

## II-I. Introduction:

L'électronique de puissance connaît depuis longtemps un essor très important. A l'heure actuelle, cette discipline du génie électrique touche des domaines d'applications vastes et très divers pour des puissances couvrant une large gamme (de quelques watts à plusieurs centaines de mégawatts).

L'onduleur joue le rôle d'interface entre source d'énergie électrique et consommateur. Il est constitué d'interrupteurs de puissance réalisant la connexion de ses nœuds d'entrée à ses nœuds de sortie, permettant ainsi d'y contrôler le transfert d'énergie. Lorsqu'il permet de commuter chaque entrée ou sortie entre deux niveaux de tension ou de courant, on parle alors d'onduleur à deux niveaux.

L'objectif recherché est d'obtenir une tension ou un courant du réseau s'approchant le plus possible du signal sinusoïdal, ce qui nous mène à l'utilisation d'une nouvelle génération d'onduleurs dits multiniveaux.

Les convertisseurs multiniveaux ont été tout d'abord créés dans le but d'associer des composants pour augmenter la puissance commutable avec les semi-conducteurs disponibles.[13] [15]

Nous allons présenter dans ce chapitre, l'étude d'un onduleur de tension à deux niveaux et ensuite un onduleur multiniveaux à structure NPC, tout en citant leurs stratégies de commande.

## II-2. Différent types d'onduleur multiniveaux:

Plusieurs topologies d'onduleurs multiniveaux existent dans la littérature, les plus rencontrés sont:[16]

- Onduleurs multiniveaux NPC (Neutral Point Clamped)
- Onduleurs multiniveaux multicellulaires.

### II-2.1.Onduleurs multiniveaux multicellulaires

Les onduleurs multiniveaux multicellulaires ont été développés au début des années 90. Parmi les différentes structures de ce type d'onduleurs on peut distinguer le convertisseur multicellulaire de type série et son dual de type parallèle, faisant directement référence à leur structure. Ils ont été imaginés dans le double but de générer une tension de sortie multiniveaux, et de réduire les contraintes en tension sur les composants de puissance.[16]

### II-2.2. Onduleurs multiniveaux NPC:

La structure la plus ancienne est la structure dite NPC ou clampé par le neutre. Dans cette structure, les diodes servent à répartir la tension d'alimentation sur les composants. Elles sont reliées au point milieu capacitif.

Comme on peut avoir une commande asynchrone sur les commutateurs, on peut obtenir des niveaux de tension différents. La structure d'onduleur multiniveaux NPC (Neutral Point Clamped) a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981 afin de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation de moteur.

La structure la plus simple des onduleurs multiniveaux NPC initialement utilisée est celle à trois niveaux. Elle a, par la suite, été étendue pour augmenter la tension et le nombre de niveaux. Un onduleur NPC multiniveaux est composé de trois bras (pour un onduleur triphasé) montés en parallèle et commandés avec un décalage angulaire de  $(\frac{2\pi}{n})$ .

Chaque bras est divisé en deux demi bras et chacun d'eux comporte « n » éléments ou étages montés en série.

Un étage est composé d'un transistor en antiparallèle avec une diode et d'un condensateur. Ainsi, pour l'obtention d'une tension de (n+1) niveaux, (n) capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $\frac{E}{n}$ , E étant la tension totale du bus continu.[16]  
[14]

### II-3. Topologie des onduleurs multiniveaux:

L'apparition des interrupteurs de puissances entièrement commandable à l'ouverture et à la fermeture (tels que MOSFET, GTO et IGBT..) a permis la conception des convertisseurs à plusieurs niveaux. Les onduleurs multiniveaux sont utilisés pour alimenter en moyenne et haute tension (2 à 13KV) et pour le contrôle des machines électriques puissantes et pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Les onduleurs multi-niveaux comme tous équipements électriques présentent certains inconvénients.

- Leur topologie contient un nombre élevé d'interrupteurs statiques;
- Leur contrôle est difficile ;
- Ils exigent plusieurs sources de tension continue, généralement relevées aux bornes des condensateurs, qui ne donnent pas toujours la même valeur de tension.

Malgré ces inconvénients, les onduleurs multiniveaux délivrent une onde de tension avec un taux d'harmonique réduit.[13] [16]

#### II-4. Les avantages et les inconvénients:[16] [13] [15]

Les avantages que présente la topologie NPC, on peut citer:

- La forme d'onde de trois niveaux résultante a une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux, voire inexistant.
- Elle est configurable de façon à obtenir un nombre élevé de niveaux , permettant de réduire la tension bloquée par chaque interrupteur  $\frac{E}{n}$ .

Et parmi ses inconvénients :

- Lorsque le nombre de niveaux est supérieur à trois, l'équilibre des tensions aux bornes des condensateurs devient très complexe voire impossible, car il est intimement lié au facteur de puissance de la charge et à l'indice de modulation.
- L'inégalité de commutations entre les interrupteurs situés à l'extérieur de la structure par rapport aux autres.
- Le déséquilibre des tensions aux bornes des condensateurs lors de leur mise en série.
- La structure NPC est généralement utilisée pour des onduleurs à trois niveaux, car en augmentant le nombre de niveaux la commande devient très complexe, non seulement elle doit fournir les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, mais aussi assurer la stabilité des sources intermédiaires.

