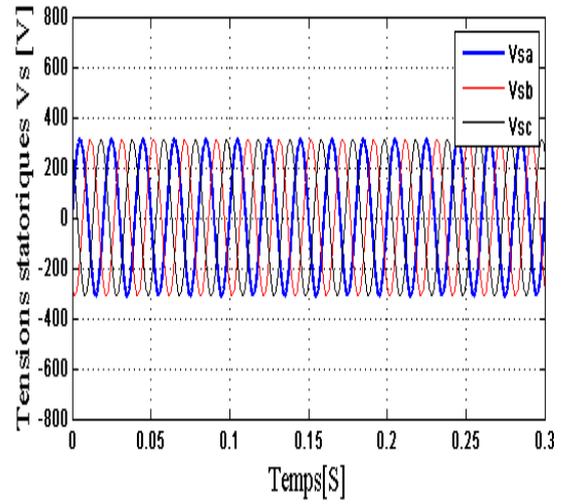
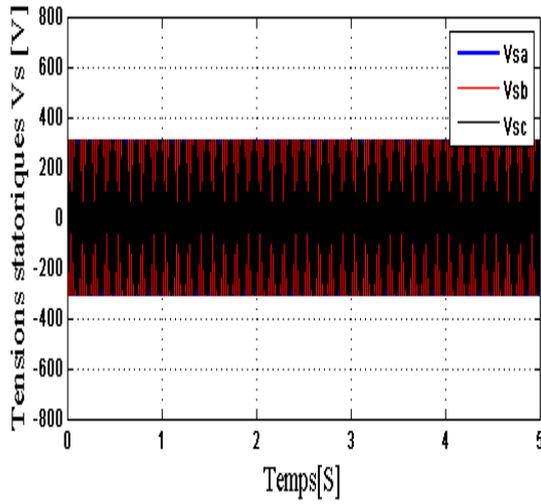
Pour le stator

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Pour le rotor

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

II.7.2. Résultat de Simulation (ANNEXE B)



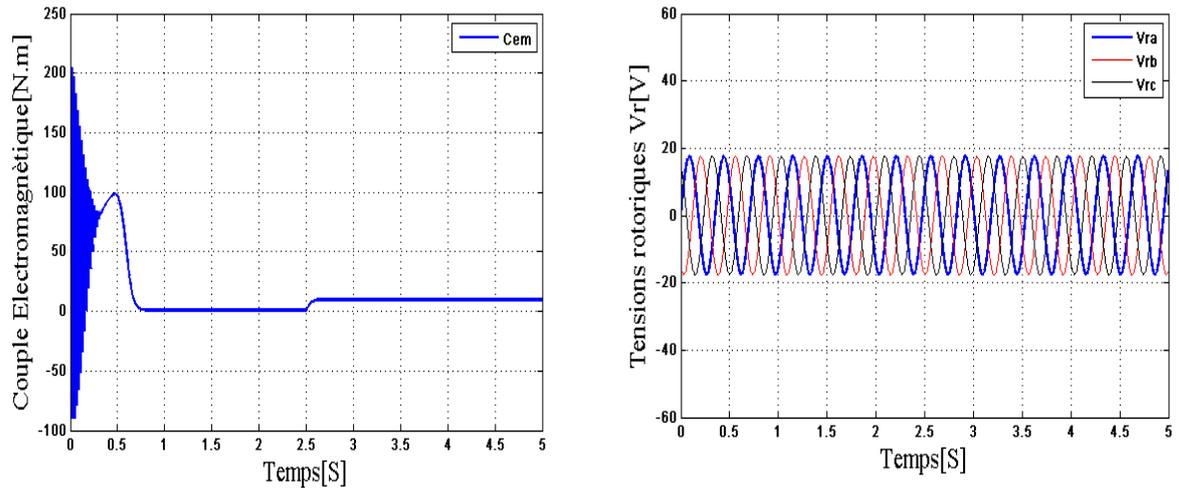


Figure II 17 Comportement de la MADA en mode Générateur

II.8 La commande vectorielle

L’objectif de ce type de commande est d’aboutir à un modèle simple de la machine asynchrone double alimentation susceptible d’assurer le contrôle séparé des grandeurs flux et courant.

La commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentation consiste à orienter les vecteurs courant et flux afin de rendre le comportement de cette dernière similaire à celui d’une machine à courant continu à excitation séparée (MCC), où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d’induit contrôle le couple. Il s’agit donc de placer le référentiel (d,q) de sorte que le flux soit aligné sur l’axe direct (d) ; ceci implique que le flux est commandé par la composante directe du courant et le couple est commandé par la composante quadrature.

