

III. COMMANDE DU SYSTEME EOLIEN A VITESSE VARIABLE BASE SUR UNE MADA

III.1. Introduction

Il existe deux grandes familles d'éoliennes : celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation.

Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. En effet, les éoliennes à vitesse variable, contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour de faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc choisi d'étudier la commande CCM d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné, plus communément appelé Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

Cette deuxième partie a pour objectifs de présenter la commande CCR du système éolien à vitesse variable basé sur une MADA avec des convertisseurs multi niveaux.

Ensuite, nous détaillerons les différentes lois de commande permettant un fonctionnement optimal de l'éolienne et un contrôle indépendant des puissances active et réactive.

La dernière partie de ce chapitre illustrera les résultats de simulation pour deux onduleur multi niveaux à deux et trois niveaux, validant ainsi les commandes établies.

III.2. Architecture du dispositif de commande

L'architecture du dispositif de commande est présentée à la Figure III.1. Elle est basée sur le modèle triphasé de la chaîne de conversion électromécanique du système éolien [27].

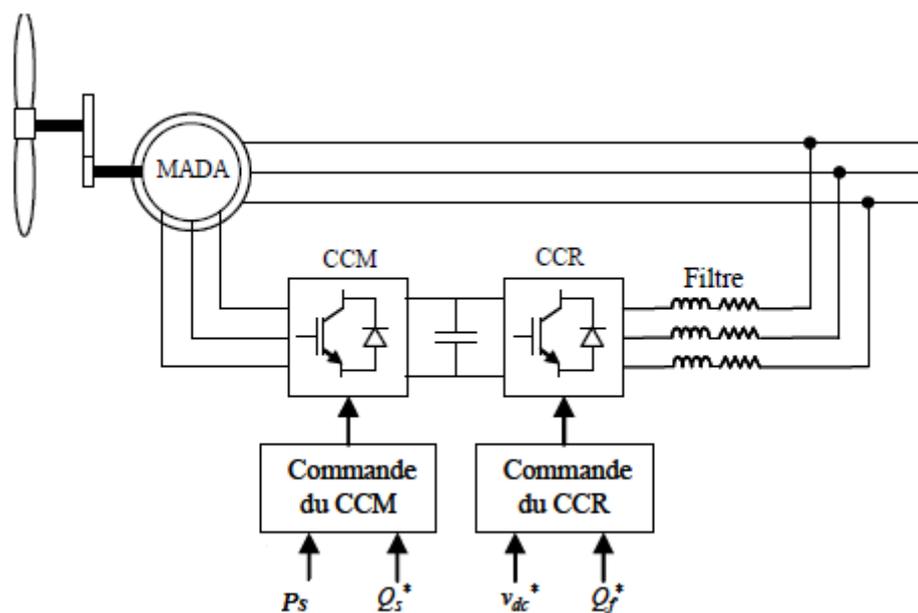


Figure III. 1: Architecture de commande du système éolien.

D'après la Figure III.1, trois commandes détaillées par la suite sont donc nécessaires pour assurer le fonctionnement de l'éolienne :

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

Est donc dans la commande du système éolienne à vitesse variable basé sur MADA, il Ya trois partie nécessaire pour commander la chaine éolienne :

- ❖ La commande du convertisseur coté MADA (CCM)
- ❖ La commande du convertisseur coté MADA (CCR)

On va commencer premier mon par la commande du convertisseur côté MADA, et passant dans le deuxième partie pour commander avec convertisseur côté Réseaux.

III.3. COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE MADA

Dans cette partie, nous nous intéressons à la commande du CCM dont le principe est illustré à la Figure III.2 :

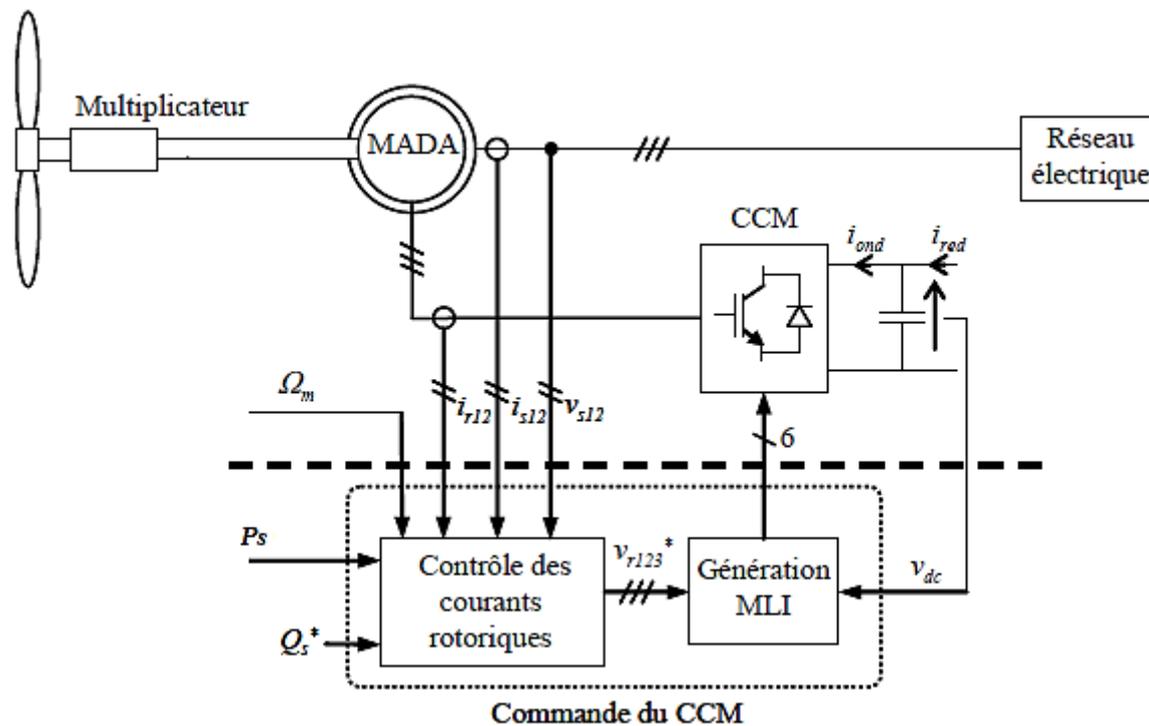


Figure III. 2: Principe de la commande du CCM.

Les contrôles du couple électromagnétique et de la puissance réactive statorique seront obtenus en contrôlant les courants rotoriques d'axes dq de la MADA.

III.3.1. Choix du référentiel pour le modèle de la MADA dans le repère dq

Le champ statorique tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme.

Il est symbolisé par le vecteur flux statorique qui donne une idée visuelle de la phase et de l'amplitude du flux.

En choisissant le référentiel diphasé dq lié au champ tournant statorique [27] et en plaçant le vecteur flux statorique φ_s sur l'axe d , on peut écrire d'après la Figure III.3 :

$$\begin{cases} \dot{\theta}_s = \omega_s \\ \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{\theta}_e = \omega_e = \omega_s - \omega_r = P \cdot \Omega_m \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- ω_s : la pulsation statorique,
- ω_r : la pulsation rotorique,
- ω_e : la pulsation électrique entre les bobinages statorique et rotorique.

Et

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

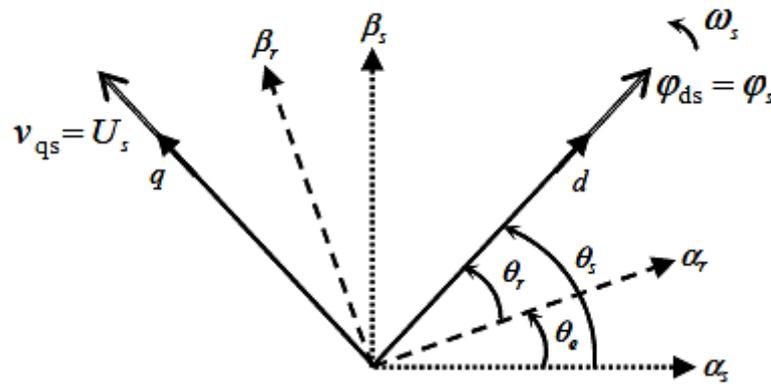


Figure III. 3: Référentiel diphasé dq lié au champ tournant statorique.

Dans le repère triphasé, la tension aux bornes d'une phase k du stator de la MADA s'exprime par ($k \in \{1, 2, 3\}$) :

$$V_{sk} = R_s \cdot i_{sk} + \frac{d\varphi_{sk}}{dt} \quad (\text{III.3})$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui constitue une hypothèse réaliste pour les génératrices de fortes puissances utilisées dans les systèmes éoliennes, l'équation précédente devient :

$$V_{sk} = \frac{d\varphi_{sk}}{dt} \quad (\text{III.4})$$

Cette équation démontre que la tension statorique et le flux statorique tournent tous les deux à la même vitesse. Cependant, la tension est en avance de $\pi/2$ radians sur le flux statorique. On peut donc écrire dans le repère dq lié au champ tournant statorique, en considérant le flux statorique constant, que :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s \sqrt{3} = U_s \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Pour déterminer les angles nécessaires aux transformations de Park pour les grandeurs statorique (qs) et pour les grandeurs rotoriques (qr).