#### II-5. Commandabilité de l'onduleur NPC à trois niveaux:

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur. Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et non plus des commandes internes (grandeurs électriques). Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée. De ce fait, on peut définir les fonctions de connexion.[13] [17]

##### II-5.1. Présentation générale de l'onduleur triphasé NPC à trois niveaux:

Cette structure est représentée sur la figure (II.1) le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1, C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux.

La tension totale du bus continu vaut  $E$ ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $E/2$  à leurs bornes: c'est l'hypothèse que l'on retiendra par la suite.

Cette structure se compose de trois bras, chacun des trois bras (A, B et C) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés ( $K_{A1}$ ,  $K_{A2}$ ,  $K_{A3}$  et  $K_{A4}$  pour le bras A) et deux diodes de clamp ( $Dcl_{A1}$  et  $Dcl_{A2}$ ) connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

Dans ces onduleurs (NPC), les diodes connectées au point milieu de la source de tension protègent les interrupteurs externes contre des tensions excessives.

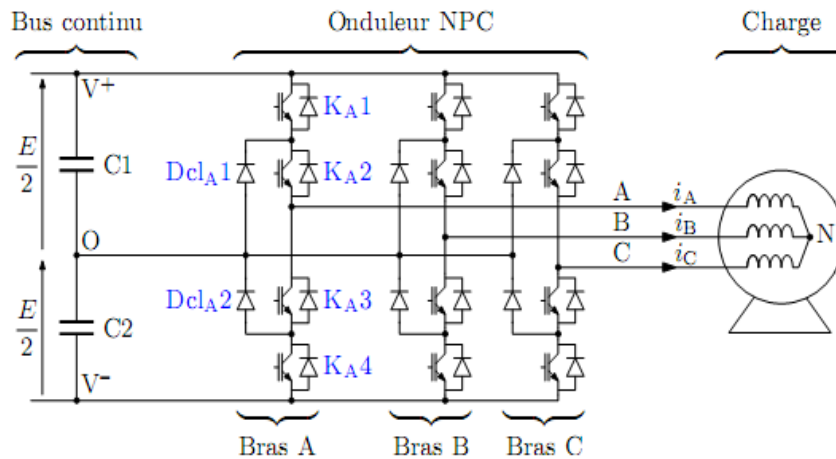
L'application des règles d'interconnexions des sources nous conduit aux règles suivantes :

- $K_{A2}$  et  $K_{A4}$  : ne doivent jamais être ouvert au même temps pour ne pas ouvrir la source de courant.
- $K_{A2}$  et  $K_{A4}$  : ne doivent jamais conduire en même temps pour ne pas court-circuiter la source flottante  $E/2$ .
- $K_{A1}$  et  $K_{A3}$  : ne doivent jamais être ouvert en même temps pour ne pas ouvrir la source de courant,
- $K_{A1}$  et  $K_{A3}$  : ne doivent jamais conduire en même temps pour ne pas connecter deux sources de tensions de valeurs différentes  $E$  et  $E/2$ .

Ces règles nous permet de conclure que :

$K_{A1}$  et  $K_{A3}$  forment une cellule de commutation et  $K_{A2}$  et  $K_{A4}$  forment une deuxième cellule de commutation.

Comme la charge est un réseau électrique à courant alternatif, les semi-conducteurs requis sont composés d'un transistor IGBT et d'une diode antiparallèle. Des diodes additionnelles notées  $Dc1i1$  et  $Dc1i2$  sont utilisées pour connecter un potentiel de chaque IGBT au point milieu, permettant ainsi l'obtention du zéro de la tension  $V_0$ . [13][17].



**Fig. II-1 :** Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.

**II-5.2. Différentes configurations d'un bras d'onduleur NPC à trois niveaux:**

Une analyse topologie d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux figure (V.2) montre qu'il existe cinq configuration possible.[13]

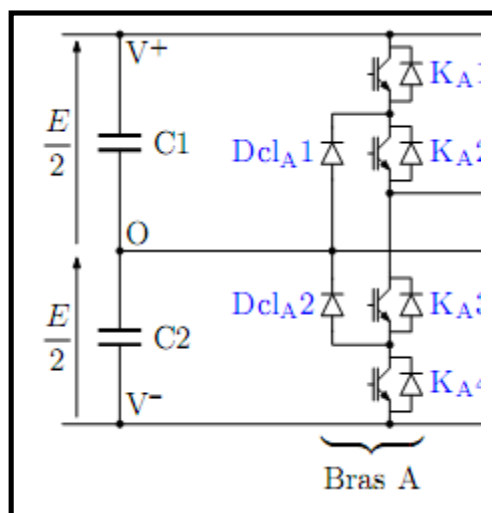
Ces différentes configurations sont représentées dans le tableau (V.1) qui donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations.

Avec :

« O » Origine des potentiels.

« K » Nombre de bras.

«  $V_K$  » Différence de potentiel entre le bras K et le point fictif 'O'.



**Fig. II-2 :** structures d'un bras de l'onduleur à trois niveaux à structure NPC

Pour simplifier on prend un seul bras (A) et par la suite la même procédure sera appliquée pour les autres bras.

**Première configuration  $E_0$  :**

Tous les interrupteurs de bras (A) sont ouverts :  $V_1 = 0$ .

**Deuxième configuration  $E_1$  :**

Les interrupteurs  $K_{A1}$  et  $K_{A2}$  de bras (A) sont fermés :  $V_1 = E/2$ .

**Troisième configuration  $E_2$  :**

Les interrupteurs  $D_{clA1}$  et  $K_{A2}$  de bras (A) sont fermés :  $V_1 = 0$ .

