

## **II.1. INTRODUCTION :**

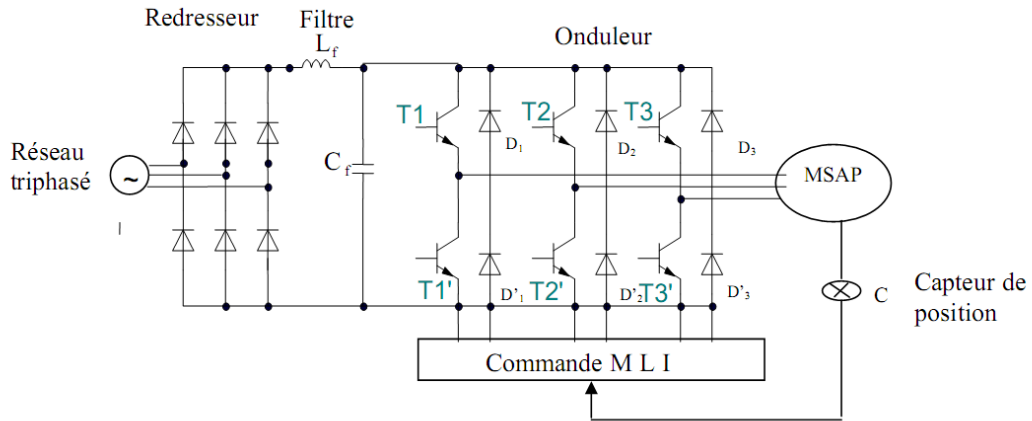
L'augmentation toujours croissante des performances globales des entraînements industriels à vitesse variable, est aujourd'hui principalement liée aux progrès réalisés dans le domaine de la commande des machines à courant alternatif. Ceci est réalisé grâce au développement de la technologie des composants de l'électronique de puissance, et l'apparition des processeurs numériques à fréquence élevée et à forte puissance de calcul.

L'intérêt de la commande des machines électriques est motivé par le fait que ces dernières constituent l'actionneur peu coûteux et peu encombrant pour la plupart des entraînements industriels.

Dans l'industrie, il semblerait que le marché des variateurs de vitesse connaisse un essor nouveau et que le souhait des concepteurs soit axé vers l'obtention de meilleures performances de l'ensemble convertisseur-machine. Ces dernières années plusieurs aimants permanents d'atteindre ces performances. Cependant, le contrôle vectoriel réalise un découplage entre les variables de commande de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) et rend donc possible l'obtention d'un modèle dynamique linéaire similaire à celui d'un moteur à courant continu [3] [1].

## **II.2. MODÉLISATION DU CONVERTISSEUR:**

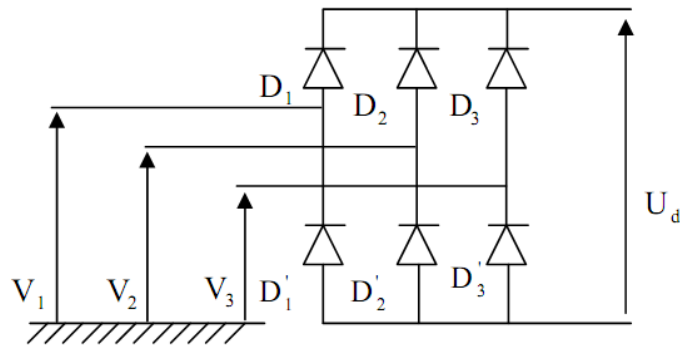
Le convertisseur statique est utilisé généralement pour transformer l'alimentation à fréquence et amplitude fixes en une autre à fréquence et amplitude variables. Il se constitue de trois étages: un redresseur connecté au réseau, un filtre qui permet de réduire les ondulations du courant et de la tension, et un onduleur qui permet d'alimenter la machine par un système de tension alternatif à fréquence variable. Pour réduire l'effet des harmoniques, qui gênent le fonctionnement de la machine, l'onduleur est commandé par une des techniques de modulation de largeur d'impulsions (MLI). La structure générale de l'alimentation est donnée (Figure II.1) [1].



