

---

**CHAPITRE II :**  
**MODELISATION DE LA GADA**

---

## II. MODELISATION DE LA GADA

### II.1. Introduction

La modélisation de la machine est une phase primordiale dans son analyse. Elle est d'un apport précieux en permettant d'une part de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement et d'autre part de prévoir des comportements de la machine plus variés que ceux de l'observation expérimentale.

Dans cette partie, on se propose de modéliser la génératrice asynchrone double alimentée dans le référentiel lié au champ tournant connectée directement aux réseaux par le stator et alimentée au rotor par l'intermédiaire d'une cascade convertisseur de puissance fonctionnant en MLI.

Par la suite on va étudier la commande vectorielle de la machine asynchrone double alimentée; et par la suite on va établir la modélisation de l'ensemble (onduleur - redresseur) La technique de la commande appliquée à cette machine est réalisée aux moyens des régulateurs PI pour les puissances active et réactive statoriques et pour l'un des courants rotoriques pour déterminer les rapports cycliques des interrupteurs utilisés pour réaliser une modulation de largeur d'impulsion du convertisseur.

### II.2. Structure de la machine

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [23].

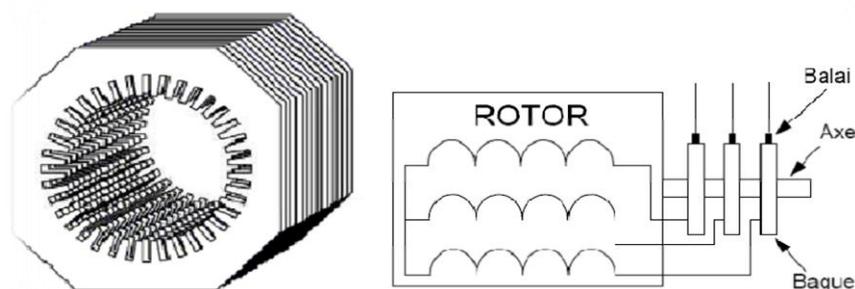


Fig.II.1 : principe du rotor bobiné.

### II.3. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double Alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de  $f_{mms}$  des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire  $\omega_s = 2. \pi. f_s$  et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega_r$ , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des  $f_{mms}$  des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \quad (\text{II.1})$$

Où :  $g$  est le glissement et  $\omega_{gl}$  est la vitesse angulaire de glissement. Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés. Pour que la rotation du vecteur résultant des  $f_{mms}$  par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence  $f_r$  [25], définie à partir de  $\omega_{gl} = 2. \pi. f_r$ ; c'est-à-dire :

$$f_r = g \cdot f_s \quad (\text{II.2})$$

### II.4. Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau : c'est la cascade hypo synchrone.
- En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et elle est convertie en puissance mécanique.

En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique.

- En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau [30].

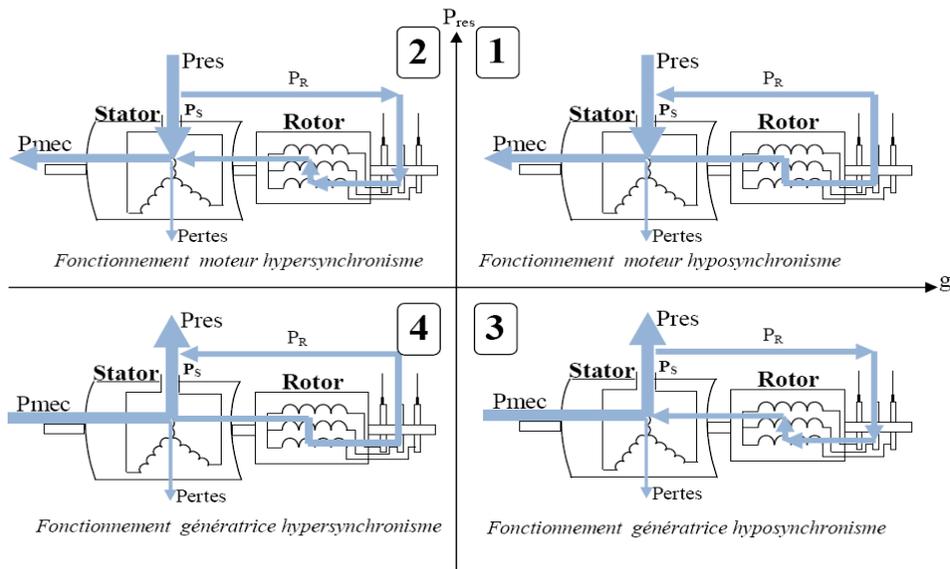


Figure II.2 : Modes de fonctionnement de la machine à double alimentation.

## II.5. Les différentes structures d'alimentation de la MADA

### II.5.1.MADA à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la (figure II.3), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotorique et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur [13].

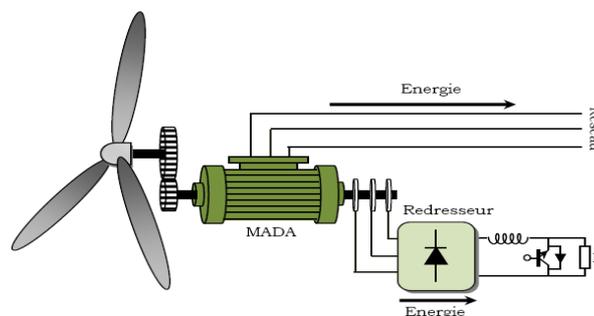
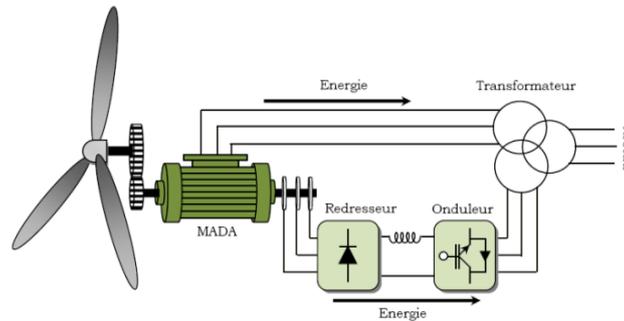


Figure II.3: MADA avec contrôle du glissement par L'énergie dissipée

### II.5.2.MADA structure de Kramer

Dans le but d'augmenter le rendement de la structure du système précède, on remplacera le hacheur et la résistance par un onduleur qui va permettre de renvoyer l'énergie de glissement vers le réseau. (Structure de Kramer, Figure (II.4)).



