

IV.1. Introduction :

Les systèmes de stockage d'électricité peuvent se décomposer en deux grandes familles, les systèmes de stockage à long terme et les systèmes de stockage à court terme. L'électricité ne se stocke pas directement, mais elle peut se convertir en d'autres formes elles même stockables (potentielle, cinétique, chimique, magnétique ...). [65][66]

Dans les SISEs les machines les plus utilisées sont les machine asynchrone. En 1996, un SISE comportant une machine asynchrone à double alimentation de 20MW et un volant d'inertie de 74000kg et 4m de diamètre, a été installé en japon pour réguler la fréquence dans une ligne électrique à 132kv. Les premières applications des SISEs dans le domaine éolien ont considéré la machine asynchrone à cage et des volants d'inertie lents, La majorité des SISEs avec machine asynchrone sont des SISEs à volant lents. [3][67]

Dans ce chapitre on va étudier le système inertielle de stockage d'énergie noté SISE. Désigner un volant d'inertie entraînée par une machine asynchrone à cage. Cette dernière est pilotée par un convertisseur de puissance type onduleur, Le but de ce chapitre est de développer les stratégies de commande permettant d'extraire une puissance désirée en stockant ou restituant de l'énergie. Premièrement une modélisation du SISE (volant + machine asynchrone), ensuite deux méthodes de contrôle sont proposés pour la MAS (contrôle vectoriel indirect, commande par mode glissant et méthode de backstepping).

Enfin, des résultats de simulation seront présentés et commentés après illustration.

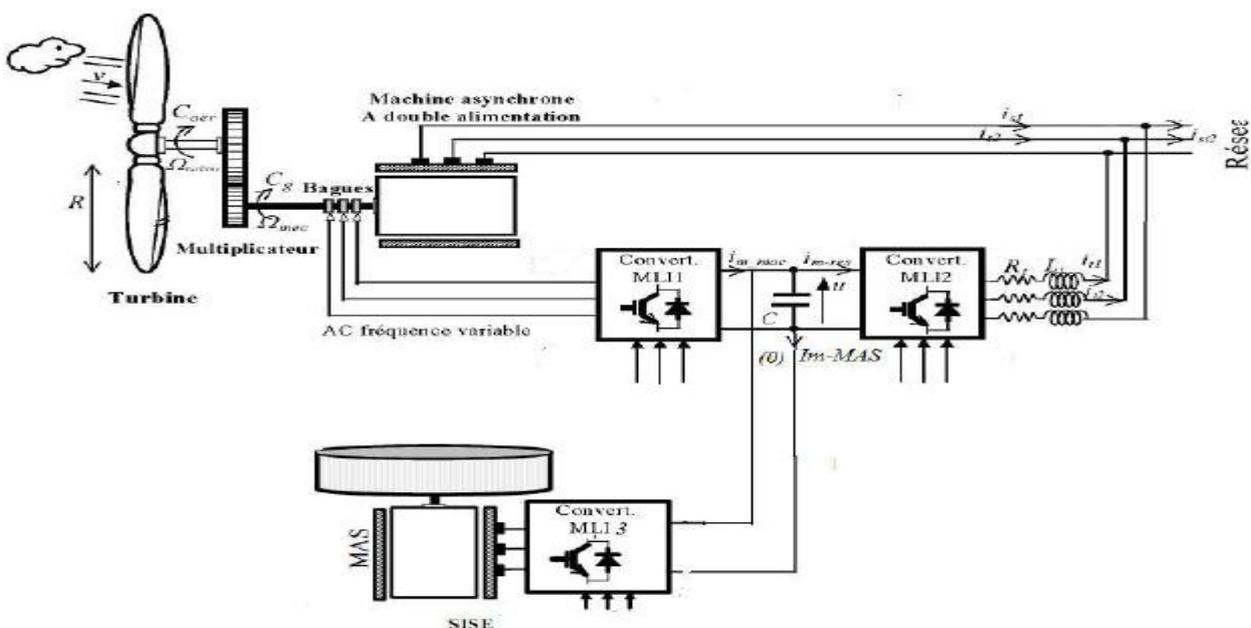


Figure IV-1 Eolienne à vitesse variable associé à du stockage en vue d'un fonctionnement sur réseau

## IV.2. Différents types de stockage :

Les systèmes de stockage ayant un horizon temporel d'une dizaine de minute à plusieurs années peuvent être considérés comme des stockages longs terme. Ainsi, les types de stockage peuvent aller des barrages hydrauliques jusqu'aux batteries chimiques. Les systèmes de stockage électrochimique (batteries) marquent la frontière entre le court et le long terme. Ils peuvent être considérés comme long ou court terme :

Il existe deux types de système de stockage [11][65]

### a- Stockage long terme :

- Stockage par système hydraulique.
- Stockage sous forme d'air comprimé (CAES, Compressed Air Energy Storage).
- Stockage sous forme chimique.
- Stockage sous forme d'hydrogène.
- Stockage sous forme thermique.

### b- Stockage à court terme :

- Volant d'inertie.
- Super capacité.
- Inductance supraconductrice (SMES Superconducting Magnet Energy Storage).

## IV.3. Le système de stockage inertielle :

Le SISE est composé d'un volant, qui est un dispositif symétrique tournant autour d'un axe de révolution, ayant le plus souvent une forme cylindrique, qui sert de stockage et de restitution de l'énergie sous forme cinétique (Figure IV-2). Cette idée de stockage a été observée par les artisans potiers de Mésopotamie, il y a environ 5500 ans, qui utilisaient des masses tournantes pour emmagasiner et restituer de l'énergie.

Les systèmes inertiels sont en grande évolution avec l'utilisation de machines rapides dont on peut les différencier selon la plage de vitesse et le matériau constituant le volant.

Effectivement le stockage qui s'effectuait classiquement dans de très lourds volants d'inertie sont accouplés à des machines classiques, s'effectue désormais à très grande vitesse avec des machines complexes comportant plusieurs rotors concentriques à des vitesses différentes.

D'habitude, les volants lents sont métalliques et les volants rapides comportent des matériaux composites.[14][66] [68].

### IV.3.1. Principe de fonctionnement :

Comme en partie indiquée précédemment, le SISE est composé d'un volant d'inertie, d'un moteur – générateur et d'un convertisseur d'électronique de puissance (Figure IV-2). Pendant la phase de charge de cette batterie électromécanique, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique grâce au convertisseur d'électronique de puissance et au moteur, qui accélère une masse tournante de moment d'inertie  $J$  (le volant d'inertie) en exerçant sur cette dernière un couple positif  $T$ . La vitesse du volant augmente avec un taux  $T/J$  jusqu'à atteindre la vitesse maximale. L'énergie mécanique est ainsi stockée sous forme cinétique dans le volant d'inertie. La vitesse du volant, image de l'état de charge du volant, peut être maintenue en fournissant au moteur l'énergie électrique nécessaire pour compenser les pertes mécaniques et électriques. Réversiblement, lors de la phase de décharge, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique par le biais du convertisseur d'électronique de puissance et du générateur, qui exercent un couple négatif  $-T$  au volant. Le volant est ainsi freiné à un taux  $-T/J$ . [66][68].

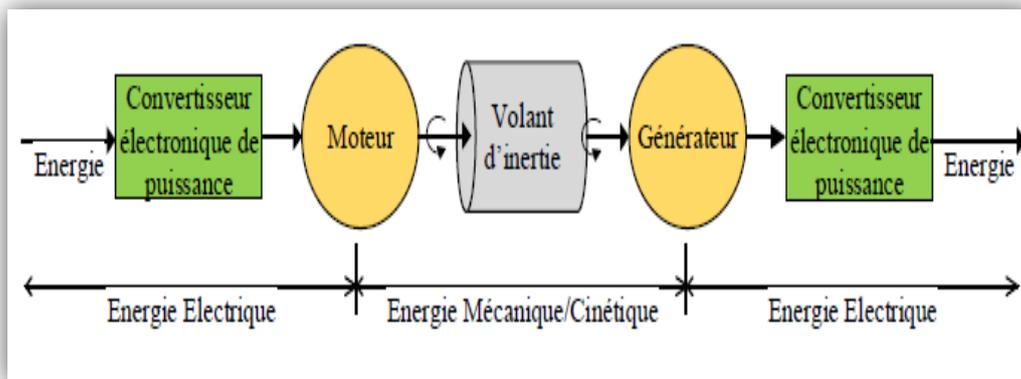


Figure IV-2 : Chaîne de conversion de l'énergie dans un SISE

### IV.3.2. Modélisation des principaux composants du SISE : [14][65][69]

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

- Le volant d'inertie,
- La machine asynchrone
- Le convertisseur de puissance (onduleur de tension).