**Figure (II.1) :** Structure générale de l'alimentation de La MSAP par un onduleur de tension.

### II.2.1. Modélisation du redresseur :

Le redresseur est un pont de Graetz à diodes (Figure II.2).



**Figure (II.2) :** Schéma du Redresseur à diodes.

La séquence de conduction des diodes

$D_i$  Conduit si  $V = \max(V_j)$ ;  $j = 1, 2, 3$ ;  $i = 1, 2, 3$

$D_i'$  Conduit si  $V_i = \min(V_j)$ ;  $j = 1, 2, 3$ ;  $i = 1, 2, 3$

A chaque bras du pont à diodes est associée une fonction logique de connexion  $G_i$  et  $G_i'$ ,  $i=1, 2, 3$ . Ces fonctions sont définies comme suit :

$$G_i \begin{cases} 1 & \text{si } D_i \text{ Conduit } (i = 1, 2, 3) \\ 0 & \text{si } D_i' \text{ Conduit } (i = 1, 2, 3) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$G_i' \begin{cases} 1 & \text{si } D_i' \text{ Conduit } (i = 1, 2, 3) \\ 0 & \text{si } D_i \text{ Conduit } (i = 1, 2, 3) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

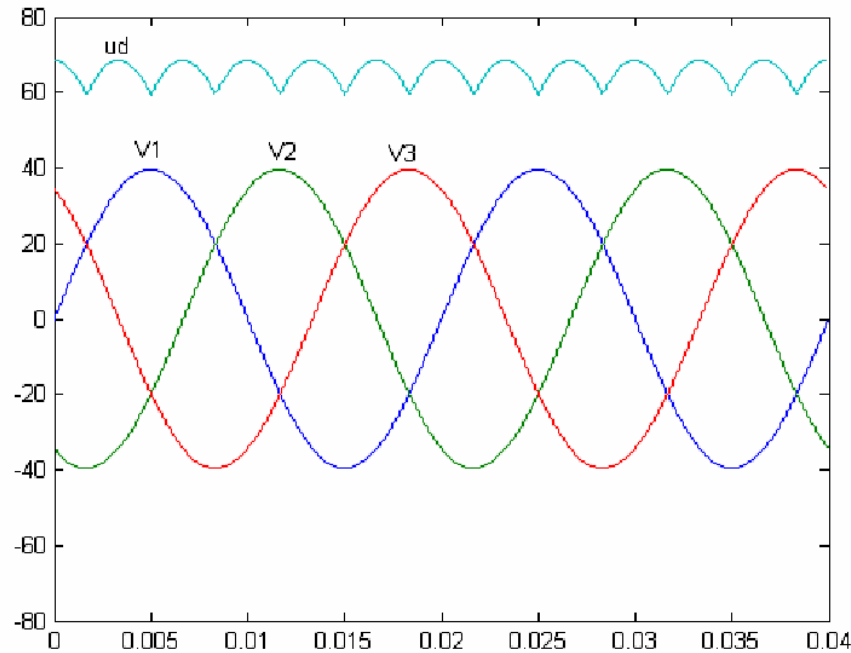
Le redresseur est alimenté par la tension:

$$V_j = V_m \sin(\theta - 2(j-1)\frac{\pi}{3}) \text{ Avec } j = 1, 2, 3 \quad (\text{II.3})$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_d$  à la sortie de redresseur est:

$$U_d = \max(V_j) - \min(V_j); \quad j = 1, 2, 3 \quad (\text{II.4})$$

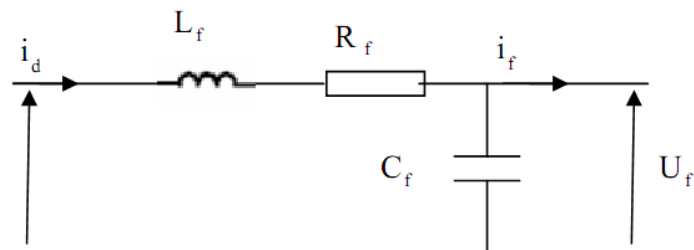
La simulation du redresseur donne les résultats représentés dans la figure (II.2)