**Figure II.4: MADA, structure Kramer**

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT, [16].

### II.5.3.MADA avec cyclo convertisseur

Dans cette configuration, l'échange d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Cela permet de doubler la plage de variation de vitesse par rapport à la structure de Kramer. En effet, la variation du glissement inférieur à 30% peut être dans ce (fonctionnement hypo synchrone) ou négative (fonctionnement hyper synchrone).

L'inconvénient noté est la génération de perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif [12].

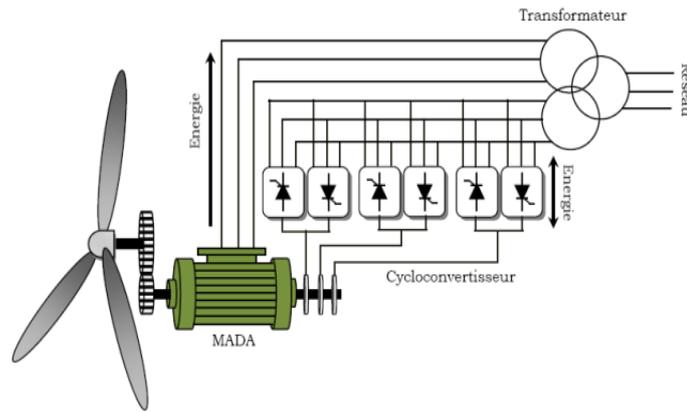


Figure II.5 : Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur.

**II.5.4.MADA «structure de Scherbius avec convertisseurs MLI »**

Une autre structure intéressante figure (II.6) utilise deux ponts triphasés d’IGBT commandables à l’ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [12].Le gain se répercute sur des perturbations moins importantes (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées par la commande MLI). En plus la bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau [13].

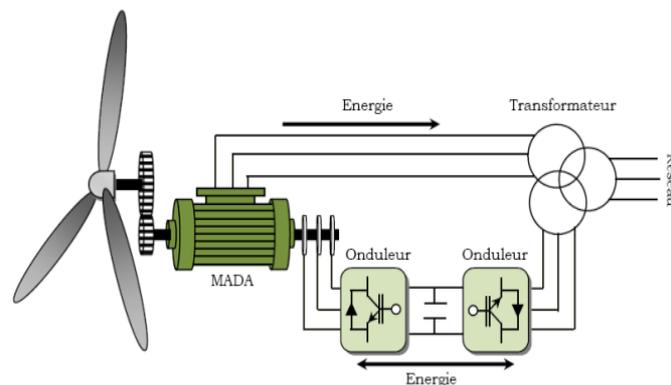


Fig.II.6 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

## II.6. Les avantages et les inconvénients

### II.6.1. Les avantages

- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse de synchronisme [28].
- A configuration dont les deux convertisseurs alimentant la machine permettent de fonctionner en régime dégradé (l'un des deux onduleurs tombe en panne) [20].
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique [20].
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir :
- Fonctionnement à vitesse de rotation variable.
- Régulation découplée des puissances active et réactive [28].

### II.6.2. Les inconvénients

- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique [20].
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques [28].
- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais [28].
- La présence des balais nécessite des interventions périodiques, ce qui augmente le coût de la maintenance [20].

## II.7. Modélisation de la GADA

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes.

Dans cette partie sera l'objectif d'une étude de modélisation de la machine asynchrone génératrice à double alimentation dans le référentielle au champ tournant. Ce dernier nous a permis d'obtenir un modèle mathématique adapté de GADA et commander par l'utilisation de la puissance active et réactive mesurer au niveau du rotor de la GADA [20].

### II.7.1. Hypothèses simplificatrices

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- La géométrie de la machine est symétrique.

- Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté, au stator et au rotor, la saturation est négligeable.
- La densité de courant est considérée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires.
- Les résistances des enroulements ne dépendent pas de la température.
- Les forces magnétomotrices créent par le stator ou le rotor a une répartition Sinusoïdale.
- L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

### II.7.2. Modèle mathématique de la GADA dans le référentiel généralisé (Description)

La GADA présente un stator triphasé identique à celui d'une machine asynchrone classique dite à cage d'écureuil et un rotor constitué d'un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants (balais). Sa robustesse est légèrement diminuée par rapport à une machine asynchrone classique à cause de ce système bagues/balais.

Une fois le stator de la machine connecté au réseau électrique, un flux magnétique apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et du courant statorique. Lors de la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des forces électromotrices (fem) dans les enroulements rotoriques.

#### II.7.2.1. Equation électrique

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sa} = -R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{sa}} \\ V_{sb} = -R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{sb}} \\ V_{sc} = -R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{sc}} \end{array} \right. \quad (\text{II.3}) \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{ra}} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{rb}} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{s_{rc}} \end{array} \right. \quad (\text{II.4})$$

$$[V_{sabc}] = [R_{sabc}] [-I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.5})$$

$$[V_{rabc}] = [R_{rabc}] [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.6})$$

$[\Phi_{abc(s)}]$  : Vecteur flux total statorique.

$[V_{abc(s)}]$  : Vecteur tension statorique applique aux trois phases.

$[I_{abc(s)}]$  : Vecteur courant traversant les enroulements statorique.

$[R_s]$  : Matrice résistance statorique.

Par un changement d'indice les vecteurs rotoriques comme suit :

$$[\Phi_{abc(r)}], [V_{abc(r)}], [I_{abc(r)}], [R_r]. \quad (\text{II.7})$$

### II.7.2.2. Équations magnétiques :

Maintenant, nous devons exprimer les grandeurs magnétiques au stator et au rotor, toujours dans le repère a, b, c :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] [-I_{sabc}] + [M_{sr}] [I_{rabc}] \quad (\text{II.8})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] [I_{rabc}] + [M_{sr}] [-I_{sabc}] \quad (\text{II.9})$$

Pour l'écriture condensée, on met :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$[L_{ss}]$  : Matrice d'inductances statoriques.

$[L_{rr}]$  : Matrice d'inductances rotoriques ;

$[L_s]$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_r]$  : Inductance propre d'une phase rotorique ;

$[M_s]$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques ;

$[M_r]$  : Inductance mutuelle entre phase statoriques.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

### II.7.2.3. La transformée de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ( $\alpha\beta$ ), puis vers le repère dq). Le repère

( $\alpha\beta$ ) est toujours fixe par rapport au repère (abc); par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe ( $\alpha\beta$ ) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park .

