

CHAPITRE III

CHANGEURS DE FREQUENCES REVERSIBLES

III.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques dispositifs permettant de générer les deux tensions U_{c1} et U_{c2} à partir d'un réseau alternatif 50 Hz. Ainsi on étudiera deux types de changeurs de fréquences réversibles :

- Cascade d'un et deux redresseurs de courant à MLI à deux niveaux – onduleur triphasé à trois niveaux-MAS.
- Cascade d'un redresseur de courant à MLI à trois niveaux – onduleur triphasé à trois niveaux-MAS.

III.2. MODELISATION DU RESEAU ELECTRIQUE

- Mise en équations du réseau

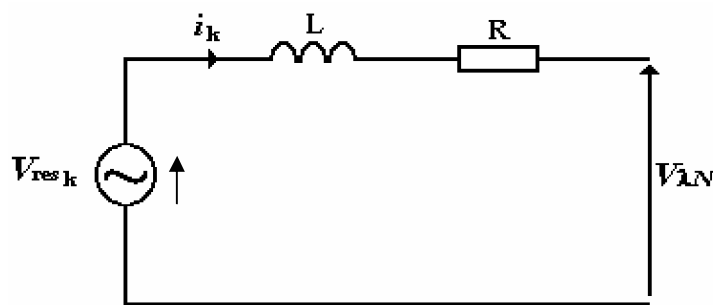


Fig.III.1. schéma équivalent du réseau triphasé

Le réseau est modélisé par une source de tension en série avec une inductance, se comportant ainsi comme une source de courant. Vu que l'inductance du réseau est faible et mal connue, elle est généralement insuffisante pour atténuer l'ondulation du courant. Il est donc nécessaire d'ajouter une inductance **L** et une résistance **R** plus importantes en série, afin de négliger celle du réseau mal connu et de réduire l'effet de leur variation [1].

En appliquant loi des mailles au modèle de la figure (III.1) on trouve :

$$V_{\lambda N} = V_{resk} - R \cdot i_k - L \cdot \frac{di_k}{dt} \quad (III-1)$$

V_{resk} et i_k : respectivement la tension et le courant de la phase k ($k = 1, 2, 3$) du réseau triphasé.

$V_{\lambda N}$ ($\lambda = a, b, c$) : la tension liée au bras k du redresseur qui est en série avec l'impédance du réseau (R et L).

Après la transformation de Laplace, le système prédéfini s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + LS & 0 & 0 \\ 0 & R + LS & 0 \\ 0 & 0 & R + LS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

III.3. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASE

III.3.1. Description [4]

La machine asynchrone triphasée comporte un stator fixe et un rotor mobile autour de l'axe de symétrie de la machine asynchrone. Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques. Leurs axes sont distants entre eux d'un angle égal à $(\frac{2\pi}{3})$.

Les enroulements du stator sont alimentés par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales, à fréquence et amplitude constantes ou par un onduleur de tension ou de courant à fréquence et amplitude réglables. Les enroulements du rotor sont court-circuités.

La figure (III.2) présente les enroulements de la machine asynchrone triphasée dans le repaire (a,b,c).

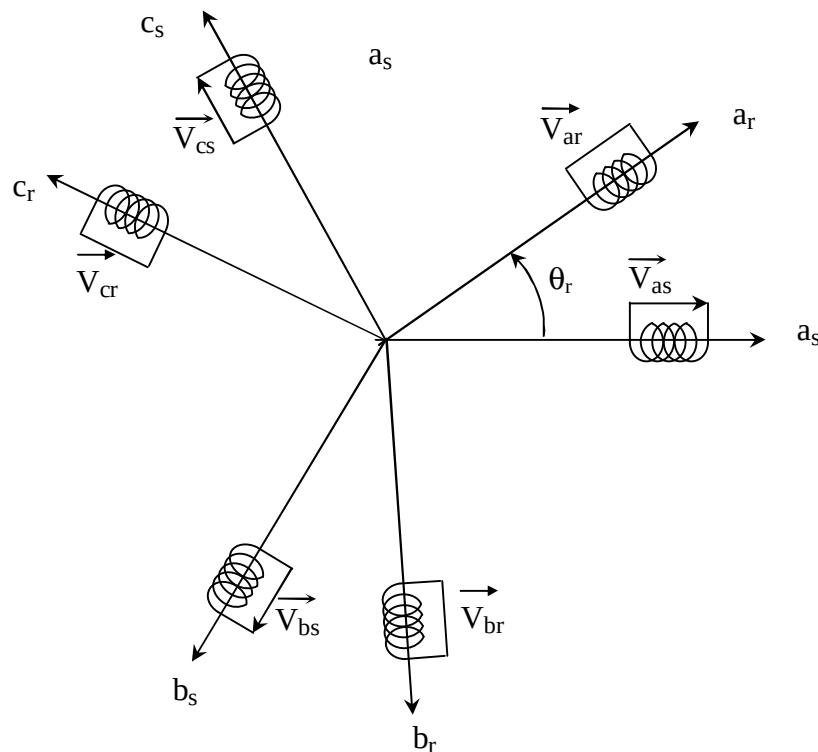


Fig.III.2. Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée dans l'espace électrique.

III.3.2. Hypothèses simplificatrices [5]

- La machine est de constitution symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et le courant de Foucault sont tous négligés.
- Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases est à répartition Sinusoïdale.
- l'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre Les axes rotoriques.

III.3.3. Mise en équation du modèle de la machine

§ Equations électriques

Les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques, qui décrivent le fonctionnement de la machine asynchrone sont : [6]

$$[V_{abcs}] = [R_s] [i_{abcs}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abcsr}] \quad (I.1)$$

$$[V_{abcr}] = [R_r] [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abcr}] = 0 \quad (I.2)$$

Avec :

$$[V_{abcs}] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^t ; [i_{abcs}] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t ; [\Phi_{abcs}] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^t .$$

$$[V_{abcr}] = [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^t ; [i_{abcr}] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t ; [\Phi_{abcr}] = [\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^t .$$

§ Equations magnétiques

Les flux sont donnés par : [6]

$$[\Phi_{abcs}] = [L_{ss}] [i_{abcs}] + [L_{sr}] [i_{abcr}] \quad (I.3)$$

$$[\Phi_{abcr}] = [L_{sr}] [i_{abcs}] + [L_{rr}] [i_{abcr}] \quad (I.4)$$

Ø Modèle de PARK

La transformation de PARK consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe « d » et « q ». Elle est définie par la matrice de transformation suivante P (θ): [7] [8]

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

L'angle (θ) dans la matrice $P(\theta)$, prend la valeur (θ_s) pour les grandeurs statoriques et la valeur ($\theta_s - \theta_r$) pour les grandeurs rotoriques, le modèle de la machine asynchrone après la transformation de PARK est décrit par :

§ Equations électriques

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} (\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \quad (\text{III.3})$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} (\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \quad (\text{III.4})$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} (\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{qr} \quad (\text{III.5})$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} (\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{dr} \quad (\text{III.6})$$

Avec:

$$\omega_r = P \Omega_r$$

§ Equations magnétiques

$$\Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{III.7})$$

$$\Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{III.8})$$

$$\Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{III.9})$$

$$\Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{III.10})$$

Avec:

$L_s = l_s - M_s$: inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$: inductance cyclique rotorique.