III.3.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

En considérant le choix du repère dq lié au champ tournant statorique et en négligeant la résistance des bobinages statorique, une simplification des équations de la MADA dans le repère dq peut être obtenue des équations (III.6) :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \dot{\theta}_s \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \dot{\theta}_r \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

On a:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = U_s = \omega_s \cdot \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

A partir des équations des flux statorique et rotoriques (équations III.8) :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + m \cdot L_m \cdot i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + m \cdot L_m \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec : $M = m \cdot L_m$

On obtient les expressions des courants statorique suivantes :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\varphi_{ds} - m \cdot L_m \cdot i_{dr}}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{m \cdot L_m}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Ces expressions sont ensuite remplacées dans les équations des flux rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

Qui deviennent alors :

$$\varphi_{dr} = \left(L_r - \frac{(m.L_m)^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{m.L_m}{L_s} \cdot \varphi_{ds} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{dr} + \frac{m.L_m}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \quad (\text{III.11})$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot i_{qr} - \frac{(m.L_m)^2}{L_s} \cdot i_{qr} = \sigma \cdot L_r \cdot i_{qr} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{(m.L_m)^2}{L_s \cdot L_r} : \text{Le coefficient de dispersion de la MADA.}$$

En remplaçant les expressions des composantes directe et en quadrature des flux rotoriques (équations III.11 et III.12), Dans les équations (III.7), nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - e_{dr} \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + e_{qr} + e_{\emptyset} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Ou :

$$\begin{cases} e_{dr} = -\sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{qr} \\ e_{qr} = \sigma \cdot L_r \cdot \omega_r \cdot i_{dr} \\ e_{\emptyset} = \omega_r \cdot \frac{m.L_m}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Pour le couple électromagnétique :

$$C_{em} = p \cdot \frac{m.L_m}{L_s} \cdot (\varphi_{qs} \cdot i_{dr} - \varphi_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (\text{III.15})$$

Devient :

$$C_{em} = p \cdot \frac{m.L_m}{L_s} \cdot \varphi_{ds} \cdot i_{qr} \quad (\text{III.16})$$

Les puissances active et réactive statorique s'expriment alors par :

$$P_s = -V_{qs} \cdot \frac{m.L_m}{L_s} \cdot i_{qr} \quad (\text{III.17})$$

$$Q_s = \frac{V_{qs} \cdot \varphi_{ds}}{L_s} - \frac{V_{qs} \cdot m.L_m}{L_s} \cdot i_{dr} \quad (\text{III.18})$$

Ces dernières expressions montrent que dans l'hypothèse où le flux φ_{ds} est maintenu constant (cette condition est assurée dans le cas d'un réseau stable connecté au stator de la MADA), le choix du repère dq rend le couple électromagnétique produit par la MADA, et par conséquent la puissance statorique, proportionnelle au courant rotorique d'axe q . La puissance réactive statorique, quant à elle, n'est pas proportionnelle au courant rotorique d'axe d due à une constante imposée par le réseau. Ainsi, ces puissances statorique peuvent être contrôlées indépendamment l'une de l'autre.

Le modèle de la MADA dans le repère dq lié au champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants rotoriques étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque courant peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront le courant rotorique d'axe q et le courant rotorique d'axe d .

Afin d'établir les boucles de régulation des courants rotoriques, nous supposons que le CCM est idéal (ce qui correspond à négliger les temps morts imposés par les drivers des interrupteurs de puissance du CCM) et modélisé au sens des valeurs moyennes. Ainsi, le CCM peut être représenté par un gain G_c dont l'expression est :

$$G_c = \frac{V_{dc}}{2.V_p} \quad (\text{III.19})$$

Avec :

V_p : L'amplitude de la porteuse triangulaire servant à la génération de la MLI.

De plus, nous supposons que les tensions rotoriques V_{rk} sont égales à leurs références V_{rk}^* ($k \in \{1, 2, 3\}$), Ce qui implique que l'amplitude de la porteuse V_p doit être fixée à $v_{dc}/2$, correspondant ainsi à un gain G_c égal à 1.

Le schéma bloc des boucles de régulation des courants rotoriques d'axes dq est présenté à la Figure III.4. Les régulateurs utilisés sont des correcteurs de type PI.

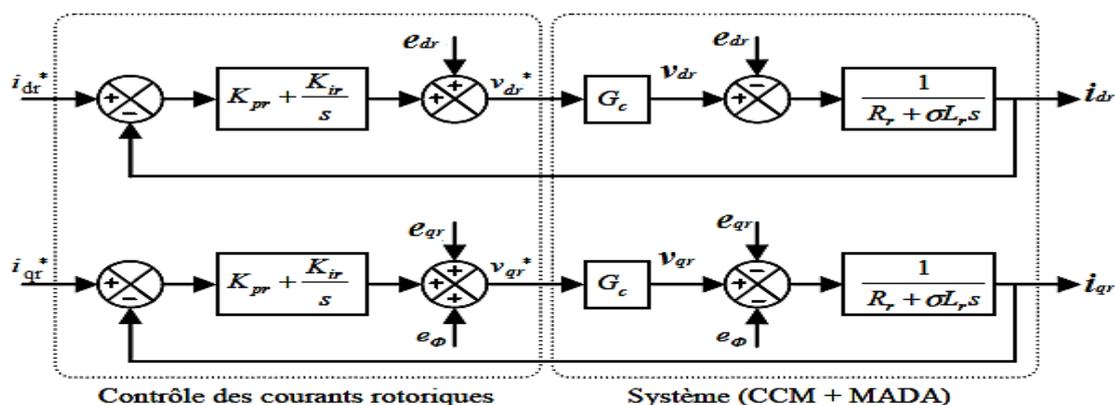


Figure III. 4: Principe du contrôle des courants rotoriques de la MADA.

Le courant rotorique de référence d'axe d est, quant à lui, issu du contrôle de la puissance réactive statorique

La Figure III.5 : représente le schéma bloc de la commande indirect du CCM. Cette commande permet de contrôler indépendamment les courants rotoriques d'axes dq et donc les puissances active et réactive statorique de la MADA.

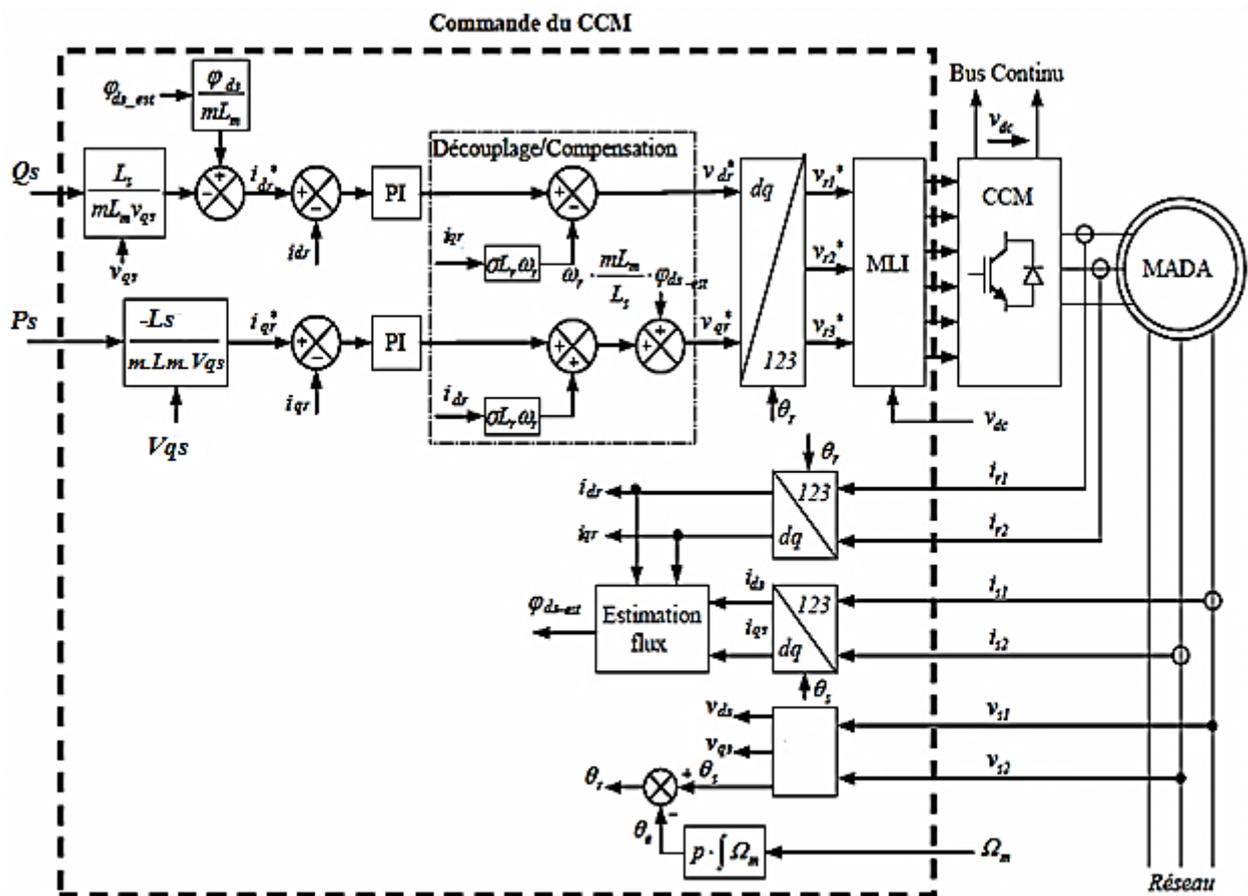


Figure III. 5: Commande du CCM.

III.3.3 : simulations de commande du convertisseur (onduleur deux niveaux) coté MADA

Le convertisseur utilisé de cette commande est l'onduleur triphasé à deux niveaux :

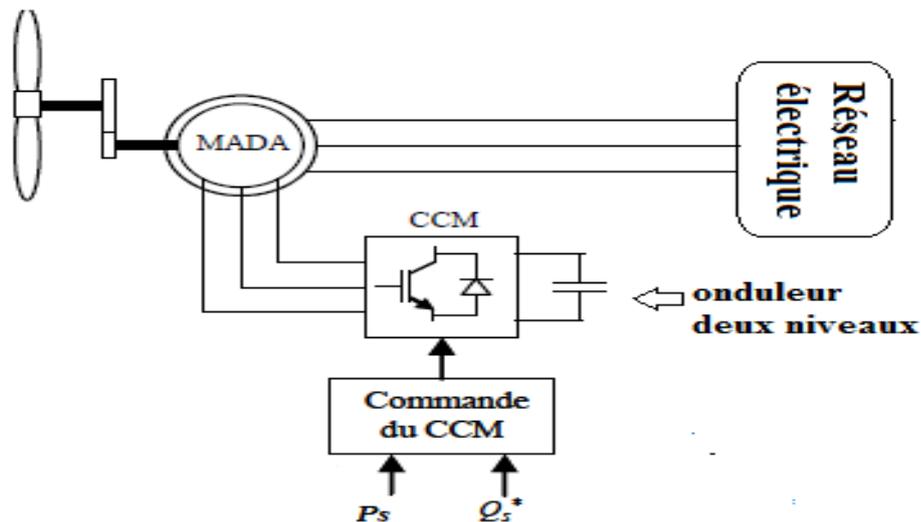


Figure III. 6: La commande CCM avec onduleur deux niveaux

III.3.3.1 : Résultat de simulation

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus en appliquant les lois de commande en puissance active et réactive que nous venons de présenter sur le modèle de la MADA obtenu et validé dans le chapitre II.

Les figures III.7.8...14 Ci-dessous montrent les performances de la commande en puissances d'une MADA entraînée à une vitesse variable et pilotée au rotor par un onduleur de tension à deux niveaux.

