

---

# CHAPITRE IV :

## IV. Intégration du système de stockage inertiel

---

---

## IV. Intégration du système de stockage inertiel

### IV.1. Introduction

Les générateurs éoliens sont des générateurs dont la source primaire d'énergie est le vent. Il est bien connu que le vent a des caractéristiques très fluctuantes et imprévisibles et il est impossible de prédire sa valeur pour un moment donné.

Comme la puissance mécanique débitée par la turbine est très fluctuante, la puissance générée par le générateur éolien sera aussi fluctuante. Cela pose beaucoup de problèmes pour les gestionnaires du système énergétique pour deux raisons. Il faut assurer la balance entre la puissance générée et la puissance consommée. De plus, la puissance consommée est difficilement prévisible et variable. A cause de ces restrictions, les générateurs éoliens actuels ne peuvent pas fonctionner sans être associés à une source classique d'énergie [34][35][36].

En ce chapitre l'idée de stockage est exploitée, afin de régler la puissance débitée sur le réseau. Le stockage inertiel est une solution appropriée aux aérogénérateurs, où il offre de meilleurs avantages par rapport aux autres types de stockage [33][34].

Le système étudié est connecté au réseau (Fig.4.5). Comporte:

- Un aérogénérateur à vitesse variable utilisant une MADA et pilotée par le rotor au moyen des convertisseurs MLI, un multiplicateur de vitesse et une turbine à trois pales.
- Un SISE Comportant un volant d'inertie, une machine asynchrone à cage (MAS) et des convertisseurs (AC/DC/AC) MLI.

L'objectif visé par ce chapitre est concentrée sur l'association d'un système inertiel de stockage d'énergie au générateur éolienne afin de constituer un ensemble capable de fournir des services système ou de fonctionner en îlot.

Nous clôturons ce chapitre par présentation des résultats de simulation obtenus sous MATLAB Simulink.

## IV.2. Importance du stockage d'énergie

Il existe à l'heure actuelle plusieurs méthodes de stockage d'énergie qui peuvent être classées en deux catégories [33] :

- **Le stockage à court terme** : Pour cette catégorie, le temps de stockage est inférieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour lisser les fluctuations de puissance produite par la ferme éolienne et pour régler la tension et la fréquence du réseau (réglage primaire).

- **Le stockage à long terme** : Le temps de stockage est supérieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour répondre aux pics d'appels de puissance aux heures de pointe du réseau électrique et en cas d'absence du vent.

De plus, il existe différents moyens de stockage à court terme et long terme. Les plus importants sont présentés dans les tableaux 4.1 et 4.2 :

Moyens de stockage	Efficacité %
Volant d'inertie	70-80
Supraconducteur	80-95
Super condensateur	70-80

Tableau 4. 1 Moyens de stockage à court terme [37]

Moyens de stockage	Efficacité %
Pompage hydraulique	90-70
Compresseur d'air	40-50
Batterie	60-70

Tableau 4. 2 Moyens de stockage à long terme [37]

Dans cette étude, on présente une solution de stockage de l'énergie éolienne à court terme. Cette solution consiste en l'utilisation du volant d'inertie afin de garantir, en temps réel, la stabilité du système électrique.

## IV.3. Les constituants du système de stockage par volant d'inertie

Les principaux composants d'un dispositif de stockage inertiel sont schématisés par la figure.4.1 On trouve ainsi en premier lieu le volant, puis le moteur-générateur, le tout guidé par des paliers

éventuellement magnétiques, un convertisseur électronique de puissance et une enceinte à basse pression [38].

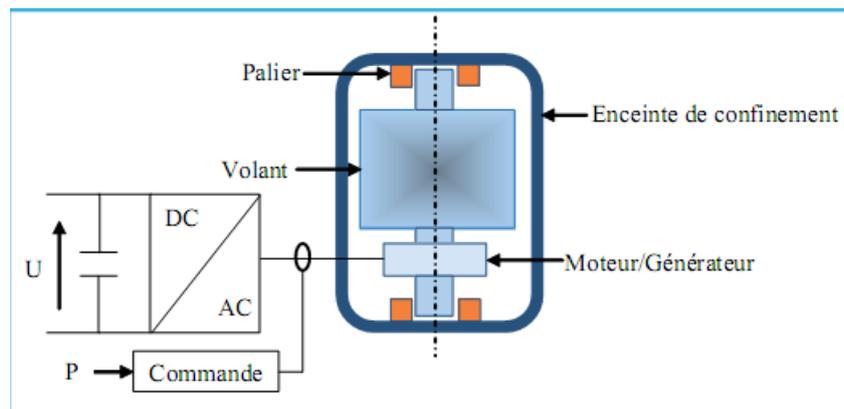


Fig.4. 1. Constituants d'un système de stockage inertiel

#### IV.4. Le principe de fonctionnement du système de stockage par volant d'inertie

Comme dans la majorité des systèmes de stockage d'énergie électrique, il y a une transformation réversible d'énergie. Ainsi, lors du stockage, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire du moteur électrique. Puis, l'énergie mécanique est à son tour stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique d'une masse tournante. En revanche, lors de la décharge du système de stockage, l'énergie mécanique est reconvertie en énergie électrique par l'intermédiaire du générateur électrique. Le régime de fonctionnement est déterminé par le convertisseur électronique de puissance qui impose le sens de transfert de l'énergie à travers la machine électrique [33]. Figure 4.2.

Les machines électriques utilisées pour le stockage inertiel sont toutes alternatives, sans balais et à rotor robuste avec soit une architecture cylindrique ou discoïde. On retrouve alors les machines à aimants, à réluctance variable et asynchrone [35].

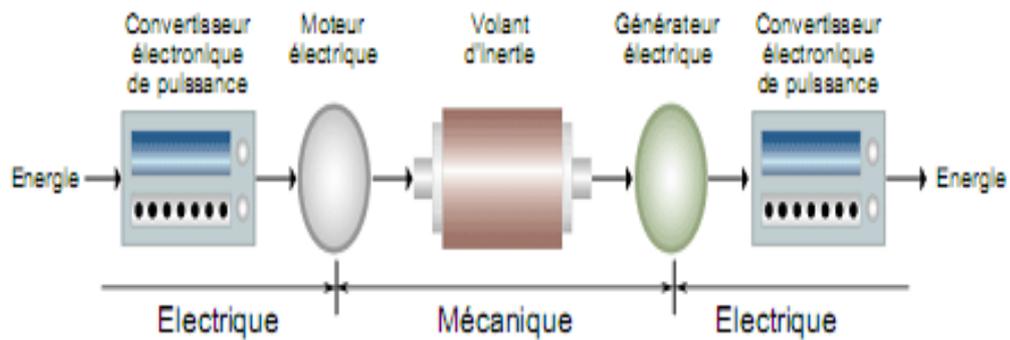


Fig.4.2. transfert d'énergie dans un SISE [33].

#### IV.5. Modélisation

Le modèle du système inertielle de stockage d'énergie peut être décomposé en trois parties:

Le volant d'inertie, la machine asynchrone et le convertisseur de puissance.