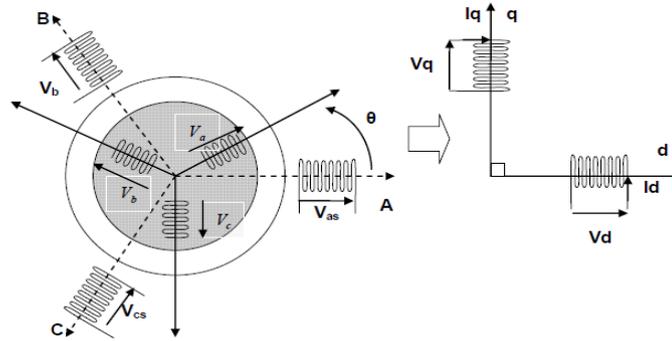


Fig.II.7 : Modèle de PARK de la MADA.

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d’obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [12].

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

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

$\theta_{OBS}$  est l’angle de rotation du repère( $u, v$ ) .

$$\begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_o \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.15}) \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P]^T \begin{bmatrix} X_u \\ X_v \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

En appliquant, la transformation de Park  $[P]$  sur les équations:(II.5),(II.6),(I.8),(I.9) et après simplification, les équations électriques et magnétiques modélisant la machine dans le repère biphasé ( $u, v$ ), sont déduites voir figure(II.7).

### II.7.3. Modèle de GADA dans le référentiel (d,q)

Dans le but d'établir une commande vectorielle de la MADA, nous rappelons ici sa modélisation dans le repère de Park. Dans cette étude, nous ferons apparaître le rapport de transformation  $m$  dans les équations.

Il est donc préférable de travail dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Les équations générales de la MADA dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante.

Les équations générales de la machine asynchrone classique dans un repère diphasé lié au champ tournant s'écrivent sous la forme suivante :

$$\text{On a : } \theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta = \theta_s - \theta_r$$

$$\text{Alors : } \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

$$\Rightarrow \omega = \omega_s - \omega_r$$

#### II.7.3.1. Equations électriques:

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - \omega_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Avec respectivement :

$V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}$  et  $V_{rq}$  sont les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature du système diphasé.

$\omega_r$  et  $\omega_s$  sont les pulsations des grandeurs électriques statoriques et rotoriques.

#### II.7.3.2. L'équations magnétiques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = -L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \varphi_{sq} = -L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} - M I_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} - M I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Avec:

$\varphi_{sq}, \varphi_{sd}, \varphi_{rq}$  et  $\varphi_{rd}$  : sont les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature du système diphasé

$L_s = l_s - M_s$  : L'inductance cyclique statorique

$L_r = l_r - M$  : L'inductance cyclique rotorique

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor

### II.7.3.3. L'équation mécanique :

$$C_{em} = C_r + f\Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.19})$$

Avec respectivement :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique ;  $C_r$  : Le couple résistant ;

$f$  : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

$J$  : L'inertie des parties tournantes ;

$\Omega$  : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

➤ L'expression du couple électromagnétique est donnée par les relations suivantes

$$\begin{cases} C_{em} = -p(I_{sq}\varphi_{sd} - I_{sd}\varphi_{sq}) \\ C_{em} = -p\frac{M}{L_r}(I_{sq}\varphi_{rd} - I_{sd}\varphi_{rq}) \\ C_{em} = p\frac{M}{L_s}(I_{rq}\varphi_{sd} - I_{rd}\varphi_{sq}) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

### II.7.3.4. Les puissances actives et réactives

$$\begin{cases} P_s = -V_{sd}I_{sd} - V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = -V_{sq}I_{sd} + V_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.21}) \quad \text{et} \quad \begin{cases} P_r = V_{rq}I_{rq} + V_{rd}I_{rd} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

### II.7.3.5. Equation d'état

A partir des équations (II.17) le modèle peut être exprimé dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$[U] = [A] [I] + [L] \frac{d}{dt} [I]$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & M\omega_s & 0 \\ 0 & M\omega_r & R_r & -\omega_r L_r \\ -M\omega_r & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \\ \dot{I}_{rd} \\ \dot{I}_{rq} \end{bmatrix}$$

En considérant les composantes en (d, q) l'équation d'état prend la forme :

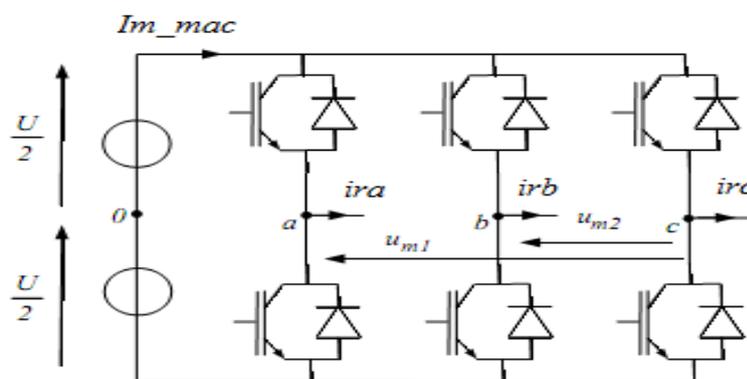
$$\frac{d}{dt}[\mathbf{I}] = -[\mathbf{L}]^{-1}[\mathbf{A}'][\mathbf{I}] + [\mathbf{L}]^{-1}[\mathbf{U}]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & M\omega_s & 0 \\ 0 & M\omega_r & R_r & -\omega_r L_r \\ -M\omega_r & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

### II.8.convertisseur

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor où les signaux de commande résultent de l'application de la commande vectorielle de la MADA afin de régler simultanément la fréquence et la tension.

En vue de la modélisation la machine asynchrone à double alimentation qui est présenté dans le repère de Park, nous utiliserons dans tout ce qui va suivre un modèle continu équivalent également dans le repère de Park [36,1] dans le but de simplifier l'analyse lors de l'étude du système complet de génération d'énergie.

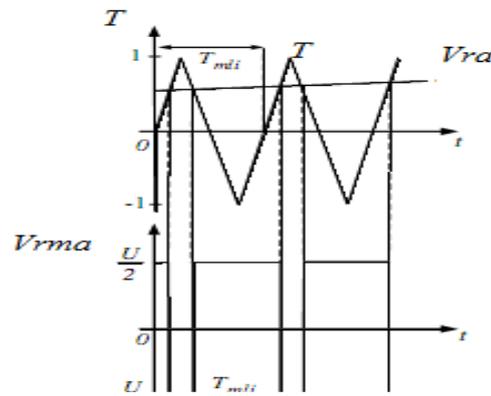


FigII.8 Le convertisseur coté rotor de la MADA à modéliser

La commande de ce convertisseur est obtenue par une modulation de largeur d'impulsion et qui détermine les deux niveaux de tension pour chaque tension modulée  $V_{rma}$ , cette dernière résulte d'une

comparaison d'un signal triangulaire  $T$  qui s'appelle la porteuse d'une fréquence très élevée avec le signal de référence  $V_{ra}$  (généralement sinusoïdal) [36].