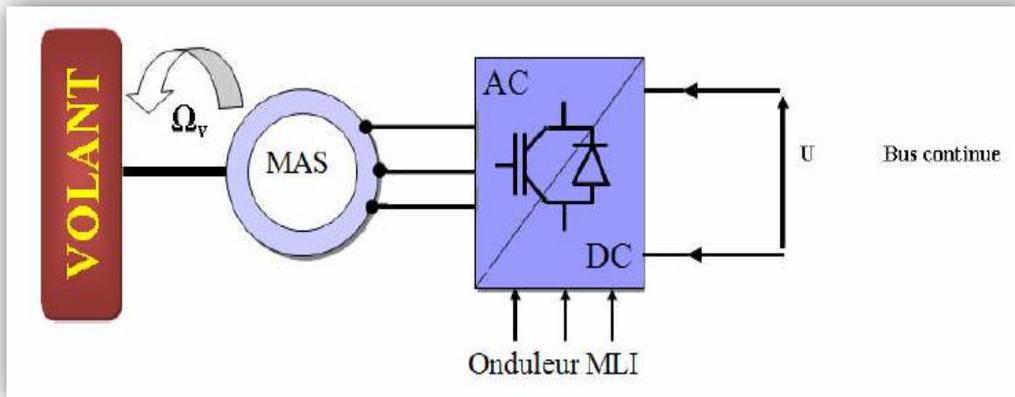


Figure IV-3 : Structure du système de stockage.

#### IV.3.2.a. Le volant d'inertie

Dans l'objectif de faire participer une éolienne à vitesse variable aux services systèmes, le stockage d'énergie de type inertielle est envisagée, un volant d'inertie couplé mécaniquement à une machine asynchrone et piloté par un convertisseur de puissance comme représenté à la Figure IV-3. [65]. L'énergie cinétique emmagasinée par le volant se détermine comme suit :

$$E_v = \frac{1}{2} J_v \Omega_v^2 \quad \text{IV.1}$$

Avec :

$E_v$  : L'énergie stockée (J).

$J_v$  : Moment d'inertie du volant exprimé en (kg.m<sup>2</sup>).

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

La valeur de l'inertie du volant en fonction de puissance à stocker et qui peut être restituée durant un temps voulu sera déterminée :

La relation qui lie la puissance à l'énergie est la suivant :

$$P_v = \frac{dE_v}{dt} \quad \text{IV.2}$$

Avec :

$P_v$  : Puissance maximale délivrable par le système de stockage (égale à la puissance nominale de la machine asynchrone) en [W].

$dE_v$  : Variation d'énergie stockée en [J].

$dt$  : Variation de temps pendant la charge ou la décharge pour la puissance maximale en [S].

Ensuite, la relation qui lie l'énergie, l'inertie et la vitesse angulaire est la suivant :

$$\frac{dE_v}{dt} = \frac{1}{2} J_v \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad \text{IV.3}$$

$\Omega_v$  : Vitesse angulaire du volant en [rad.s<sup>-1</sup>]

$J_v$  : Inertie du volant en [kg.m<sup>2</sup>]

En regroupant les deux équations on obtient la relation suivant :

$$P_v = \frac{1}{2} J_v \frac{d\Omega_v^2}{dt} \quad \text{IV.4}$$

Supposant qu'on a des petites variations l'équation (III.4) devient :

$$P_v = \frac{1}{2} J_v \frac{\Delta\Omega_v^2}{\Delta t} \quad \text{IV.5}$$

$\Delta\Omega_v$  : Petite variation de vitesse angulaire autour d'un point de fonctionnement.

$\Delta t$  : Petite variation de temps.

De (IV.5) l'inertie vaut :

$$P_v \Delta t = \frac{1}{2} J_v \Delta\Omega_v^2 \quad \text{IV.6}$$

$$J_v = \frac{2P_v \Delta t}{\Delta\Omega_v^2} \quad \text{IV.7}$$

$$\text{Où:} \quad \Delta\Omega_v^2 = \Omega_{vmax}^2 - \Omega_{vmin}^2 \quad \text{IV.8}$$

Remplaçant (IV.8) dans (IV.7) l'inertie vaut :

$$J_v = \frac{2P_v \Delta t}{(\Omega_{vmax}^2 - \Omega_{vmin}^2)} \quad \text{IV.9}$$

$\Omega_{vmax}$  : vitesse angulaire maximale du volant (égale à la survitesse maximale de la machine asynchrone) ;

$\Omega_{vmin}$  : vitesse angulaire minimale du volant.

La transmission mécanique :

$$J_v \frac{d\Omega_v}{dt} + f_v \Omega_v = C_{em} \quad \text{IV.10}$$

$J_v$  : Inertie du volant et de la machine asynchrone [kg.m<sup>2</sup>]

$f_v$  : Coefficient de frottement visqueux [Nm/rad.s<sup>-1</sup>]

$\Omega_v$  : Vitesse angulaire du volant d'inertie [rad.s<sup>-1</sup>]

$C_{em}$  : Couple électromagnétique de la machine asynchrone [Nm]

### IV.3.2.b. Modélisation de la machine asynchrone : [65][70][71]

La machine asynchrone est constituée essentiellement de deux armatures :

- ❖ Une armature fixe appelée stator, porte dans ses encoches régulièrement réparties sur sa face interne trois enroulements identiques à paires de pôles dont leurs axes sont décalés entre eux d'un angle électrique de  $2\pi/3$ .
- ❖ Une armature mobile autour de l'axe de symétrie de la machine appelé rotor. On distingue deux types :
  - 1- Un type dont le circuit électrique est identique à celui du stator ; c'est la machine à rotor bobiné.
  - 2- Un second type dont le circuit électrique est formé d'un certain nombre de barres, une par encoche, reliées entre elles à chaque extrémité du rotor par des anneaux ; c'est la machine à rotor à cage d'écureuil. [70].

#### b.1. Représentation d'état du modèle de la machine asynchrone :

Une machine asynchrone alimentée en tension, a comme variable de commande, les tensions statorique  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  et comme perturbation le couple résistant  $C_r$ .

Elle peut être décrite par plusieurs variables d'état. Notre étude sera limitée à un seul cas représenté par les courants statoriques et les flux rotoriques ( $I_{sd}, I_{sq}, \varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ ). [71]

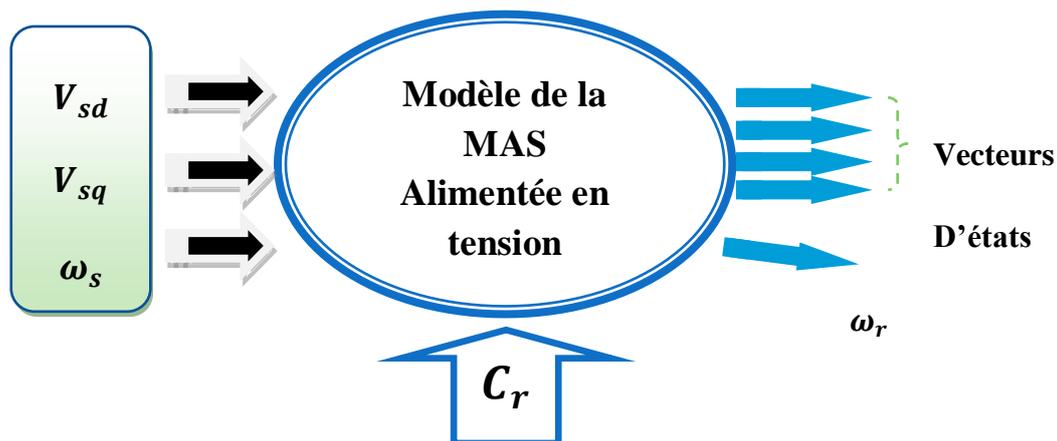


Figure IV-4 : Schéma bloc de la machine asynchrone triphasée alimentée en tension

Le modèle mathématique est sous la forme :

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad \text{IV-11}$$

Où :

$[X]$  : Vecteur d'état,  $X = [I_{sd}, I_{sq}, \varphi_{sd}, \varphi_{sq}]^t$

$[U]$ : Vecteur de commande,  $U = [V_{sd}, V_{sq}, 0, 0]^t$

$[A], [B]$  : Matrices liées au contrôle du flux.