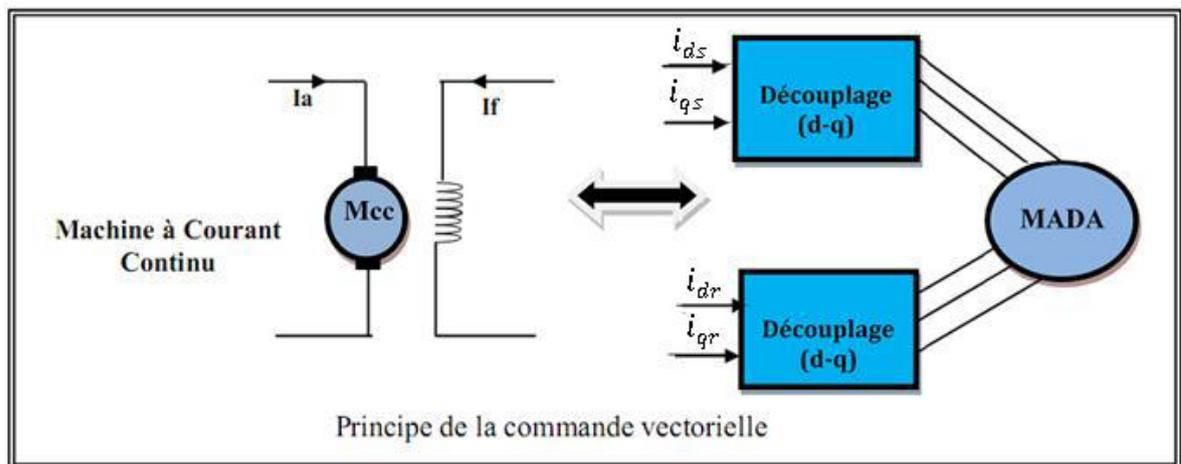


Figure II 18 Principe de la commande vectorielle

Le couple électromagnétique de la machine à courant continu

$$\begin{aligned} C_{em} &= K_t \cdot \varphi_f \cdot I_a \\ \varphi_f &= K \cdot I_f \end{aligned} \quad (\text{II.44})$$

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone à double alimentation

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_s} \cdot (\varphi_{qs} I_{dr} - \varphi_{ds} I_{qr}) \quad (\text{II.45})$$

II.8.1. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

II.8.1.1. Equations des tensions

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

b. Equations électriques

Ce choix du repère permet d'écrire des équations électriques avec un flux statorique fixé et orienté qui modélisent notre système en régime permanent de la façon suivant[20]

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Si on élimine la résistance des enroulements statoriques, on utilise les machines de grande puissance pour la production d'énergie éolienne pour accepter l'hypothèse

Les équations des tensions de cette façon

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

c. Équations magnétiques

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

A partir de l'équation (II.49), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} \cdot I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

d. Équations mécaniques

$$C_e = \frac{PM}{L_s} (\Phi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.51})$$

e. Relation entre les puissances statorique et les courants rotoriques

Les puissances actives et réactives statoriques sont exprimées par

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

Avec l'orientation du flux statorique ($V_{ds}=0$) le système d'équation devient

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (II.50) dans l'équation (II.53).. Nous trouvons les équations de la puissance active et réactive **Ps.Qs** en cette forme

$$\begin{cases} P_s = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

En tirant $\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$ de l'équation (II.54) l'expression de la puissance réactive devient

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s \cdot L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} \cdot I_{dr} \quad (\text{II.55})$$

f. Relation entre les tensions rotorique et les courants rotoriques

En remplaçant (II.49) dans (II.50) on aura

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \Phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.56})$$

En remplaçant (II.56) dans (II.48) on aura

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.57})$$

On appliquant la transformation de Laplace, on trouve

$$\begin{cases} V_{dr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) s \right] I_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) s \right] I_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right) \cdot I_{dr} + g \frac{M \cdot V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.58})$$

g: correspond au glissement de la machine asynchrone.

\mathbf{V}_{dr} et \mathbf{V}_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus.

L'influence des termes de couplage entre les deux axes en $g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$ est minime. En revanche le terme $g \frac{M \cdot V_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

II.8.2. Commande vectorielle Directe

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et de mettre en place un régulateur (PI) indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives (figure II.19).[10] Cette méthode est dite méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine[7]. Dans notre travail le modèle utilisé de la machine (MADA) est un modèle complet c'est-à-dire la résistance du stator n'est pas négligé.

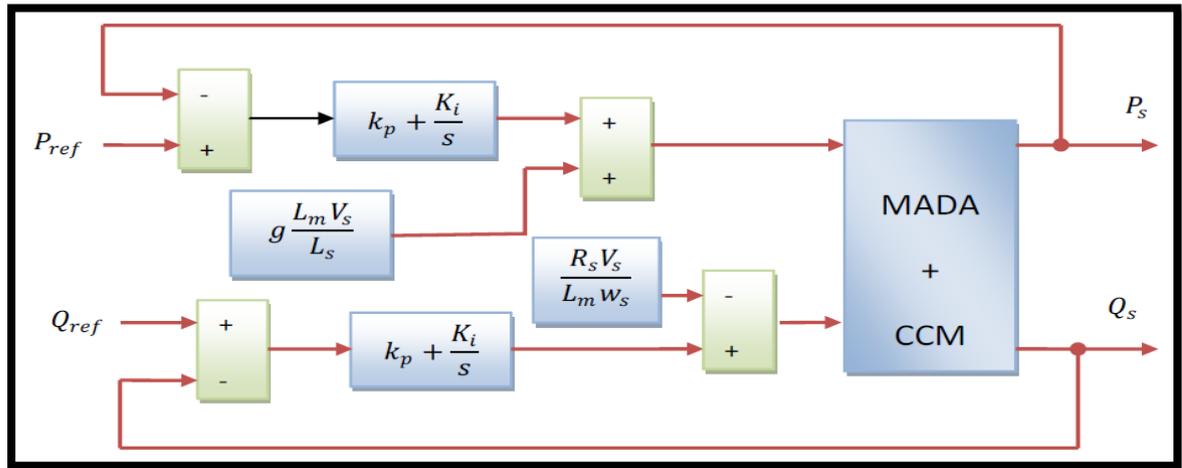


Figure II 19 Commande Directe de la MADA

II.8.2.1.Synthèse du régulateur PI

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI), utilisé pour commander la MADA en génératrice, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de régulation éolien. La figure II.24 montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur PI [7].