##### V.5.1. Le volant d'inertie

L'énergie  $E_v$  stockée dans le volant d'inertie  $J_v$  à pour expression:

$$E_v = \frac{1}{2} J_v \Omega_v^2 \quad (4.1)$$

Avec :

$E_v$  : L'énergie stockée(J)

$J_v$  : Moment d'inertie du volant exprimé en ( $\text{kg.m}^2$ ).

$\Omega_v$  : vitesse angulaire de rotation du volant (rad/s).

Le moment d'inertie du volant est un paramètre essentiel car il caractérise la capacité de stockage (ou restitution), pour cela on le détermine en fonction de la puissance stockée durant un temps voulu.

La puissance de stockage est exprimée en fonction de l'énergie par :

$$P_v = \frac{dE_v}{dt} \quad (4.2)$$

Comme on peut exprimer la variation d'énergie stockée durant un temps par :

$$\frac{dE_v}{dt} = \frac{1}{2} J_v \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad (4.3)$$

De (4.2) et (4.3) on peut écrire:

$$P_v = \frac{1}{2} J_v \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad (4.4)$$

Supposant qu'on a des petites variations l'équation (4.4) devient :

$$P_v = \frac{1}{2} J_v \frac{\Delta\Omega_v^2}{\Delta t} \quad (4.5)$$

$\Delta\Omega_v$  : Petite variation de vitesse de rotation du volant autour d'un point de fonctionnement exprimée en (rad/s).

$\Delta t$  : Petite variation de temps (s).

De (5.5) l'inertie vaut :

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Delta\Omega_v^2} \quad (4.6)$$

$$\text{Où : } \Delta\Omega_v^2 = \Omega_{v\max}^2 - \Omega_{v\min}^2 \quad (4.7)$$

Remplaçant (4.7) dans (4.6) l'inertie vaut :

$$J_v = \frac{2 \cdot P_v \cdot \Delta t}{\Omega_{v\max}^2 - \Omega_{v\min}^2} \quad (4.8)$$

En étudiant l'allure de puissance et du couple en fonction de la vitesse de rotation d'une machine asynchrone (couplée au volant) .

En distingue deux zones de fonctionnement pour la machine électrique présenté à la figure 4.3. [33],[36].

- Pour :  $0 \leq \Omega_v \leq \Omega_{vm}$ , le couple nominale de la machine est disponible, mais la puissance maximale est variable, en fonction de la vitesse ( $P_{mas} = K \Omega_v$ ), et plus petite que la puissance nominale. Cette zone ne présente pas beaucoup d'intérêt pour les SISE.

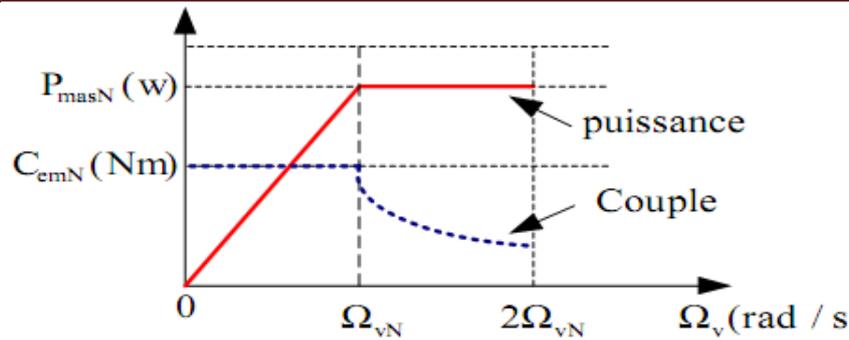


Fig.4.3. Allure de la puissance et du couple en fonction de la vitesse de rotation d'une MAS.

- Pour :  $\Omega_v > \Omega_{vn}$ , la puissance est maximum et correspond à la puissance nominale de la machine, le couple électromagnétique est alors inversement proportionnel à la vitesse de rotation ( $T_{em} = \frac{K}{\Omega_v}$ ). C'est la zone de fonctionnement utilisée dans les SISE parce qu'ici la puissance de la machine est disponible pour n'importe quelle vitesse. Le stockage inertiel avec machine asynchrone sera donc utilisé dans la plage de vitesse suivant  $\Omega_{vn} \leq \Omega_v \leq 2\Omega_{vn}$ . Permettant ainsi un fonctionnement à puissance nominale constante.

## IV.5.2. La machine asynchrone (MAS)

### IV.5.2.1. Equations électriques dans le repère (d,q)

On utilise le modèle de la machine asynchrone à cage dans le repère de Park [35, 36,39, 33] pour les mêmes raisons que pour la MADA.

Nous constatons d'après cette équation que lors de la fabrication d'un volant d'inertie pour un SISE, il y a deux conditions initiales dont il faut tenir compte : La vitesse maximale de rotation du volant et la capacité du volant d'inertie. La machine asynchrone est choisie en fonction de ces avantages en termes de simplicité et de robustesse des parties tournantes, son modèle dans le repère de peut-être décrit par PARK les équations suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -\frac{R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}}\psi_{rd} + (w_s - p\Omega_v)\psi_{rq} + \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}}i_{sd} \\
 \frac{d\psi_{rq}}{dt} = -\frac{R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}}\psi_{rq} - (w_s - p\Omega_v)\psi_{rd} + \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}}i_{sq} \\
 \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{\sigma L_{s-MAS} L_{r-MAS}^2}\psi_{rd} + \frac{Mp\Omega_v}{\sigma L_{s-MAS} L_{r-MAS}}\psi_{rq} - \frac{R_{rs}}{\sigma L_{s-MAS}}i_{sd} + w_s i_{sq} + \frac{1}{\sigma L_{s-MAS}}V_{sd} \\
 \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{M \cdot R_r}{\sigma L_s L_r^2}\psi_{rq} - \frac{Mp\Omega_v}{\sigma L_s L_r}\psi_{rd} - \frac{R_{rs}}{\sigma L_s}i_{sq} - w_s i_{sd} + \frac{1}{\sigma L_s}V_{sq}
 \end{array} \right.$$

(4.9)

Le couple électromagnétique de la machine est obtenu par :

$$T_{em-MAS} = pM(\psi_{rd}i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd}) \quad (4.10)$$

$L_{s-MAS}$  : inductance propre cyclique statorique (H).

$L_{r-MAS}$  : inductance propre cyclique rotorique (H).

$M$  : inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor (H).

$\sigma$  : Coefficient de dispersion égale à :  $1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$

$R_{s-MAS}$  : résistance d'une phase statorique ( $\Omega$ ).

$R_{r-MAS}$  : résistance d'une phase rotorique ( $\Omega$ ).

Le terme  $R_{sr} = R_{s-MAS} + \frac{M^2}{L_{r-MAS}^2} R_{r-MAS}$

$\psi_{rd}$  : composante directe du flux rotorique totalisé (Web).

$\psi_{rq}$  : composante quadratique du flux rotorique totalisé (Web).

$i_{sd}$  : composante directe du courant statorique (A).

$i_{sq}$  : composante quadratique du courant statorique (A).

$v_{sd}$  : composante directe de la tension statorique (V).

$v_{sq}$  : composante quadratique de la tension statorique (V).