La figure (II.8) montre le principe de la MLI.



FigII.8. Principe de la MLI

La valeur moyenne de la tension modulée sur une période MLI ( $T_{MLI}$ ) est :

$$\overline{V_{rma}} = \frac{1}{T_{mli}} \int_0^{T_{mli}} (V_a - V_0) dt = \frac{1}{T_{mli}} \left[ -\frac{U}{2} \alpha T_{mli} + \frac{U}{2} (1 - \alpha) T_{mli} \right] = \frac{U}{2} (1 - 2\alpha) \quad (II.23)$$

Avec :  $\alpha$  est le rapport cyclique.

Du fait que  $T_{MLI}$  est très petite la référence  $V_{ra}$  varie peu durant cette période et les deux premières intersections de la porteuse avec la référence nous donnent :

$$V_{ra} = 1 - 2\alpha \quad (II.24)$$

En combinant les équations (II.23) et (II.24) on trouve:

$$\overline{V_{rma}} = \frac{U}{2} V_{ra} \quad (II.25)$$

La même chose pour les deux autres phases, on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} \overline{V_{rma}} \\ \overline{V_{rmb}} \\ \overline{V_{rmc}} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

En appliquant le principe de la conservation de puissance on écrit :

$$U \cdot \mathbf{I}_{m-mac} = \begin{bmatrix} \overline{V_{rma}} & \overline{V_{rmb}} & \overline{V_{rmc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.27)$$

En remplaçant les tensions moyennes par leurs valeurs on obtient:

$$\mathbf{I}_{m-mac} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_{ra} & V_{rb} & V_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Où:  $\overline{V_{rma}}$ ,  $\overline{V_{rmb}}$  et  $\overline{V_{rmc}}$  représentent les tensions simples modulées par le convertisseur.

$\mathbf{I}_{m-mac}$  représente le courant modulé par le convertisseur.

En appliquant la transformation de Park sur les tensions de référence et les tensions modulées on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{rmd} \\ V_{rmq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{rd-reg} \\ V_{rq-reg} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$\mathbf{I}_{m-mac} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_{rd-reg} & V_{rq-reg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Où:

$V_{rmd}$ ,  $V_{rmq}$  représentent les tensions modulées dans le repère de Park.

$V_{rd-reg}$ ,  $V_{rq-reg}$  : Les tensions de réglage dans le repère de Park.

$i_{rd}$ ,  $i_{rq}$  : Les courants rotoriques dans le repère de Park.

$U$  : La tension du bus continu.

$\mathbf{I}_{m-mac}$  : Le courant modulé par le convertisseur.

Les équations (II.29) et (II.30) qui décrit le modèle continu équivalent du convertisseur et qui va être utilisé pour tout ce qui va suivre, on ne tient pas compte donc des fréquences de commutation des convertisseurs.

## II.9 Contrôle du convertisseur

Le contrôle vectoriel de machine fixe des tensions de réglage que l'on appelle  $V_{rd-reg}$  et  $V_{rq-reg}$  à appliquer au rotor de la MADA pour qu'elle suive les consignes de puissances.

D'après et [1] la relation inverse du modèle continu équivalent du convertisseur pour une référence à un point milieu fictif de la tension du bus continu nous permet d'écrire:

$$V_{rd-reg} = \frac{2}{U} \cdot V_{rd-ref} \quad (\text{II.31})$$

$$V_{rq-reg} = \frac{2}{U} \cdot V_{rq-ref} \quad (\text{II.32})$$

Avec :  $V_{rd-ref}$ ,  $V_{rq-ref}$  sont les tensions de référence issues de la commande vectorielle.

## II.10. Résultats de simulation numérique du système

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 4 KW.

### II.10.1. Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA)

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnement moteur à rotor en court-circuit et présentée sur les figure (II.9), (II.10), (II.11), (II.13) concernant respectivement la vitesse et le couple, les composante du flux statoriques et sont résultante, les composante du courant statoriques et rotoriques.

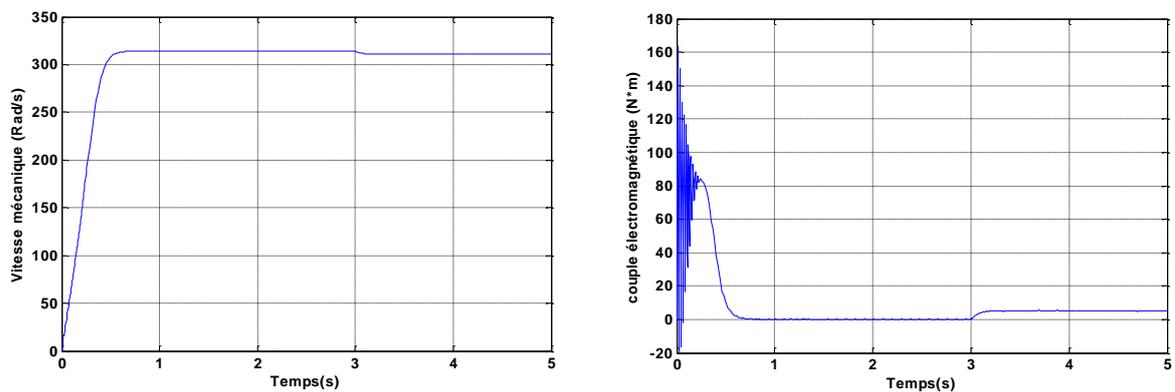


Figure II.9 : Vitesse mécanique et couple électromagnétique.