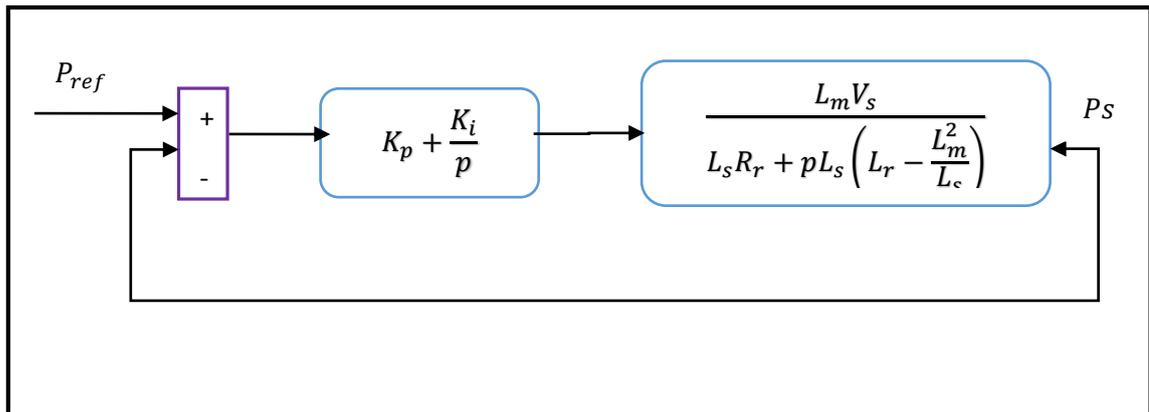
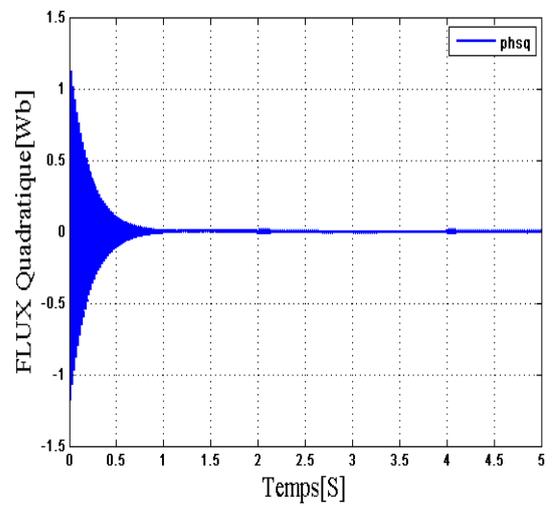
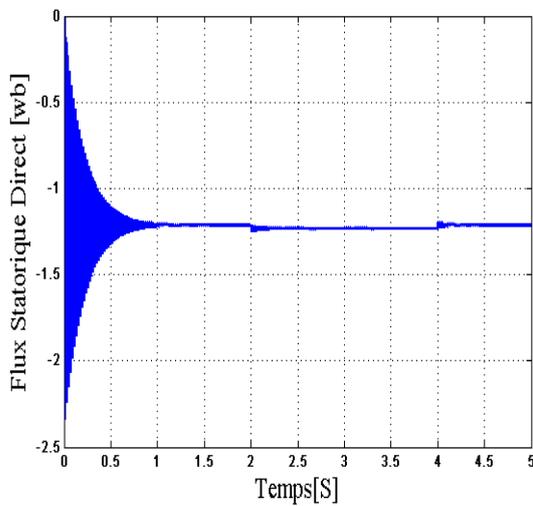
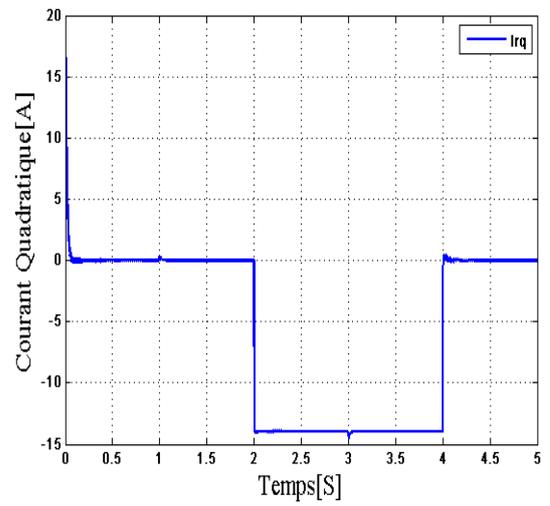
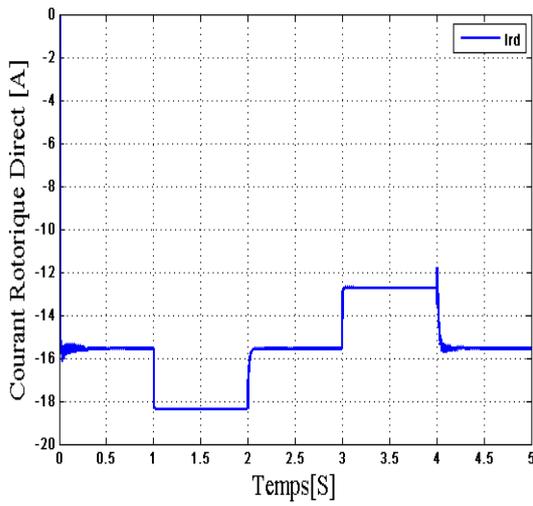
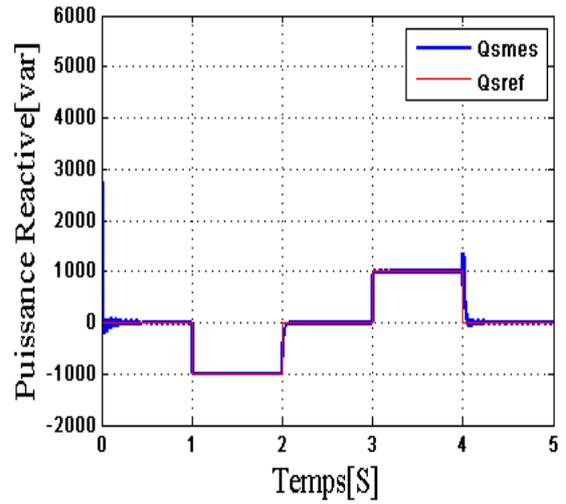
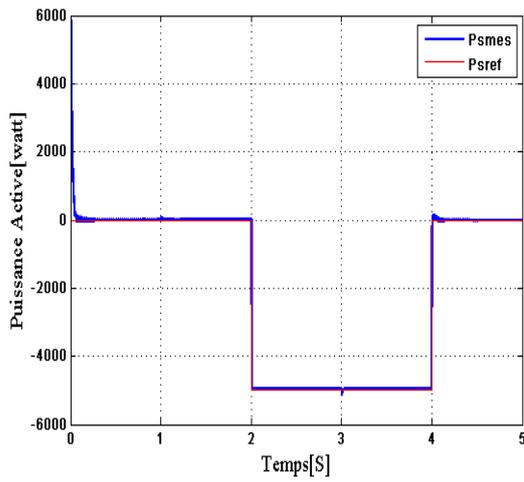