Le modèle de la MAS sous forme d'équations d'état dans un référentiel lié au champ tournant peut s'écrire comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ - \left( R_s + \frac{M^2 R_r}{L_r^2} \right) I_{sd} + \omega_s \sigma L_s I_{sq} + \frac{M}{T_r L_r} \varphi_{rd} + \omega_r \frac{M}{L_r} \varphi_{rq} + V_{sd} \right] \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[ - \left( R_s + \frac{M^2 R_r}{L_r^2} \right) I_{sq} + \omega_s \sigma L_s I_{sd} + \frac{M}{T_r L_r} \varphi_{rq} - \omega_r \frac{M}{L_r} \varphi_{rd} + V_{sq} \right] \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + \omega_s \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = \frac{M}{T_r} I_{sq} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rq} + \omega_s \varphi_{rd} \\ C_{em} = \frac{pM}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq} - \varphi_{rq} I_{sd}) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} C_{em} - \frac{C_r}{J} - \frac{F}{J} \Omega_r \end{array} \right. \quad \text{IV.12}$$

Avec :  $R_{sr} = R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r$

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

### IV.3.2.c. Modélisation du convertisseur électronique de puissance :

Les machines électriques sont alimentées par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques de puissance, (L'onduleur de tension avec onde porteuse) est utilisé pour le control vectoriel de la machine asynchrone utilisé dans le SISE commandé en tension par la stratégie MLI. Cette commande MLI présente l'avantage d'une fréquence constante, qui est fixé par fréquence de l'onde porteuse. [3][67]

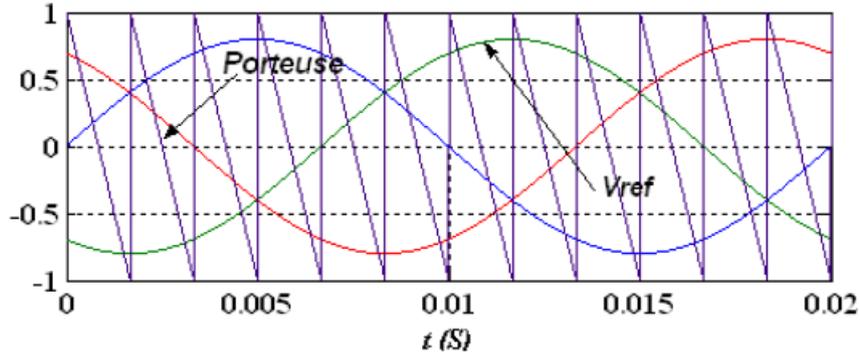


Figure IV-5 : Modèle continu équivalent du convertisseur

On peut écrire la relation suivante entre les composantes utiles des tensions polaires et les signaux de références. :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{aref} \\ V_{bref} \\ V_{cref} \end{bmatrix} \tag{IV-13}$$

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 :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{2} \begin{bmatrix} V_{d-ref} \\ V_{q-ref} \end{bmatrix} \tag{IV-14}$$

**c.1. Modélisation du bus continu :**

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. La figure IV-6 est présentée le modèle mathématique de ce circuit en détail et le bus continu à courant continu, et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur C où sont connectés tous les convertisseurs (CCM, CCR et l'onduleur du SESI). Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit, par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur. [3] [14]

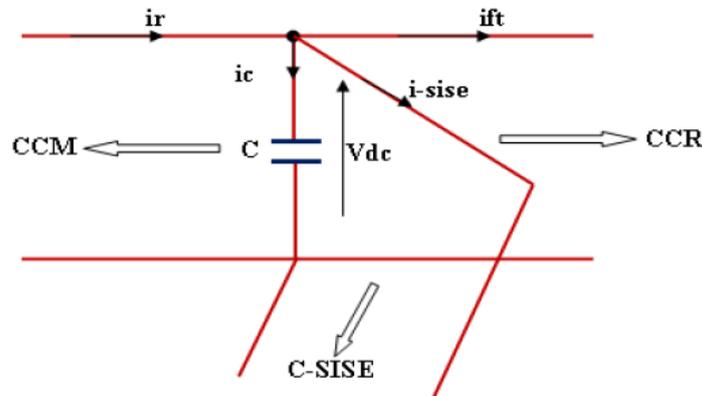


Figure IV-6 : Modèle de bus continu

Les sens des courants ont été considérés pour le cas où seulement le générateur éolien fournit de l'énergie dans le bus à courant continu. C'est-à-dire que la charge n'a pas besoin de toute l'énergie fournie par le système de conversion d'énergie éolienne et c'est le SISE qui prend le surplus d'énergie produite. Les courants dans le bus à courant continu agissent directement sur la valeur de la tension du bus continu,  $V_{dc}$  [67]. A partir de la figure IV-6 on peut écrire l'équation suivante :

$$i_c = i_r - i_{sise} - i_{ft} \quad \text{IV-15}$$

La tension  $V_{dc}$  est une fonction du courant  $i_c$

$$i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad \text{IV-16}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = i_c \frac{1}{C} \quad \text{IV-17}$$

On trouve :

$$V_{dc} = V(t_0) + \int i_c \frac{1}{C} dt \quad \text{IV-18}$$

### c.2. Principe de contrôle du SISE associé au générateur éolien :

On peut déterminer la puissance de référence à appliquer au SISE conformément l'expression suivante :

$$P_{ref} = P_{res-ref} - P_{éol} \quad \text{IV-19}$$

$P_{ref}$  : La puissance de référence pour le SISE

$P_{res-ref}$  : La puissance qu'il faut délivrer au réseau ou sur les charges isolées

$P_{éol}$  : La puissance générée par le générateur éolien

### IV.3.3. Control de la machine asynchrone utilisée pour SISE

L'objectif de ce type de contrôle est d'aboutir à un modèle simple de la machine asynchrone susceptible d'assurer le contrôle séparé de la grandeur flux et de la grandeur courant générateur du couple électromagnétique (comme une machine à courant continu à excitation séparée). [65]

#### IV.3.3.a. Théorie du contrôle par flux orienté

Dans le modèle biphasé de la machine asynchrone, nous choisissons un référentiel lié au champ tournant de telle sorte que l'axe dde ce référentiel coïncide avec la direction désirée du flux : statorique, rotorique ou d'entrefer comme l'indique la figureIV-7. La position du référentiel est choisie afin d'annuler la composante d'axe q pour le flux rotorique,[65]

La position du référentiel est obtenue afin d'annuler la composante quadratique du fluxrotorique donc faire coïncider le vecteur flux rotorique avec l'axe 'd' du repère de Park.[14]

C'est-à-dire :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = 0 \end{cases} \quad \text{IV-20}$$

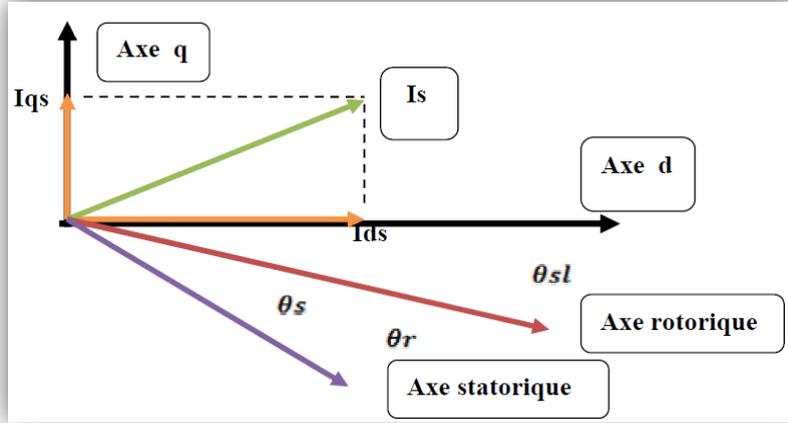


Figure IV-7: Principe d'orientation du flux.