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

§ Equation mécanique

$$J \frac{d}{dt} (\Omega_r) = C_{em} - C_r - F \Omega_r \quad (\text{III.11})$$

Différentes formes d'équations du couple :

$$C_{em} = P \left(\frac{M}{L_r} \right) (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{III.12})$$

$$C_{em} = P (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{III.13})$$

$$C_{em} = P (\Phi_{qr} i_{dr} - \Phi_{dr} i_{qr}) \quad (\text{III.14})$$

$$C_{em} = PM (i_{qr} i_{dr} - i_{ds} i_{qs}) \quad (\text{III.15})$$

§ Représentation d'états

$$\frac{d}{dt}x = f(x) + g u.$$

Avec :

$$x = [i_{ds} \ i_{qs} \ \varphi_{dr} \ \varphi_{qr} \ \omega_r]^t, u = [V_{ds} \ V_{qs}]^t.$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -v \cdot i_{ds} + \omega_s \cdot i_{qs} + \frac{k}{T_r} \cdot \varphi_{dr} + k \cdot \varphi_{qr} \cdot \omega_r \\ -\omega_s \cdot i_{ds} - v \cdot i_{qs} - k \cdot \omega_r \cdot \varphi_{dr} + \frac{k}{T_r} \cdot \varphi_{dr} \\ \frac{M}{T_r} \cdot i_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{qr} \\ \frac{M}{T_r} \cdot i_{qs} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \varphi_{dr} - \frac{1}{T_r} \cdot \varphi_{qr} \\ \frac{P^2 \cdot M}{J \cdot L_r} \cdot (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) - \frac{f}{J} \cdot \omega_r - \frac{P}{J} \cdot C_r \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec: } v = \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \cdot \left(R_s + R_r \cdot \left(\frac{M}{L_r} \right)^2 \right); T_r = \frac{L_r}{R_r}; \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r}; k = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r}.$$

III.4. ETUDE DES DEFFERANTES CASCADES :

III.4.1. Redresseur de courant triphasé à deux niveaux

Le redresseur de courant triphasé à deux niveaux constitué de six interrupteurs bidirectionnels, alimenté par une source de courant alternatif. Cette structure est représentée dans la figure (IV.1).

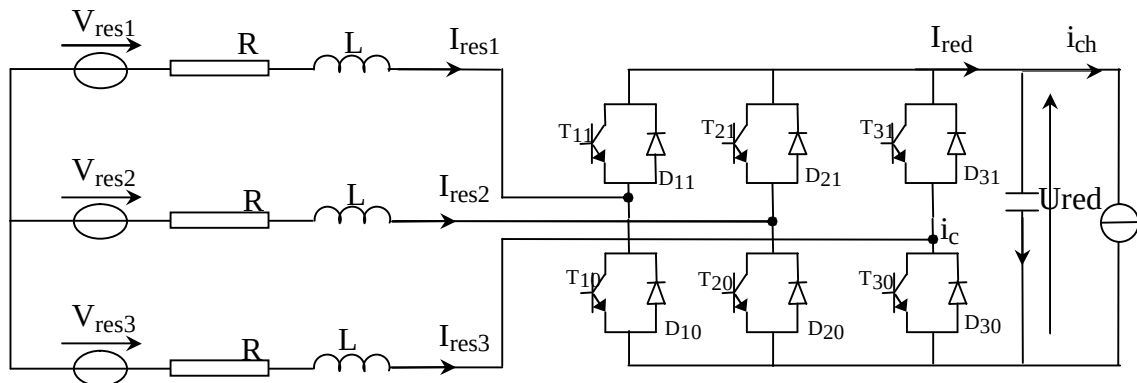


Fig.III.3. Redresseur de courant triphasé à MLI à deux niveaux

Les tensions de réseaux sont définies comme suit:

$$\begin{cases} V_{res1} = V_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot t) \\ V_{res2} = V_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ V_{res3} = V_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3}) \end{cases} \quad (III.16)$$

Pour un redresseur triphasé à deux niveaux, l'algorithme par hystérésis en courant se résume par le système (IV.2).

$$\begin{cases} \text{si } \varepsilon_k \geq \Delta i & \text{alors } B_{k1} = 0 \text{ (ou faux)} \\ \text{si } \varepsilon_k \leq -\Delta i & \text{alors } B_{k1} = 1 \text{ (ou vrai)} \\ \text{si non la commande des semi-conducteurs reste inchangée} \end{cases} \quad (III.17)$$

Avec $\varepsilon_k = I_{refk} - i_k$

Les courants de référence sont donnés comme suit :

$$\begin{cases} I_{ref1} = I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot t) \\ I_{ref2} = I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \\ I_{ref3} = I_{eff} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{res} \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3}) \end{cases} \quad (III.18)$$

III.4.2. CASCADE D'UN REDRESSEUR DE COURANT À DEUX NIVEAUX – ONDULEUR TRIPHASÉ À TROIS NIVEAUX-MAS

La structure générale de cette cascade est montrée dans la figure (III.3). L'onduleur est commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses en dent de scie. Le redresseur est commandé par la stratégie par hystérésis en courant cette stratégie qui assure un courant coté réseau en phase avec la tension donc un facteur de puissance unitaire.

La valeur efficace du courant de référence du réseau triphasé alimentant le redresseur est de 0.6A. Les tensions du réseau ont une valeur efficace de 220V. La cascade alimente le moteur triphasé.

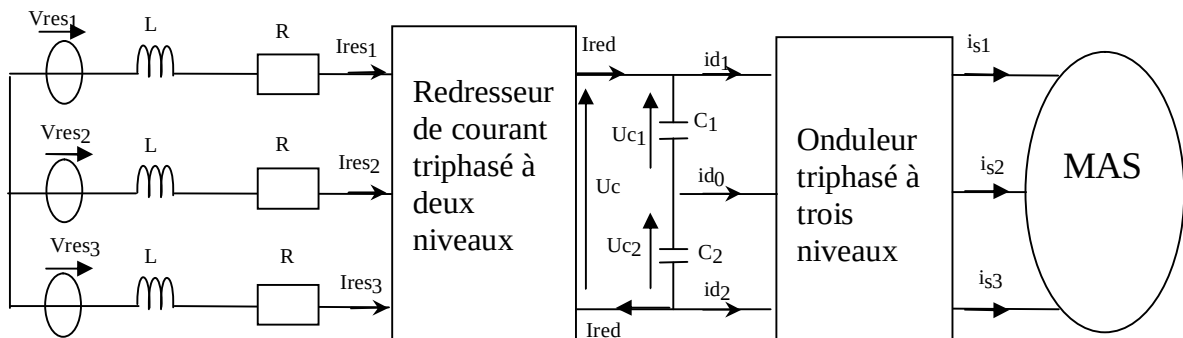


Fig.III.4. Cascade un redresseur de courant triphasé à deux niveaux – onduleur triphasé à trois niveaux ($R=0.25\Omega, L=10mH, C_1=C_2=20mF$).

III.4.2.1. Filtre intermédiaire pour cette cascade

Le modèle du filtre de cette cascade est défini par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{red} - id_1 & (1) \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{red} + id_2 & (2) \end{cases}$$

III.4.2.2. Simulations et interprétations des résultats

Les figures III.5. présentent les différentes grandeurs de la cascade. La figure(a) représente les tensions $uc1$ et $uc2$ qui divergent vers des valeurs très grandes.