Figure II 20 Système à régulé par le PI.

Les paramètres de cet régulateur ce trouve dans (ANNEXE A)

II.8.2.2.Résultats de simulation



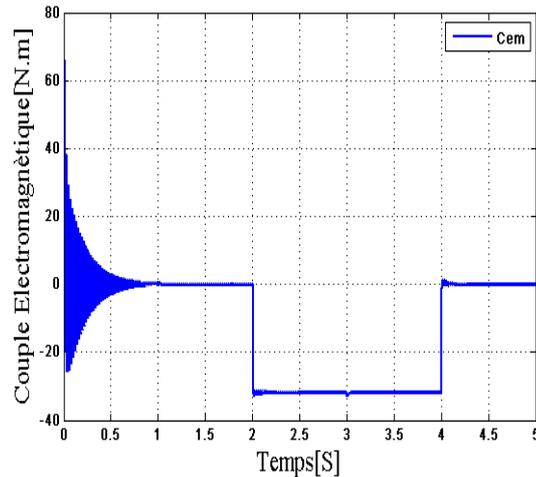


Figure II 21 Résultats de la Commande vectorielle Directe.

Les résultats de simulation présentent respectivement les courbes de la puissance active et réactive, les courants et les flux rotorique et le couple électromagnétique. Cette commande permet de découpler les expressions des puissances du générateur.

D'après les résultats obtenus, on peut dire que le contrôle direct utilisant les régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactives au niveau du rotor de la machine.

Après le régime transitoire, on note une bonne poursuite des allures aux valeurs de références imposées.

La puissance réactive est nulle entre les instantes $t=0s$ à $t=1s$ c'est un condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire

La puissance active est négative entre les instantes $t=2s$ à $t=4s$ qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fourni par la MADA.

II.8.3. Commande Indirecte

Cette méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en utilisant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. En combinant les différentes équations des flux, des tensions rotoriques, des courants et des puissances, nous pouvons exprimer les tensions en fonction des puissances.[7] 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.

Pour obtenir une bonne stabilité du système nous introduisons une boucle de régulation des courant rotoriques dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la machine figure II.22.[10]

a. Commande Indirecte sans boucle de puissance

Pour obtenir une bonne stabilité du système on introduit 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. L'asservissement des courants joue un rôle très important dans la commande. En effet, plus cet asservissement est efficace plus la puissance rotorique (active, réactive) produite par la machine est proche de celle désirée.

Pour cela et pour conserver l'orientation du flux exigé par la commande vectorielle, on doit étudier une boucle de régulation de courant.