**Quatrième configuration  $E_3$  :**

Les interrupteurs  $K_{A3}$  et  $K_{A4}$  de bras (A) sont fermés :  $V_1 = -E/2$ .

**Cinquième configuration  $E_4$  :**

Les interrupteurs  $D_{clA2}$  et  $K_{A3}$  de bras (A) sont fermés :  $V_1 = 0$ .

Configuration	Grandeur électrique
$E_0$	$V_1 = 0$
$E_1$	$V_1 = E/2$
$E_2$	$V_1 = 0$
$E_3$	$V_1 = -E/2$
$E_4$	$V_1 = 0$

**Tableau II.1 :** Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration possible d'un bras k.

## II-6. Modélisation de l'onduleur multiniveaux:

Les exigences relatives au bon contrôle de ces structures passent nécessairement par une étape de modélisation dont le principe est fortement lié à la topologie de ces nouvelles associations. Une particularité de ces onduleurs réside dans le fait que les harmoniques du courant d'entrée, qui bien que leurs amplitudes soient très faibles devant la valeur moyenne, régissent l'évolution de l'état de l'onduleur [13] [18].

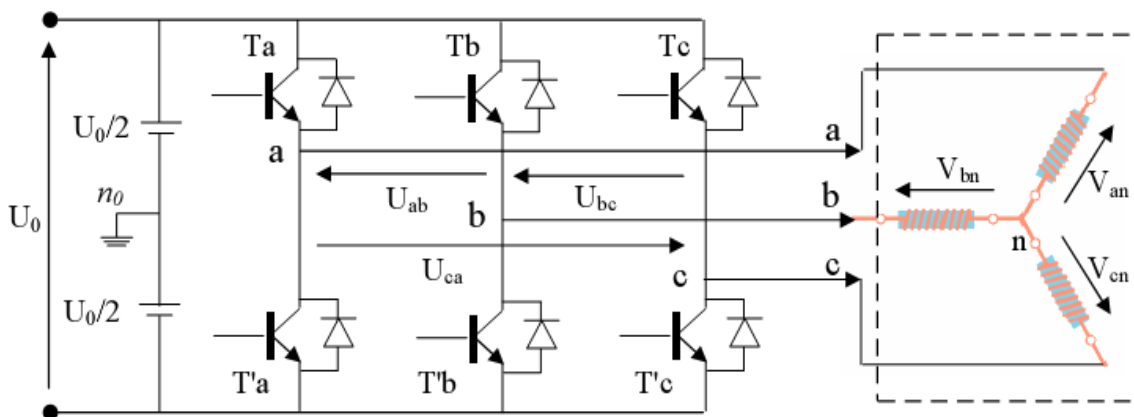
### II-6.1. Hypothèses simplificatrices:

Les hypothèses nécessaires à la mise en équations sont les suivantes [16] [17] :

- Les interrupteurs sont idéalisés (tension de saturation, courant de fuite et temps de commutation nuls).
- Les interrupteurs étant parfaits, les temps morts sont supposés nuls.
- Les inductances de liaison des cellules sont dimensionnées pour limiter les variations du courant commuté par chaque cellule, ces courants seront supposés constants sur une période de découpage.
- Les variations des courants moyens des cellules seront supposées lentes vis-à-vis de la fréquence de découpage ainsi que les cellules du courant de sortie.
- La source d'alimentation  $E$  est supposée constante.

### II-6.2. Modélisation de l'onduleur de tension:

Nous considérons que la machine synchrone est couplée en étoile. Les tensions d'entrée de l'onduleur ( $V_{A0}$ ,  $V_{B0}$ ,  $V_{C0}$ ), sont référencées par rapport à un point milieu d'un pont diviseur fictif d'entrée  $O$ . Le neutre de la machine n'est pas connecté au point milieu  $O$  de l'onduleur, par conséquent la somme des courants des phases statoriques est nulle. Dans ce cas la mesure de deux courants de phase suffit. La figure (II.3) illustre la structure de l'onduleur triphasé[5].



**Fig. II-3** : Schéma de l'onduleur triphasé

Pour modéliser l'onduleur de tension Fig(II.3), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être réalisée par deux générateurs de F.E.M égale à  $U_0/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

La machine a été modélisée à partir des tensions simples notées  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  les transistors (supposés des interrupteurs idéaux), on a :

Si  $S_i = 1$ , Alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert

Si  $S_i = 0$ , Alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = \left(\frac{1}{3}\right) [U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n0$  :

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \left(\frac{1}{3}\right) [V_{an0} + V_{bn0}] \quad (\text{II.4})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow S_i$  ( $i=a,b,c$ ) on a:

$$V_{in0} = S_i \cdot U0 - \frac{U0}{2} \quad (\text{II.5})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5) U0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5) U0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5) U0 \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