Les courants $id1$, $id2$, $id0$ de l'onduleur sont donnés figure (b). Le courant $id0$ à une valeur moyenne nulle.

La figure **c** présente le couple électromagnétique qui a une fréquence deux fois celle de l'onduleur.

Le Courant d'une phase et la vitesse de la MAS sont donnés à la figure (e) et (d) respectivement. La vitesse de synchronisme de la MAS est 1500tr/mn.

Les figures (f) et (g) montrent respectivement le courant redressé, la tension et le courant d'une phase du réseaux, ce dernier alimente le pont redresseur est pratiquement sinusoïdal, le courant de réseau est en phase avec la tension de réseau ce qui équivaut à un facteur de puissance unitaire.

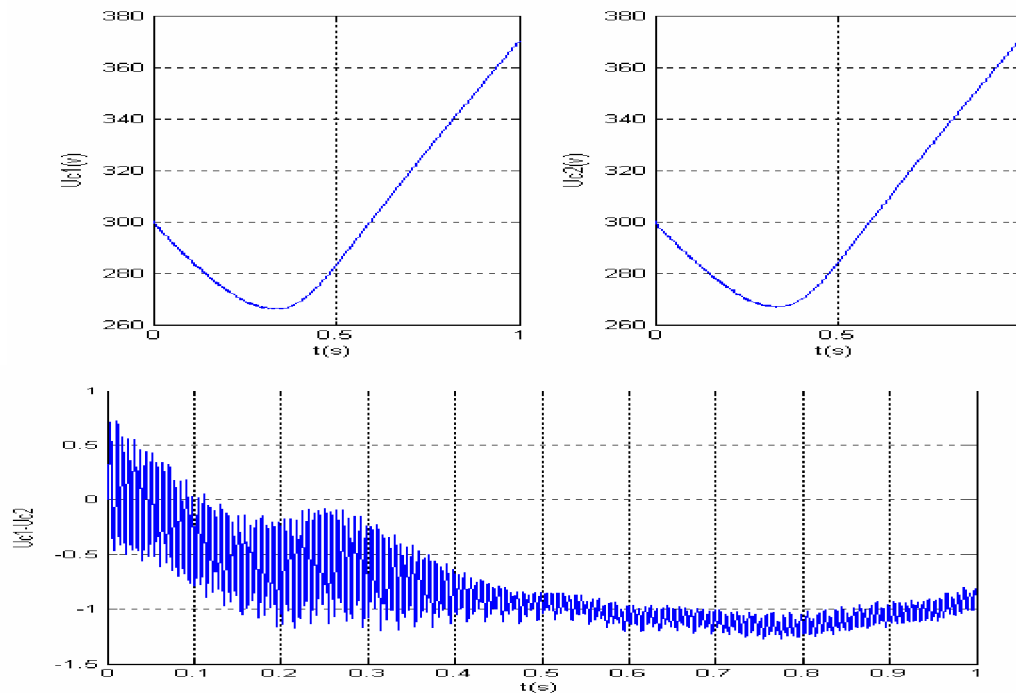


Fig.III.5.a.les tensions $Uc1$ et $Uc2$ et leur différence

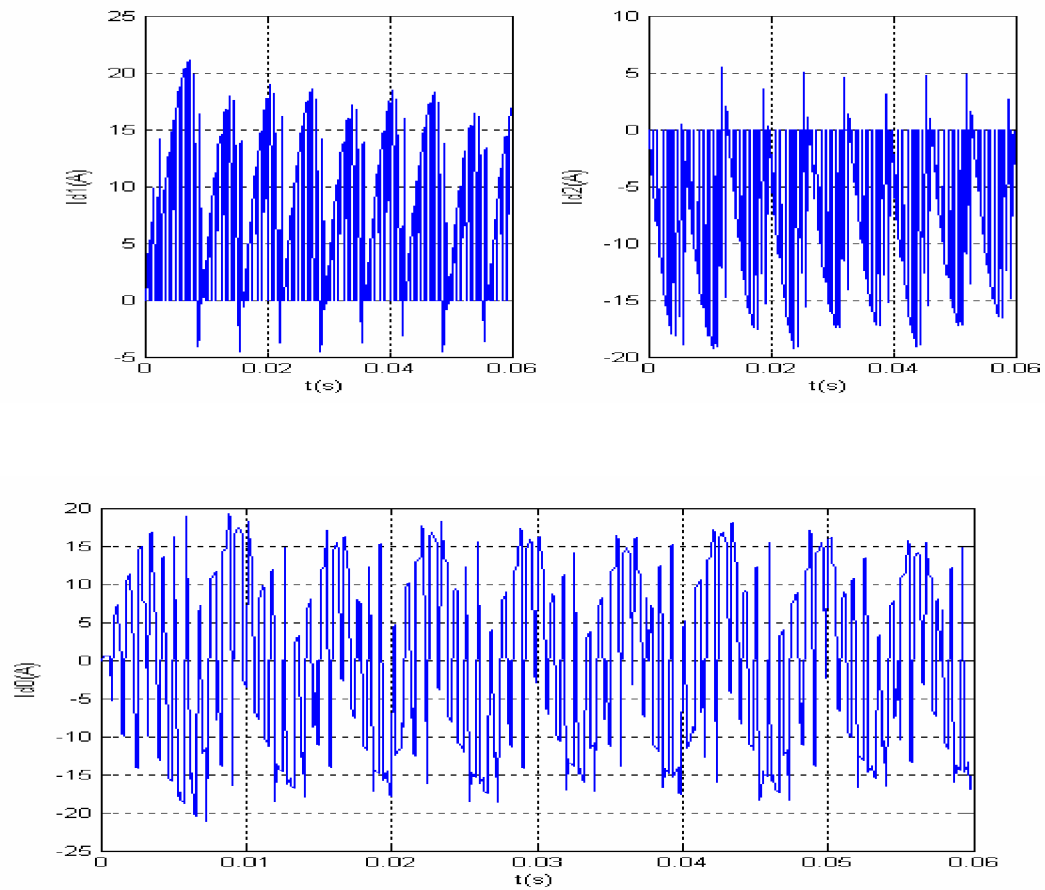


Fig.III.5.b. courants i_{d1} i_{d2} et i_{d0} de l'onduleur triphasée à trois niveaux

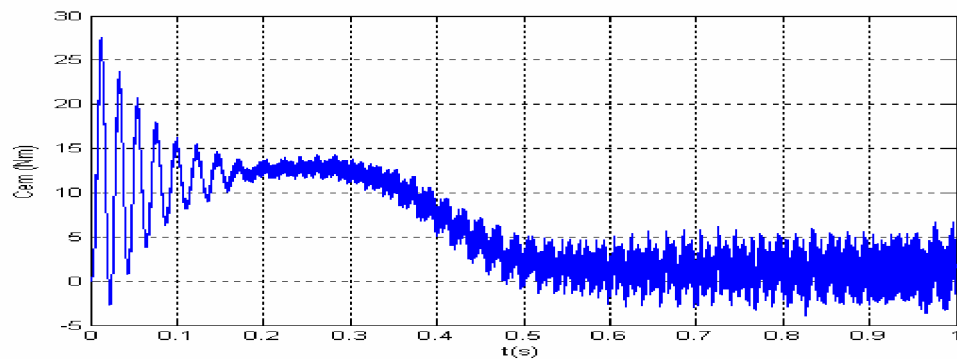


Fig.III.5.c. Le couple électromagnétique de la machine triphasée.