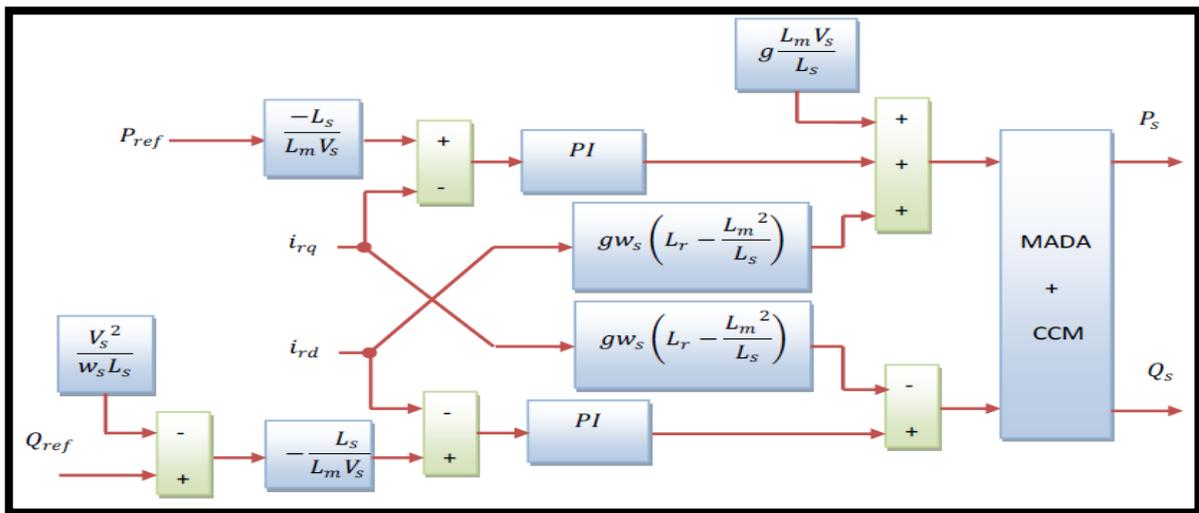


Figure II 22 Schéma bloc de la commande vectorielle indirecte sans boucle de puissance

Le régulateur utilisé pour commander la **MADA** en génératrice est un régulateur de type proportionnel-Intégral (**PI**) qui permet d'avoir une bonne précision, une rapidité et stabilité du système.[28] .Et le calcul des paramètres du régulateur ce trouve dans (**ANNEXE A**)

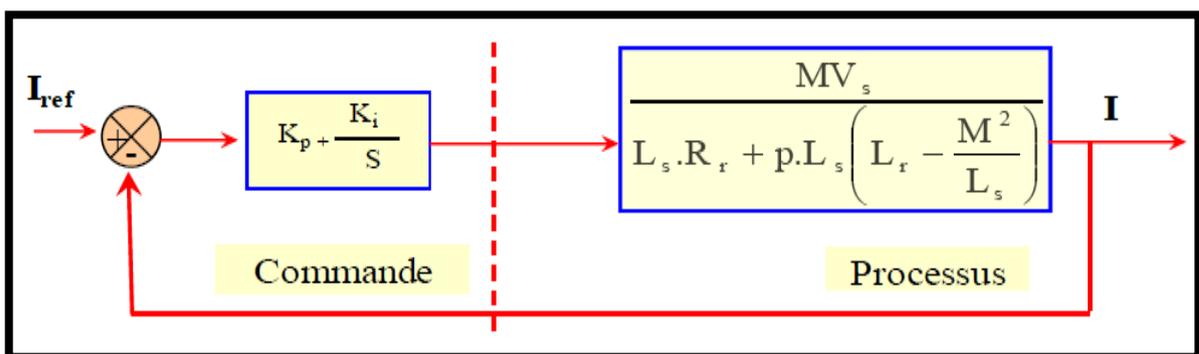


Figure II 23 Schéma bloc de la régulation du courant

b. Commande Indirecte avec boucle Commande puissance

Afin d'améliorer la commande précédente, nous allons incorporer une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances afin d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Nous aboutissons au schéma bloc en figure II.23 sur lequel on distingue bien les deux boucles de régulation pour chaque axe, l'une contrôlant le courant et l'autre la puissance.[7],[25]