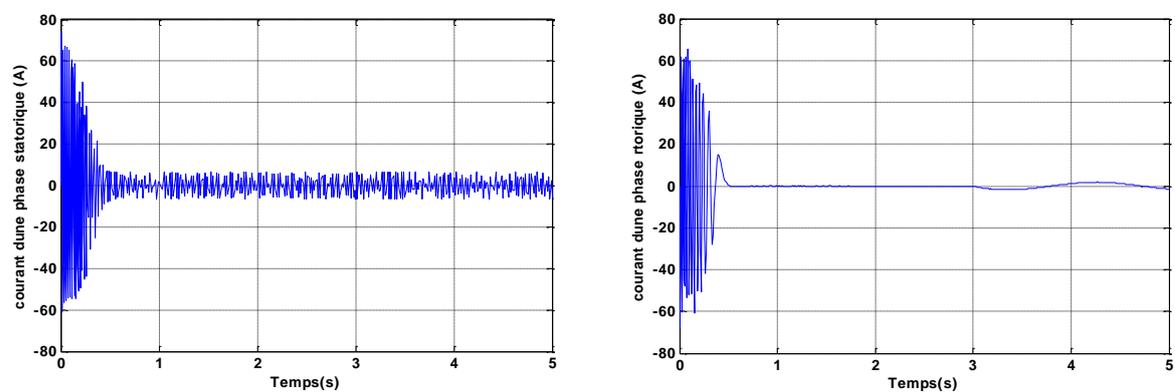


Figure II.10 : Courant statorique et rotorique de phase ( $I_{sa}$  et  $I_{ra}$ )(A).

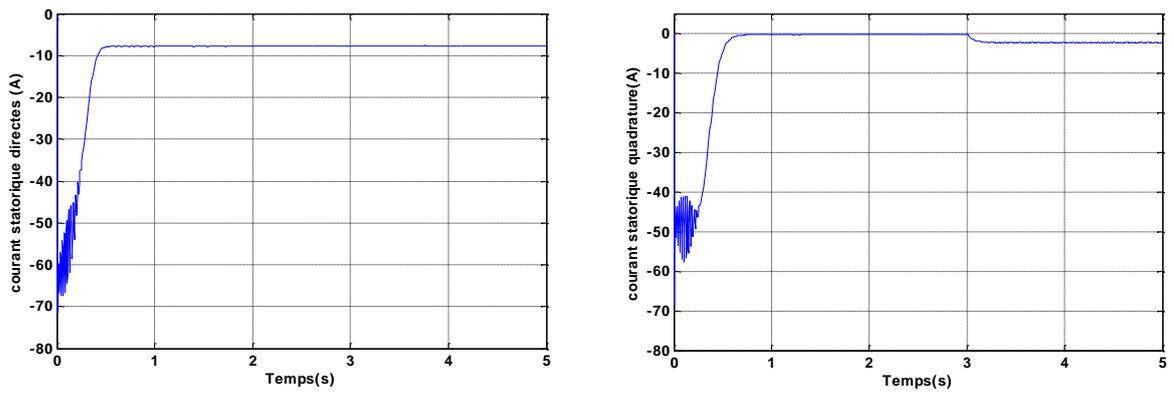


Figure II.11 :Les composantes du courant statoriques.

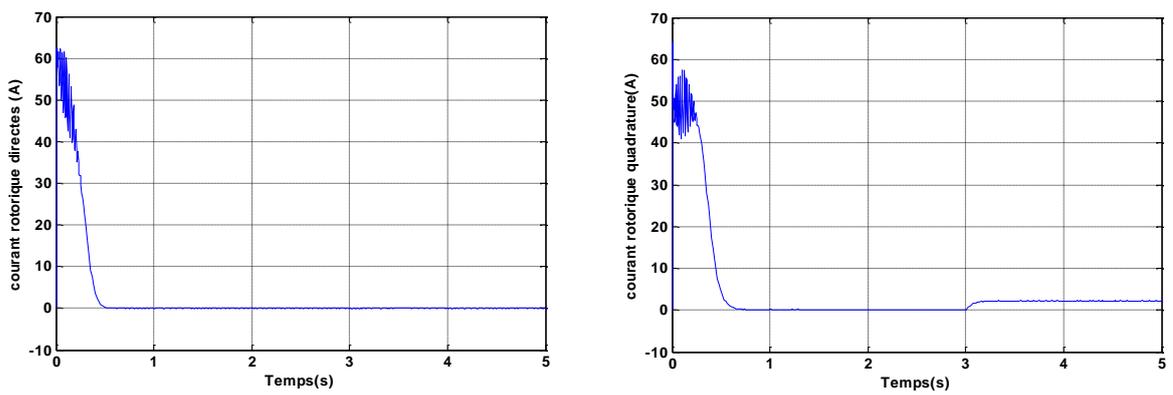


Figure II.12 : Les composantes du courant rotoriques.