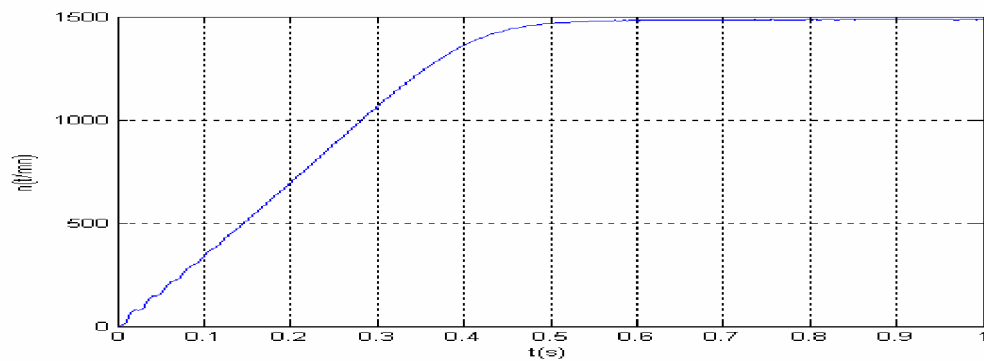


Fig.III.5.d. La vitesse de la machine asynchrone.

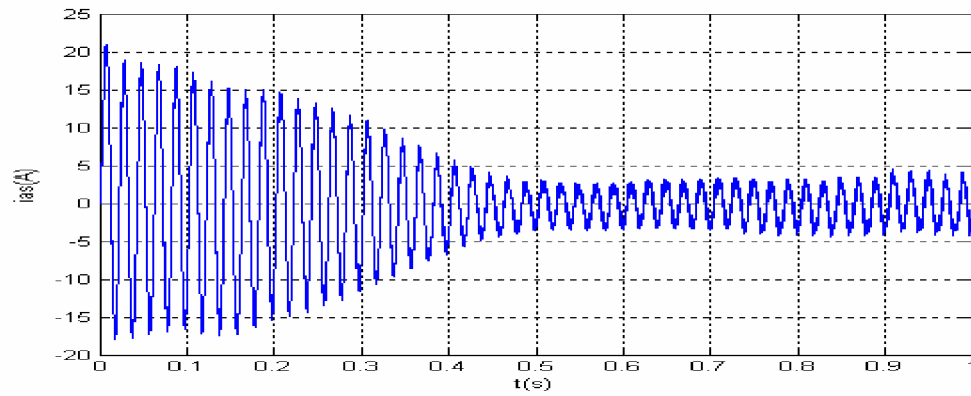


Fig.III.5.e. Courant de la première phase du moteur triphasé.

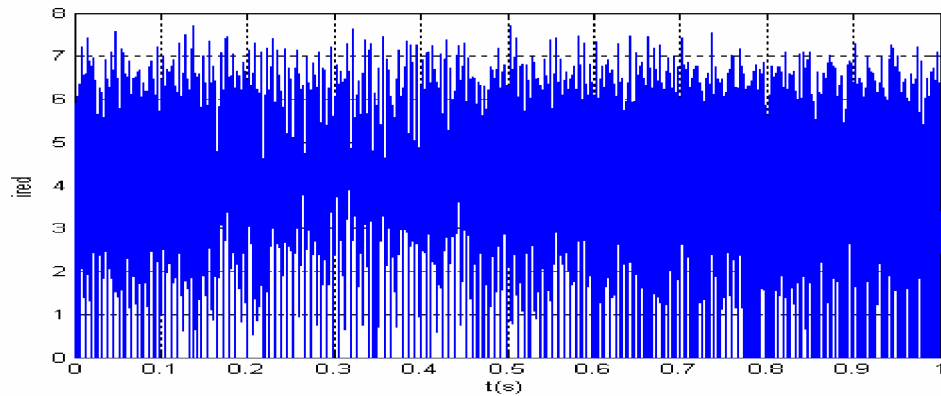


Fig.III.5.f. Le courant redressé I_{red} du redresseur triphasé à deux niveaux.

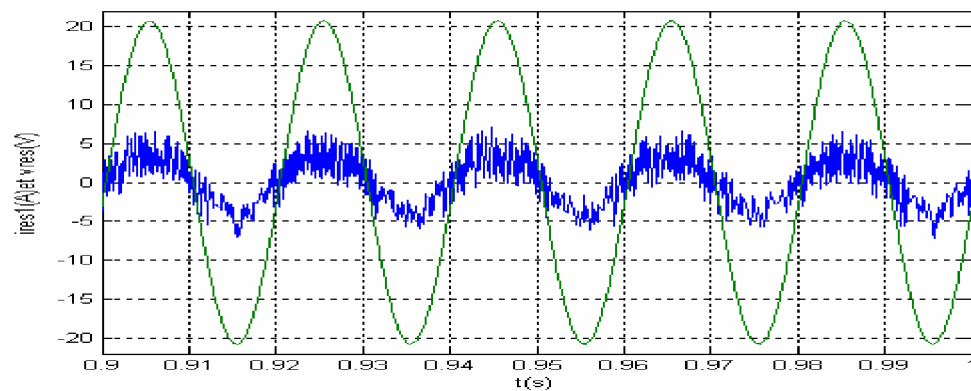


Fig.III.5.g. Courant et tension d'une phase du réseau alimentant le redresseur Triphasé à deux niveaux.

III.4.3. CASCADE DEUX REDRESSEURS DE COURANT À DEUX NIVEAUX – ONDULEUR TRIPHASÉ À TROIS NIVEAUX-MAS

La structure générale de cette cascade est montrée dans la figure (III.5). L'onduleur est commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses en dent de scie. Les deux redresseurs sont commandés par la stratégie par hystérésis en courant

La valeur efficace du courant de référence du réseau triphasé alimentant le premier redresseur est de 0.6A. La même valeur efficace pour les courants de références du réseau alimentant le second redresseur. Les tensions du deux réseaux ont une valeur efficace de 220V. La cascade alimente le moteur triphasé.

III.4.3.1. Filtre intermédiaire pour cette cascade

Le modèle du filtre dans cette cascade est défini par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{red1} - id_1 & (1) \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{red2} + id_2 & (2) \end{cases}$$