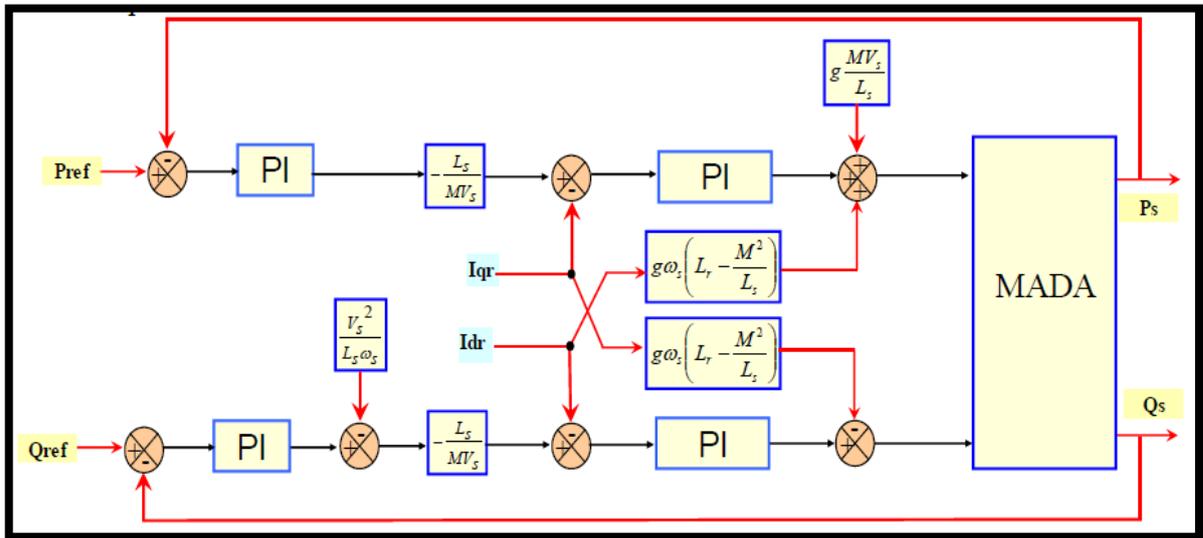
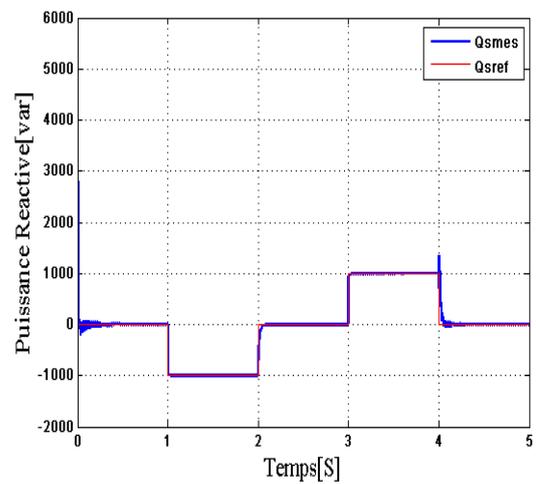
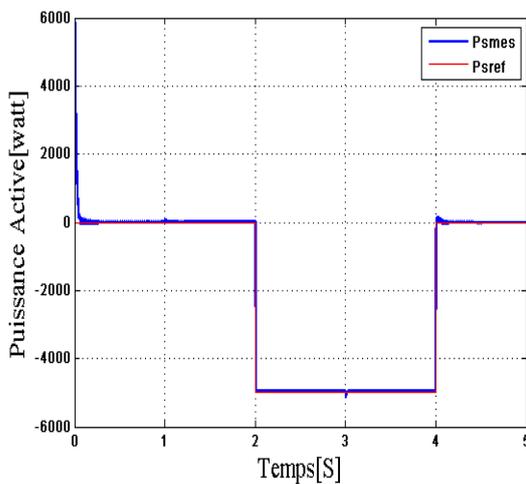


Figure II 24 Commande indirecte avec boucle de puissance.