Le système d'équationIV-12 devient :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dI_{sd}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} \left[ - \left( R_s + \frac{M^2 R_r}{L_r^2} \right) I_{sd} + \omega_s \sigma L_s I_{sq} + \frac{M}{T_r L_r} \varphi_r + V_{sd} \right] \\ \frac{dI_{sq}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} \left[ - \left( R_s + \frac{M^2 R_r}{L_r^2} \right) I_{sq} - \omega_s \sigma L_s I_{sd} - \omega_r \frac{M}{L_r} \varphi_r + V_{sq} \right] \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} &= \frac{M}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_r \\ C_{em} &= \frac{pM}{L_r} (\varphi_{rd} I_{sq}) \\ \frac{d\Omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} C_{em} - \frac{C_r}{J} - \frac{F}{J} \Omega_r \end{aligned} \right. \quad \text{IV-21}$$

Et en posant les deux tensions  $E_d$  et  $E_q$  telle que :

$$E_d = V_{sd} + \frac{M R_r}{L_r^2} \varphi_{rd} + \sigma L_s \omega I_{sq} \quad \text{IV-22}$$

$$E_q = V_{sq} - \frac{M \cdot p \Omega_r}{L_r} \varphi_{rd} - \sigma L_s \omega I_{sd} \quad \text{IV-23}$$

D'après les équations IV-22 et IV-23

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\varphi_{rd}}{dt} &= \frac{R_r}{L_r} \varphi_{rd} + \frac{M \cdot R_r}{L_r} I_{sd} \\ \frac{dI_{sd}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} (E_d - R_{sr} I_{sd}) \\ \frac{dI_{sq}}{dt} &= \frac{1}{\sigma L_s} (E_q - R_{sr} I_{sq}) \end{aligned} \right. \quad \text{IV-24}$$

Les tensions de référence  $E_{d-ref}$  et  $E_{q-ref}$  deviennent :

$$E_{d-ref} = Reg(I_{sd-ref} - I_{sd}) \tag{IV-25}$$

$$E_{q-ref} = Reg(I_{sq-ref} - I_{sq}) \tag{IV-26}$$

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 ». Le flux de référence est déterminé à partir de la loi de défluxage de la MAS. Lors des tests en variation sur la vitesse on a donc utilisé le bloc de défluxage qui donne un flux constant pour des vitesses inférieures à la vitesse nominale, et décroît pour les vitesses supérieures à cette vitesse. La fonction de défluxage qui impose le consigne de flux  $\phi_r$  suit le profil de la figure IV-8

$$\phi_{r-ref}(\Omega_v) = \begin{cases} \phi_{rn} & \text{si } |\Omega_v| \leq \Omega_{vn} \\ \phi_{rn} \cdot \frac{\Omega_{vn}}{|\Omega_v|} & \text{si } |\Omega_v| > \Omega_{vn} \end{cases} \tag{IV-27}$$

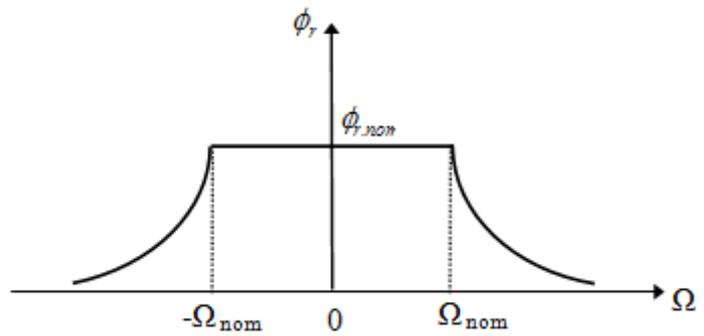


Figure IV-8 : Profil de flux rotorique du défluxage

$\Omega_{vn}$  : la vitesse nominale de la MAS (rad/s).

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

$$\phi_{rn} = \frac{L_r}{M} \cdot \phi_{sn} \tag{IV-28}$$

Où :

$$\phi_{sn} = \sqrt{3} \frac{V_s}{\omega_s} \tag{IV-29}$$

Avec :

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

$V_s$  : La valeur efficace de la tension simple statorique (V).

$\omega_s$  : La pulsation du réseau égale à 314.16 rad/s.

A partir des équations (IV-22) et (IV-23) Les tensions statoriques de référence dans le référentiel dq sont les suivants :

$$\begin{cases} V_{sd-ref} = E_{d-ref} - \frac{MR_r}{L_r} \varphi_{r-ref} - \sigma L_s \omega I_{sq-ref} \\ V_{sq-ref} = E_{q-ref} + \frac{M.p\Omega_v}{L_r} \varphi_{r-ref} + \sigma L_s \omega I_{sd-ref} \end{cases} \quad \text{IV-30}$$

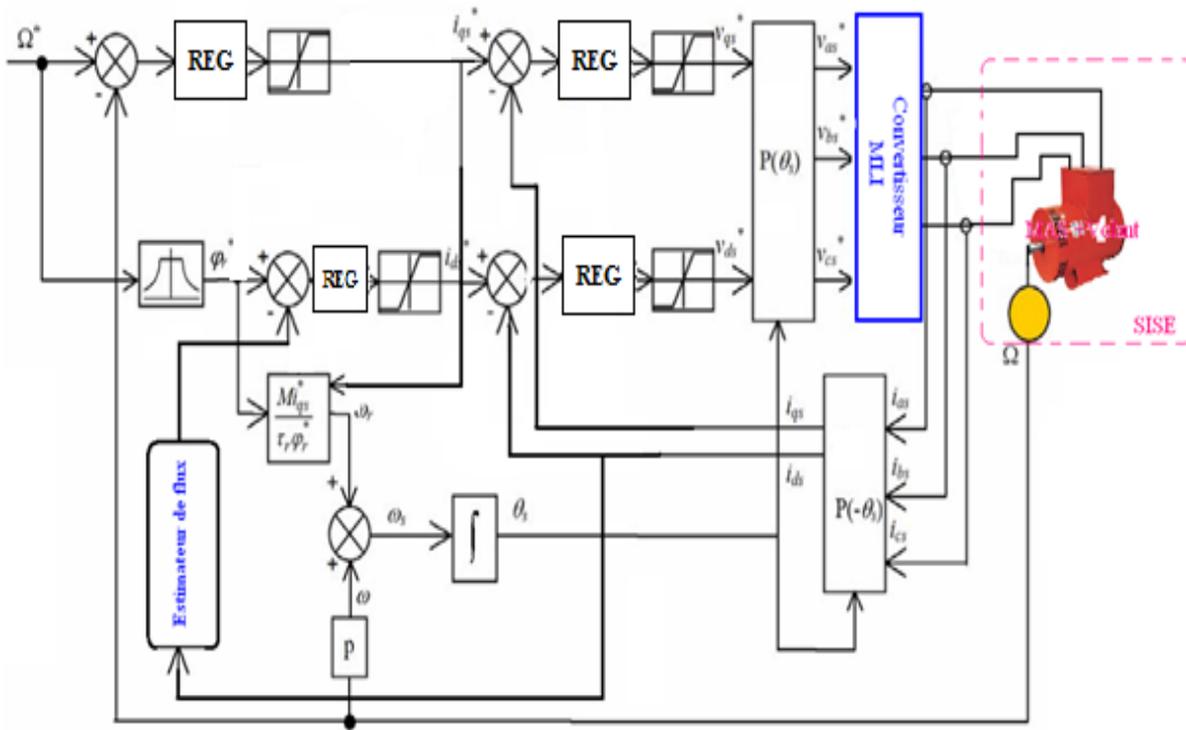
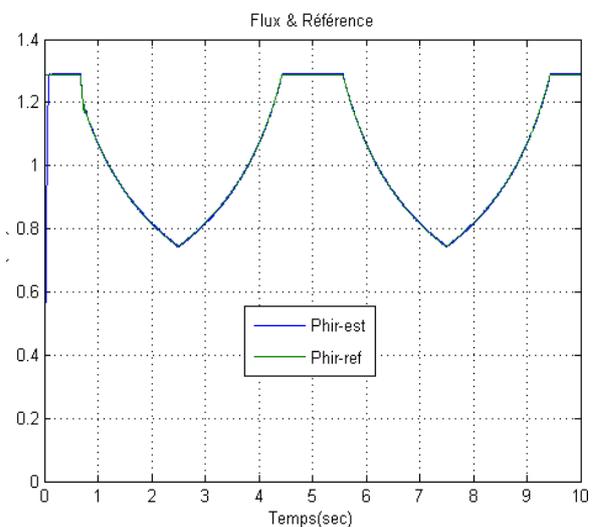
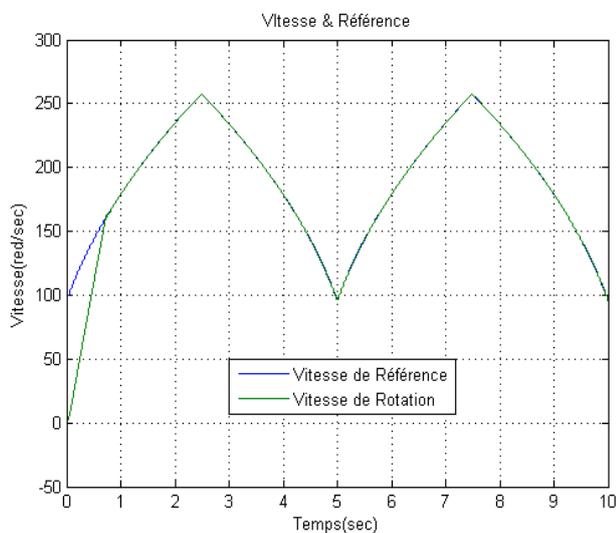