$p$  : le nombre de paires de pôles de la MAS.

$\omega_s$  : pulsation du champ dans le repère statorique (rad/s).

$\Omega_v$  : vitesse mécanique de l'arbre (rad/s).

L'avantage d'utiliser ce référentiel, est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent.

Il est alors plus aisé d'en faire la régulation [39].

#### IV.5.2.2. Equation mécanique de la MAS

L'équation mécanique est donnée par :

$$J_v \frac{d\Omega_v}{dt} = T_{em-MAS} - f_v \cdot \Omega_v \quad (4.11)$$

Avec :

$f_v$  : Le coefficient du frottement visqueux  $\text{kg.m}^2/\text{s}$ .

On ne tient pas compte au couple de frottement sec.

#### IV.5.2.3. Contrôle vectoriel de la machine asynchrone

Pour déterminer la commande (tensions de référence à appliquer au convertisseur) de la machine asynchrone, on opte le contrôle vectoriel à flux rotorique orienté parce que les équations sont plus simples par rapport au contrôle à flux statorique ou à flux d'entrefer orienté [33].

La position du référentiel est obtenue afin d'annuler la composante quadratique du flux rotorique donc faire coïncider le vecteur flux rotorique avec l'axe 'd' du repère de Park.

On pose :

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \psi_r \\ \psi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\text{Ainsi :} \quad \begin{cases} \omega_r = 0 \\ \omega_s = \omega \end{cases} \quad (4.13)$$

Le système d'équations (4.9) devient :

$$(4.14) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{rd}}{dt} = -\frac{R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}}\psi_{rd} + (w_s - p\Omega_v)\psi_{rq} + \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{L_r}i_{sd} \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} = 0 \\ \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{\sigma L_{s-MAS} L_{r-MAS}^2}\psi_{rd} - \frac{R_{rs}}{\sigma L_{s-MAS}}i_{sd} + w_s i_{sq} + \frac{1}{\sigma L_{s-MAS}}V_{sd} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{M \cdot p\Omega_v}{\sigma L_{s-MAS} L_{r-MAS}}\psi_{rd} - \frac{R_{rs}}{\sigma L_s}i_{sq} - w_s i_{sd} + \frac{1}{\sigma L_{s-MAS}}V_{sq} \end{array} \right.$$

Et le couple électromagnétique devient :

$$T_{em-MAS} = pM(\psi_{rd}i_{sq}) \quad (4.15)$$

Posant les deux tensions  $E_d$  et  $E_q$  telles que :

$$E_d = v_{sd} + \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}^2}\psi_{rd} + \sigma L_{s-MAS}w_s i_{sd} \quad (4.16)$$

$$E_q = v_{sq} - \frac{M \cdot p\Omega_v}{L_{r-MAS}^2}\psi_{rd} - \sigma L_{s-MAS}w_s i_{sd} \quad (4.17)$$

D'après (4.14), (4.16), (4.17) on obtient :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s}(E_d - R_{sr}i_{sd}) \quad (4.18)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s}(E_q - R_{sr}i_{sq}) \quad (4.19)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -\frac{R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}}\psi_{rd} + \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{L_r}i_{sd} \quad (4.20)$$

En inversant les équations (4.18) et (4.19), nous obtenons les tensions de référence  $E_{d-ref}$  et  $E_{q-ref}$  comme suite :

$$E_{d-ref} = PI_i(i_{sd-ref} - i_{sd}) \tag{4.21}$$

$$E_{q-ref} = PI_i(i_{sq-ref} - i_{sq}) \tag{4.22}$$

Avec :  $PI_i$  est le correcteur des boucles de courant .il est de type proportionnel intégral et est identique pour les deux axes de Park.

Les tensions  $E_{d-ref}$  et  $E_{q-ref}$  sont les tensions de référence non compensées parce qu’elles contiennent les termes de couplage entre les axes « d » et « q ».

La mesure du flux est difficile mais on peut l’estimer en mesurant le courant direct par la fonction de transfert suivante :

$$\psi_{rd-est}(s) = \frac{M}{1 + \frac{L_{r-MAS}}{R_{r-MAS}} \cdot s} i_{sd-mes} \tag{4.23}$$

Avec : S est l’opérateur de Laplace.

Le flux de référence est déterminé à partir de la loi de défluxage de la MAS qui nous donne un flux nominale pour des vitesses de rotation inférieurs à la vitesse de vitesse de base de la machine, et pour obtenir des vitesses supérieurs le flux est réduit conformément à la non linéarité suivante[40] :

$$\psi_{r-ref}(\Omega_v) = \begin{cases} \psi_{rn} & si \quad |\Omega_v| \leq \Omega_{vn} \\ \psi_{rn} \cdot \frac{\Omega_v}{|\Omega_v|} & si \quad |\Omega_v| > \Omega_{vn} \end{cases} \tag{4.24}$$

avec  $\Omega_{vn}$  la vitesse nominale de la MAS (rad/s).  
 a n Impair  
 a n Pair

$$\psi_{rn} = \frac{L_{r-MAS}}{M} \cdot \psi_{sn} \tag{5.25}$$

$\psi_{rn}$  est le flux rotorique nominal (Web).

$\psi_{sn}$  est le flux statorique nominal (Web).

$$\text{Où : } \psi_{sn} = \sqrt{3} \frac{v_s}{\omega_b} \quad (4.26)$$

Avec :  $v_s$  la valeur efficace de la tension simple statorique (V).

$\omega_b$  la pulsation du réseau égale à 314.16 rad/s.

A partir de (5.20) on écrit :

$$i_{sd-ref} = PI_\psi (\psi_{r-ref} - \psi_{r-est}) \quad (4.27)$$

Avec :  $PI_\psi$  est le correcteur de boucle de flux dont les paramètres sont cités à l'annexe.

On souhaite contrôler la puissance de la machine asynchrone couplée au volant d'inertie, pour cela à partir d'une puissance de référence qu'on veut stocker (ou restituer) notée  $P_{v-ref}$  et une mesure de la vitesse de rotation du volant, le couple électromagnétique de référence de la MAS peut être calculé par :

$$T_{em-MAS-ref} = \frac{P_{v-ref}}{\Omega_v} \quad (4.28)$$

Le courant d'axe 'd' est régulé suivant une régulation du flux et le courant d'axe 'q' est régulé suivant la référence du couple électromagnétique.

On peut déterminer les références pour cette commande comme suite :

En inversant l'équation (4.15) on obtient la référence du courant quadratique et on écrit :

$$i_{sq-ref} = \frac{T_{em-MAS-ref} \cdot L_{r-MAS}}{p \cdot M \cdot \psi_{rd-ref}} \quad (4.29)$$

On estime la pulsation statorique par la relation suivante :

$$\omega = p\Omega_v + \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}} \cdot \frac{i_{sq-ref}}{\psi_{rd-ref}} \quad (5.30)$$

IL reste maintenant à déterminer les tensions de référence  $v_{sd-ref}$  et  $v_{sq-ref}$  à partir desquelles on détermine les signaux de commande appliqués au convertisseur.