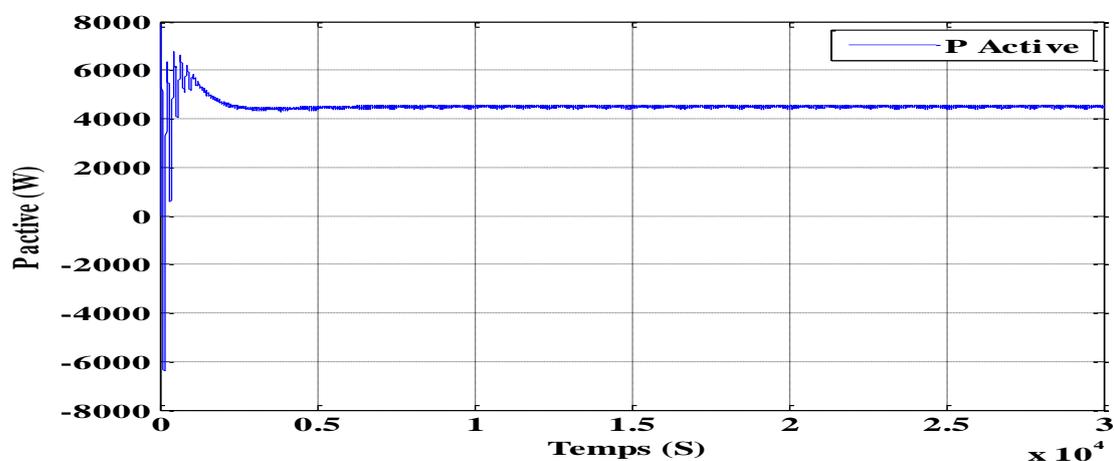


Figure III. 7 : la puissance active de la MADA

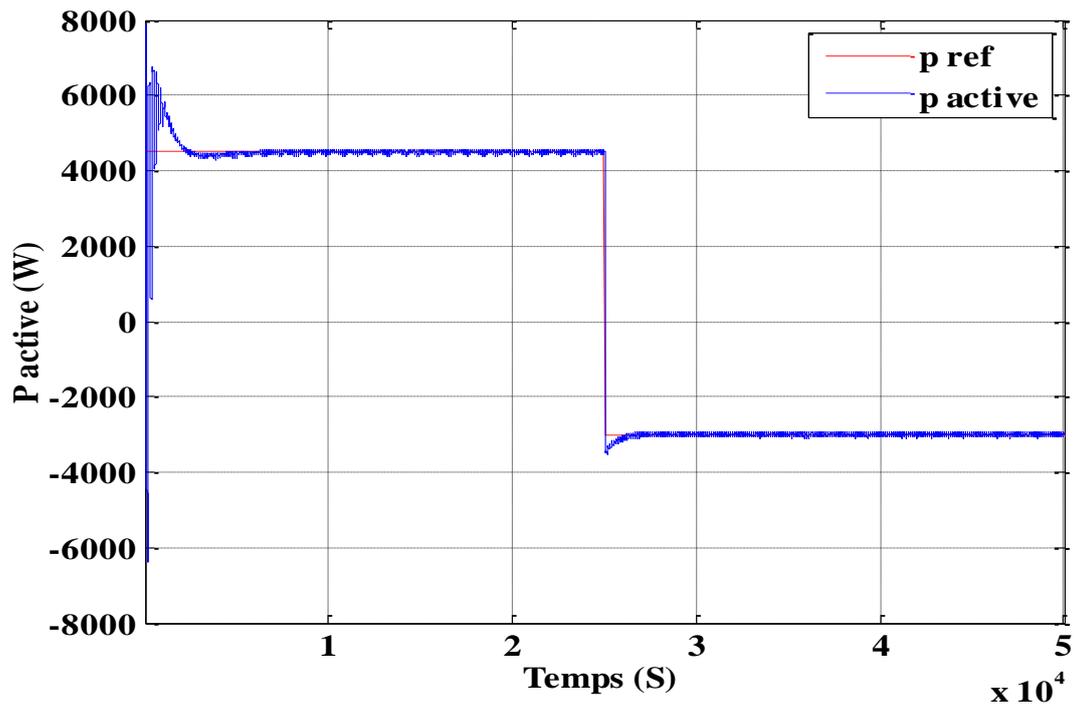


Figure III. 8 : la puissance active de la MADA avec référence

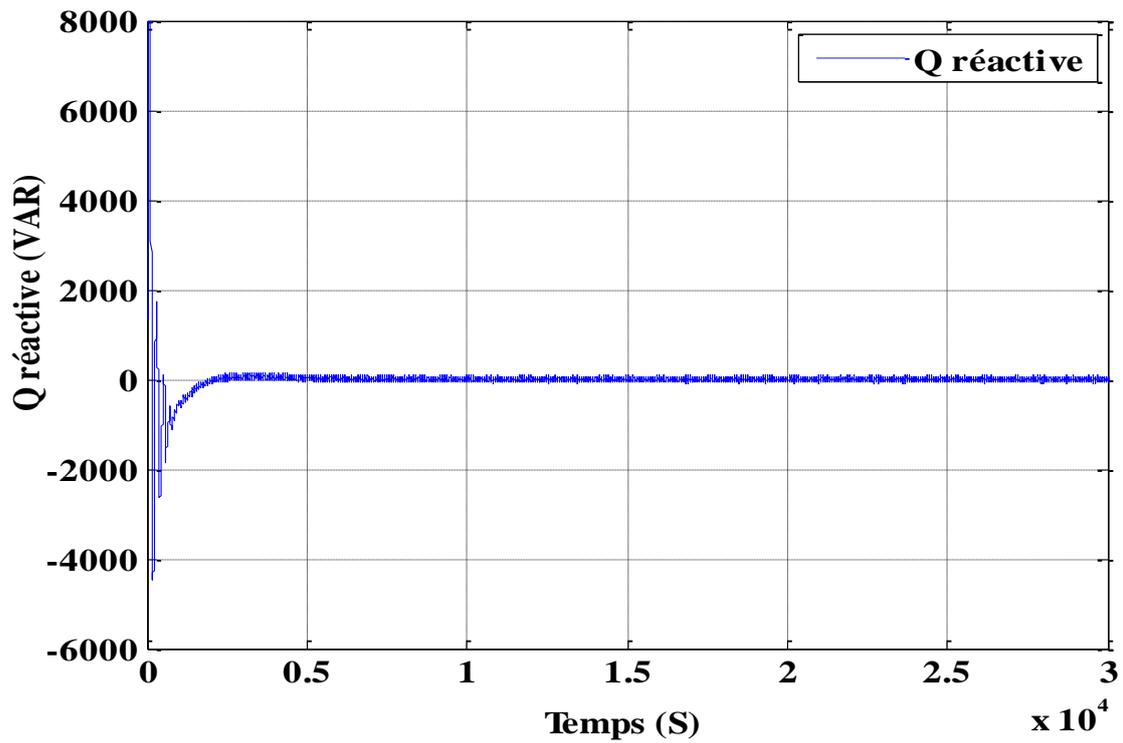


Figure III. 9 : la puissance réactive de la MADA

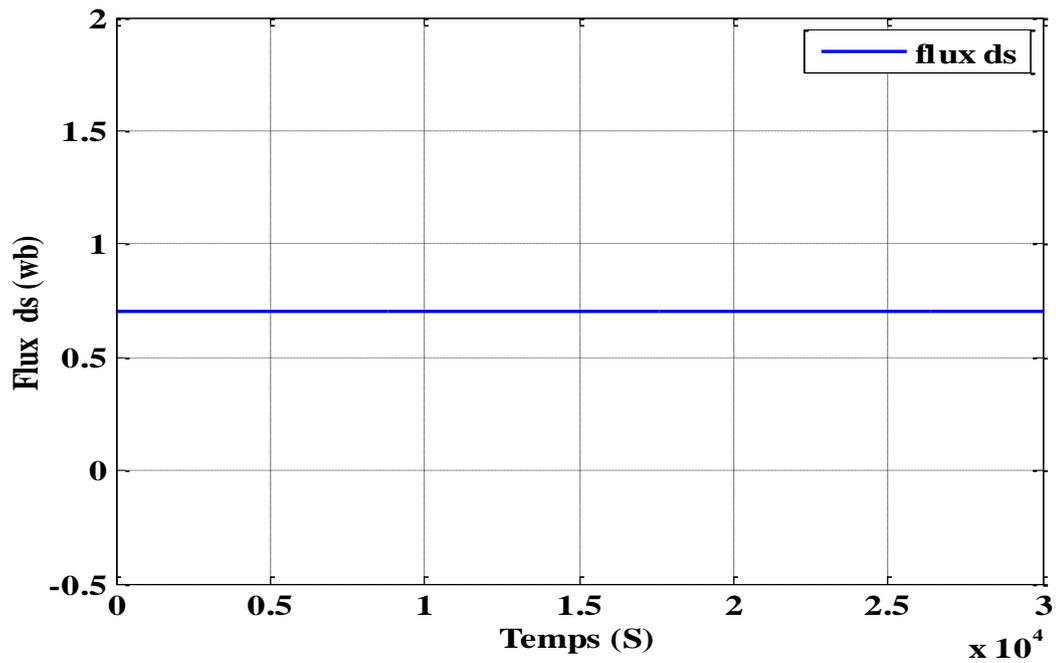


Figure III. 10 : le flux statorique dans l'axe d

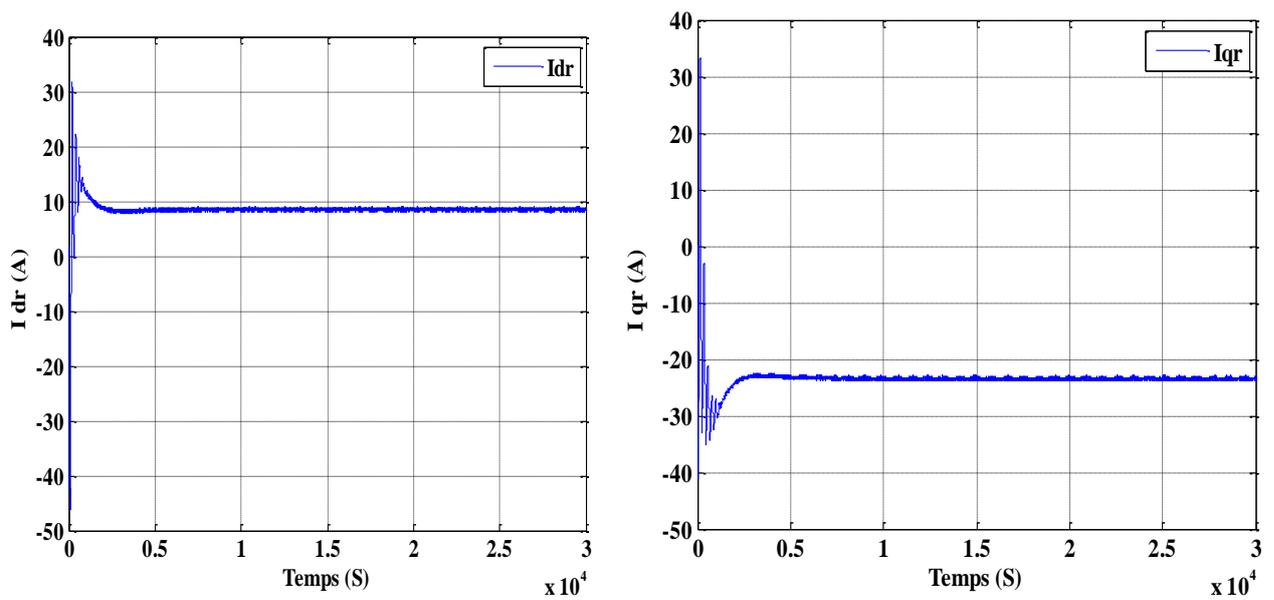
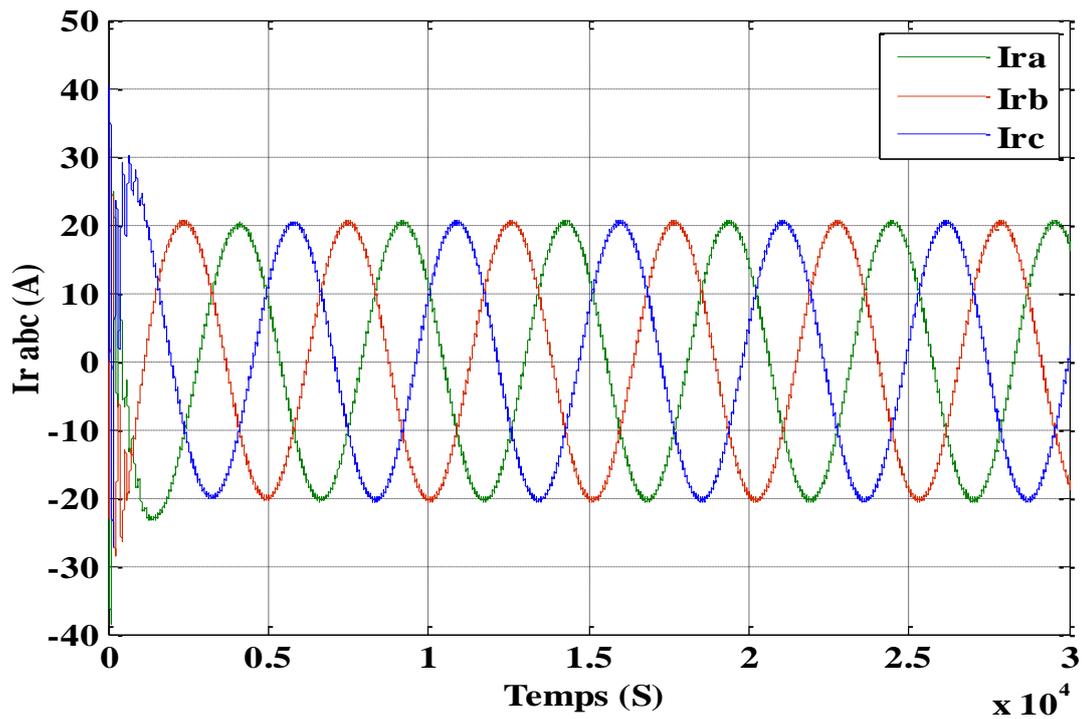
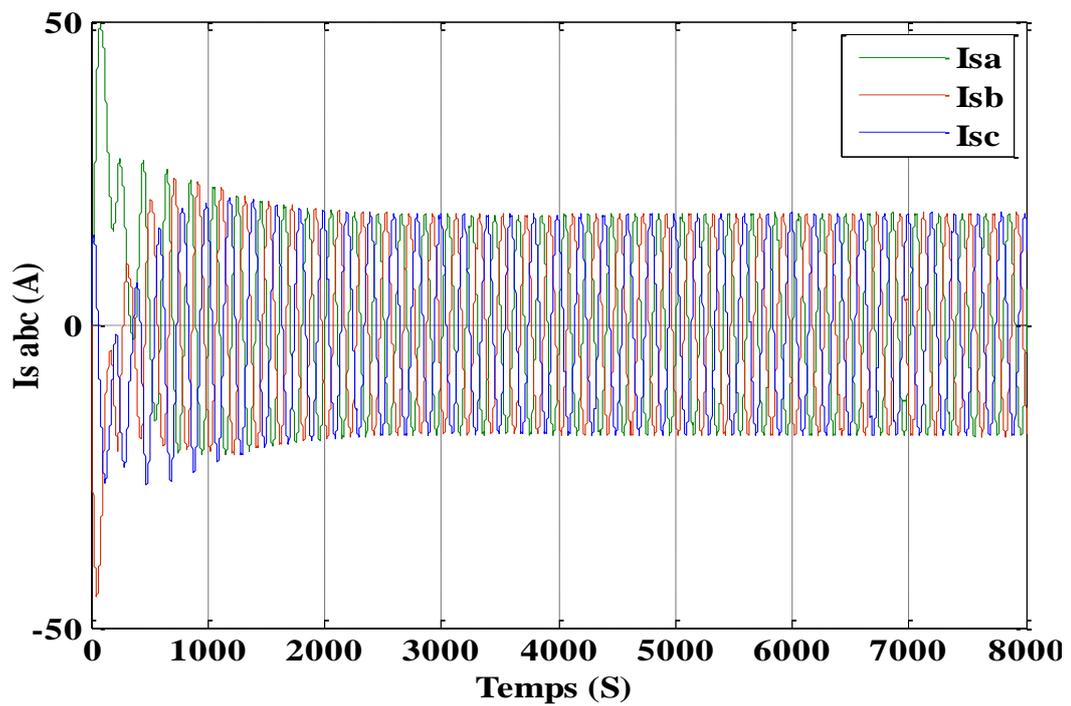


Figure III. 11 : le courant rotorique dans l'axe dq

Figure III. 12 : Les courants rotorique $I_r abc$ Figure III. 13 : Les courants statorique $I_s abc$

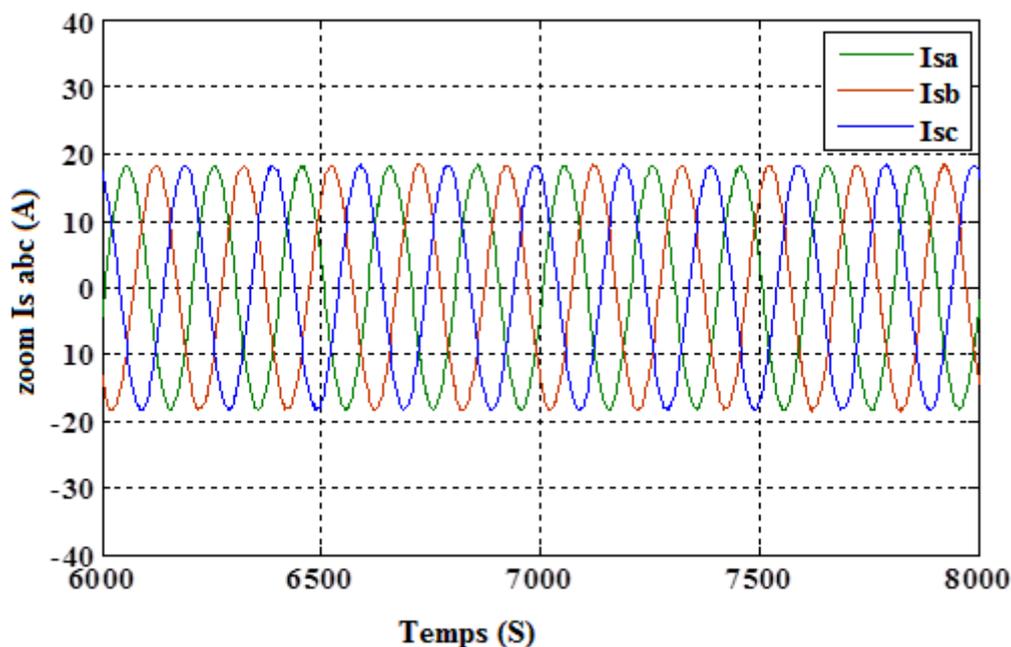


Figure III. 14 : La zoom des courants statorique Is abc

Nous remarquons sur les Figure III.12 et Figure III.13 que le courant rotorique (côté rotor de la MADA) avec le courant statorique, ce qui montre que nous avons un facteur de puissance unitaire et que la puissance de la MADA absorbe de l'énergie électrique.

III.3.3.2 : Interprétation des résultats

On peut remarquer que l'alimentation de la machine avec onduleur deux niveaux les échelons de puissance sont bien suivis avec la puissance active est constant avant le $t=0.2\text{sec}$, et la puissance réactive est égal à zéro, alors la MADA a besoin d'une puissance réactive nécessaire à sa magnétisation et comme la puissance réactive Q_s est égale à zéro, la MADA absorbe de la puissance réactive par le rotor et le facteur de puissance unitaire ça veut dire est consommée le maximum d'énergie électrique.

III.4. COMMANDE DU CONVERTISSEUR COTE RESEAU

Le CCR est connecté entre le bus continu et le réseau électrique via un filtre RL. Ce convertisseur a deux rôles : maintenir la tension du bus continu constante, quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance rotorique de la MADA et maintenir un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique. La Figure III.15 décrit la commande du CCR. Cette commande réalise donc les deux fonctions suivantes :

- le contrôle des courants circulant dans le filtre RL,
- le contrôle de la tension du bus continu [28].