**Figure (II.3) :** La tension redressée  $U_d$  est formée de six sommets de sinusoïde par période.

### II.2.2. Modélisation du filtre :

Pour diminuer les ondulations à la sortie du redresseur nous insérons à l'entrée de l'onduleur un filtre  $L_f C_f$  celui-ci est schématisé par la figure (II.4)



**Figure (II.4):** Schéma de filtre LC.

Le rôle essentiel de ce filtre peut être résumé dans les points suivants :

Il assure la fourniture du courant sous basse impédance et transitoirement le stockage des impulsions renvoyées par l'onduleur et empêche qu'ils ne soient injecté vers le réseau d'alimentation.

Il évite les fluctuations importantes de la tension continue d'alimentation délivrée par le redresseur (filtrage des harmoniques de la tension redressée) ou du débit instantané variable de l'onduleur.

Il limite la vitesse de croissance des courants de court-circuit. En freinant, grâce à l'inductance l'apport d'énergie extérieur en cas de «rate» de commutation de l'onduleur.

Les grandeurs qui interviennent pour fixer le dimensionnement du filtre sont:

- La tension  $U_f$  d'alimentation de l'onduleur.
- La composante continue du courant exigé  $i_f$ .
- L'ondulation maximale de ce courant est celle tolérée sur la tension  $U_f$  dans les plus mauvaises conditions.

Le condensateur de capacité  $C_f$  avec l'inductance  $L_f$  constituent un filtre passe-bas.

$C_f$  (Mf) permet d'obtenir à l'entrée de l'onduleur une tension  $U$  - La capacité Sensiblement constante, et d'absorber le courant négatif restitué par la charge.

$L_f$  (mH) permet de rendre sensiblement constant le courant  $I_d$ , car le courant absorbé par l'onduleur est fortement nodule.

Les équations du filtre sont :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} = U_d - U_f - R_f i_d \\ \frac{dU_f}{dt} = \frac{1}{C_f} (i_d - i_f) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

### II.2.3. Calcul des paramètres :

En combinant les deux équations précédentes, nous obtenons la fonction de transfert  $F(S)$  du filtre :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_d}{dt} = U_d \\ U_d = \text{frtgioii} \end{cases}$$

$$F(S) = \frac{U_f}{U_d} = \frac{1}{L_f C_f S^2 + R_f C_f S + 1} \quad (\text{II.6})$$

La pulsation de coupure correspondante est :

$$\omega_r = \sqrt{\frac{2}{L_f C_f} - \frac{R_f^2}{L_f^2}}$$

Le choix de paramètre du filtre  $L_f$  et  $C_f$  assure la relation :

$$L_f \cdot C_f \cdot \omega_0^2 > 1, \text{ avec: } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

### II.3. DÉFINITION DE L'ONDULEUR :

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Si on dispose à l'entrée d'une tension continue, grâce à des semi-conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative.

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du l'onduleur une tension alternative de valeur moyenne nulle.