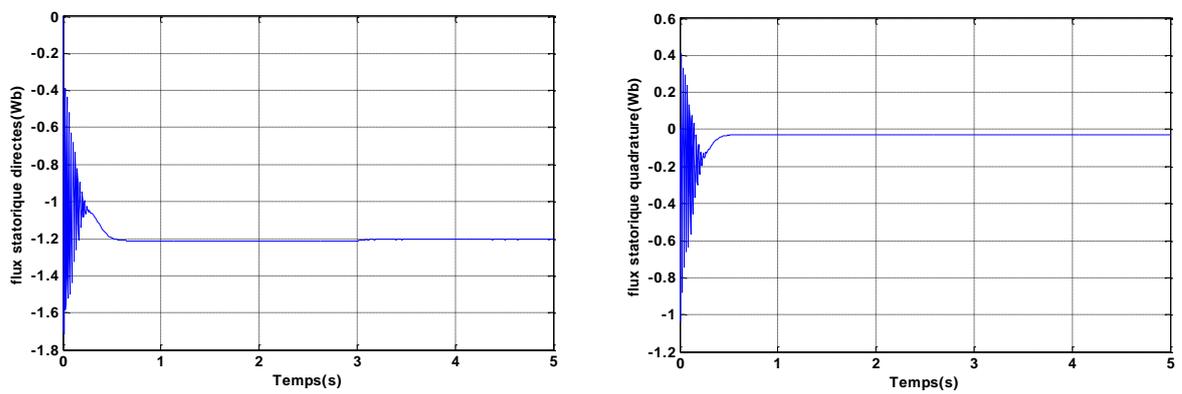


Figure II.13 : Les composantes du flux statorique

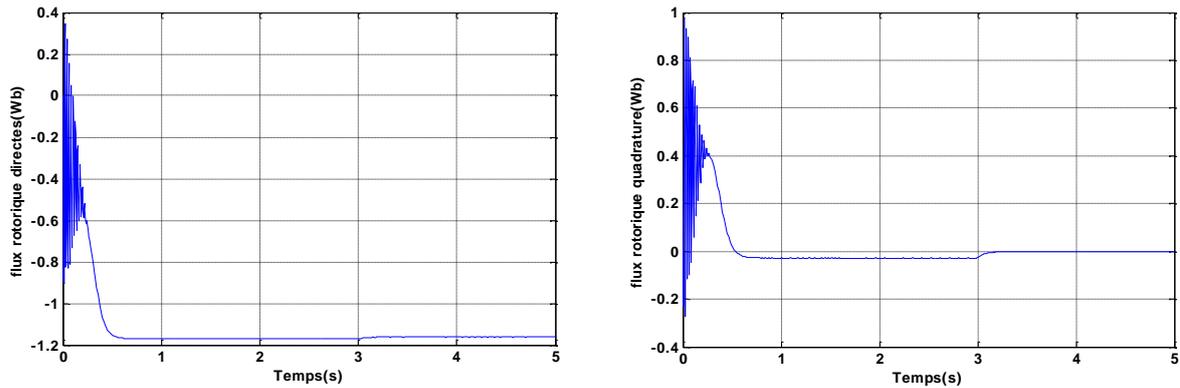


Figure II.14 : Les composantes du flux rotorique

### II.10.1.1. Interprétation des résultats

On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant l'établissement du régime permanent caractérisé par une vitesse proche du synchronisme (Figure vitesse et couple ) et une fréquence des courants rotoriques presque nulle (Figure  $I_r dq$ ) (un très faible glissement). En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro (Figure vitesse et couple) (présence de frottements visqueux).

L'application d'un couple résistant se traduit par une augmentation du couple électromagnétique, augmentation de l'amplitude des courants statoriques (Figure  $I_s dq$ ) et une diminution de la vitesse à cause d'un glissement plus important qui se répercute sur les courants rotoriques (vérification de la relation  $(f_r = g f_s)$ ). La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone).

### II.10.2. Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance 4KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasés parfaite, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de  $(220\sqrt{2}v ; 100\pi \text{ rad/s}; 50\text{Hz})$ , et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de  $(12\sqrt{2}v ; 24\sqrt{2}v ; 4\pi \text{ rad/s}; 2\text{Hz})$  et une fréquence égale à la fréquence rotorique.

Le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1440 tr/min.

II.10.2.1. Pour alimentation à rotor de  $V_r = 12V$  :

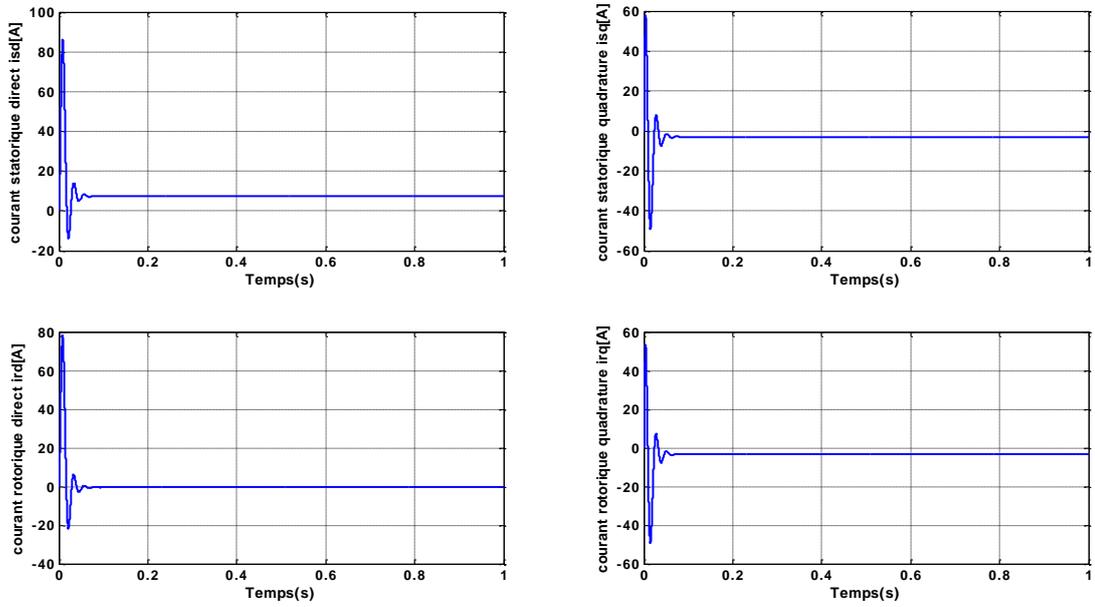


Fig.II.15: Courant statorique et rotorique de GADA (d , q)

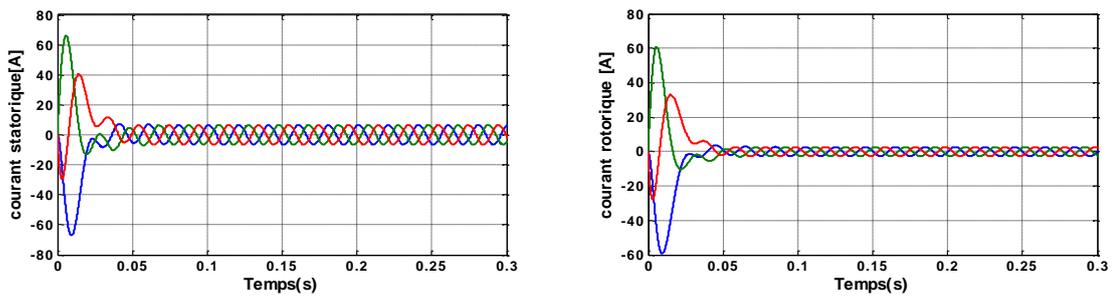


Fig.II.16 : Les courants statoriques et rotoriques triphasés.