A partir des équations (4.16) et (4.17) on écrit :

$$v_{sd\_ref} = E_{d\_ref} - \frac{M \cdot R_{r-MAS}}{L_{r-MAS}^2} \psi_{r\_ref} - \sigma L_{s-MAS} \omega_s i_{sd\_ref} \quad (4.31)$$

$$v_{sq\_ref} = E_{q\_ref} + \frac{M \cdot p \Omega_v}{L_{r-MAS}} \psi_{r\_ref} + \sigma L_{s-MAS} \omega_s i_{sd\_ref} \quad (4.32)$$

### IV.5.3. Le convertisseur

On adopte le modèle continu équivalent du convertisseur représenté dans le repère de Park pour des raisons de simplicité.

Nous définissons les tensions simples modulées par le convertisseur dans le repère de Park et appliquées au stator de la MAS par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{d-reg} \\ V_{q-reg} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Avec :

$V_{d-reg}$  et  $V_{q-reg}$  représentent les tensions de réglage du convertisseur dans le repère de Park.

$U$  représente la tension continue alimentant le convertisseur associé à la MAS.

Ainsi le courant modulé par le convertisseur est donné par :

$$I_{m-MAS} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_{d-reg} & V_{q-reg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Où :

$i_{sd}$  et  $i_{sq}$  sont les composantes directe et quadratique du courant statorique.

La commande du convertisseur associé à la MAS est déduite en inversant le système d'équation (4.23) et les tensions de réglage valent :

$$V_{d-reg} = \frac{2}{U} \cdot v_{sd-ref} \quad (4.35)$$

$$V_{q-reg} = \frac{2}{U} \cdot v_{sq-ref} \quad (4.36)$$

Avec :

$v_{sd-ref}$  et  $v_{sq-ref}$  représentent les composantes directe et quadratique des tensions de références issues de la commande vectorielle de la MAS.

La structure et le principe de la commande du système de stockage inertiel est résumé par la figure (4.4).

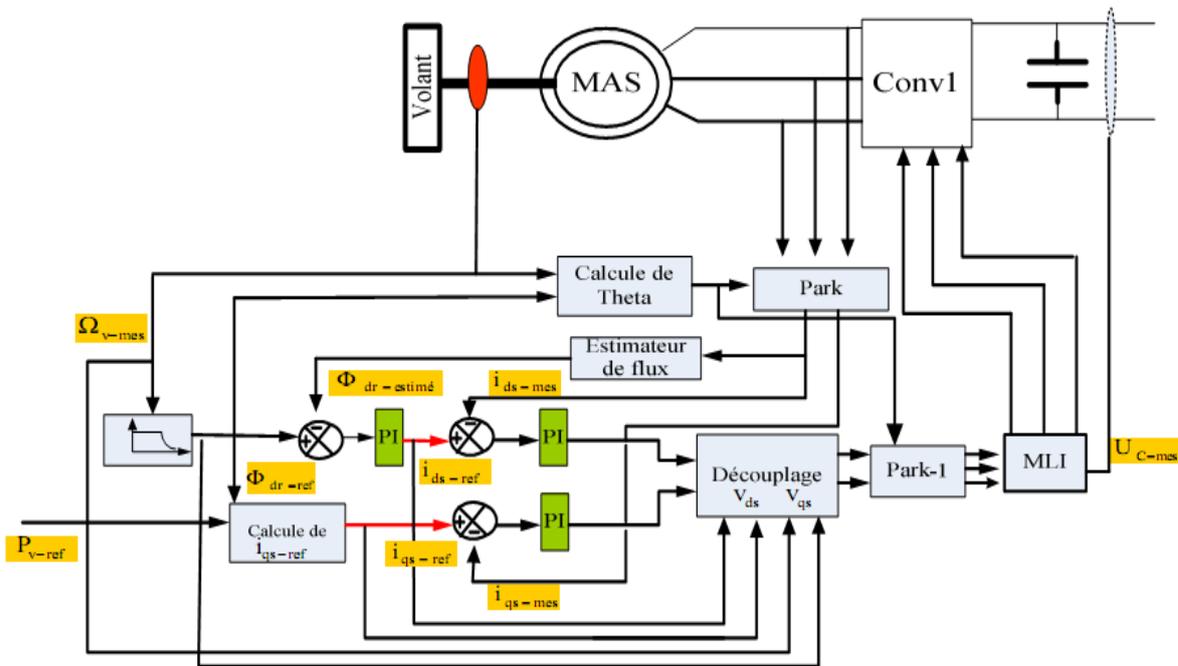


Fig.4.4.Schéma bloc de la commande du système de Stockage inertiel

#### IV.6. Intégration du système de stockage dans la chaîne de conversion éolienne

Comme on a déjà vu précédemment, le vent est une source intermittente ce qui rend la puissance fournie par le générateur éolien fluctuante alors que le réseau exige une puissance lissée pour des raisons de stabilité ; d'autre part, la consommation est difficile à prévoir ce qui pose le problème de déséquilibre entre la production et la consommation et c'est pour cela, les applications actuelles des éoliennes sont associées à des sources classiques d'énergie.

Les études qui ont été faites sur les SISE et dans le but de réguler la puissance débitée sur le réseau offre un meilleur contrôle de cette dernière ainsi leur dynamique élevée, leur rendement et leur longue période de vie, rend ces systèmes de stockage bien adaptés pour stocker l'énergie pendant des périodes courtes permettant l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique envoyée au réseau.[41]

IV.6.1. Structure du système étudié

Nous considérons le système inertiel de stockage d'énergie associé à la chaîne de conversion éolienne étudiée aux chapitres 2 et 3 dont la connexion du SISE est assurée par le biais du bus continu des convertisseurs électroniques de puissance comme le montre la fig.4.5 où on peut voir le schéma d'une éolienne à vitesse variable avec machine asynchrone doublement alimentée et équipée d'un SISE dans le but multiple d'extraire le maximum de puissance et la réguler avant de l'injecter au réseau.

Il est à noter aussi que pour ce cas, le SISE est chargé uniquement de réguler la puissance fournie par le générateur et qu'il n'intervient pas au réglage de tension du bus continu, c'est le 2<sup>ème</sup> convertisseur qui est chargé de faire. Cependant les mêmes principes de contrôle pour le SISE avec MAS étudiés auparavant sont appliqués maintenant pour le système global présenté à la figure 4.5.