Figure IV-9 : Schéma bloc de la commande vectorielle du SISE

a.1. Résultat de Simulation :



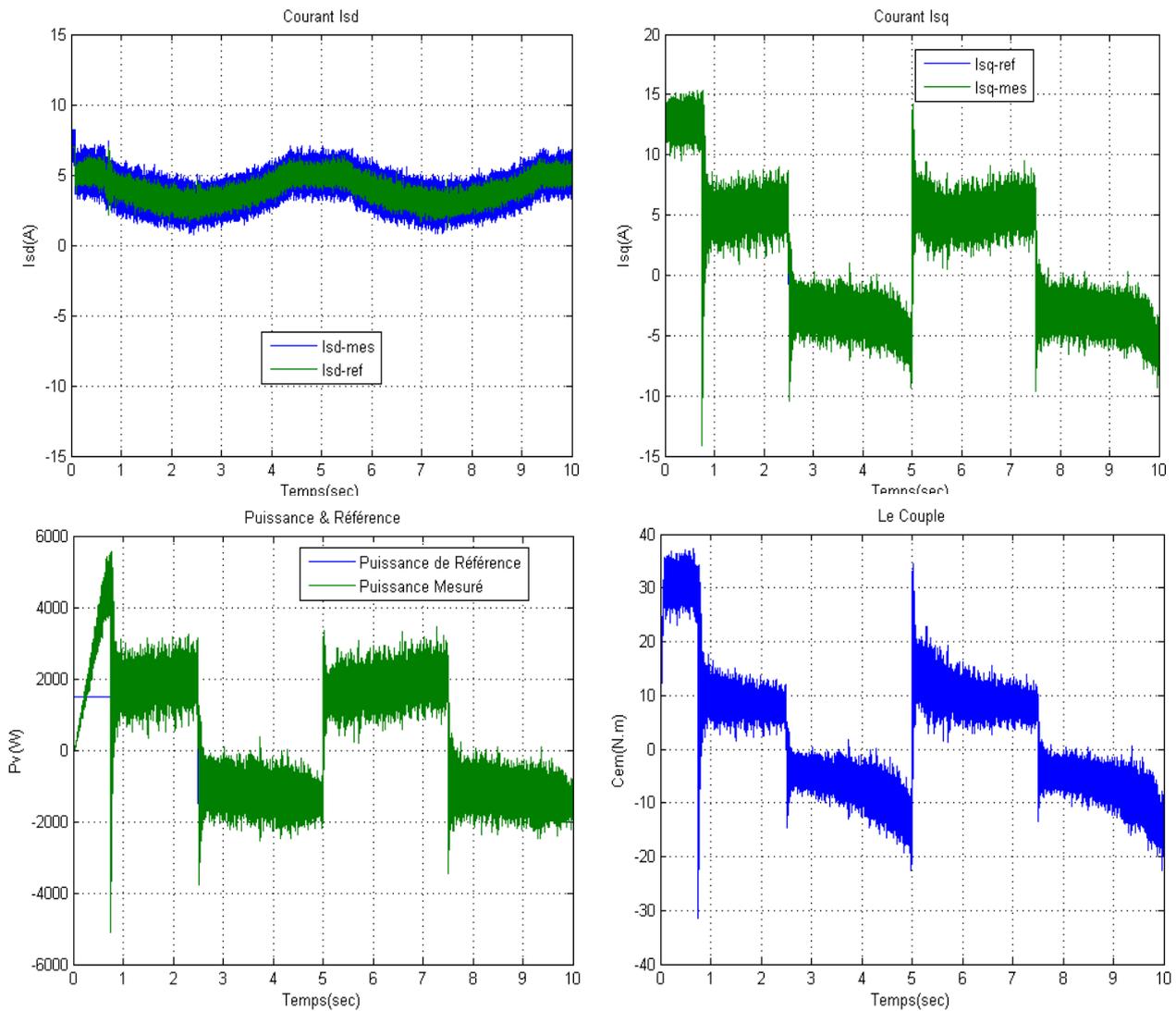


Figure IV-10 : Résultats du contrôle vectoriel du SISE

## a.2. Interprétations des résultats :

La figure IV-10 montre le comportement d'une MAS avec le contrôle vectoriel.

Nous constatons bien que la vitesse suit parfaitement sa référence. D'autre part on voit bien sur les deux courants ( $I_{sd}$  et  $I_{sq}$ ) et le flux suivant leur référence avec précision.

On remarque aussi que le courant direct  $I_{sd}$  a la même forme que celle du flux, la courante quadrature  $I_{sq}$  possède de la même allure que celle du couple électromagnétique.

Alors les courants ( $I_{sd}$  et  $I_{sq}$ ) sont respectivement producteurs de flux et producteur de couple.

#### IV.3.4. Commande par Backstepping basée sur le principe du command vectoriel :

La technique du backstepping est une méthode de command relativement récente des systèmes non linéaire. Elle permet de manière séquentielle et systématique, par le choix d'une fonction de lyapunov, de loi de commande du système.

##### IV.3.4.a. Application du backstepping a la MAS :

La technique de commande par Backstepping est une méthode de système non linéaire quand il est difficile d'appliquer la méthode directe de lyapunov.

##### IV.3.4.b. Les étapes de l'application du backstepping :

Cette application est divisée en deux étapes

###### ➤ Etape 1 :

###### - Contrôle du flux et de la vitesse :

Nous définissons les erreurs  $e_1$  et  $e_2$  qui représentent respectivement l'erreur entre le module du flux rotorique  $\varphi_d$  et celui de référence  $\varphi_{d-ref}$

Ainsi que l'erreur entre la vitesse réelle  $\omega_r$  et la vitesse de référence  $\omega_{r-ref}$

$$\begin{cases} e_1 = \varphi_{d-ref} - \varphi_d \\ e_2 = \omega_{r-ref} - \omega_r \end{cases} \quad \text{IV-31}$$

La dérivée des deux erreurs est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{\varphi}_{d-ref} - \frac{M_{sr}R_r}{L_r} I_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_d \\ \dot{e}_2 = \dot{\omega}_{r-ref} - \frac{pM_{sr}}{L_r} I_{sq} \varphi_d + \frac{f}{j} \omega_r + \frac{p}{j} T_r \end{cases} \quad \text{IV-32}$$

La première fonction de lyapunov est défini par

$$V_1 = \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2) \quad \text{IV-33}$$

La dérivée de cette fonction est donnée par

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad \text{IV-34}$$

$$\dot{V}_1 = e_1 \left( \dot{\omega}_{r-ref} - \frac{pM_{sr}}{L_r} I_{sq} \varphi_d + \frac{f}{j} \omega_r + \frac{p}{j} T_r \right) + e_2 \left( \dot{\varphi}_{d-ref} - \frac{M_{sr}R_r}{L_r} I_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_d \right) \quad \text{IV-35}$$

On choisit comme command pour ce première sous système pour que la dérivée de la fonction de lyapunov choisie soit défini négative.

$$\begin{cases} I_{sd}^* = \frac{T_r}{M_{sr}} \left( \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + \varphi_{rd}^* + K_1 e_1 \right) \\ I_{sq}^* = \frac{JL_r}{P^2 M_{sr} \varphi_{rd}} \left( \frac{f}{J} \omega_r + \omega_r^* + \frac{P}{J} C_r + K_2 e_2 \right) \end{cases} \quad \text{IV-36}$$

$K_1$  et  $K_2$  sont des constantes positives.

Avec cette structure de commande calculée on assure que le premier sous système soit asymptotiquement stable.