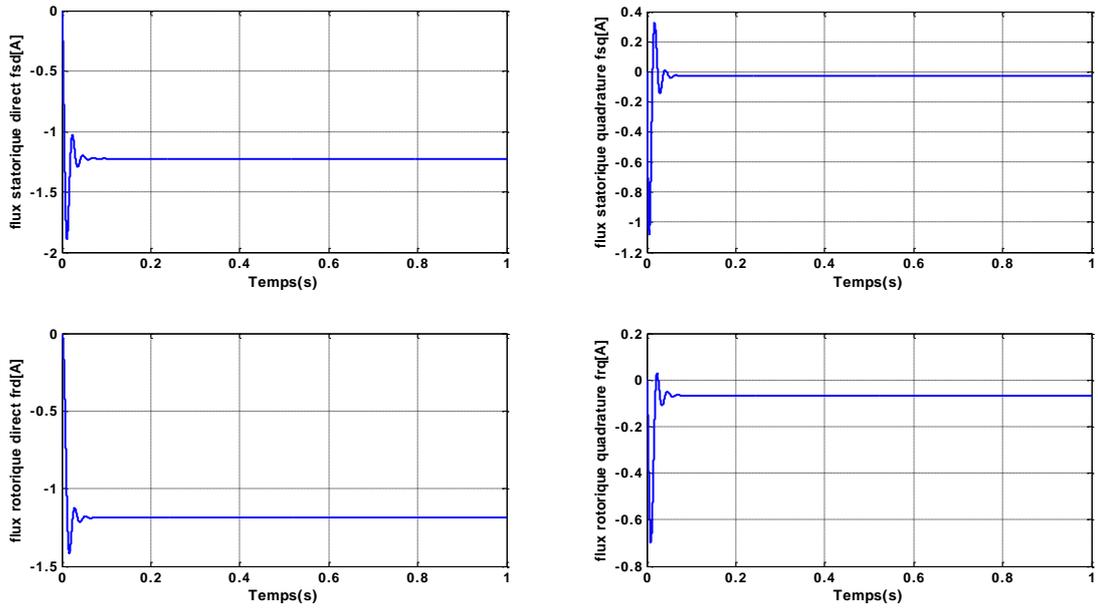


Fig.II.17: Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q)

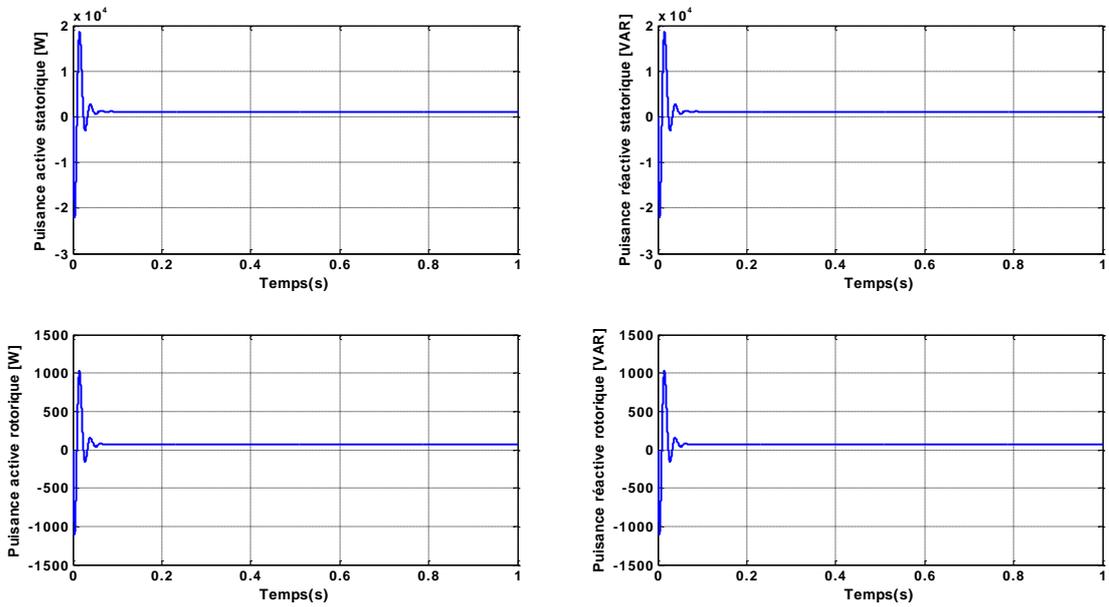


Fig.II.18: Puissance statorique ( $P_s, Q_s$ ) et Puissance rotorique ( $P_r, Q_r$ )

II.10.2.2. Pour alimentation à rotor de  $V_r = 24V$  :

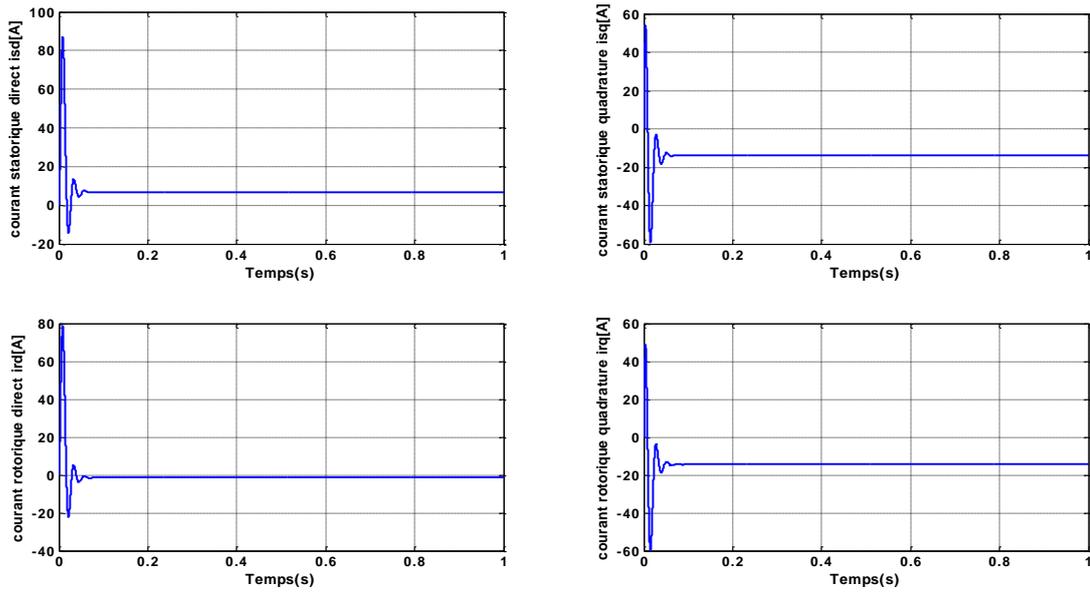


Fig.II.19: Courant statorique et rotorique de GADA (d , q).