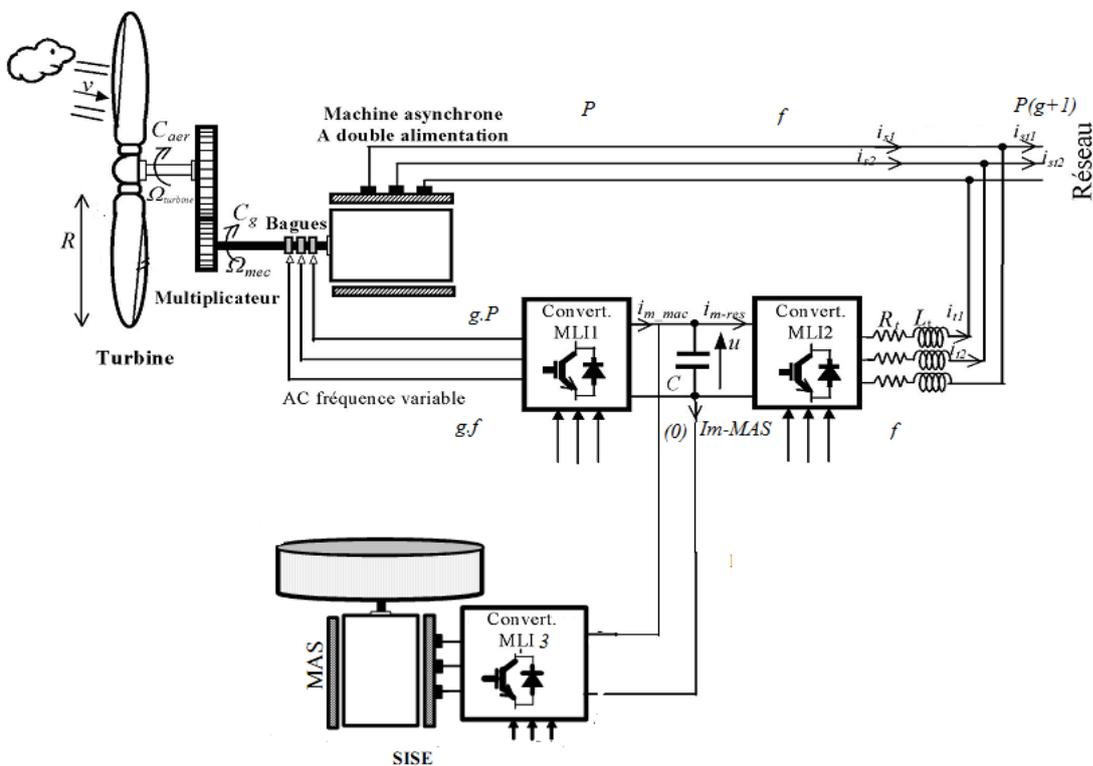


Fig. 4.5. Structure du système étudié

#### IV.6.2. Modèle du bus continu

Comme il est montré à la figure 4.6, Le couplage du générateur éolien au système de stockage est fait par l'intermédiaire d'un bus continu où sont connectés tous les bus continus des convertisseurs électroniques de puissance. Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur.

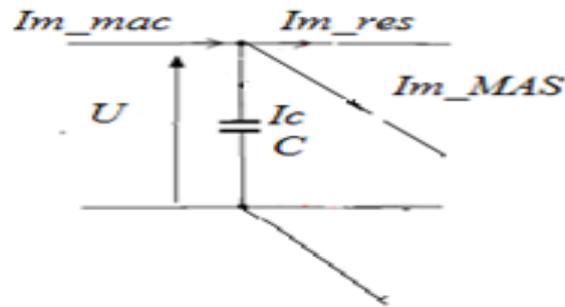


Fig. 4.6. Le bus continu

A partir de la figure 5.19 la loi des nœuds nous permet d'écrire :

$$I_c = I_{m-mac} - I_{m-res} - I_{m-MAS} \quad (4.37)$$

En intégrant le courant capacitif  $I_c$  on trouve la tension continue  $U$  par :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot I_c \quad (4.38)$$

On trouve :

$$U = \int \frac{dU}{dt} + U(t_0) \quad (4.39)$$

Avec :  $U(t_0)$  est la valeur initiale de la tension continue.

#### IV.6.3 Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien

La fonction principale du SISE est de lisser la puissance fournie par le générateur éolien qui peut causer plusieurs problèmes dans le réseau. Pour réduire au minimum les fluctuations de cette puissance, le SISE doit assurer la compensation des variations de la puissance de vent.

La puissance de référence du SISE est déterminée par la différence entre la puissance générée par le générateur éolienne et la puissance qu'il faut délivrer au réseau ou sur les charges isolées.

$$P_{v-ref} = P_{res-ref} - P_{eol} \tag{4.40}$$

Selon le principe illustré par la figure 4. 7.

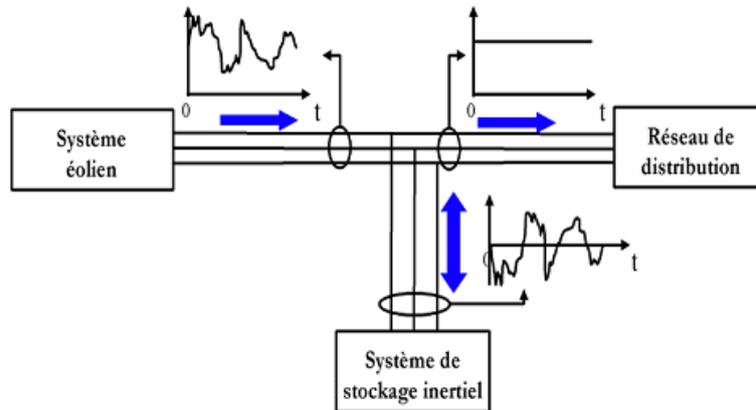


Fig.4.7. La puissance lisse par SISE

Le contrôle de la puissance de SISE à stocker de l'énergie en cas de surplus de puissance ( $P_{v-ref} > 0$ ) qui se traduit par un fonctionnement de la MAS en moteur ; et à restituer l'énergie en cas de déficit ( $P_{v-ref} < 0$ ) qui se traduit par le fonctionnement de la MAS en génératrice.

D'autre part cet aspect peut être expliqué en se basant sur le principe d'équilibre de puissance qui dit que toute réduction de la puissance transitée sur le réseau conduit à une augmentation de l'énergie stockée dans le condensateur et dans l'unité de stockage et inversement, toute augmentation de la puissance transitée sur le réseau conduit à une diminution de la puissance stockée.

Le modèle ainsi le dispositif de commande du système global étudié dans cette partie est représenté à la figure 4.8.