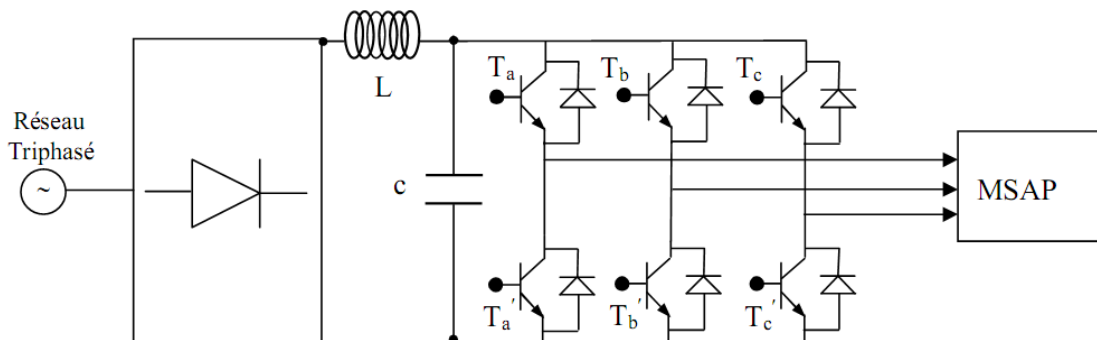
Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions Pulse Width Modulation, en anglo-saxon On distingue plusieurs types d'onduleurs Selon la source: onduleurs de tension et onduleurs de courant selon le nombre de phases monophasé, triphasé, etc.....et selon le nombre de niveaux 2,3, etc [5].

### II.4. MODÉLISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION:

L'onduleur de tension alimente la MSAP peut être idéalement représenté selon la figure (II.5), où  $T_i$  et  $\bar{T}_i$   $i=a, b, c$  sont des transistors MOSFET  $S_i$  et  $\bar{S}_i$  sont les commandes logiques qui leur sont associées telle que :

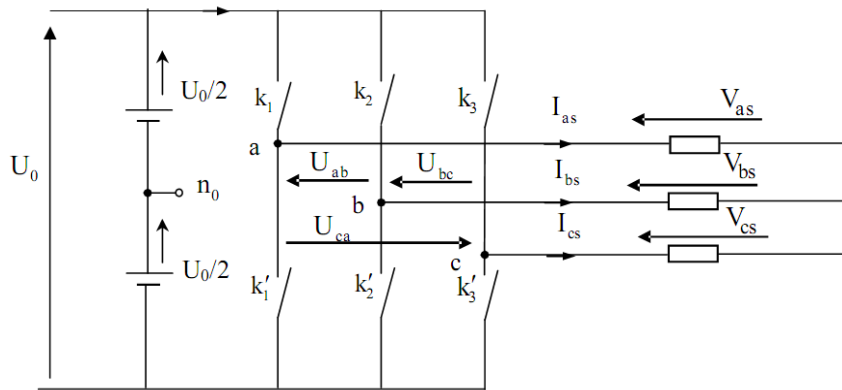
- si  $S_i=1$ , l'interrupteur  $T_i$  est passant et  $\bar{T}_i$  est ouvert.
- si  $S_i=0$ , l'interrupteur  $T_i$  est ouvert et  $\bar{T}_i$  est passant.

Le convertisseur coté réseau est constitué d'un redresseur triphasé à diodes et d'un filtre, et le convertisseur coté machine, et un onduleur de tension triphasé



**Figure (II.5) :** Schéma de l'association machine synchrone-onduleur de tension.

On considère l'alimentation de l'onduleur est comme une source parfaite, supposée être constituée par deux générateurs de f.é.m égale à  $\frac{U_0}{2}$  connectés entre eux par un point note  $n_0$ . L'onduleur est constitué de trois bras, chaque bras est constitué de deux transistors dont la commande est complémentaire. Les transistors sont shuntés par des diodes de récupération, Chaque bras de l'onduleur peut être présenté par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure (II.5). La machine synchrone est connectée en étoile,  $U_0$  est la tension continue alimentant l'onduleur de tension. Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :