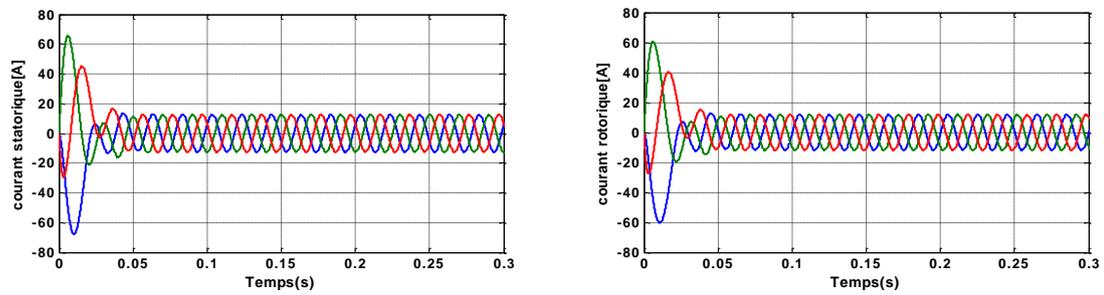


Fig .II.20: Les courants statoriques et rotoriques triphasés.

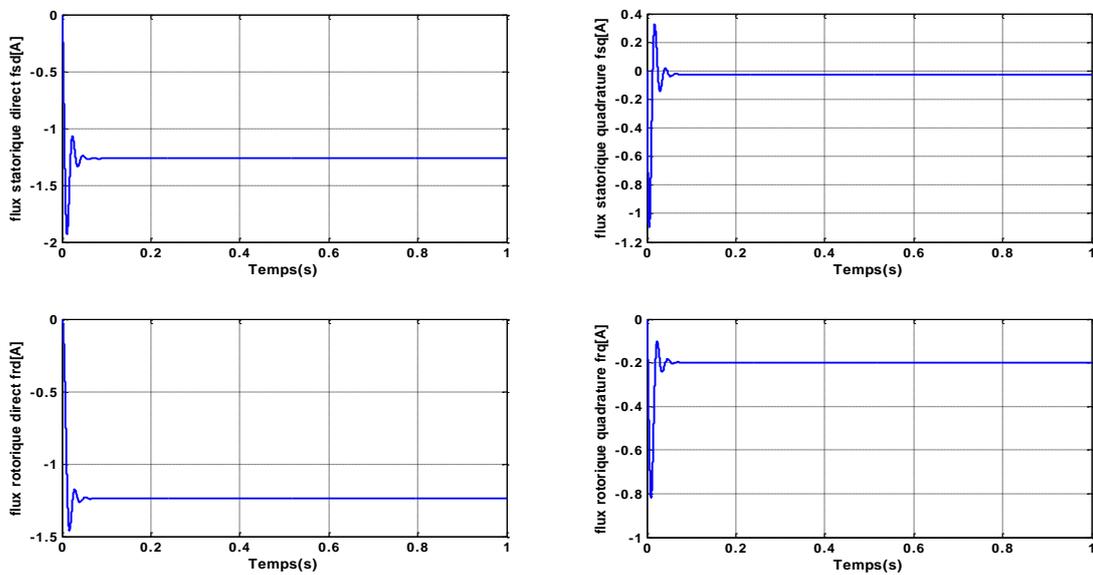


Fig.II.21: Flux statorique et rotorique de GADA (d ,q).

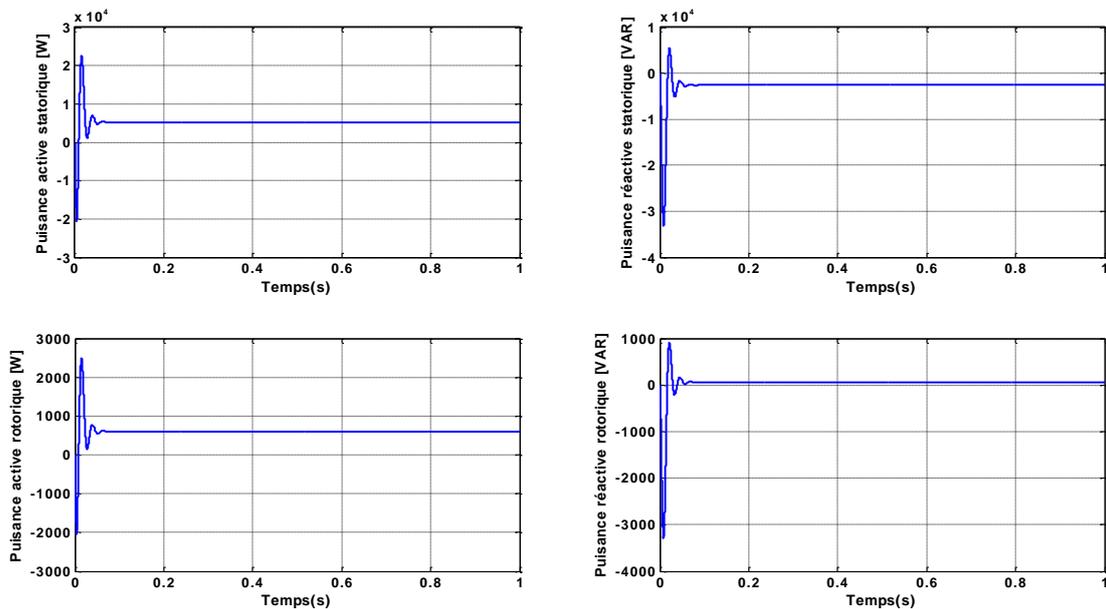


Fig.II.22: Puissance statorique ( $P_s, Q_s$ ) et Puissance rotorique ( $P_r, Q_r$ ).

### II.10.2.1. Interprétations des résultats

Les figures précédentes représentent les résultats de simulation obtenus montrant que pendant le régime dynamique. Pendant le démarrage on remarque l'importance du courant, après un temps très réduit égale à environ 0.05s, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdale de fréquence 50Hz pour les courants statorique et.  $f_r = gfs$ . Pour les courants rotorique. Le couple électromagnétique est négatif atteint au démarrage une valeur maximale ( $-158\text{Nm}$ ).

On remarque que l'augmentation au niveau de la tension rotorique implique d'augmentations au niveau des grandeurs de la machine, et on peut signaler aussi que la tension et la fréquence rotoriques influence sur les grandeurs de la génératrice, et influence sur la puissance au niveau de stator.

### II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation du système éolien, basé sur la machine asynchrone double alimentée et son convertisseur mécanique. la modélisation de turbine et l'étude va traiter la commande vectorielle de la machine et les différents convertisseurs électroniques assurant la commande rotorique de la GADA pour exploiter au mieux l'énergie disponible dans le vent en cherchant le point de fonctionnement à puissance maximale.