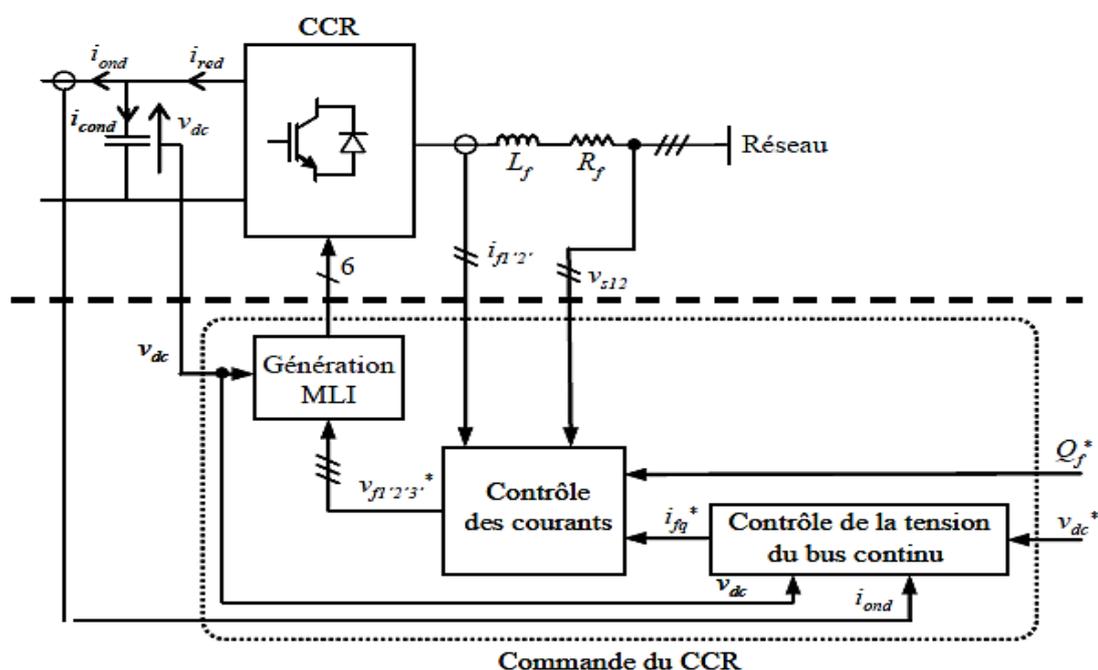


Figure III. 15: Principe de la commande du CCR.

III.4.1. Contrôle des courants transitant dans le filtre RL

Dans le repère dq lié au champ tournant statorique, les équations :

$$\begin{cases} P_f = V_{df} \cdot i_{df} + V_{qf} \cdot i_{qf} \\ Q_f = V_{qf} \cdot i_{df} - V_{df} \cdot i_{qf} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Deviennent :

$$\begin{cases} V_{df} = -R_f \cdot i_{df} - L_f \frac{di_{df}}{dt} + e_{df} \\ V_{qf} = -R_f \cdot i_{qf} - L_f \frac{di_{qf}}{dt} + e_{qf} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Où :

$$\begin{cases} e_{df} = -\omega_s \cdot L_f \cdot i_{qf} \\ e_{qf} = -\omega_s \cdot L_f \cdot i_{df} + V_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Le modèle de la liaison du CCR au réseau dans le repère dq suivant le champ tournant statorique nous montre que nous pouvons mettre en place un contrôle des courants circulant dans le filtre RL étant donné, qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec pour chacun son propre régulateur. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs seront les courants dans le filtre RL d'axes dq .

Comme pour la régulation des courants rotoriques, nous modélisons le convertisseur par un gain G_c (voir équation III.19), avec ici G_c égal à 1. Le schéma bloc des boucles de régulation des courants d'axes dq est décrit à la Figure III.16. Les correcteurs utilisés sont de type PI. Dans ces schémas blocs de régulation apparaissent les termes de compensation et de découplage des axes dq ainsi que les modèles du CCR et de la liaison de celui-ci au réseau via le filtre RL suivant le repère dq .

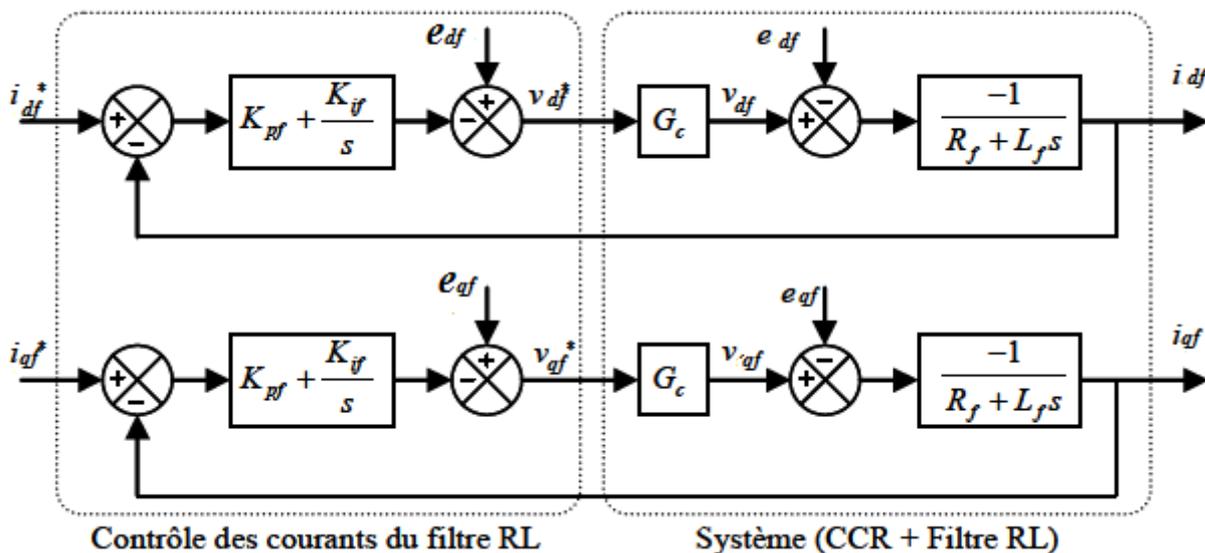


Figure III. 16: Contrôle des courants circulant dans le filtre RL.

Les courants de référence i_{df}^* et i_{qf}^* sont respectivement issus du bloc de contrôle de la tension du bus continu et du contrôle de la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique (Figure III.16).

En négligeant les pertes dans la résistance R_f du filtre RL et en tenant compte de l'orientation du repère dq lié au champ tournant statorique ($v_{ds} = 0$), les équations III.23 et III.24

$$Q_f = V_{qf} \cdot i_{df} - V_{df} \cdot i_{qf} \quad (\text{III.23})$$

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (\text{III.24})$$

Deviennent :

$$P_f = V_{qs} \cdot i_{qf} \quad (\text{III.25})$$

$$Q_f = V_{qs} \cdot i_{df} \quad (\text{III.26})$$

A partir de ces relations, il est alors possible d'imposer les puissances active et réactive de référence, notées ici P_f^* et Q_f^* , en imposant les courants de référence suivants :

$$i_{df}^* = \frac{Q_f^*}{V_{qs}} \quad (\text{III.27})$$

$$i_{qf}^* = \frac{P_f^*}{V_{qs}} \quad (\text{III.28})$$

La composante directe du courant est utilisée pour contrôler la puissance réactive au point de connexion du CCR avec le réseau électrique. La composante en quadrature, quant à elle, est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Avec ce principe, une puissance réactive de référence nulle peut alors être imposée ($Q_f^* = 0 \text{ VAR}$).

III.4.2. Contrôle de la tension du bus continu

$$\text{A partir de l'équation : } i_{cond} = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{III.29})$$

Nous pouvons exprimer les puissances mises en jeu sur le bus continu :

$$\begin{cases} P_{red} = V_{dc} \cdot i_{red} \\ P_c = V_{dc} \cdot i_{cond} \\ P_{ond} = V_{dc} \cdot i_{ond} \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

Ces puissances sont liées par la relation :

$$P_{red} = P_c + P_{ond} \quad (\text{III.31})$$

Si l'on néglige l'ensemble des pertes Joule devant la puissance échangée entre le rotor de la MADA et le réseau électrique (pertes dans le condensateur, le convertisseur et le filtre RL), on peut alors écrire :

$$P_f = P_{red} = P_c + P_{ond} \tag{III.32}$$

En réglant la puissance P_f , il est alors possible de contrôler la puissance P_c dans le condensateur et donc de réguler la tension du bus continu. Pour ce faire, les puissances P_{ond} et P_c doivent être connues afin de déterminer P_f^* .

La référence de puissance pour le condensateur est liée au courant de référence circulant dans le condensateur :

$$P_c^* = V_{dc} \cdot i_{cond}^* \tag{III.33}$$

La régulation de la tension du bus continu s'effectue alors par une boucle externe (par rapport à la boucle interne de régulation des courants), permettant de maintenir une tension constante sur le bus continu, avec un correcteur PI générant le courant de référence i_{cond}^* dans le condensateur.

La Figure III.17 présente le schéma bloc du contrôle de la tension du bus continu. On considère, pour simplifier la chaîne de régulation, que le courant de référence i_{qf}^* est toujours égal au courant i_{qf} car le temps de réponse de la boucle interne est plus faible que celui de la boucle externe.

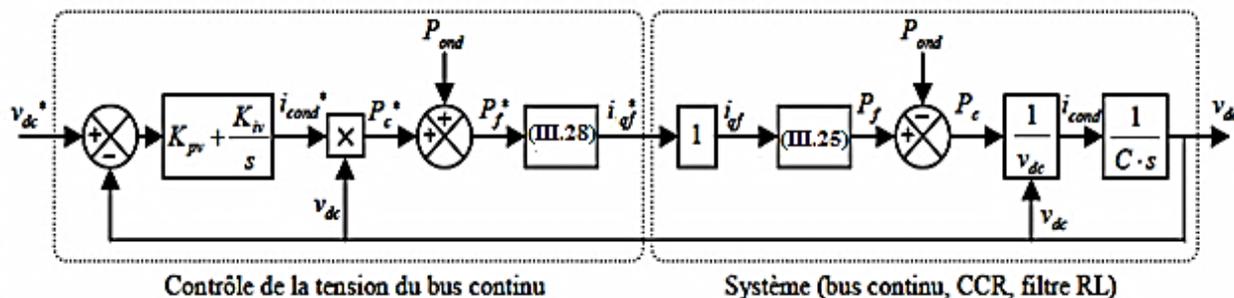


Figure III. 17: Boucle de régulation de la tension du bus continu.

A la Figure III.14 apparaît la puissance disponible P_{ond} correspondant à la puissance rotorique : c'est une perturbation vu de la régulation et elle sera compensée dans la chaîne de régulation.

La Figure III.15 représente le schéma bloc de la commande du CCR. Ce schéma bloc inclut les termes de découplage et de compensation afin de pouvoir contrôler indépendamment

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps le choix de la différente commande multi niveaux du système éolien basé sur une MADA de côté réseaux et analysons les résultats obtenus par simulation pour deux convertisseurs multi niveaux (onduleurs triphasé à deux niveaux et trois niveaux).

III.4.3.1 : Simulation du système avec onduleur triphasé à deux niveaux

Le convertisseur de puissance utilisé dans ce partie de côté réseaux de la machine « CCR » est un onduleur à deux niveaux (figure III.19).