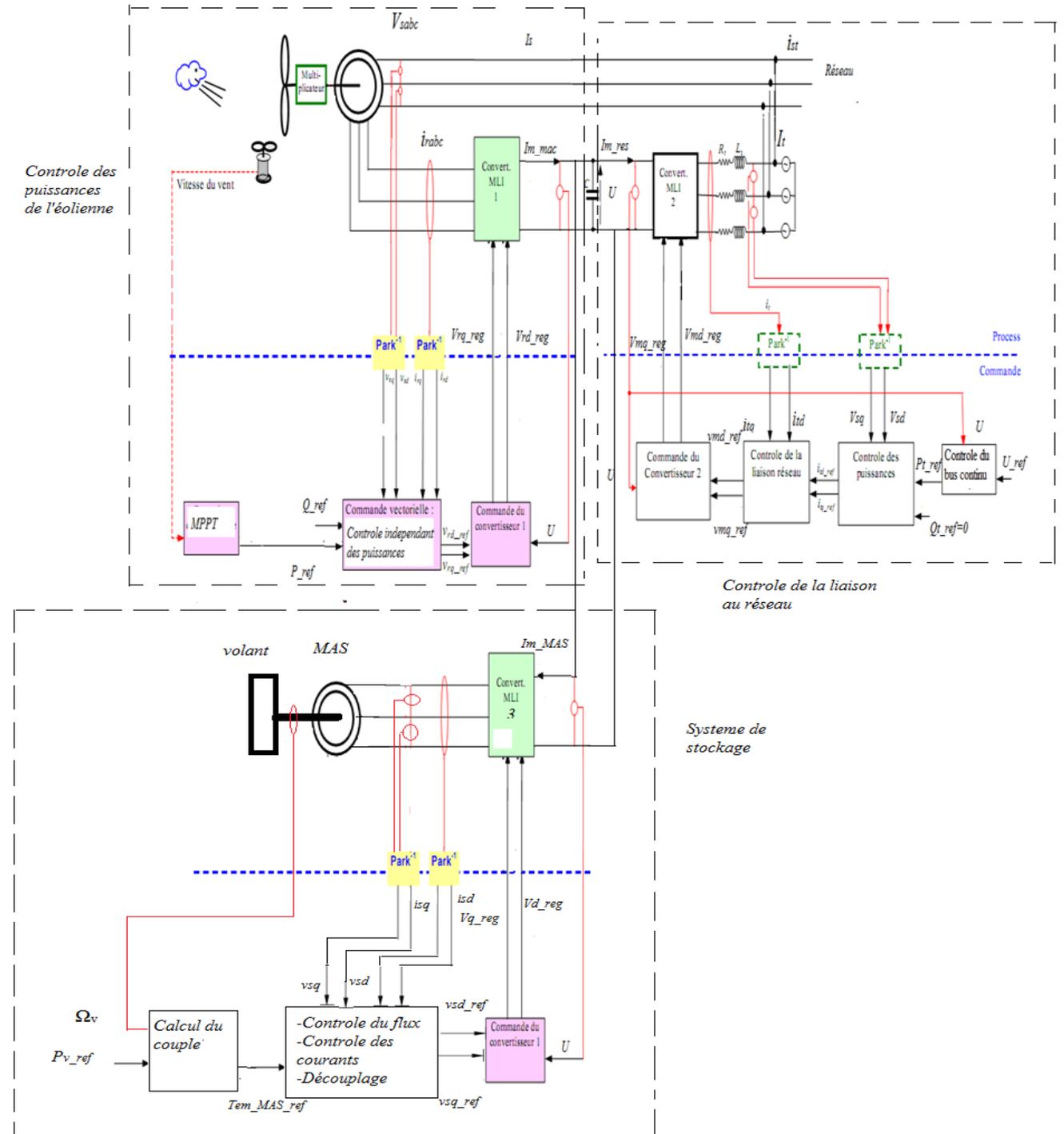


Fig. 4.8. Dispositif de commande du système global étudié

## IV.7. Simulations

Le système de la figure 4.8 a été implanté sous MATLAB Simulink où on a simulé la connexion au réseau d'une éolienne de 1.5MW associée à une unité de stockage inertiel.

### IV.7.1 Conditions de la simulation

Afin de montrer le comportement du système global considéré dans cette étude à différents modes de fonctionnement du générateur éolien, on a choisi un profil de vent permettant de prélever un glissement variant autour de  $\pm 0.1$ .

Les simulations ont été faites pour le cas où le réseau demande une puissance constante

( $P_{res-ref}$ ) de 1.5MW.

Le réglage du bus continu est assuré par le convertisseur(2) coté réseau.

Le SISE considéré est initialement chargé et maintenu dans la zone de fonctionnement à puissance constante (en limitant sa vitesse de rotation).

### IV.7.2. Résultats obtenus et interprétations

Les figures (4.9) et (4.10) représentent respectivement le glissement et la vitesse mécanique du générateur éolien sur les quelles on peut voir les différents modes de fonctionnement de la MADA afin d'analyser le comportement du système global comprenant l'unité de stockage.

La puissance active extraite du vent par la technique MPPT est représentée à la figure (4.11). La puissance de l'éolienne (fig4.12) varie entre des valeurs inférieures et supérieures à la puissance constante que le réseau doit recevoir ( $P_{res-ref}=1.5MW$ ) sur les différentes phases de fonctionnement de la MADA.

La puissance réactive est transitée au réseau à facteur de puissance unitaire ( $Q_{ref}=0$ ) ce qui est illustré à la figure (4.13). Du fait que le courant total renvoyé au réseau et la tension de ce dernier sont en opposition de phase, l'écoulement de la puissance vers le réseau se fait à puissance réactive nulle (figure 4.14).

Le contrôle de la liaison au réseau est montré par la régulation de tension continue (fig.4.15).

Afin de montrer le comportement du système de stockage, la tension et le courant de la MAS sont illustrés aux figures (4.18), (4.19).

On a dit que le SISE est initialement chargé ; le courant de la MAS en avance de phase par rapport à la tension (fig4.18), la puissance de référence ( $P_{v-ref}$ ) négative appliquée au SISE (fig4.20) ainsi la vitesse du volant qui tend à diminuer durant cette phase (fig4.21) montrent qu'on est demandé de couvrir le déficit de puissance de l'éolienne, c'est le mode de fonctionnement de la MAS en générateur donc restitution d'énergie correspondant au mode hypo-synchrone du générateur éolien (MADA).

Au fonctionnement hyper-synchrone de la MADA, l'excédent de puissance est remarqué, la vitesse du volant tend à augmenter graduellement et sa puissance change de signe, la MAS fonctionne en moteur caractérisant la phase de stockage et justifiant le retard de phase du courant par rapport à la tension (fig4.19).