**Figure (II.6) :** Schéma équivalent de l'onduleur.

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont:

$$U_{ab} = V_{as} - V_{bs} = U_0 (S_a - S_b) \quad (\text{II.7})$$

$$U_{ab} = V_{bs} - V_{cs} = U_0 (S_b - S_c) \quad (\text{II.8})$$

$$U_{ab} = V_{cs} - V_{as} = U_0 (S_c - S_a) \quad (\text{II.9})$$

Les tensions  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$  et  $V_{cs}$  forment un système de tension triphasées équilibrées alors de (II.7) et (II.9) on trouve :

$$V_{as} = \frac{U_0}{3} (2S_a - S_b - S_c) \quad (\text{II.10})$$

De (II.7) et (II.8) on trouve :

$$V_{bs} = \frac{U_0}{3} (2S_b - S_a - S_c) \quad (\text{II.11})$$

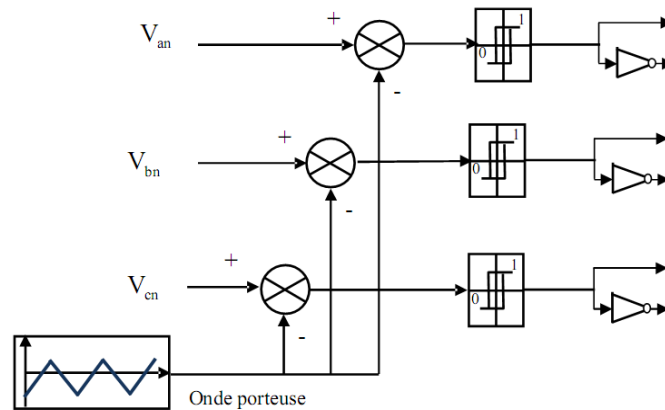
De (II.8) et (II.9) on trouve :

$$V_{cs} = \frac{U_0}{3} (2S_c - S_a - S_b) \quad (\text{II.12})$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique de Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI). Elle consiste à imposer aux bornes de la machine des tensions, hachées à fréquence fixe, évoluant en fonction des références de tension obtenues à partir des régulateurs des courants. A l'aide d'un signal triangulaire appelé porteuse, ces tensions sont modulées en largeur d'impulsion afin de déterminer les instants de commutation et la durée de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur. A chaque instant, l'un des deux interrupteurs de chaque bras est en conduction et l'autre est bloqué.



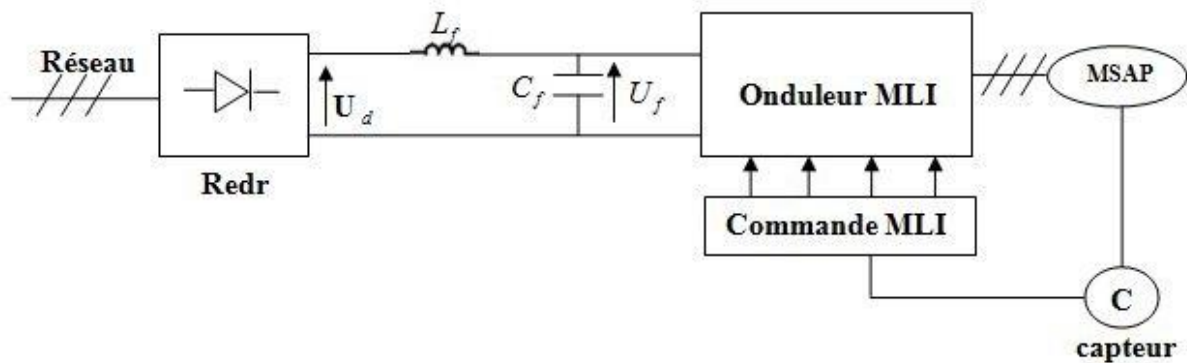
**Figure (II.7) :** Schéma de principe de la technique triangulo-sinusoïdale.

Nous avons simulé l'association convertisseur statique-MSAP, pour un fonctionnement à vide puis en charge. L'onduleur est commandé par la technique de modulation triangulo sinusoïdale.

La comparaison de ces figures (II.10.a) et figures (II.10.b) avec celles obtenues avec le modèle de la machine alimentée par un système de tensions sinusoïdales montre une ressemblance dans l'allure; cependant la présence de l'onduleur engendre des ondulations autour des valeurs moyennes [1].