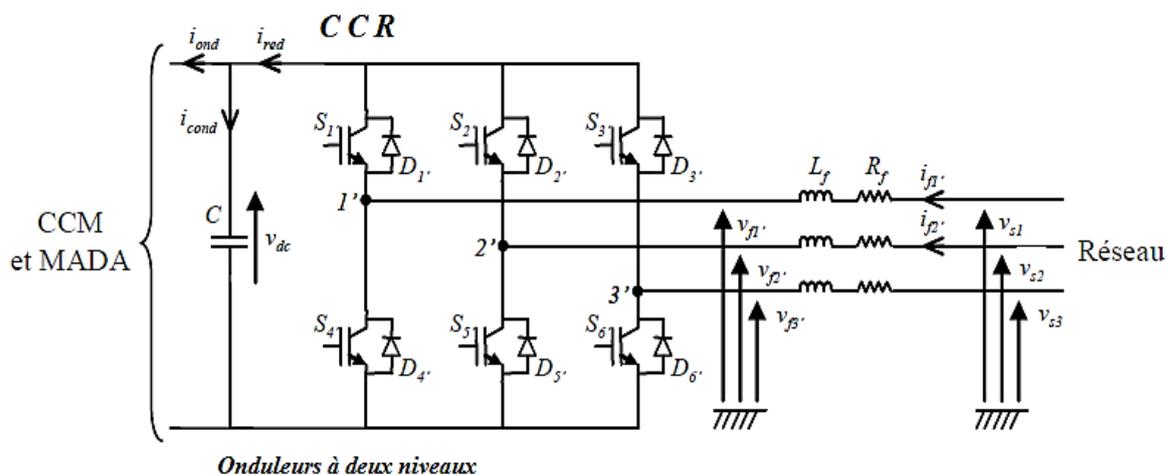


Figure III. 19: commande côté réseaux avec onduleur deux niveaux

III.4.3.1.1 : Résultat de simulation

Les résultats obtenus pour une fréquence de 50 Hz et réglage de la tension de bus continu.

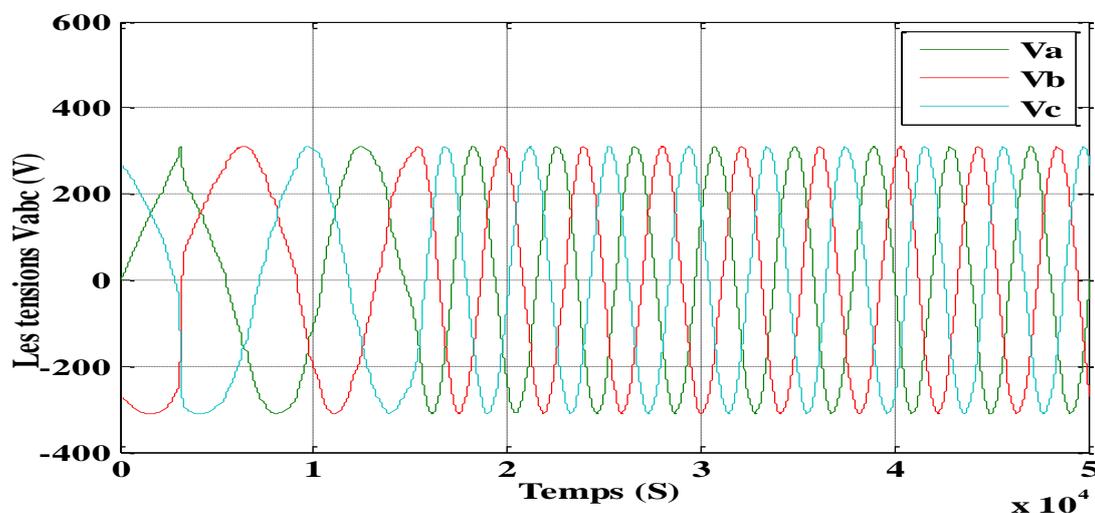


Figure III. 20: Les tensions Va, Vb, Vc, de côté réseaux.