➤ **Etape2 :**

- **Contrôle de courant :**

Dans cette étape, nous définissons deux nouvelles erreurs  $e_d$  et  $e_q$  qui représentent les erreurs sur les composants du courant statorique, puis nous calculons la loi de commande pour le deuxième sous système pour assurer la convergence asymptotiquement vers les deux références.

Donc :

$$\begin{cases} e_d = I_{sd-ref} - I_{sd} \\ e_q = I_{sq-ref} - I_{sq} \end{cases} \quad \text{IV-37}$$

La dérivée des deux erreurs est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{e}_d = \dot{I}_{sd-ref} - L_s \sigma \left( I_{sd-ref} + \left( \frac{R_s}{L_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{sd} - \omega_s I_{sq} - \left( \frac{1-\sigma}{T_r L_m \sigma} \right) \varphi_d - \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \right) \\ \dot{e}_q = \dot{I}_{sq-ref} + \left( \frac{R_s}{L_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{sq} - \omega_s I_{sd} - \left( \frac{1-\sigma}{T_r L_m \sigma} \right) \varphi_d \omega_r - \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \end{cases} \quad \text{IV-38}$$

De même on a la deuxième fonction de Lyapunov est donnée par :

$$V_2 = \frac{1}{2} (e_d^2 + e_q^2) \quad \text{IV-39}$$

La dérivée de cette fonction est donnée par

$$\dot{V}_2 = e_d \dot{e}_d + e_q \dot{e}_q \quad \text{IV-40}$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = e_d \left( \dot{I}_{sd-ref} - L_s \sigma \left( I_{sd-ref} + \left( \frac{R_s}{L_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{sd} - \omega_s I_{sq} - \left( \frac{1-\sigma}{T_r L_m \sigma} \right) \varphi_d - \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \right) \right) + \\ e_q \left( \dot{I}_{sq-ref} + \left( \frac{R_s}{L_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{sq} - \omega_s I_{sd} - \left( \frac{1-\sigma}{T_r L_m \sigma} \right) \varphi_d \omega_r - \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \right) \end{aligned} \quad \text{IV-41}$$

On choisie comme command calculée on assure que le deuxième sous système soit asymptotiquement stable et par conséquent, le système entier soit asymptotiquement stable aussi.

$$\begin{cases} V_{sd}^* = L_s \sigma \left( \dot{I}_{sd-ref} + \left( \frac{R_s}{L_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{sd} - \omega_s I_{sq} - \left( \frac{1-\sigma}{T_r M_{sr}} \right) \varphi_d + K_3 e_d \right) \\ V_{sq}^* = L_s \sigma \left( \dot{I}_{sq-ref} + \left( \frac{R_s}{L_s \sigma} + \frac{1-\sigma}{T_r \sigma} \right) I_{sq} - \omega_s I_{sd} - \left( \frac{1-\sigma}{\sigma M_{sr}} \right) \omega_r \varphi_d + K_4 e_q \right) \end{cases} \quad \text{IV-42}$$

b.1. Résultat de simulation :

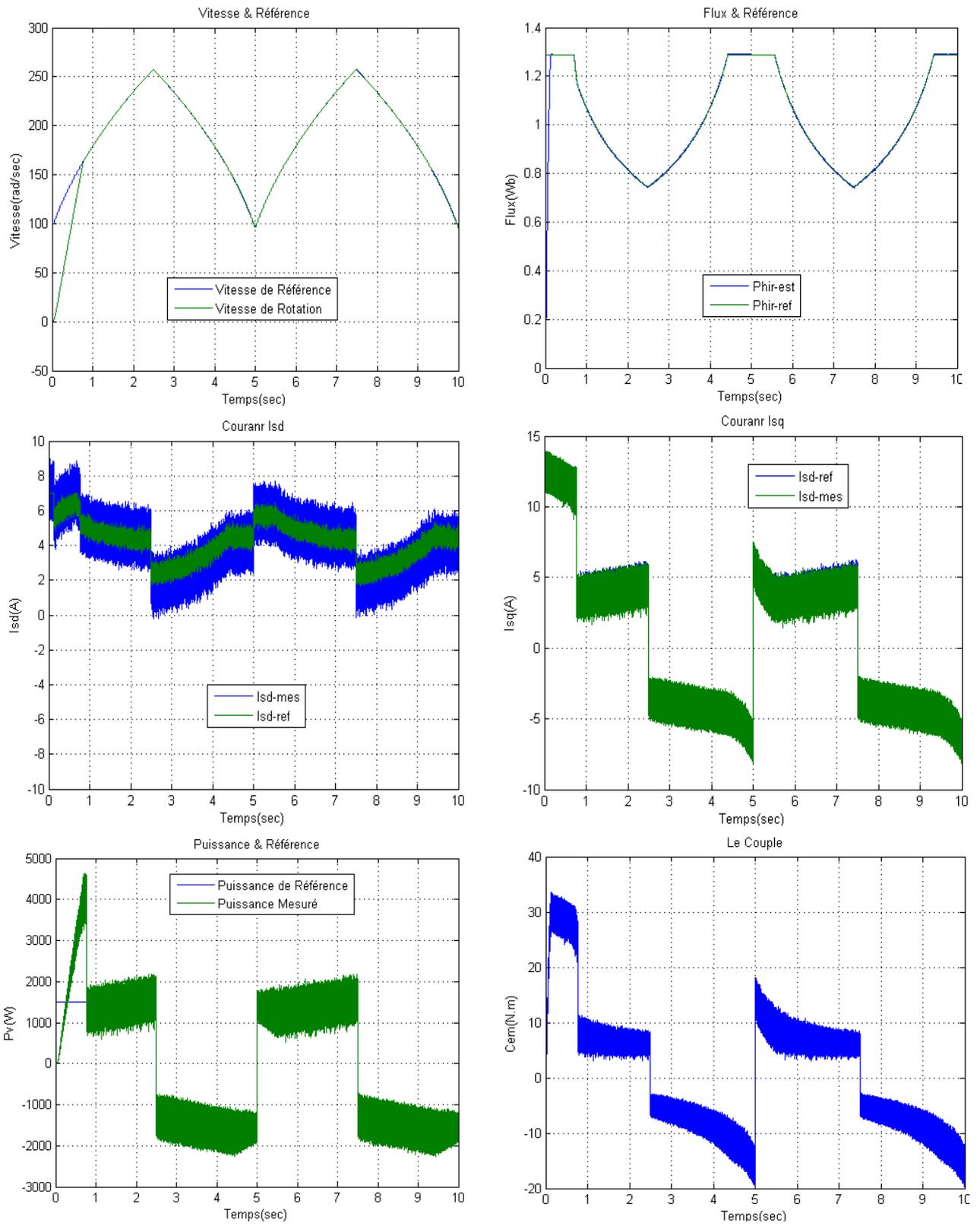


Figure IV-11 : Résultats du command backstepping du SISE

**b.2. Interprétation des résultats :**

La figure IV-11 montre le comportement d'une MAS avec command backstepping. Nous constatons bien que la vitesse de rotation suit parfaitement sa référence avec une bonne dynamique ce qui montre l'efficacité de ce régulateur, de même pour les courants et le flux.

**IV.3.5. Command par mode glissants :**

La commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état vers la surface de glissement et de la faire évoluer dessus avec une certaine dynamique jusqu'au point d'équilibre.

La conception de command par mode glissant revient principalement à déterminer trois étapes.

- Choix de la surface de commutation
- Condition de convergence
- Calcule de la commande

- **Choix de la surface de commutation :**

*J.J.Slotine* propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée.

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda \right)^{r-1} e(x) \quad \text{IV-43}$$

Avec :

$e(x)$  : L'écart de la variable à régler,  $e(x) = x_{ref} - x$

$\lambda$  : Constant positive

$r$  : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaitre la commande.

- **Condition de convergence :**

Les conditions de convergence permettent à la dynamique du système, dans le plan de phase de convergence vers la surface de glissement, nous retenons deux conditions.

- **La fonction directe de commutation**

Elle est sous la forme :

$$s(x)\dot{S}(x) < 0$$

C'est la première condition de convergence

➤ **La fonction de Lyapunov**

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$

En définissant la fonction de Lyapunov :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x)$$

Sa dérivée sera

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \tag{IV-44}$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \tag{IV-45}$$

▪ **Calcul de commande :**

La structure d'un contrôleur par mode glissant est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exact ( $U_{eq}$ ) et l'autre de la stabilité ( $U_n$ ).

$U_{eq}$  Correspond à la commande (proposée par *Filipov*). Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $S(x) = 0$ .