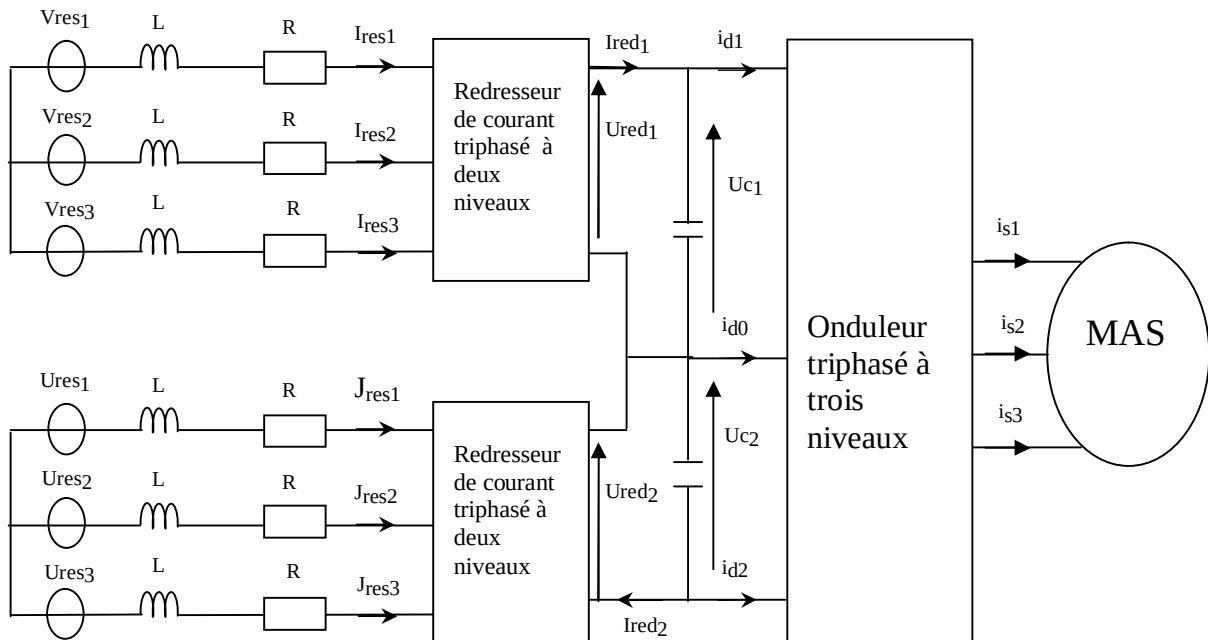


Fig.III.6. Cascade deux redresseurs de courant triphasé à deux niveaux – onduleur triphasé à trois niveaux (R=0.25Ω,L=10mH,C₁=C₂=20mF)

III.4.3.2. Simulation et interprétation

Les différentes grandeurs de cette cascade sont présentées sur les figures (III.7) :

La figure (a) montre le courant d'une phase de la machine asynchrone, qui se stabilise à partir de $t=0.5s$. Le couple et la vitesse de cette dernière, (figure. (b), (c)).

Il n'y a pas de différence entre les deux cascades concernant les deux tension U_{c1} et U_{c2} . La figure (d) montre qu'il y a toujours une divergence vers de grandes valeurs.

Les courants de réseaux d'une phase de chaque redresseur, (figure. (e)) sont en phase avec leurs tensions de réseau qui équivaut à un facteur de puissance unitaire.

Les deux courants redressés I_{red1} et I_{red2} qui ont une valeur moyenne de 4A et I_{d1} , I_{d2} de l'onduleur sont montrés dans les figures (f) et (g) respectivement.

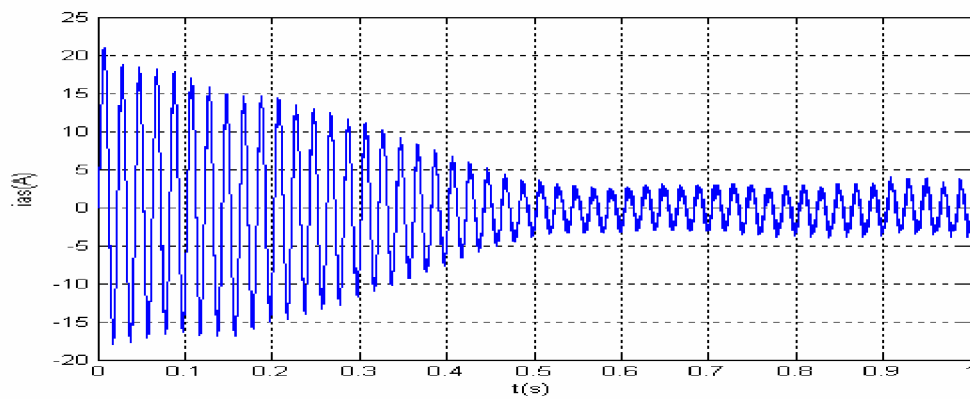


Fig.III.7.a. Courant de la première phase du moteur triphasé.

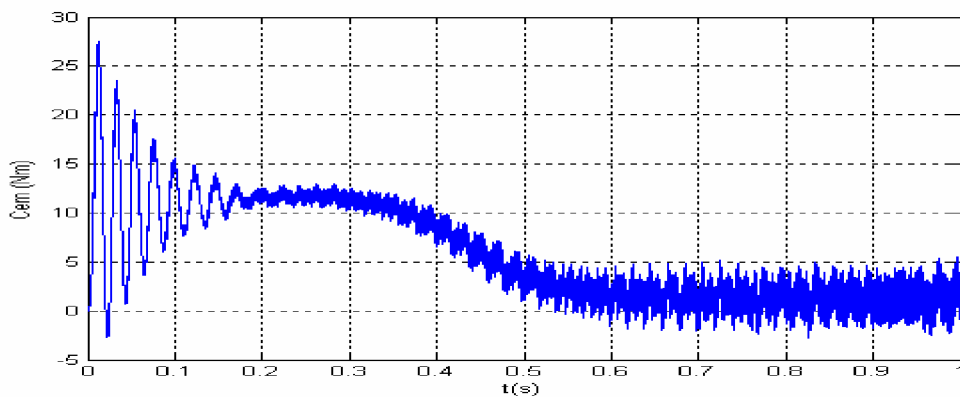


Fig.III.7.b. Le couple électromagnétique de la machine triphasée.

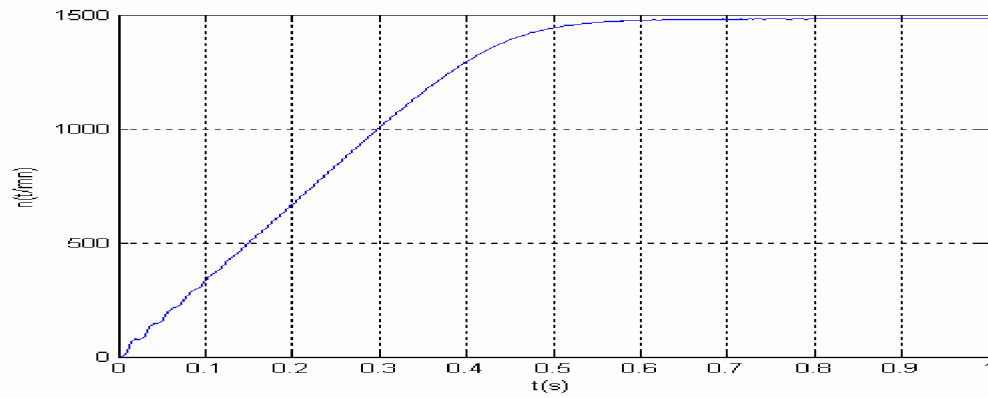


Fig.III.7.c. La vitesse de la machine asynchrone.