II.8.3. Résultats de simulation de la commande vectorielle indirecte

a. Commande vectorielle Indirecte avec boucle Commande puissance



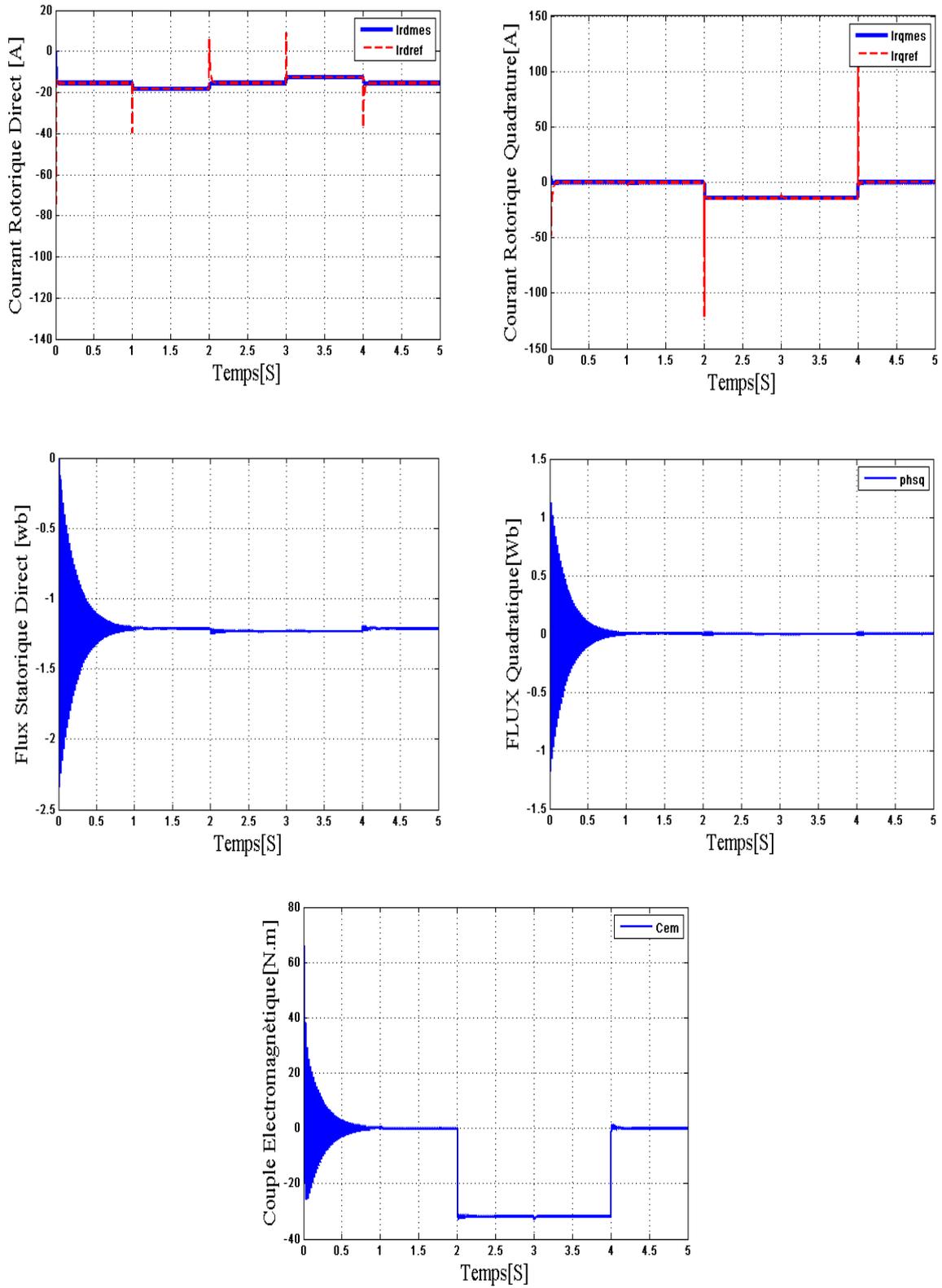
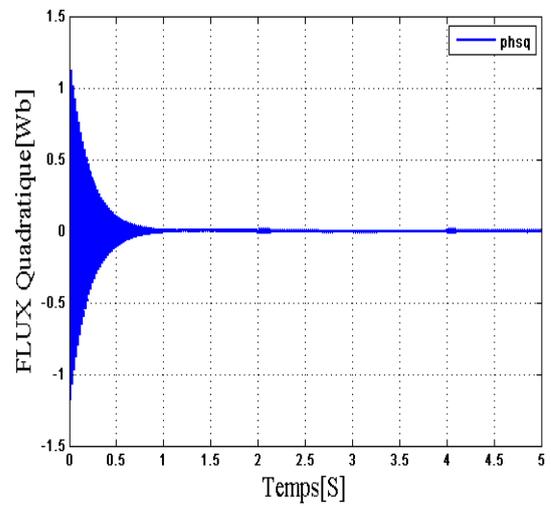
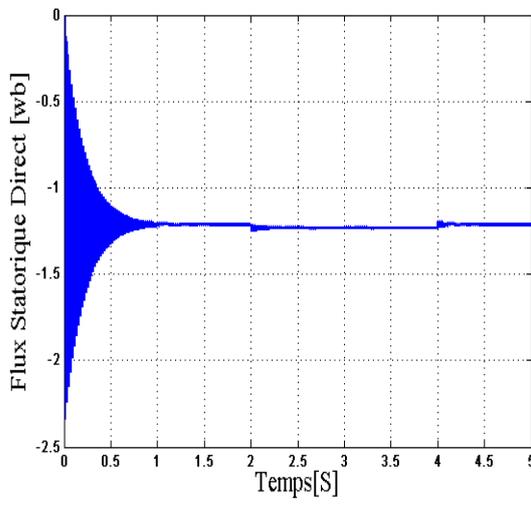
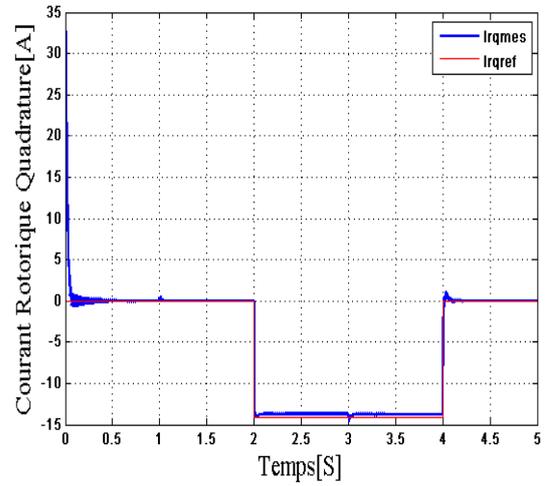
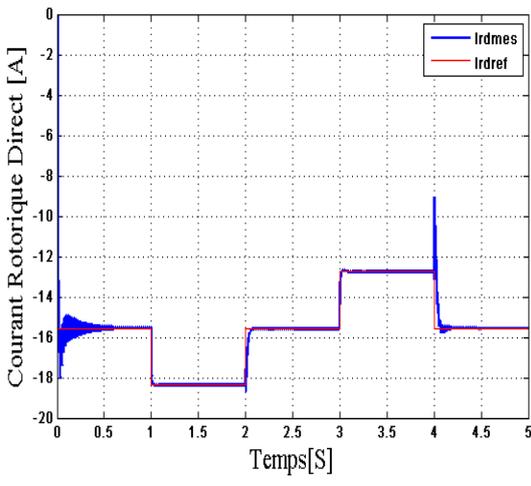
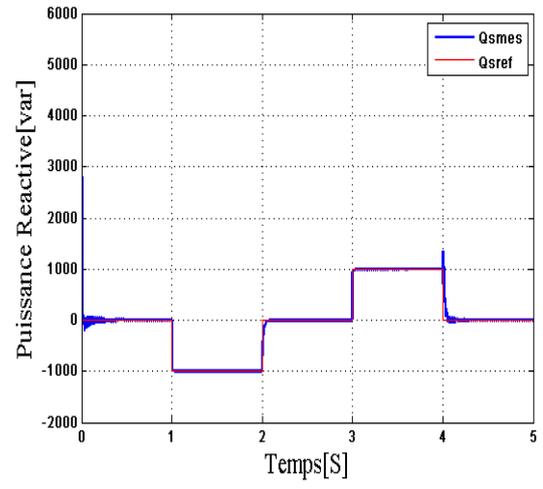
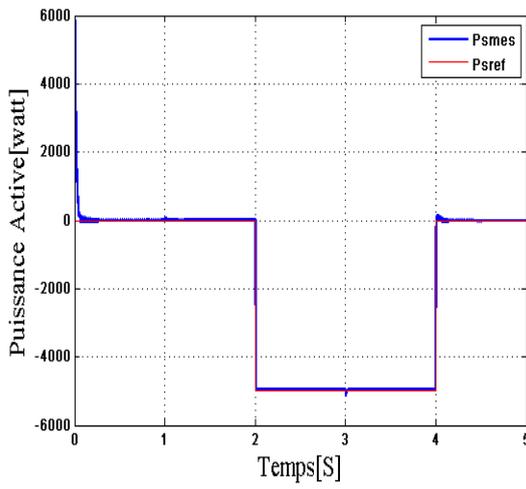