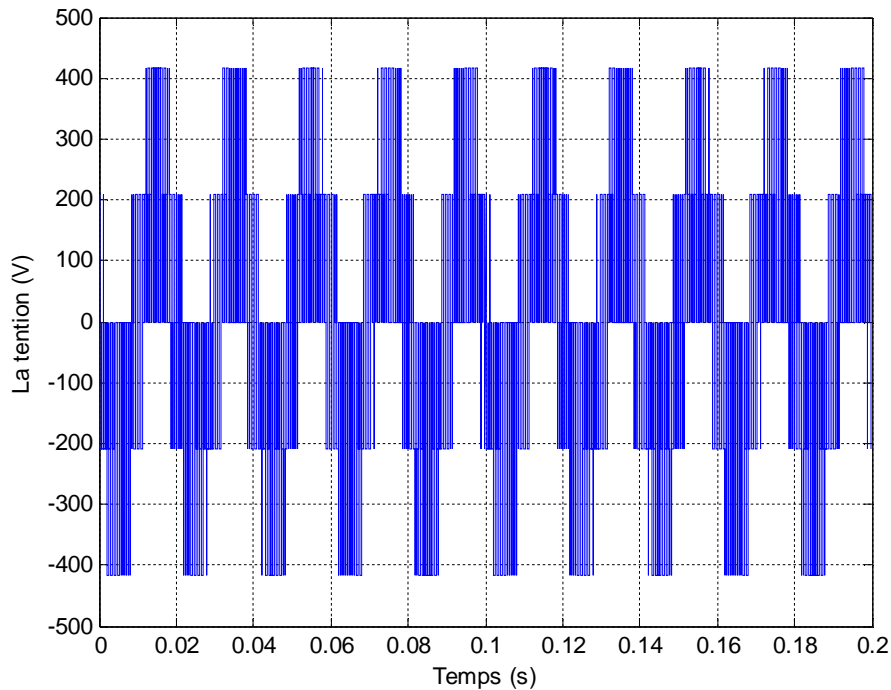
En remplaçant (II.4) dans (II.3), on obtient :



$$\begin{cases} Van = \frac{2}{3}Van0 - \frac{1}{3}Vbn0 - \frac{1}{3}Vcn0 \\ Vbn = -\frac{1}{3}Van0 + \frac{2}{3}Vbn0 - \frac{1}{3}Vcn0 \\ Vcn = -\frac{1}{3}Van0 - \frac{1}{3}Vbn0 + \frac{2}{3}Vcn0 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

En remplaçant (1.6) dans (1.7), on obtient :

$$\begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$



**Fig. II-4** La tension de sortie de l'onduleur de tension à deux niveaux.

### II-6.3. Modélisation de l'onduleur NPC à trois niveaux:[13]

#### II-6.3.1. Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux:

Un convertisseur est dit en mode commandable si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe (commande des bases des semi-conducteurs) et par suite une conduction continue de ce convertisseur

Pour l'onduleur à trois niveaux, cette condition de commandabilité implique que les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes (grandeurs électriques). Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée. De ce fait, on peut définir les fonctions de connexion.

Alors:

➤ La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est supposée faible (négligeable devant  $U_c$ ).

➤ La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé, alors on a :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$V_A, V_B, V_C$  : Les tensions alternatives simples à la sortie de l'onduleur.

$i_1, i_2, i_3$  : Les courants à la sortie de l'onduleur.

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou à une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{k1} = \bar{B}_{k4} \\ B_{k2} = \bar{B}_{k3} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

Avec  $B_{ks}$  la commande du transistor  $T_{ks}$  du bras  $k$ .

### II-6.3.2. Fonctions de connexion:

#### a-Fonctions de connexion des interrupteurs

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur  $T_{ks}$  comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci.

$$\begin{cases} F_{ks} = 1 & \text{Si } T_{ks} \text{ est fermé} \\ F_{ks} = 0 & \text{Si } T_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras  $k$ , on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

La commande complémentaire est exprimée pour les trois bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{11} = 1 - F_{14} \\ F_{12} = 1 - F_{13} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{21} = 1 - F_{24} \\ F_{22} = 1 - F_{23} \end{cases} \quad \begin{cases} F_{31} = 1 - F_{34} \\ F_{32} = 1 - F_{33} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

### b-Fonctions de connexion des demi bras

La fonction de connexion  $F_{km}^b$  est associée au demi bras  $m$  avec  $m = 1$  pour le demi bras du haut et  $m = 0$  pour le demi bras du bas.

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

### II-6.3.3.Fonction de conversion:

On note:

- ❖ Les tensions simples aux bornes de chaque phase de la charge:  $V_A, V_B$  et  $V_C$  ;
- ❖ Les tensions entre chaque bras de l'onduleur et le point milieu  $M$  de l'alimentation continue de l'onduleur:  $V_{AM}, V_{BM}$  et  $V_{CM}$  ;
- ❖ La tension entre le point neutre de la charge et le point milieu de l'alimentation continue de l'onduleur  $V_{NM}$ .

Les potentiels aux nœuds  $A, B$  et  $C$  de l'onduleur par rapport au point milieu  $M$  s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit:

$$V_{kM} = F_{i1} \cdot F_{i2} \cdot U_{c1} - F_{i3} \cdot F_{i4} \cdot U_{c2} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$$k \in \{A, B, C\} \text{ et } i \in \{1, 2, 3\}$$

On introduisant les fonctions de connexion des demi-bras de (II.15) dans (II.16), ce système d'équations s'écrit sous forme matricielle comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \quad (\text{II.17})$$

Les tensions composées sont données par la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{A0} \\ V_{B0} \\ V_{C0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{B0} \\ V_{C0} \\ V_{A0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

En utilisant la relation (II.17), le système (II.18) se met sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad (\text{II.19})$$

Le système matriciel donnant les expressions des tensions simples aux bornes de la charge:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad (\text{II.20})$$

Si on prend en considération l'hypothèse  $U_{c1} = U_{c2} = U_c$ , l'équation (II.17) devient comme suit:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} U_c \quad (\text{II.21})$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} U_c \quad (\text{II.22})$$