$U_n$  Est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

Durant le mode de glissement en régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulle [72].

$$U_{eq} = - \left\{ \frac{\delta S}{\delta x} [B] \right\}^{-1} \left\{ \frac{\delta S}{\delta x} [B] \cdot [X] \right\} \tag{IV-46}$$

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression on obtient la nouvelle expression de la dérivée de la surface [72]

$$U_n = K_x \text{Sign}(S(x)) \tag{IV-47}$$

**IV.3.5.a. Application de la commande par mode glissant à la MAS :**

On prend les surfaces suivantes :

$$\begin{cases} S(\varphi_d) = \varphi_{ref} - \varphi_d \\ S(\omega) = \omega_{ref} - \omega \\ S(I_{sd}) = I_{sd-ref} - I_{sd} \\ S(I_{sq}) = I_{sq-ref} - I_{sq} \end{cases} \tag{IV-48}$$

**a.1. Pour le réglage de flux :**

La condition nécessaire pour que les états du système suivant la trajectoire définie par les surface de glissement est  $\dot{S} = 0$  ce qui nous définit la commande équivalant du module de flux rotorique de la façon suivant

$$\dot{S}(\varphi_d) = \dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi}_d \quad \text{IV-49}$$

$$\dot{S}(\varphi_d) = \dot{\varphi}_{ref} + \frac{1}{T_r}(\varphi_d - M_{sr}I_{sd}) \quad \text{IV-50}$$

Durant le mode glissant et le régime permanent, nous avons :

$$S(\varphi_d) = 0 \rightarrow \dot{S}(\varphi_d) = 0 \quad \text{IV-51}$$

$$I_{sd-eq} = \frac{1}{M_{sr}}(T_r\varphi_{ref} + \varphi_d) \quad \text{IV-52}$$

Durant le mode de convergence, nous avons :

$$S(\varphi_d)\dot{S}(\varphi_d) \leq 0 \quad \text{IV-53}$$

On assurant la commande d'attractivité par :

$$I_{sdn} = K_f \tanh S(\varphi_d) \quad \text{IV-54}$$

$$I_{sd-ref} = I_{sd-eq} + I_{sdn} \quad \text{IV-55}$$

**a.2. Pour le réglage de vitesse :**

La synthèse de la commande de la vitesse est, comme suit :

$$\dot{S}(\omega) = \dot{\omega}_{ref} - \dot{\omega} \quad \text{IV-56}$$

$$\dot{\omega}_{ref} - \frac{PM_{sr}}{JL_r}\varphi_d I_{sq} + \frac{C_r}{J} = 0 \quad \text{IV-57}$$

$$I_{sqeq} = \frac{L_r}{PM_{sr}\varphi_d}(J\omega_{ref} + C_r + F\omega) \quad \text{IV-58}$$

La commande qui assure l'attractivité est :

$$I_{sqn} = K_\omega \tanh S(\omega) \quad \text{IV-59}$$

$$I_{sqref} = I_{sqeq} + I_{sqn} \quad \text{IV-60}$$

## a.3. Pour le réglage du courants statorique :

## ✓ Commande de composante directe :

$$\dot{S}(I_{sd}) = \dot{I}_{sd-ref} - \dot{I}_{sd} \quad \text{IV-61}$$

$$\dot{I}_{sd-ref} + R_{sm}I_{sd} - \omega_s I_{sq} - \frac{M_{sr}}{T_r L_r} \varphi_{rd} - \frac{1}{L_s \sigma} V_{sd} = 0 \quad \text{IV-62}$$

$$V_{sd\_eq} = L_s \sigma \left( \dot{I}_{sd-ref} + R_{sm}I_{sd} - \omega_s I_{sq} - \frac{M_{sr}}{T_r L_r} \varphi_{rd} \right) \quad \text{IV-63}$$

Avec :  $R_{sm} = R_s + R_r \left( \frac{M_{sr}^2}{L_r^2} \right)$

La commande d'attractivité est assurée par :

$$V_{sd\_n} = K_d \tanh S(I_{sd}) \quad \text{IV-64}$$

$$V_{sd\_ref} = V_{sd\_eq} + V_{sd\_n} \quad \text{IV-65}$$

## ✓ Commande de composante quadratique :

$$\dot{S}(I_{sq}) = \dot{I}_{sq-ref} - \dot{I}_{sq} \quad \text{IV-66}$$

$$\dot{I}_{sq-ref} + R_{sm}I_{sq} - \omega_s I_{sq} - \frac{M_{sr}}{L_r} \varphi_{rd} \omega_r - \frac{1}{L_s \sigma} V_{sq} = 0 \quad \text{IV-67}$$

$$V_{sq\_eq} = L_s \sigma \left( \dot{I}_{sq-ref} + R_{sm}I_{sq} - \omega_s I_{sq} - \frac{M_{sr}}{L_r} \varphi_{rd} \omega_r \right) \quad \text{IV-68}$$

La commande d'attractivité est assurée aussi par :

$$V_{sq\_n} = K_q \tanh S(I_{sq}) \quad \text{IV-69}$$

$$V_{sq\_ref} = V_{sq\_eq} + V_{sq\_n} \quad \text{IV-70}$$

a.4. Résultats de simulation :

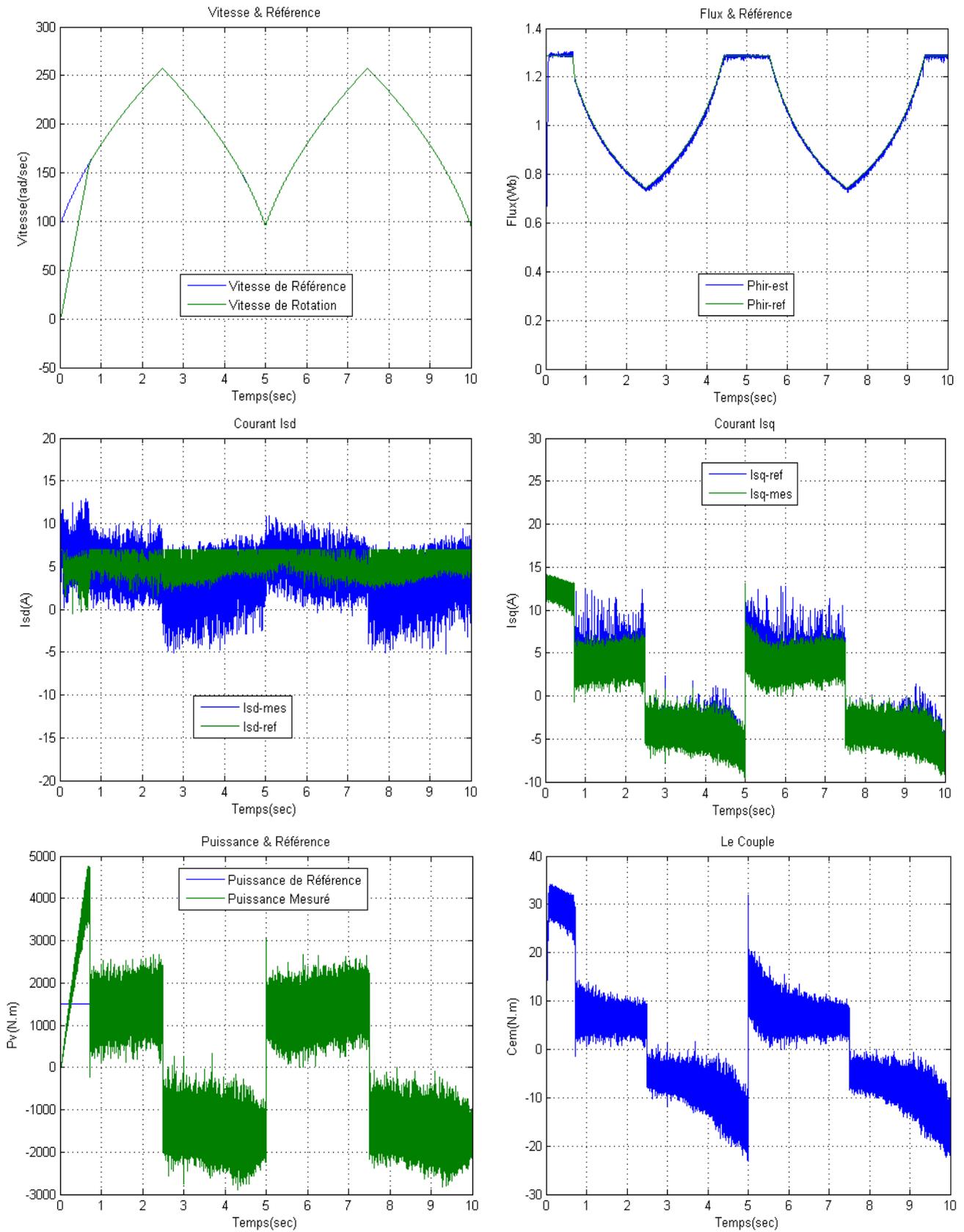


Figure IV-12 : Résultats du command par mode glissant du SISE

### a.5. Interprétations des résultats :

La figure IV-12 montre le comportement d'une MAS avec la commande mode glissant. Elle assure un temps de réponse très rapide, on remarque aussi que les courants ( $I_{sd}$  et  $I_{sq}$ ) et le flux suivant leurs références. Mais cette commande cause des phénomènes de broutement (chatte ring) présente quelque oscillations de haute fréquence.