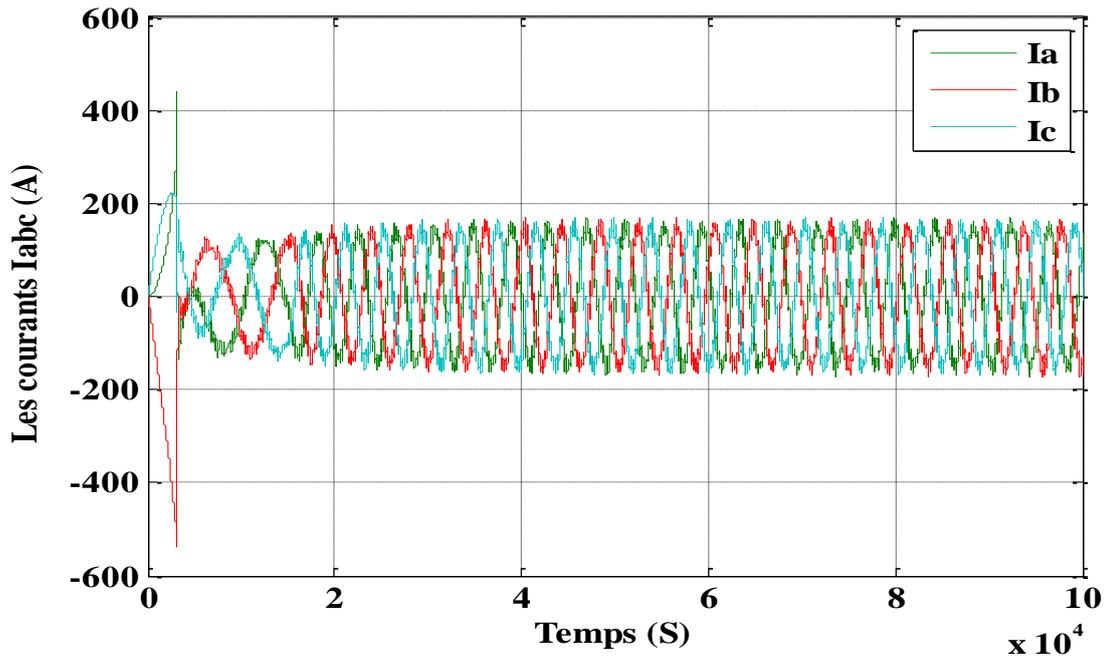


Figure III. 21 : les courants I_a , I_b , I_c de côté réseaux

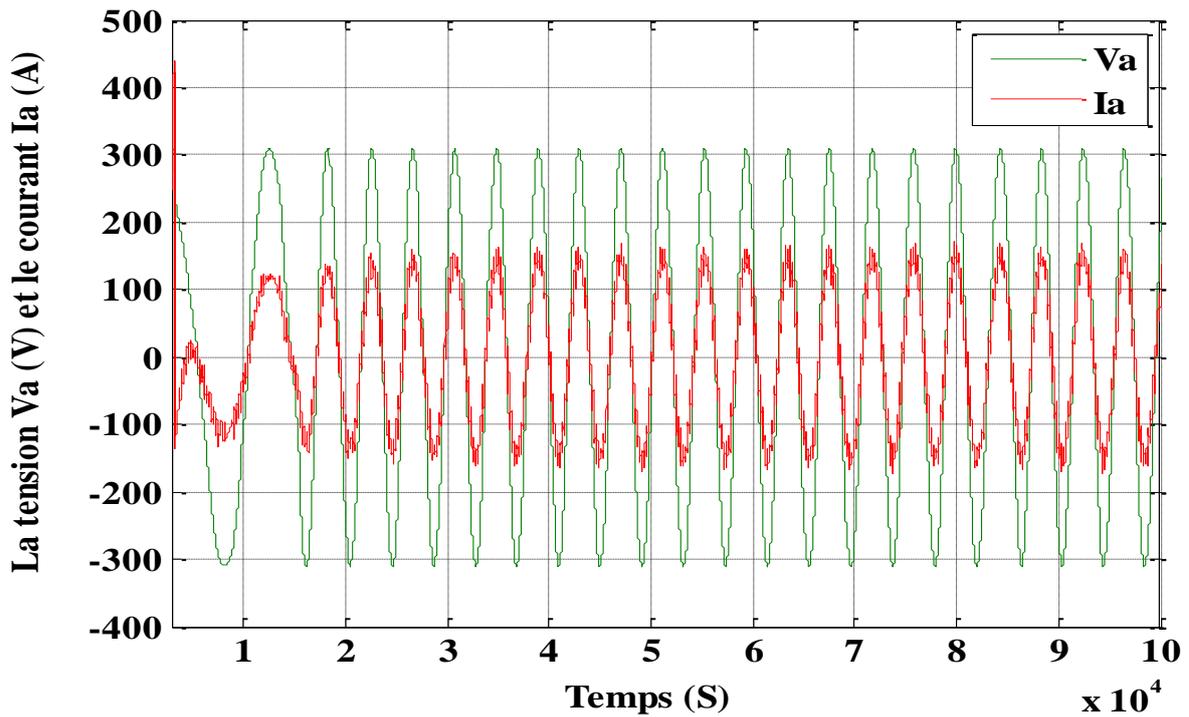


Figure III. 22: La tension et Le courant de phase de côté réseaux

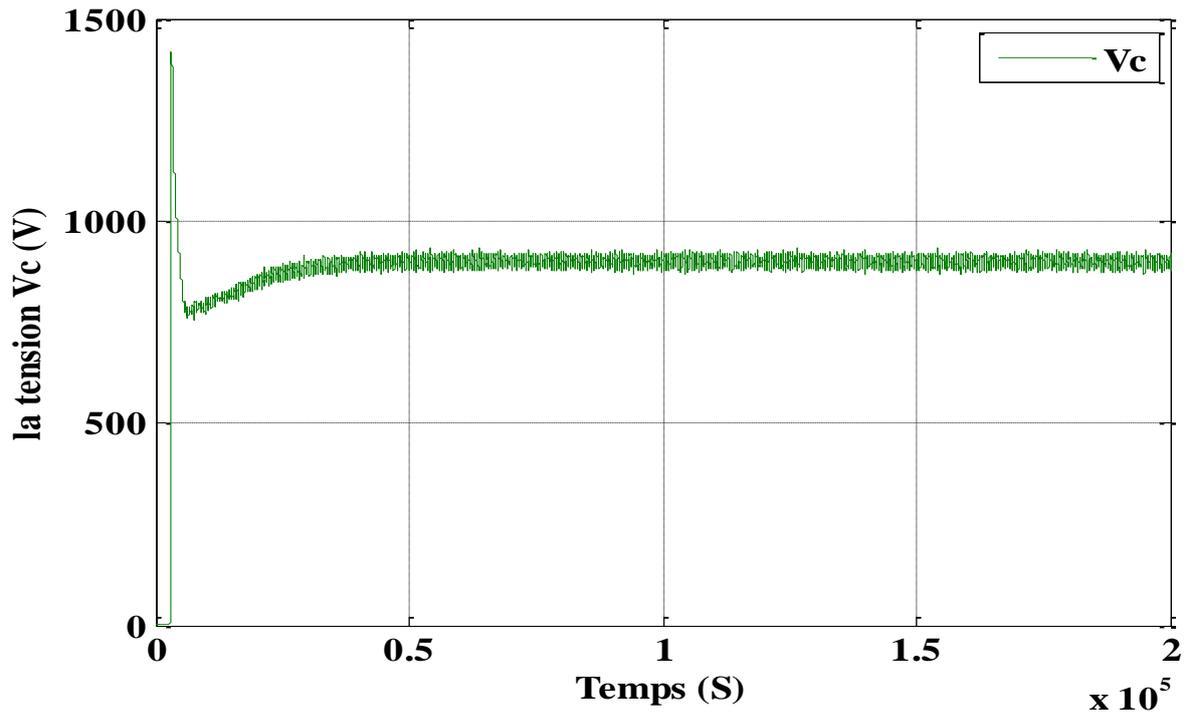


Figure III. 23: La tension de bus continu

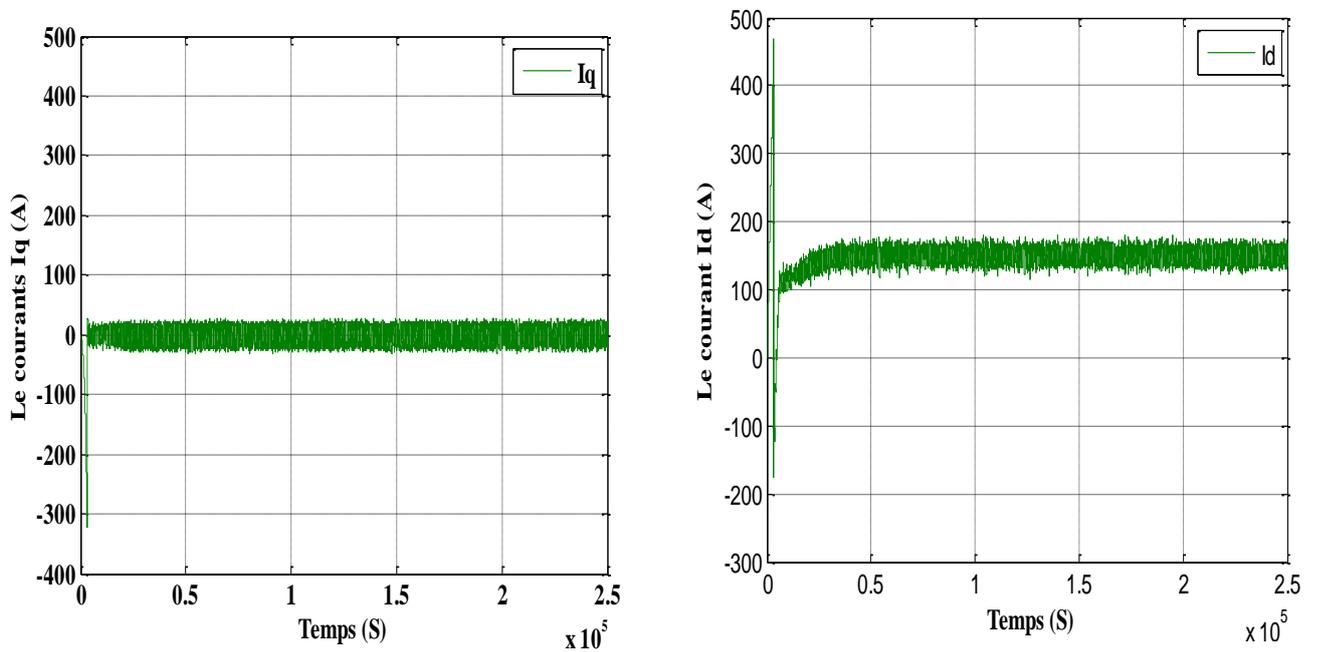


Figure III. 24: Le courant composé dans l'axe d et q

III.4.3.2 : Simulation du système avec onduleur triphasé à trois niveaux

Dans cette partie, on étudie le comportement électrique de commande de système éolienne de côté réseaux avec onduleur triphasé à trois niveaux à base de la machine double alimentation (MADA), le stator de la MADA est directement relié aux réseaux par contre son rotor est connecté à ce dernier via un montage de deux onduleur a trois niveaux entre le CCM et CCR dans ce système relie ou réseaux.

La figure (III.25) est présenté la commande du convertisseur multi niveaux aux réseaux avec appliqué l'onduleur trois niveaux à structure NPC.