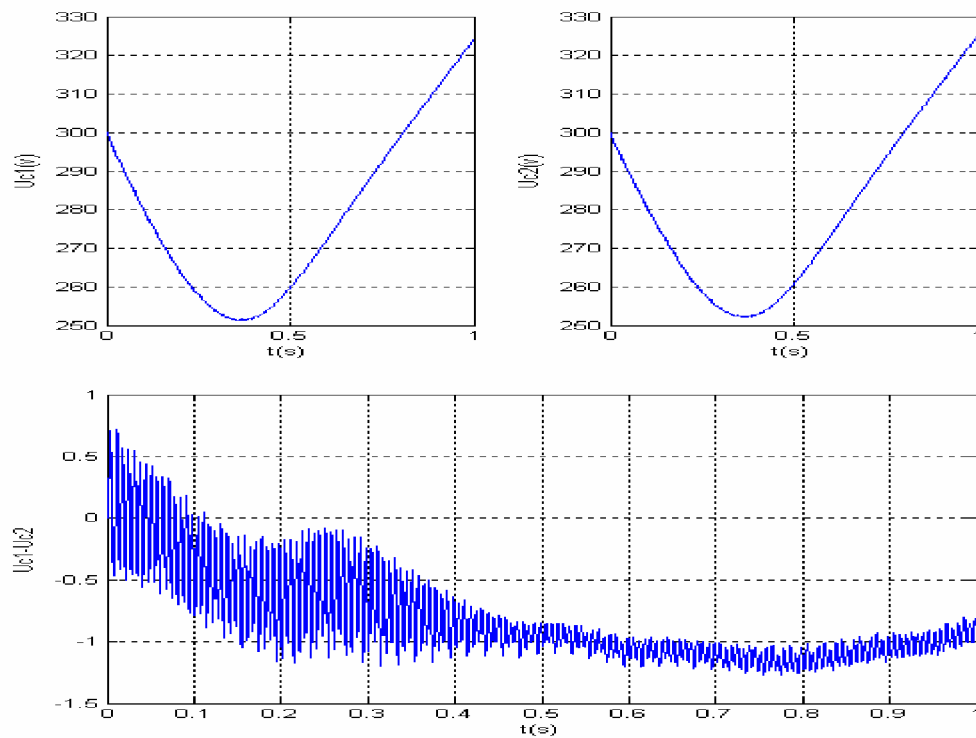
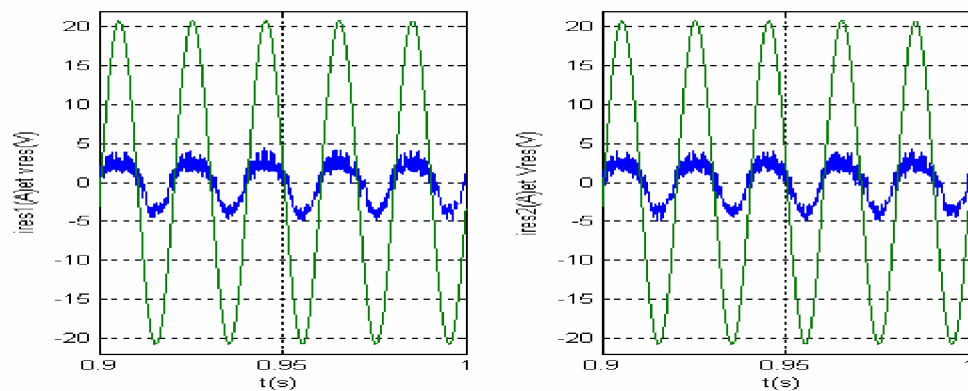
Fig.III.7.d.les tensions $Uc1$ et $Uc2$ et leur différence

Fig.III.7.e. Courant et tension d'une phase des deux réseaux alimentant les redresseurs triphasés à deux niveaux.

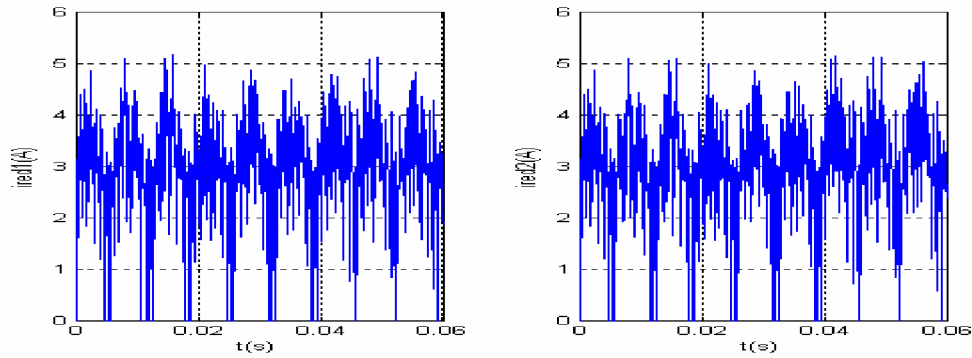


Fig.III.7.f. Les courants redressés I_{red1} , I_{red2} des redresseurs triphasés à deux niveaux.

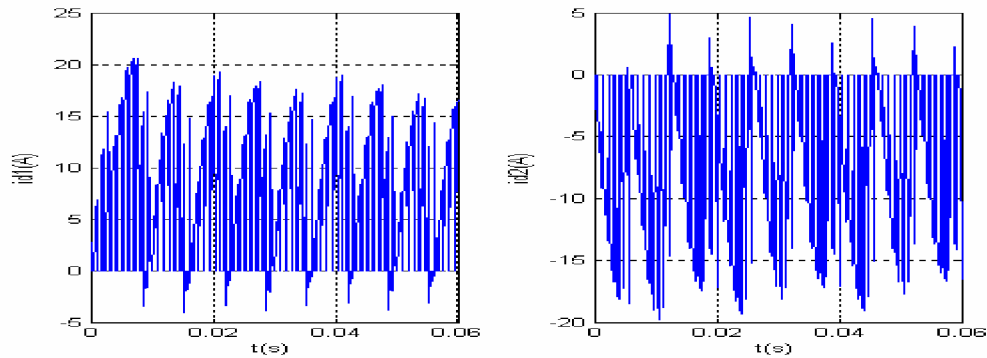


Fig.III.7.g.courants i_{d1} , i_{d2} de l'onduleur triphasée à trois niveaux

III.4.4. CASCADE D'UN REDRESSEUR DE COURANT À TROIS NIVEAUX - ONDULEUR TRIPHASÉ À TROIS NIVEAUX -MAS

La structure générale de cette cascade est montrée dans la figure (III.8). L'onduleur est commandé par la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses en dent de scie. Le redresseur est commandé par la stratégie par hystérésis en courant.

La valeur efficace du courant de référence du réseau triphasé alimentant le redresseur est de 0.6A. Les tensions du réseau ont une valeur efficace de 220V. La cascade alimente le moteur triphasé.