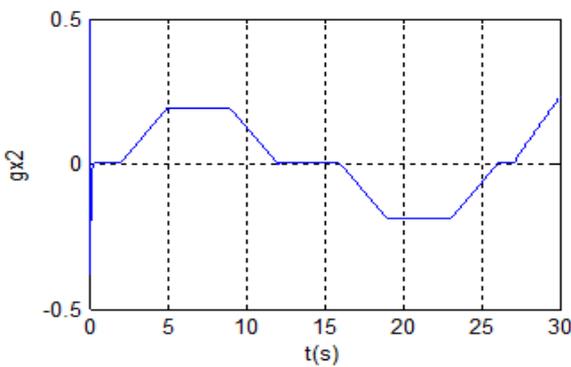


Fig.4.9. Glissement de la MADA

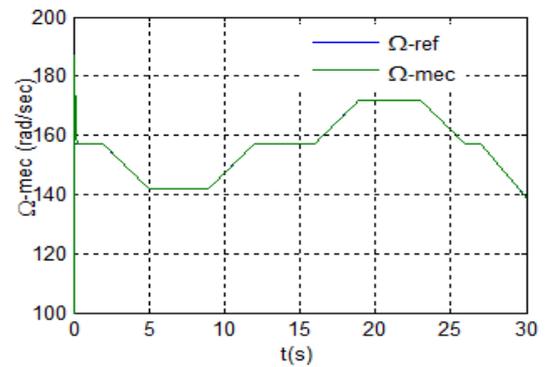


Fig.4.10. Vitesse mécanique de la MADA

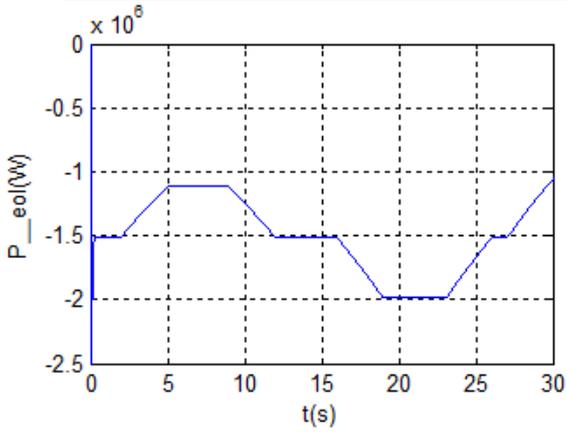


Fig.4.11. Puissance extraite du vent

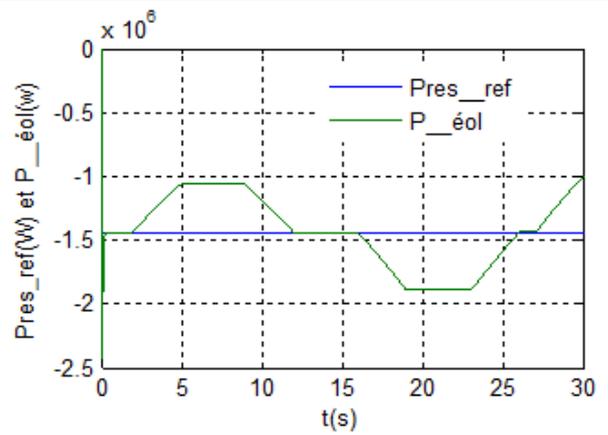


Fig.4.12. Puissance active de l'éolienne

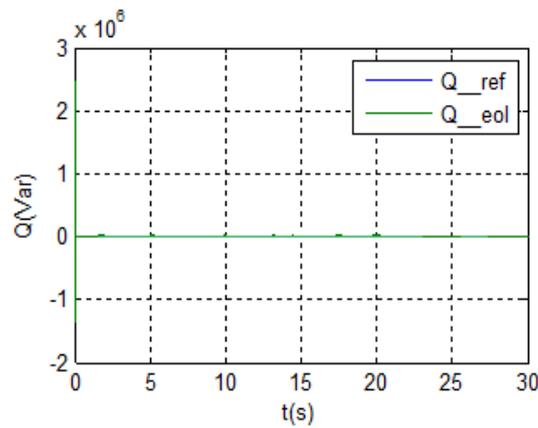


Fig.4.13. Puissance réactive renvoyée au réseau

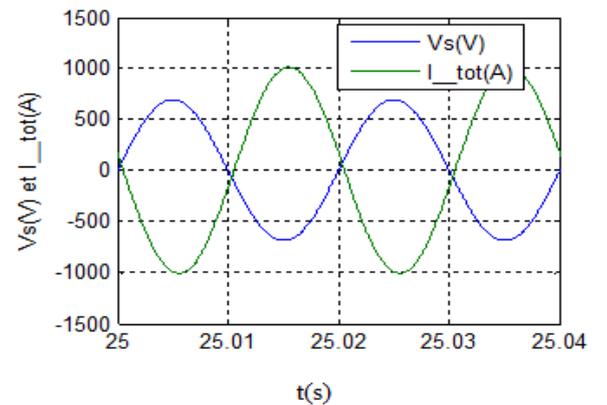
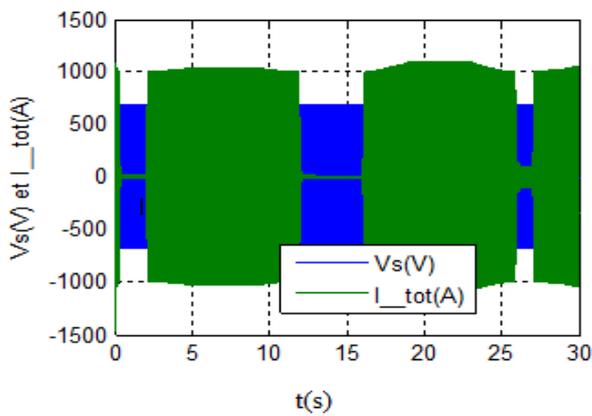


Fig.4.14. .tension d'alimentation statorique et courant total avec un zoom sur deux périodes