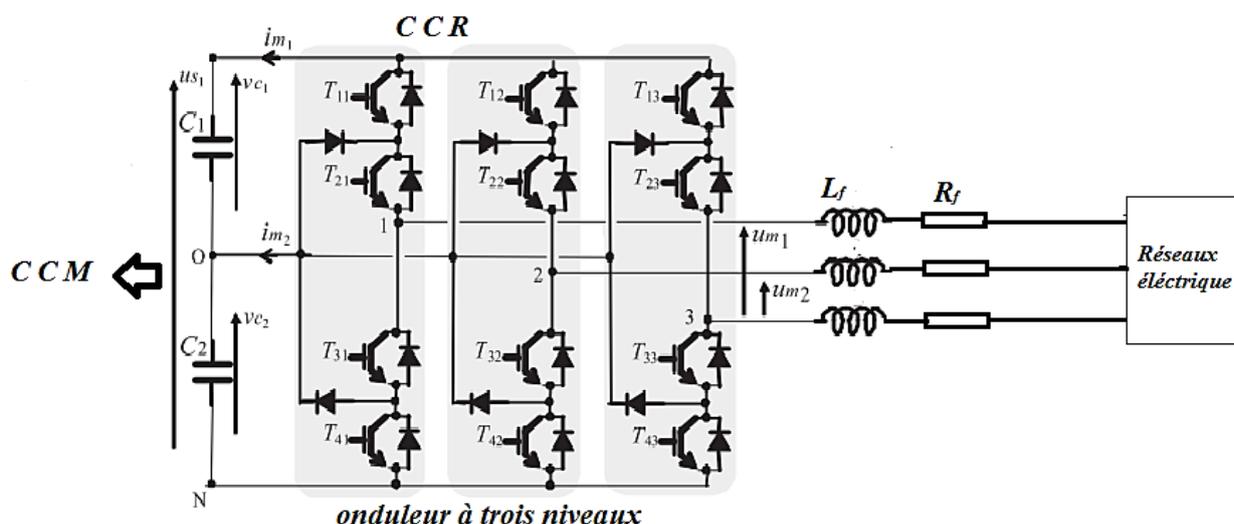


Figure III. 25: commande côté réseaux avec onduleur trois niveaux

III.4.3.2.1 : Résultat de simulation

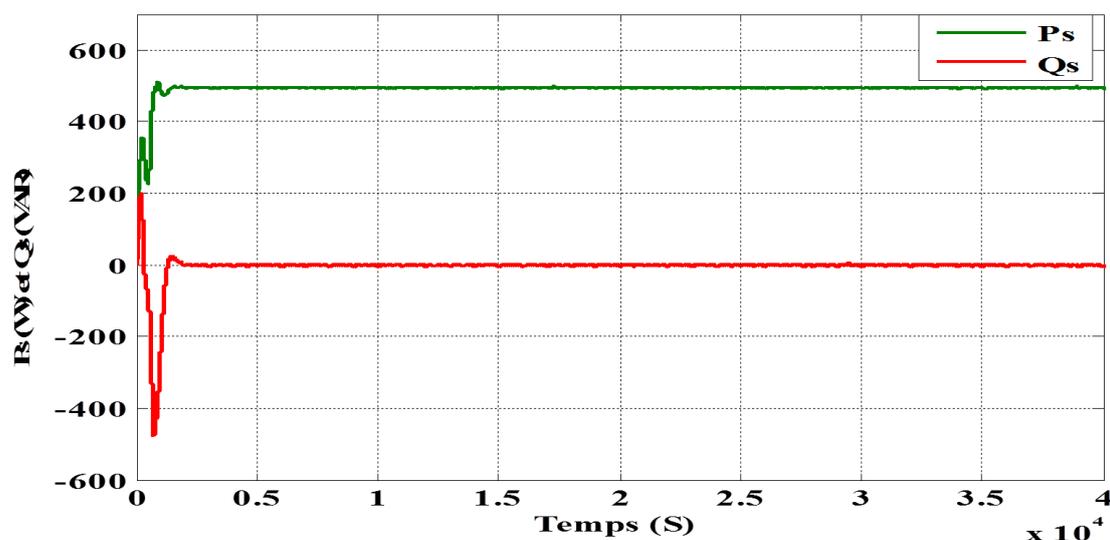


Figure III. 26: la puissance active et réactive côté réseaux

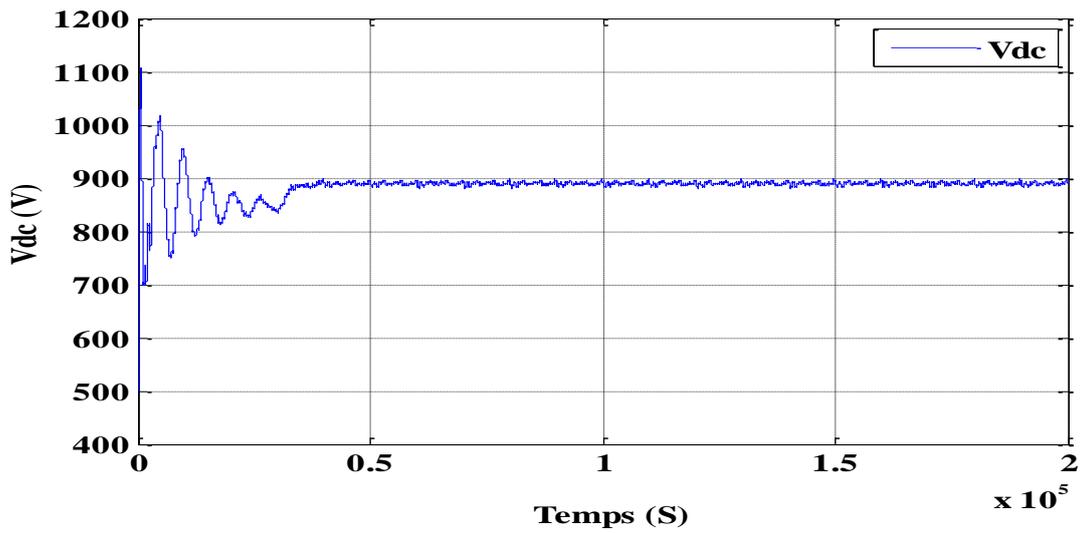


Figure III. 27: la tension du bus continu

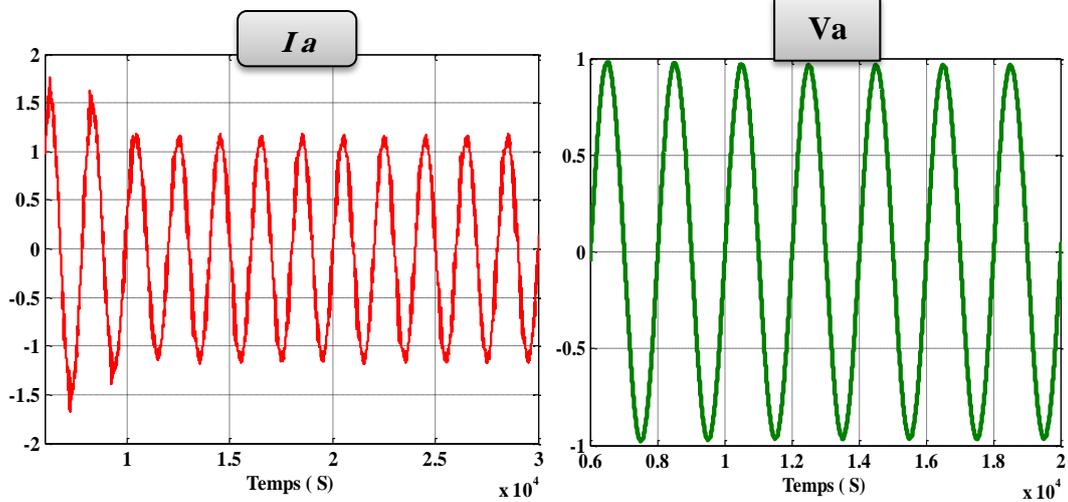
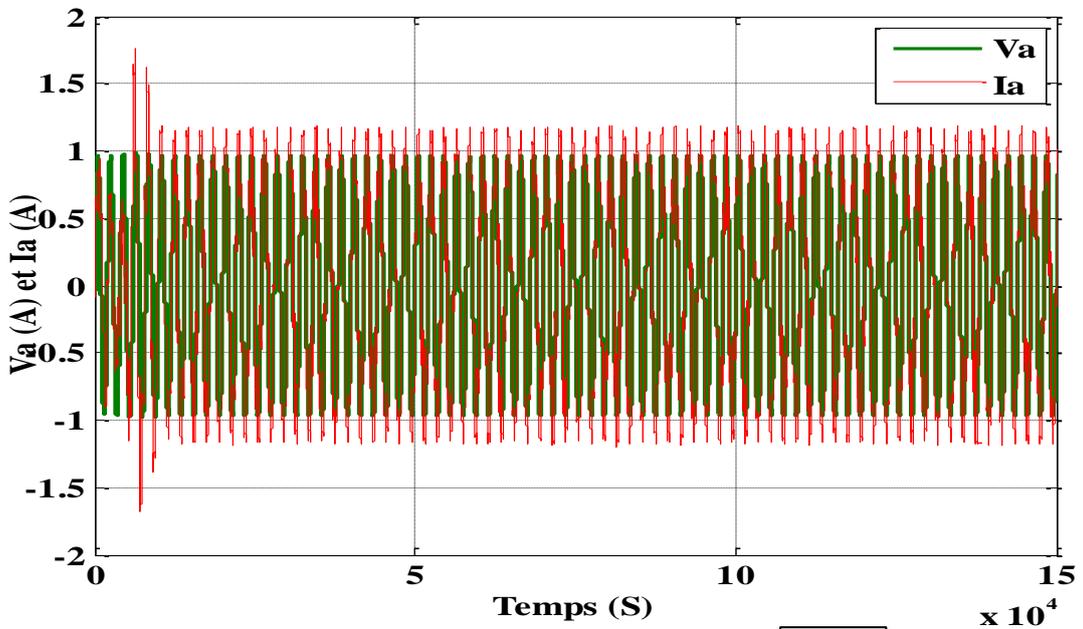


Figure III. 28: la tension et le courant de phase a

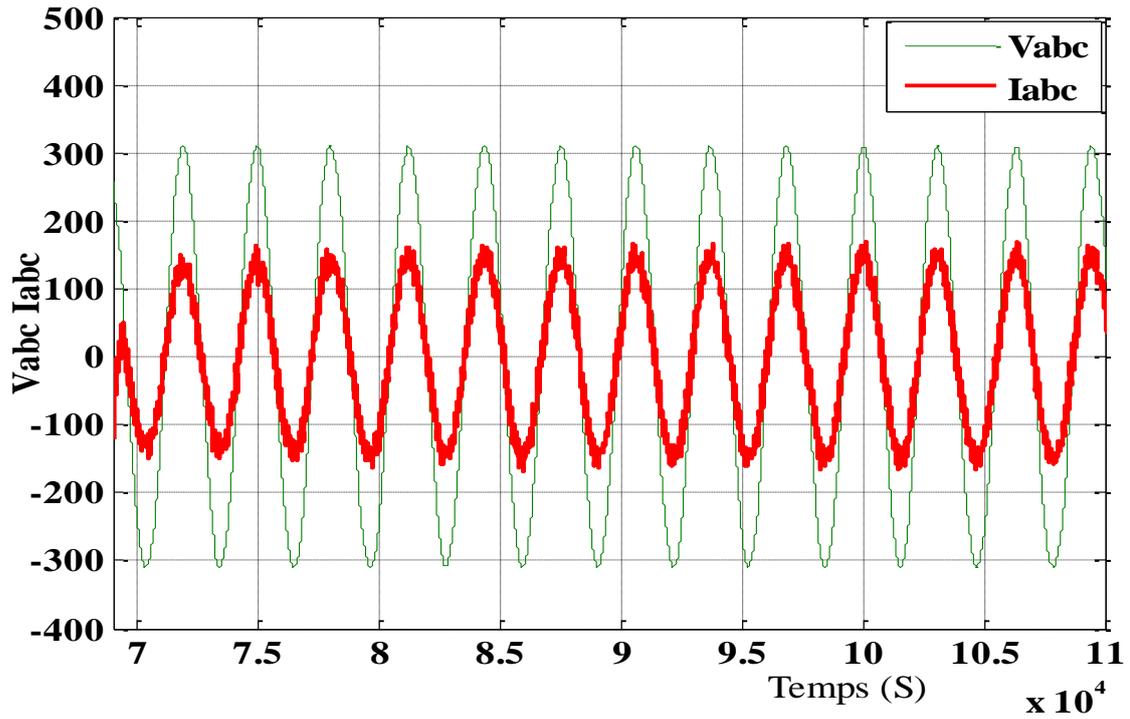


Figure III. 29: la tension et le courant des phase a,b,c

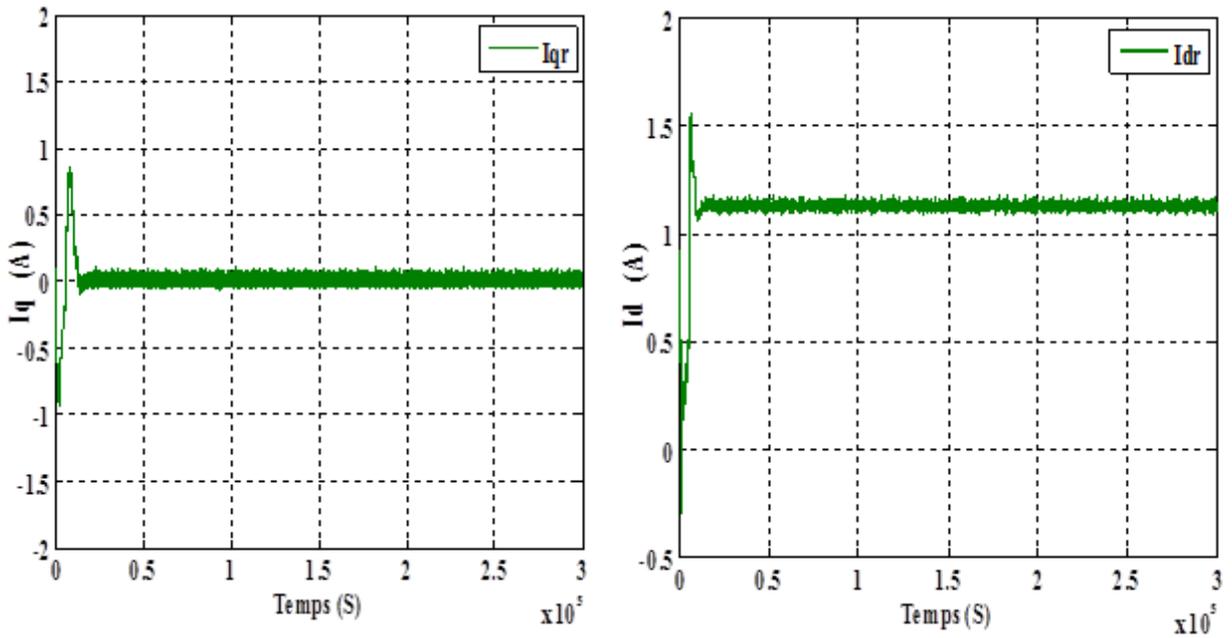


Figure III. 30 : le courant composé Idq

III.4.3.3 : Interprétation des résultats

Ensuite, on a trouvé un bon résultat de la tension et le courant de phase de réseaux qui produit. La tension du bus continu Vdc est maintenue constante.

Nous avons remarqué que la puissance active positive et la puissance réactive est égal à zéro, alors le facteur de puissance il est unitaire ($\cos(\varphi)=1$), Et on en déduit que nous avons atteint le maximum de production d'énergie électrique.

III.5 : Conclusion

Dans Ce chapitre on a traité de la commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une MADA. Dans un premier temps, nous avons expliqué pourquoi ce système éolien est le plus utilisé actuellement, notamment en raison des économies réalisées grâce au faible dimensionnement des convertisseurs multi niveaux.

Ensuite, nous nous intéresserons, Les différentes commandes du CCM et du CCR ont été détaillées pour assurer un contrôle indépendant des puissances active et réactive tout en garantissant un fonctionnement optimal de l'éolienne.

Enfin, afin de valider la modélisation et la commande globale du système éolien, nous avons effectué des simulations pour deux onduleurs triphasés à deux et trois niveaux. Les résultats obtenus ont montré que les puissances actives et réactives du système éolien pouvaient être contrôlées de façon indépendante tout en garantissant une puissance active optimale fournie au réseau électrique quel que soit le mode de fonctionnement.