Les courants d'entrée  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  sont exprimés en fonction des courants de charge  $i_1, i_2$  et  $i_3$  par les relations suivantes :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_1 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_2 + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_1 + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_2 + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_3 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

D'où :

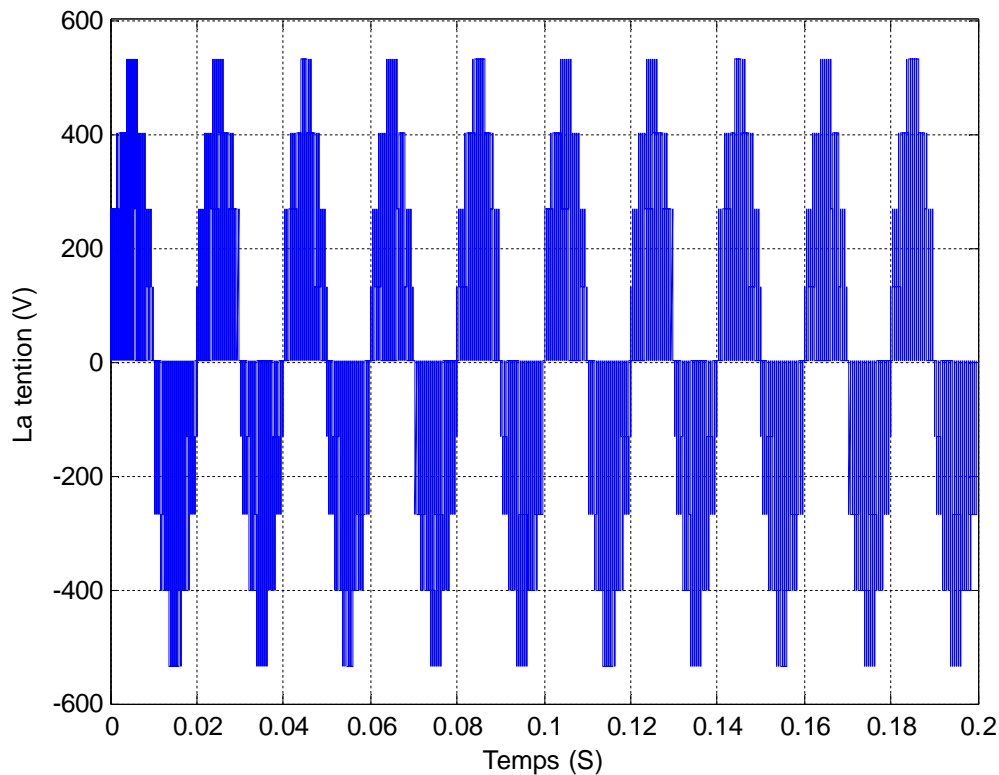
$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Cette relation montre, que pour l'onduleur à trois niveaux, tout se passe comme si le courant  $i_{d1}$  était le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du haut, et  $i_{d2}$  le courant d'entrée de l'onduleur à deux niveaux du bas. Le courant  $i_{d0}$  est lié aux courants de charge comme suit :

$$i_{d0} = F_{11}.F_{13}.i_1 + F_{21}.F_{23}.i_2 + F_{31}.F_{33}.i_3 \quad (\text{II.25})$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi-bras, cette relation devient:

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b)i_1 + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b)i_2 + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b)i_3 \quad (\text{II.26})$$



**Fig. II-5** La tension de sortie de l'onduleur de tension à trois niveaux structure NPC

### II-7. Comportement dynamique de la MSAP alimentée par onduleur :

L'alimentation du moteur synchrone à aimants permanents par un onduleur de tension nécessite l'utilisation d'une technique de commande adéquate afin de générer les séquences de ses interrupteurs, dans la pratique il existe deux techniques de commandes à savoir ; la technique d'hystérésis et la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans notre cas nous avons retenu la deuxième technique vue les avantages qu'elle offre par rapport à la première.

## II-8. Généralisation de la commande MLI:[16]

Généraliser la commande MLI dans le cas d'un onduleur multiniveaux revient à généraliser la porteuse, c'est à dire qu'on parlera aussi d'une porteuse multiniveaux.

En effet, dans le cas d'un onduleur multiniveaux, la commande par MLI nécessite autant de porteuses triangulaires qu'il n'y a de cellules à commander.

De plus, les porteuses sont toutes régulièrement déphasées entre elles. Pour un onduleur ayant n cellules, il est nécessaires d'avoir n porteuses décalées l'une par rapport à l'autre d'un angle de  $(\frac{2\pi}{n})$  et ayant toutes la même amplitude. D'une façon générale, la porteuse d'indice <<K>> s'écrit :