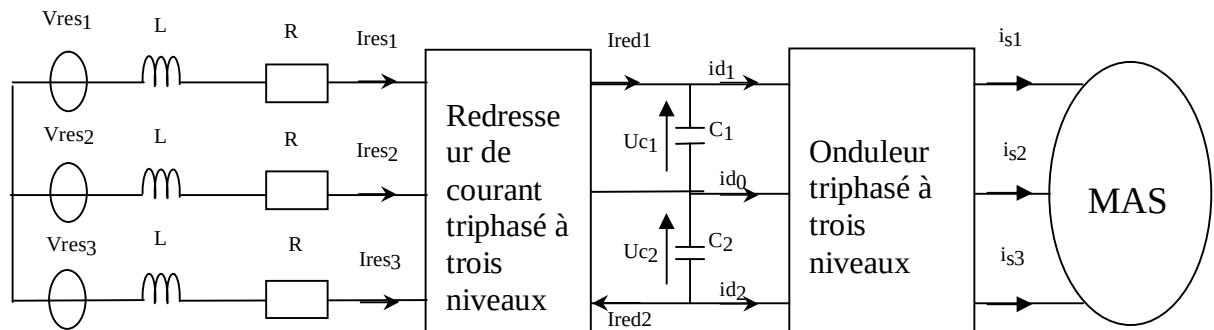


Fig.III.8. Cascade d' un redresseur de courant triphasé à trois niveaux – onduleur triphasé à trois niveaux ($R=0.25\Omega, L=10mH, C_1=C_2=20mF$)

III.4.4.1. Filtre intermédiaire pour cette cascade

Le modèle du filtre dans cette cascade est défini par le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{c1}}{dt} = I_{red1} - id_1 \\ C_2 \frac{dU_{c2}}{dt} = I_{red2} + id_2 \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

III.4.4.2. Simulation et interprétation

Le courant de la première phase de la machine est montré dans la figure (III.9.a). Le couple et la vitesse de la machine sont donnés respectivement aux figures (III.9.b) et (III.9.c). Le couple a une fréquence deux fois celle de l'onduleur.

La figure (III.9.d) montre les deux tensions U_{c1} et U_{c2} . La différence entre les deux tensions est pratiquement nulle.

Le courant du réseau I_{res1} est donné à la figure (III.9.e). Le courant de réseau est en phase avec la tension de réseau ce qui équivaut à un facteur de puissance unitaire.

Les courants redressés I_{red1} et I_{red2} qui possèdent une valeur moyenne de 6A, sont montrés à la figure (III.9.f).

Les courants $id1$, $id2$ de l'onduleur sont donnés à la figure (III.9.g). Les courants $ired0$ et $id0$ de redresseur respectivement de l'onduleur ont une valeur moyenne pratiquement nulle comme le montre la figure (III.9.h).

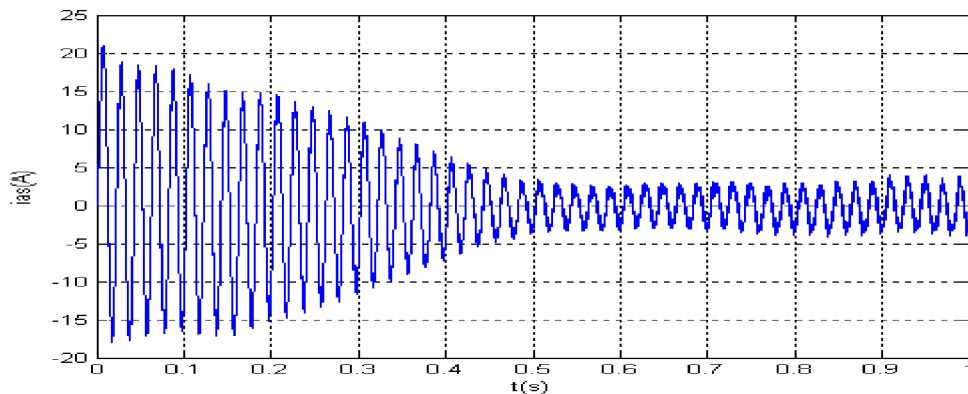


Fig.III.9.a. Courant de la première phase du moteur triphasé.

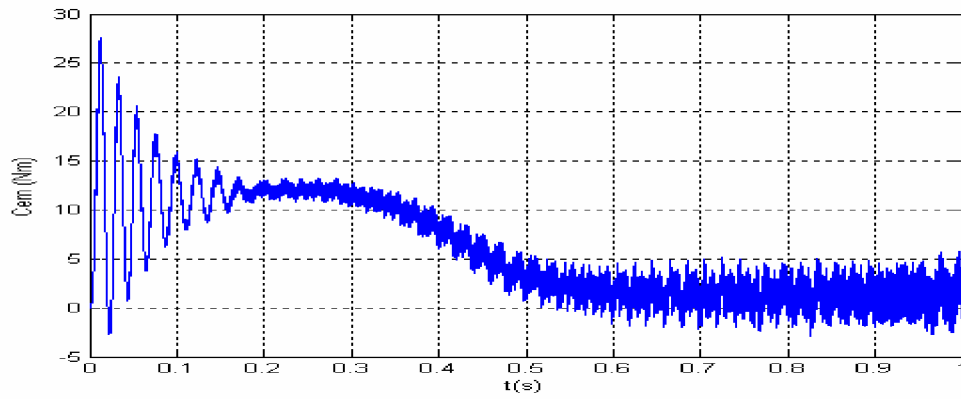


Fig.III.9.b. Le couple électromagnétique de la machine triphasée.

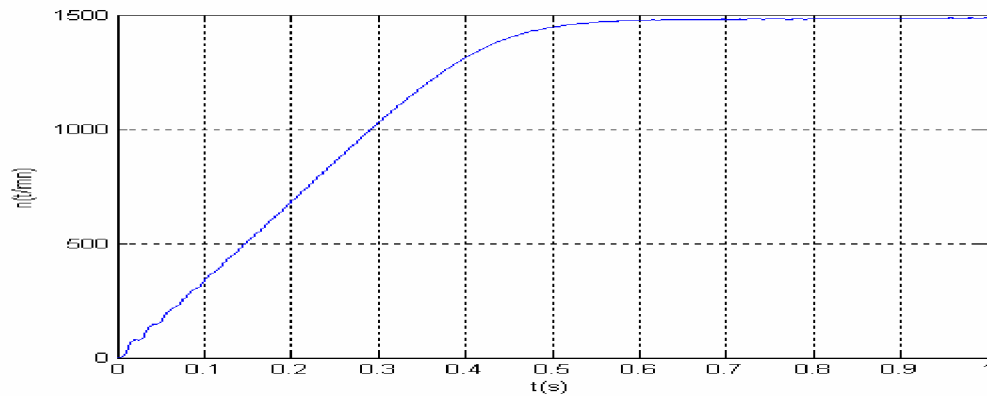


Fig.III.9.c. La vitesse de la machine asynchrone.