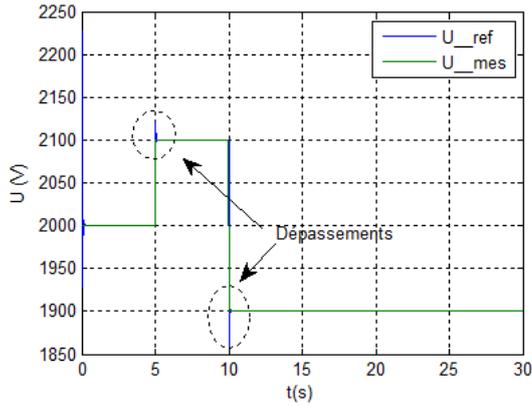


Fig.4.15 Tension du bus continu

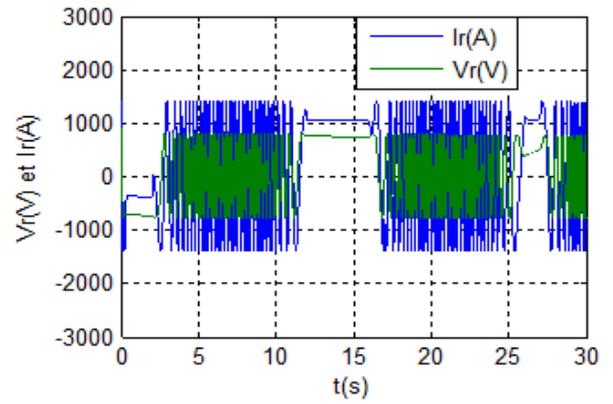


Fig.4.16 Tension et courant rotorique

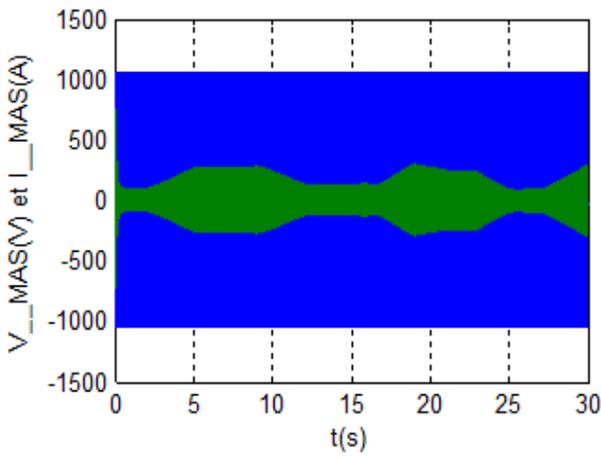


Fig4.17 Tension et courant de la MAS

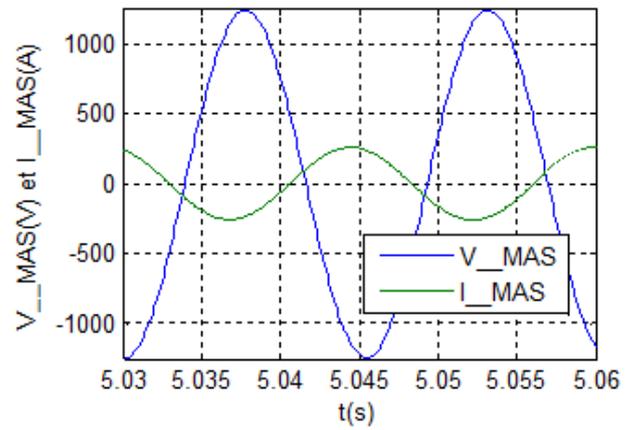


Fig4.18 Tension et courant de la MAS à  $g > 0$

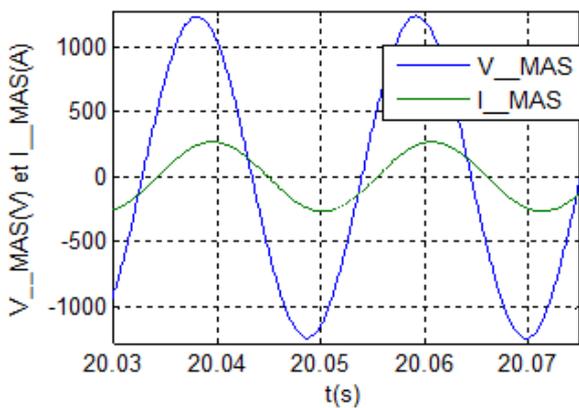


Fig4.19 Tension et courant de la MAS à  $g < 0$

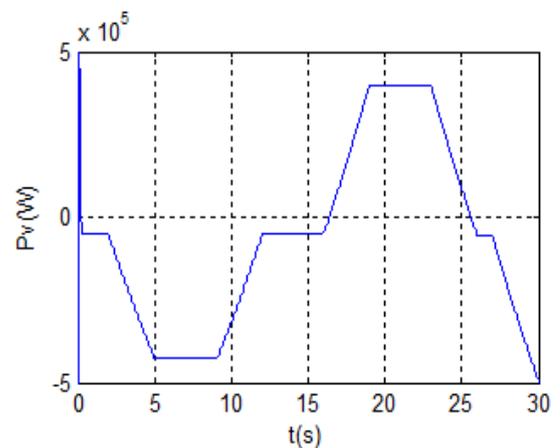


Fig4.20 Puissance absorbée ou débitée par la MAS

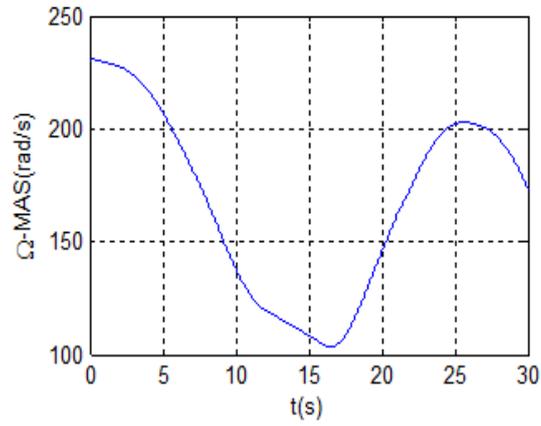


Fig.4.21 Vitesse du volant

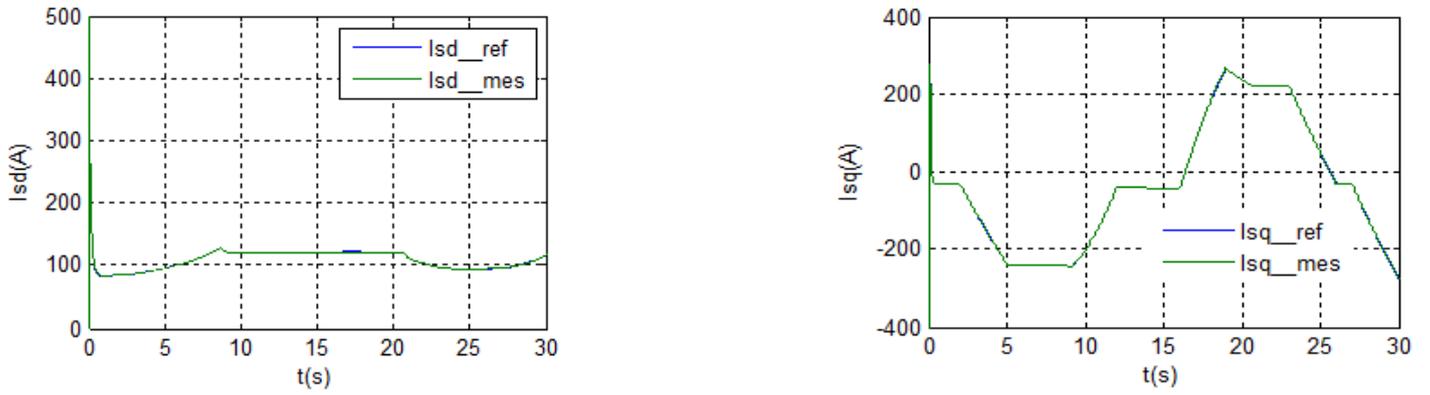


Fig.4.22. Régulation des courants direct et quadratique au stator de la MAS

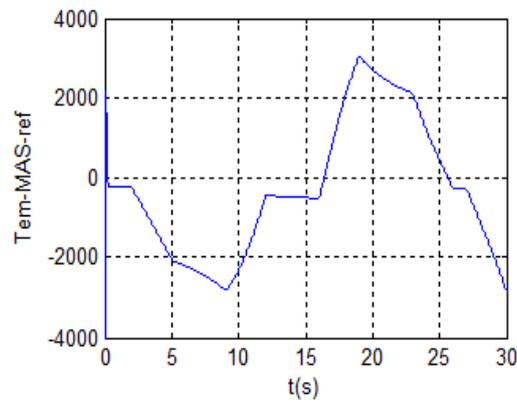


Fig5.23 Couple électromagnétique de la MAS

-La figure (4.22) illustre le courant direct et quadratique au stator de la MAS, ainsi le couple électromagnétique est présenté à la figure (4.23).

Au regard des figures il apparut que le courant direct est l'image du flux ainsi le courant quadratique est l'image du couple électromagnétique.

#### **IV.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, le modèle du système de stockage inertiel est étudié comprenant la machine asynchrone qui fait l'élément de base en tant qu'élément de conversion d'énergie, la volant d'inertie qui est la masse tournante dans la quelle l'énergie est stockée et le convertisseur électronique de puissance qui impose le sens de transit de la puissance.

On a présenté aussi les principes de contrôle du SISE ou on a envisagé le contrôle vectoriel de la MAS.

Pour valider ces modèles on a présenté des résultats de simulation.

Après validation du SISE seul, et par le biais du bus continu qui a été également modélisé, on a étudié l'association de l'élément de stockage à une éolienne afin de réguler la puissance débitée sur le réseau dont les résultats de simulation ont montré un comportement satisfaisant.