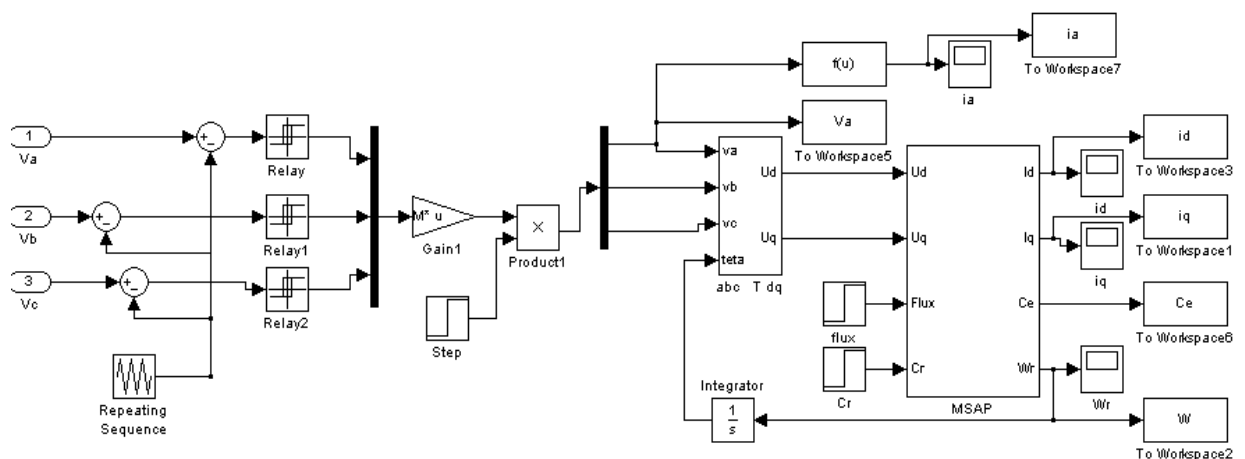
## II.5. MODÉLISATION DE L'ASSOCIATION CONVERTISSEUR-MSAP:

L'association MSAP-Onduleur est représentée par la figure suivante:



**Figure (II.8):** L'association convertisseur –MSAP

**Schéma bloc :**



**Figure (II.9):** Schéma de bloc de modèle onduleur-MSAP

### II.5.1. Résultats de simulation de l'ensemble convertisseur-MSAP :

Les performances de l'association machine synchrone à aimants permanents et onduleur commandé par la technique MLI triangulo-sinusoidale sont mises en relief par une simulation numérique, les résultats de la simulation sont représentés sur les figures (II.10.a) (sans charge) et (II.10.b) ( $C_r = 5 \text{ N.m}$ ) à l'instant ( $t=1 \text{ sec}$ ). Nous remarquons que le couple électromagnétique est très fort au démarrage, et présente des ondulations (dues à l'onduleur). La vitesse subit une variation lors de l'application de la charge ( $t=1 \text{ sec}$ ).