Figure II 25 Résultat de Commande vectorielle Indirecte avec boucles de puissance.

b. Commande vectorielle Indirecte sans boucle Commande puissance



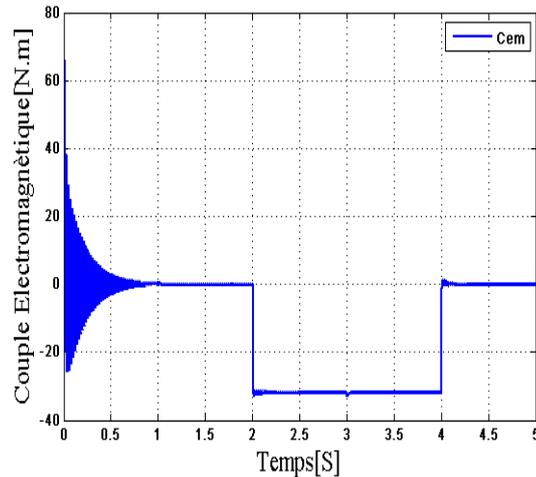


Figure II 26 Résultat de Commande vectorielle Indirecte sans boucles de puissance.

La Figure (II.25.26) représente les résultats obtenus des puissances actives et réactives dans le cas du contrôle indirect avec boucle et sans boucle de puissance par le correcteur PI. Cette commande est plus performante par rapport à la commande directe qui présentait les deux puissances (active et réactive).

Les résultats obtenus par la méthode indirect, avec et sans boucle de puissance, sont bien régulé en régime permanent, et les oscillations de forte amplitude en régime transitoire sont réduites

Le fonctionnement du contrôle de puissance réactive nous permis d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductive).

On remarque que L'amplitude des courants, flux, et les puissances accompagnée L'application des valeurs références des puissances active et réactive.

Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances de réglage par des régulateurs PI, Ces derniers présentent un bon découplage au réglage des puissances active et réactive et au niveau du rotor ou d'autre manier celle du flux et du couple, ainsi qu'un meilleur suivi des courants rotoriques par rapport à leurs références, dont la puissance active et réactive (P , Q) sont proportionnelles à la composante en quadrature et directe du courant rotorique (I_{rq} et I_{rd}) respectivement.

Finalement, on conclut que la commande indirecte sans boucle de puissance donné des bons résultats.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande du système éolien à base de la MADA. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. Une représentation de schéma bloc alors été menée pour chacun des constituants avant de procéder à la synthèse d'un système de commande.

Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation en vue d'une alimentation triphasée sinusoïdale. Le modèle triphasé, obtenu sous certaines hypothèses simplificatrices, s'est réduit en un modèle biphasé à l'aide de la transformation de PARK.

En plus de ça nous avons terminé la première partie de ce chapitre par une simulation de la machine (MADA).

En ce qui concerne sa deuxième partie nous avons étudié la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en fonctionnement génératrice.

En premier lieu, nous avons commencé par une présentation du principe de la commande vectorielle et des deux méthodes de contrôle à savoir la méthode directe et indirecte.

En second lieu, nous avons vu que la commande directe, était simple à mettre en œuvre, alors que la méthode indirecte en association avec le bouclage des puissances est certes complexe, mais elle permet d'obtenir un système performant.

Afin d'avoir un bon fonctionnement et un rendement élevé de la machine (MADA), il faut introduire des convertisseurs multiniveaux ; ceci sera l'objectif du prochain chapitre.