### IV.4. Le contrôle du SISE associé au générateur éolien

La puissance fournie par un générateur éolien est toujours variable, dû aux variations de la vitesse du vent. De l'autre côté, c'est le consommateur ou le réseau qui doit recevoir une puissance lissée. La figure (IV.13) montre le principe de contrôle d'un SISE associé à un générateur éolien. Ayant la puissance générée par le générateur éolien,  $P_{éol}$ , et connaissant la puissance qu'il faut délivrer au réseau ou sur les charges isolées,  $P_{rég}$ , une puissance de référence pour le SISE peut être déterminée comme suit :

$$P_{ref} = P_{éol} + P_{rég} \quad \text{IV.71}$$

Si la puissance de référence est positive, c'est qu'il y a un excédent d'énergie qui doit être stockée. Si la puissance de référence est négative, on a un déficit d'énergie qui doit être couvert par l'énergie (déstocké)

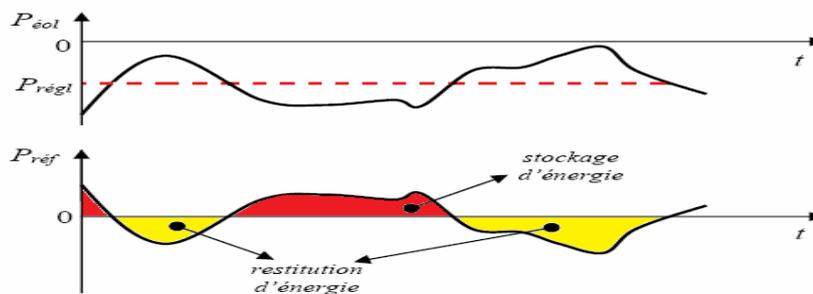


Figure IV-13 : Principe du contrôle de SISE associé au générateur éolien

#### IV.4.1. Résultats de simulation de du système global (système de conversion éolien +SISE)

Les résultats ci-dessus ont été obtenus sous environnement MATLAB/SIMULINK, en gardant le même profil du vent et en utilisant pour le système de conversion une MADA de 7.5KW et une turbine de 10 KW et pour le SISE une MAS et un volant d'inertie dont les paramètres sont donnés dans l'annexe A

IV.4.1.a. Résultats de la Chain global :

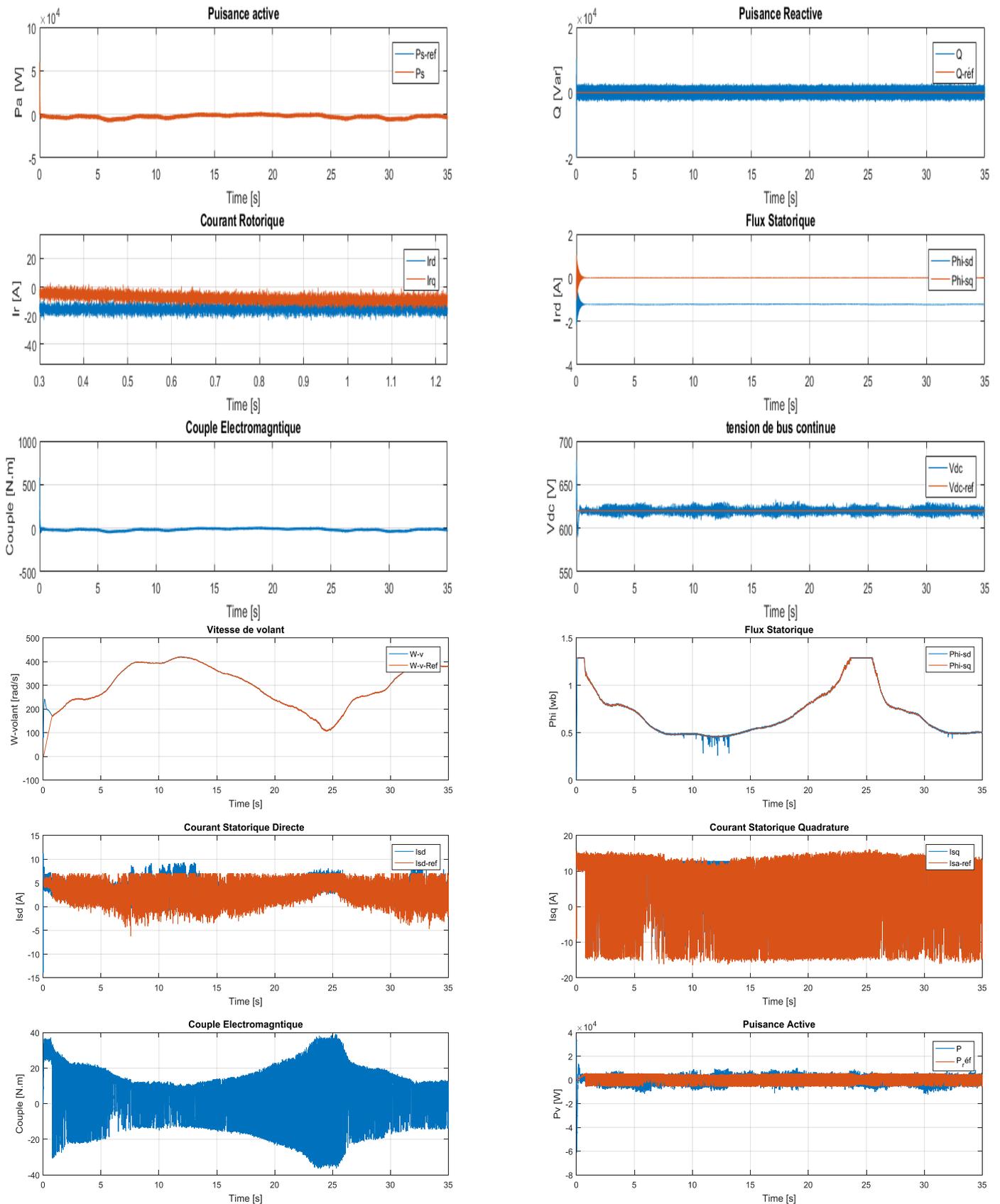


Figure IV.14 : Résultats de la chaîne globale (système de conversion éolien +SISE)

**IV.4.1.a Interprétation de Résultats :**

La figure IV-14 montre les résultats de simulation de la chaîne globale (système de conversion éolien +SISE)

On remarque que les grandeurs mesurées suivent leurs valeurs de consigne après l'application de la commande vectorielle. On peut remarquer que la tension du bus continu suit parfaitement sa consigne (620 V) avec présence des performances dynamiques en utilisant un régulateur classique (PI), Nous constatons bien que les paramètres de SISE suivent parfaitement ça référence.

**IV.5. Conclusion :**

La première partie de ce chapitre à été l'objet de l'étude d'un système inertiel de stockage D'énergie, ce dernier s'avère très intéressant on se qui concerne le lissage de la puissance fluctuante issue de la **MADA** à cause de la variation de la vitesse du vent. Dans la deuxième partie nous avons étudié la modélisation et la commande vectorielle de la machine asynchrone avec régulateur proportionnel intégral PI, par mode glissant, méthode backstepping.

Les simulations montrent d'une part les avantages de la commande vectorielle envisagée, et d'autre part l'efficacité des différentes régulations

Les résultats obtenus avec les techniques de commande proposées, montrent des performances équivalentes, très satisfaisantes et une très bonne robustesse.