## a) Test à vide :

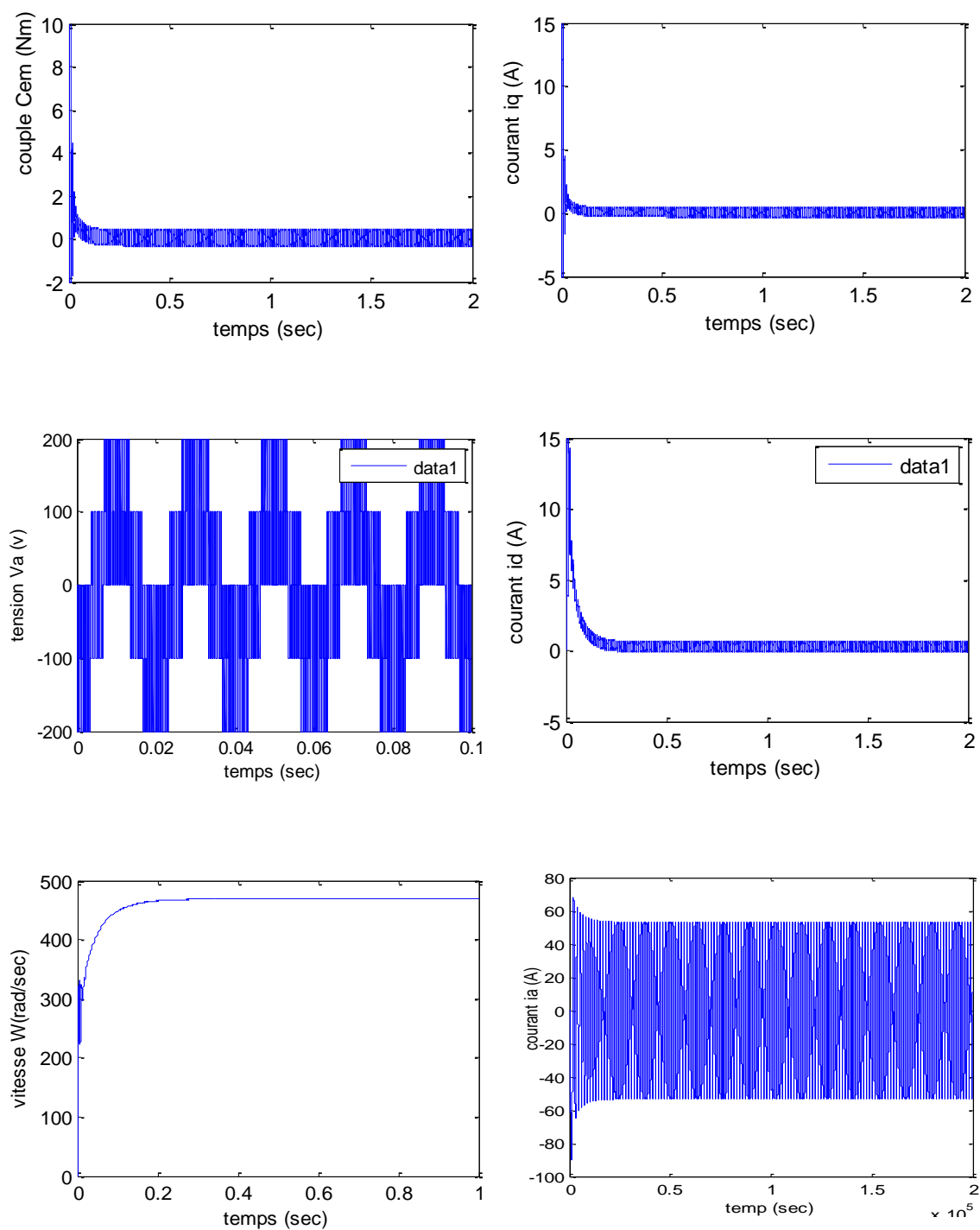
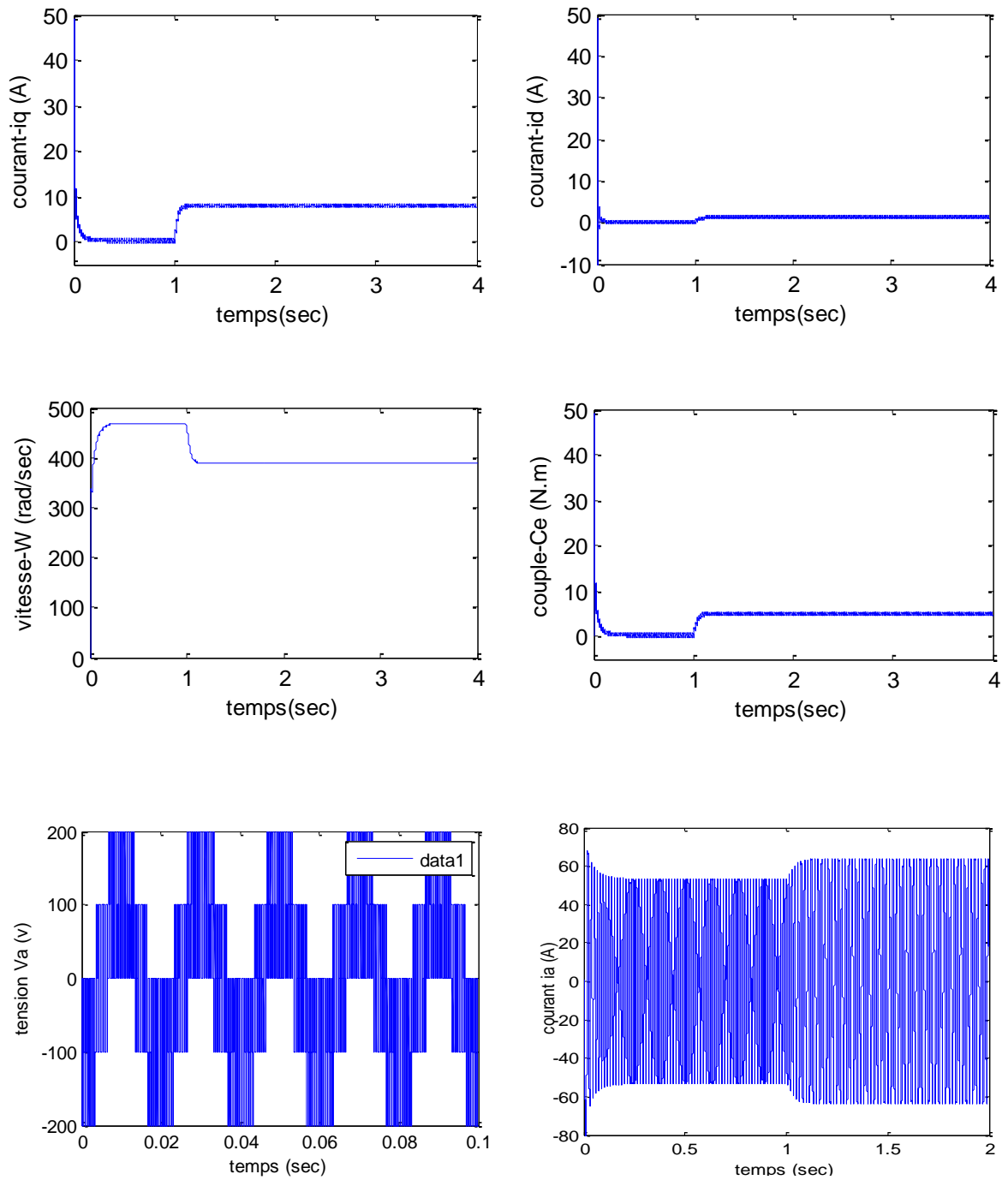


Figure (II.10.a) : Caractéristique dynamique de l'ensemble convertisseur-MSAP à vide

**b) Test en charge :****Figure (II.10.b) :** Caractéristique dynamique de l'ensemble convertisseur-MSAP en charge

**II.6. CONCLUSION :**

Nous avons étudié le comportement dynamique de la MSAP alimentée en tension en passant dans ce chapitre par la modélisation du convertisseur statique qu'il l'alimente (redresseur, filtre et onduleur) on verra la simulation de tout l'ensemble (machine-convertisseur). Nous terminerons par la simulation du système fonctionnant à vide et en charge alimenté par un convertisseur statique d'autre part, nous avons constaté que lorsque le moteur est chargé, sa vitesse de rotation chute considérablement. Pour résoudre ce problème, on fait appel à une stratégie de commande appelée la commande par backstepping, qui sera présentée au prochain chapitre.