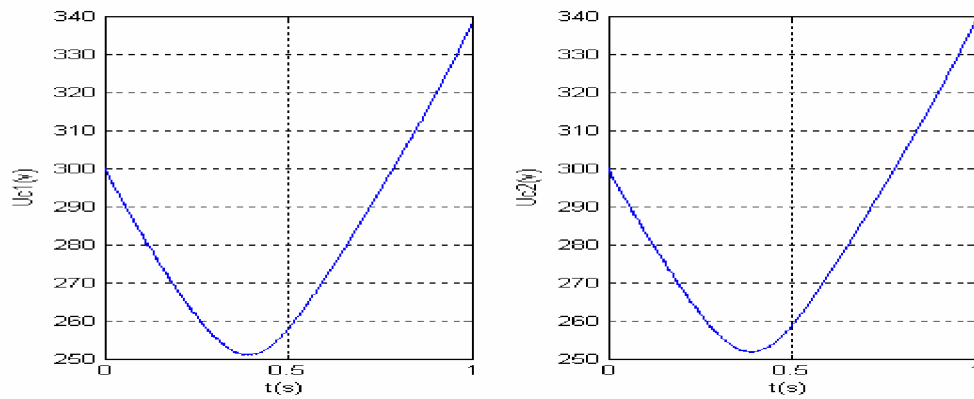


Fig.III.9.d.les tensions U_{c1} et U_{c2}

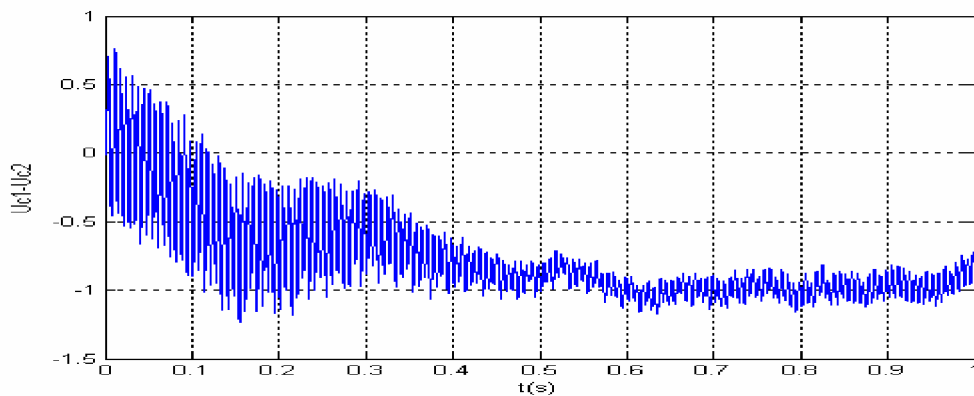


Fig.III.9.dd. la différence entre les deux tensions $U_{c1}-U_{c2}$

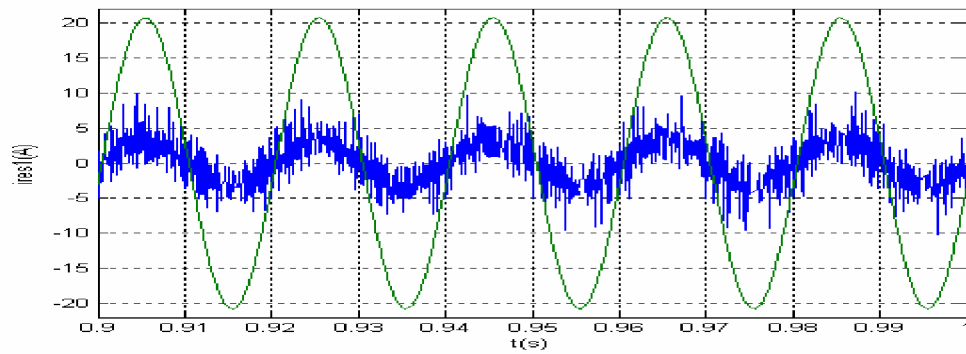


Fig.III.9.e. Courant et tension d'une phase du réseau alimentant le redresseur triphasé à trois niveaux.

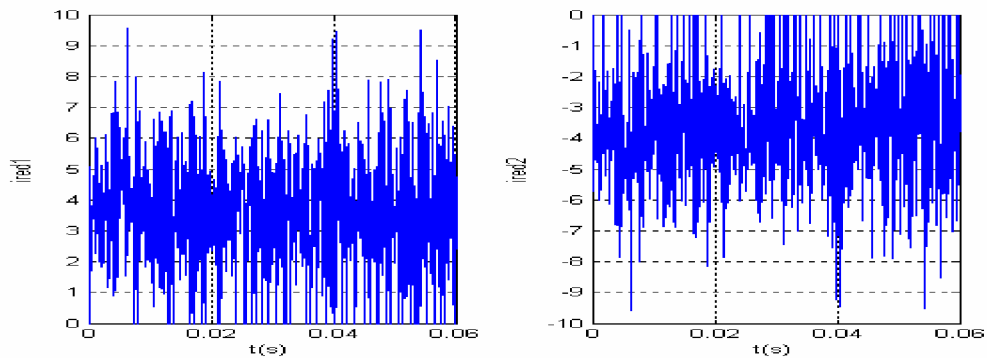


Fig.III.9.f.courants ired1, ired2 de redresseur triphasée à trois niveaux

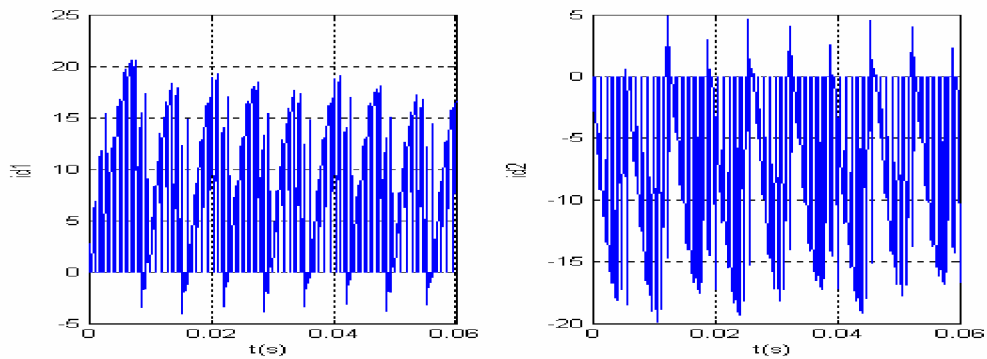


Fig.III.9.g.courants id1, id2 de l'onduleur triphasée à trois niveaux

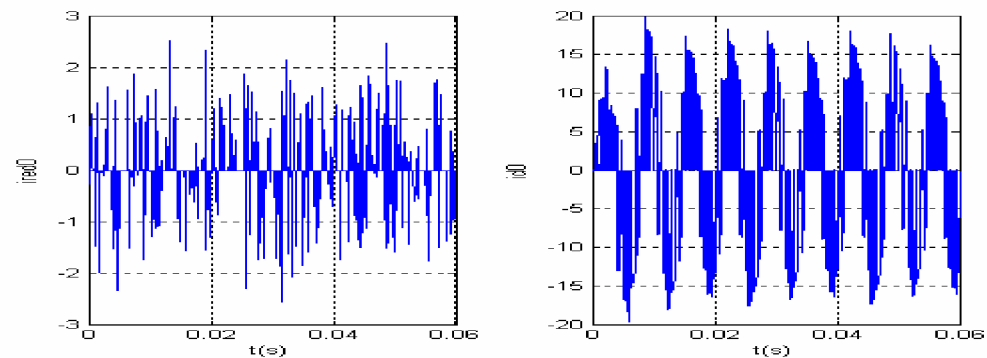


Fig.III.9.h.courants ired0, id0 de redresseur rés. Onduleur triphasé à trois niveaux

III.5. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a étudié différentes cascades ayant l'onduleur triphasé à trois niveaux comme pont de sortie .Ainsi on a présenté les cascades suivantes :

- ü Cascade d'un et deux redresseurs de courant à MLI à deux niveaux – onduleur triphasé à trois niveaux– MAS.
- ü Cascade d'un redresseur de courant à MLI à trois niveaux – onduleur triphasé à trois niveaux– MAS.

Ces cascades utilisant des redresseurs de courant commandés par hystérésis permet d'avoir un courant coté réseau le plus sinusoïdal possible avec un facteur de puissance proche de l'unité. On a rencontré le problème de fluctuation du potentiel du point milieu M du à la dérivé des deux tentions U_{c1} et U_{c2} .la solution de ce problème sera proposé dans le chapitre suivant.