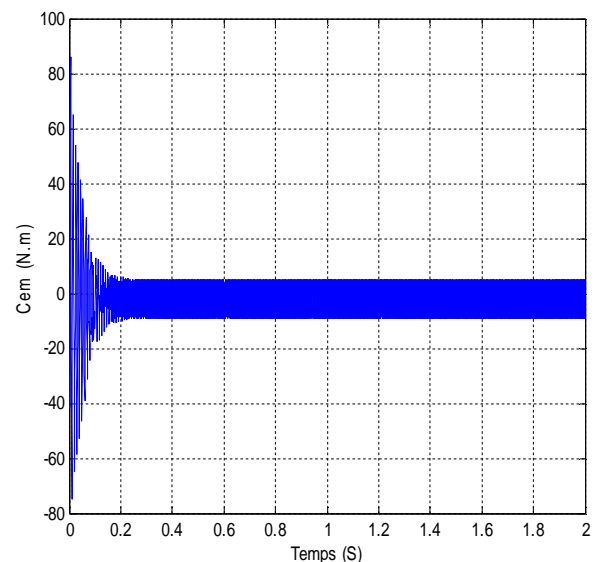
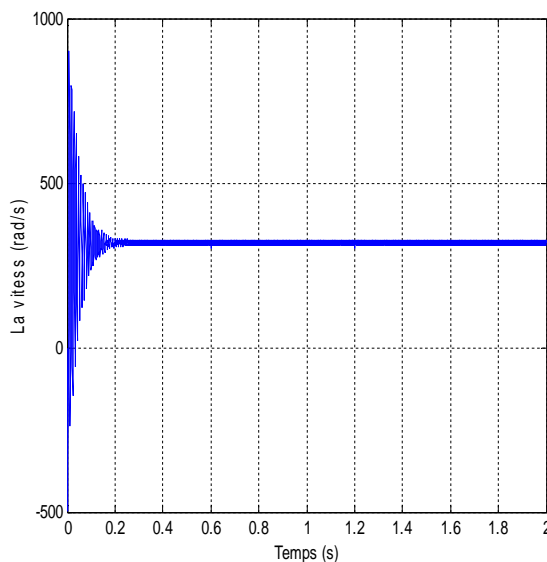
$$V_{pk}(t) = \frac{[V_p \text{ arcine}(\sin 2\pi f_p t - (K - 1)(\frac{2\pi}{n}))]}{\pi/2}$$

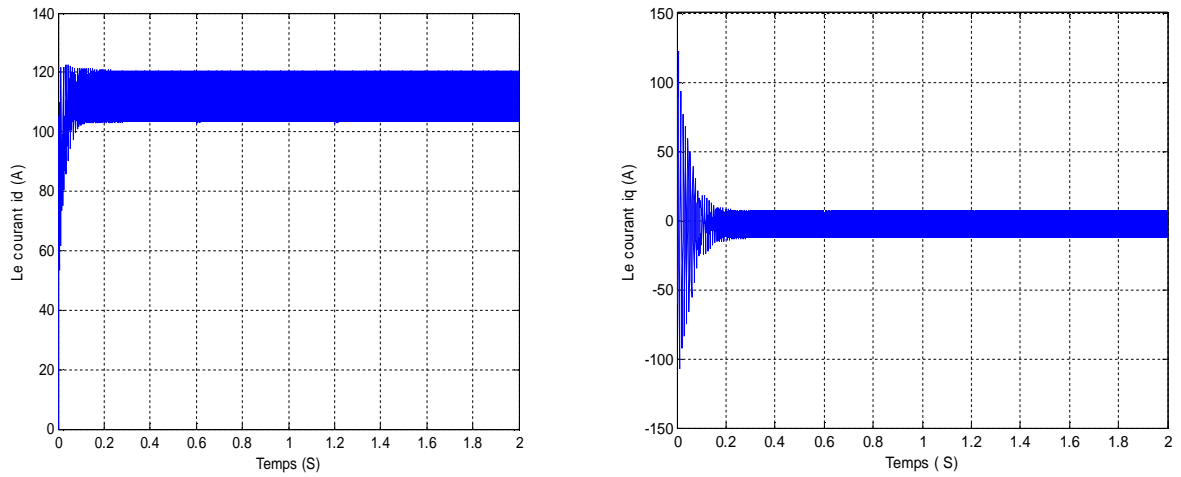
### II-8. Résultats de simulation:

#### II-8-1. Alimentation par onduleur de tension deux niveaux:

On a alimenté la MSAP par un onduleur de tension à deux niveaux

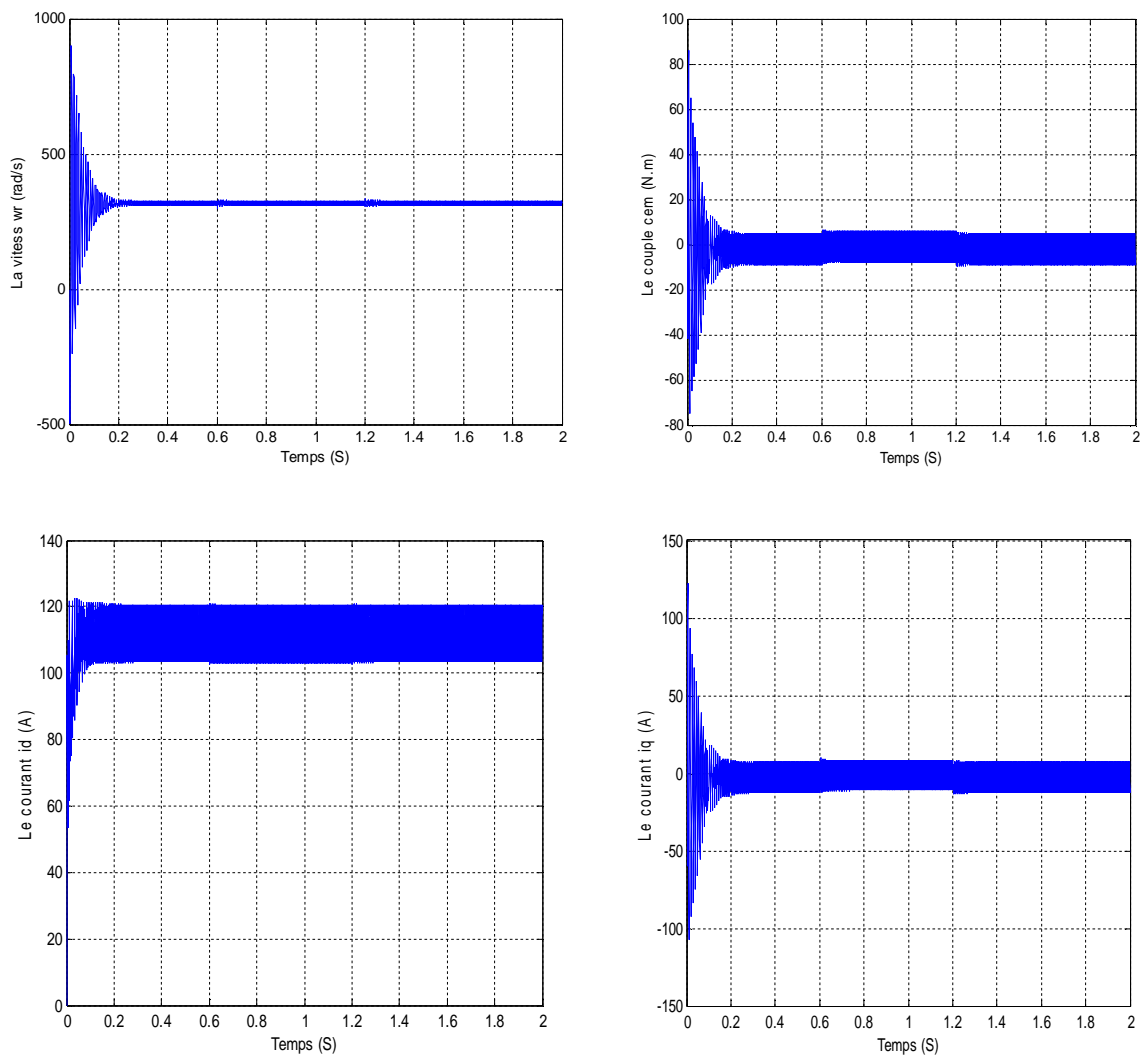
##### II-8-1-1. À vide



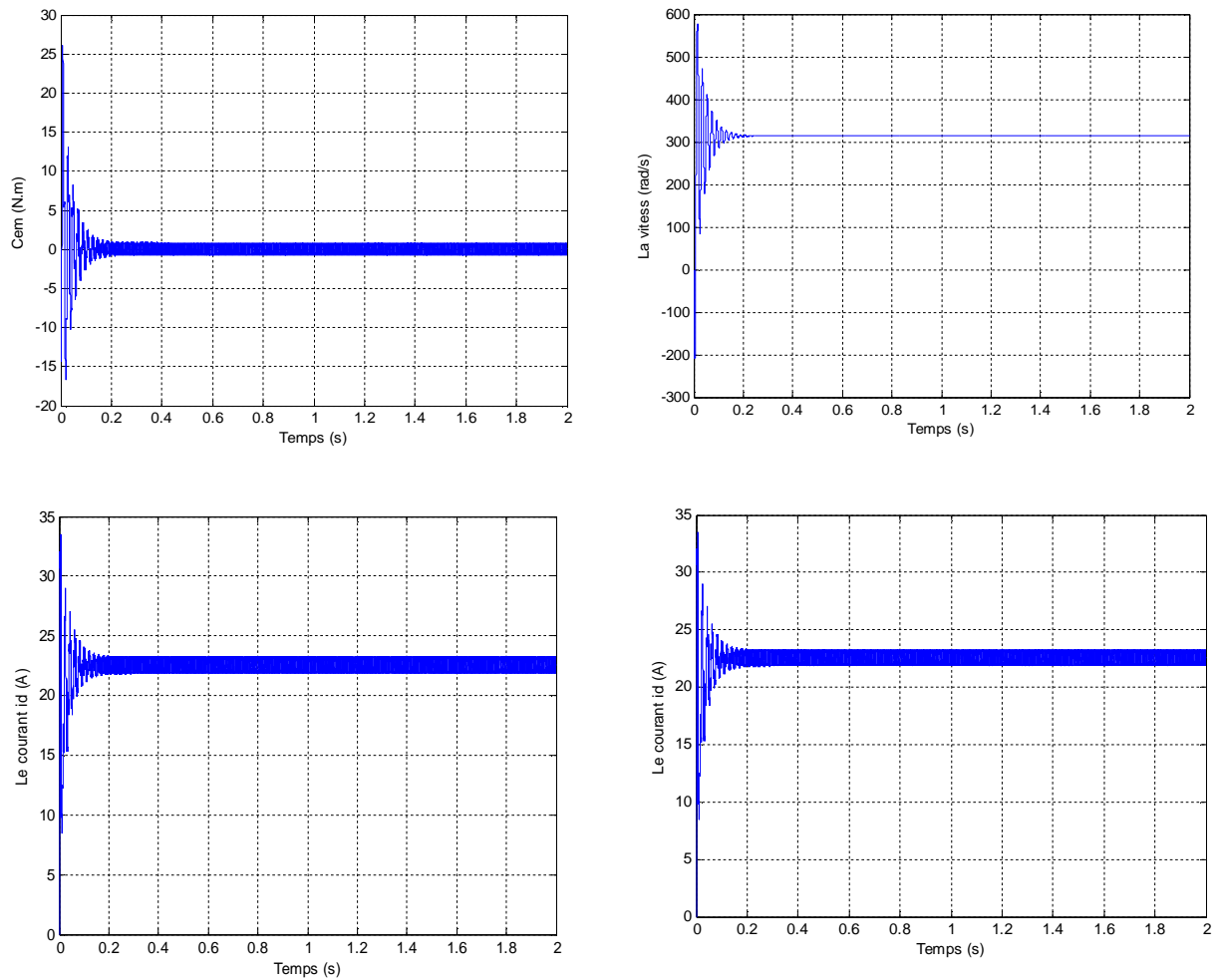


**Fig. II-6** Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 2 niveaux lors d'un démarrage à vide

**II-8-1-1. En charge**



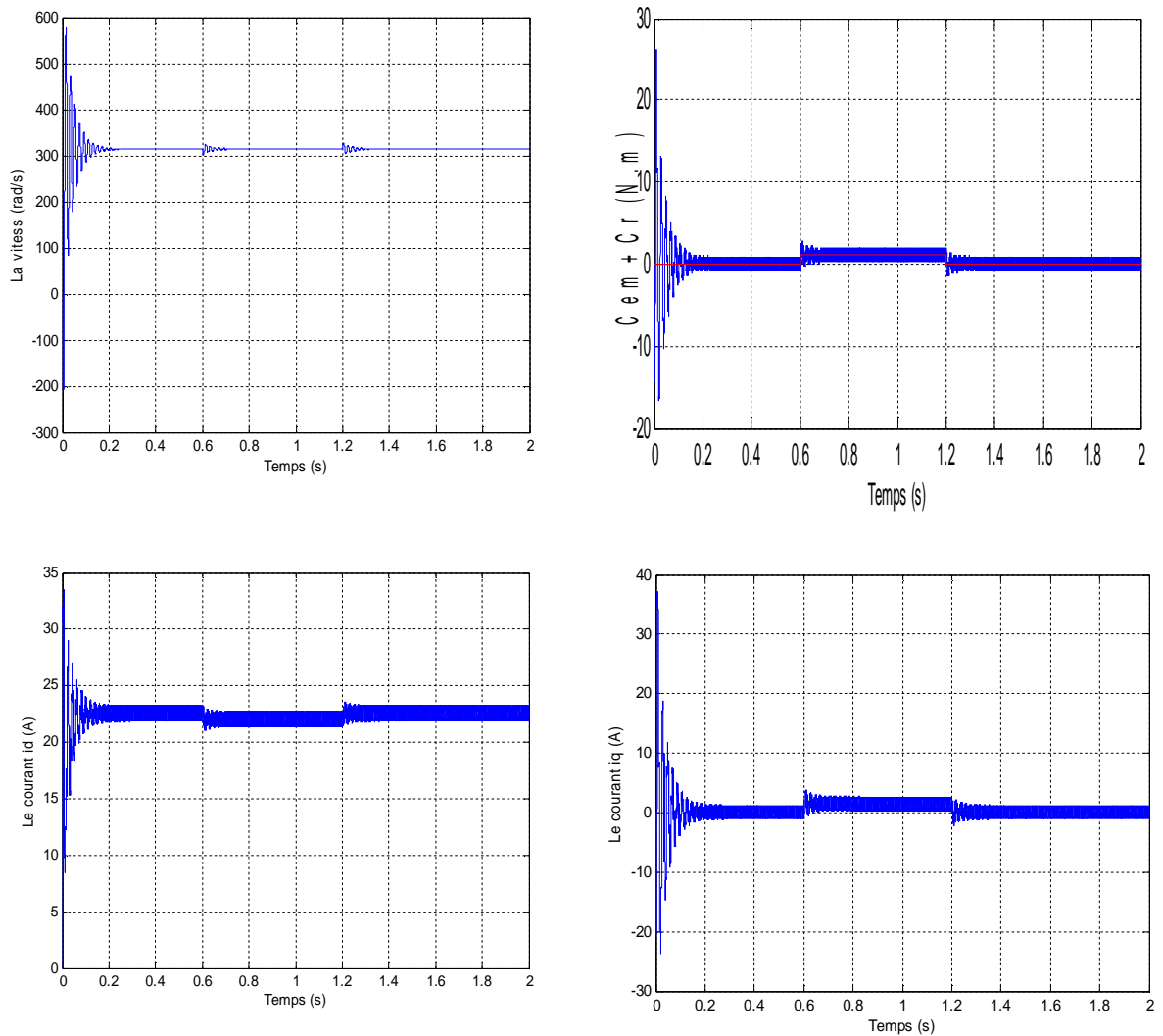
**Fig. II-7** Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 2 niveaux lors d'un démarrage en charge.

**II-8-2. Alimentation par onduleur NPC trois niveaux:****II-8-2-1. À vide**

**Fig. II-6** Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 3 niveaux lors d'un démarrage à vide



### II-8-2-2. En charge



**Fig. II-7** Résultats de simulation de MSAP alimentée par onduleur à 2 niveaux lors d'un démarrage en charge

### II.9. Conclusion:

Ce chapitre présente l'étude, la modélisation d'onduleur multiniveaux (onduleur à 2 niveaux et onduleur à 3 niveaux structure NPC) commandé par la technique MLI, qui assurent l'alimentation de la MSAP.

On a simulé le modèle de la MSAP alimentée par le convertisseur multiniveaux à vide puis en charge.

À la fin de ce chapitre on a donné les résultats de simulation du comportement dynamique de l'association MSAP-onduleur.