

## Chapitre 3 : Commande directe du couple

### 3.1 Introduction:

La structure de contrôle directe du couple (DTC, Direct Torque Contrôle, DSC, direct self-control) de la machine asynchrone est apparue dans la deuxième moitié des années 80 par Takahashi et Depenbrock (spécialement pour les machines asynchrones, ensuite, plusieurs études ont permis de développer plus précisément la connaissance de cette commande) comme concurrentielles des méthodes classiques, basées sur un découplage de flux et de couple moteur par orientation du champ magnétique. [14].

la commande DTC elle présente des avantages bien connus par rapport à la commande vectorielle notamment en ce qui concerne l'amélioration de la robustesse (utilisation seulement de la résistance statorique par l'algorithme de commande) ; la simplicité (ne nécessitant pas des boucles de régulation des courants), la réduction du temps de réponse du couple (contrôle en boucle fermée de flux et de couple par des contrôleurs à hystérésis). [15]

La commande directe de couple d'une machine à induction, est basée sur la détermination de la séquence de commande à appliquer aux interrupteurs de l'onduleur de tension à chaque instant de commutation. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de commander l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et du couple électromagnétique. A l'origine, de la commande DTC était fortement basée sur le "sens physique" et une approche relativement empirique de la variation des états (couple, flux) sur un intervalle de temps très court (intervalle entre deux commutation) [16].

### 3.2 Principe de la commande directe de couple(DTC) :

la commande directe du couple et de flux est basée principalement sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.

Pour chacune des grandeurs contrôlées, flux stator et couple électromagnétique, on définit une ou plusieurs bandes ; La valeur estimée de chaque grandeur est comparée avec une valeur de référence à l'aide d'un régulateur à hystérésis.

La séquence de commande est choisie selon :

- ✓ Le signal de sortie du régulateur à hystérésis du couple électromagnétique.
- ✓ Le signal de sortie du régulateur à hystérésis du flux stator.
- ✓ Le signal informant sur la position du vecteur flux stator.

L'objectif de ce choix est de déterminer le vecteur de tension optimal pour le contrôle de l'amplitude du flux et du couple, et les maintenir dans leurs bandes d'hystérésis. Ce type de commande se classe donc dans la catégorie des commandes en amplitude

Le contrôle direct de couple est caractérisé par :

- ✓ Généralement d'excellentes réponses dynamiques .
- ✓ La sélection des vecteurs de tension optimaux pour l'onduleur assure le contrôle direct de couple et de flux et indirectement le contrôle de la tension et de courant statoriques.
- ✓ La fréquence de commutation de l'onduleur est variable et dépend des régulateurs à hystérésis utilisés.

✓ L'existence des oscillations de couple entraînant la variation du niveau sonore.

Nécessité à des fréquences d'échantillonnage très élevées (>20KHz).[17]

### 3.3 Contrôle de flux et de couple électromagnétique :

Pour un contrôle efficace du couple de la machine asynchrone il est tout d'abord impératif de régler correctement le flux. En contrôle de type DTC, on réalise le réglage du flux stator, d'une part du fait que c'est le plus simple à estimer, et d'autre part parce qu'il a une dynamique plus rapide que celle du flux rotor. La différence entre le flux stator et le flux rotor ramené au stator correspond au flux de fuites, qui présente typiquement des valeurs relatives inférieures à 10% du flux magnétisant. Ainsi, en réglant le flux stator, on règle « indirectement » le flux rotor. Comme dans les autres méthodes de contrôle qui utilisent une régulation directe du flux, on impose à ce dernier une référence constante et de valeur nominale, pour les vitesses inférieures à la vitesse nominale. Pour les vitesses supérieures, on impose une référence de flux qui décroît selon une proportion inverse de la vitesse, ce qui correspond au dé fluxage à puissance maximale constante.[8]

#### 3.3.1 Contrôle du flux statorique :

L'expression du flux statorique dans le référentiel  $(\alpha, \beta)$  lié au stator de la machine asynchrone, et est donnée par l'équation suivante :

$$\overline{\Phi}_s = \int (\overline{V}_s - R_s \overline{I}_s) dt \quad (3.1)$$

Entre deux commutations de l'onduleur, le vecteur de tension est fixe et constant. Si l'instant  $(t=0)$  correspond à l'instant de la commutation précédente, l'évolution du vecteur flux à partir de cet instant initial est :

$$\overline{\Phi}_s(t) = \overline{\Phi}_s(0) + \overline{V}_s t - R_s \int_0^t \overline{I}_s dt \quad (3.2)$$

Avec l'hypothèse que  $R_s$  reste constante et que le terme  $(R_s I_s)$  est négligeable devant la tension  $V_s$ . Dans un intervalle de temps  $[0, T_e]$ , on trouve l'expression du flux :

$$\overline{\Phi}_s(T_e) \approx \overline{\Phi}_s(0) + \overline{V}_s T_e$$

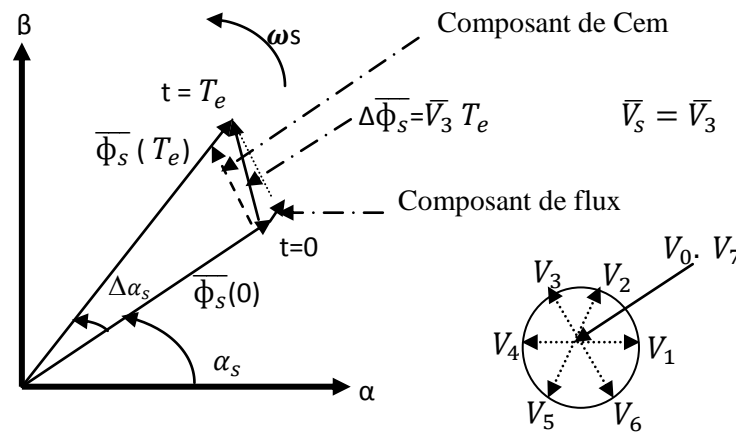


Fig 3.1 l'évolution de l'extrémité de  $\overline{\Phi}_s$

L'extrémité du vecteur flux statorique  $\phi_s(t)$  se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur tension appliqué  $V_s$ .

Un résultat immédiat du comportement du flux de point de vue réglage :

Pour augmentation de flux, on applique un vecteur tension  $V_s$  parallèle à  $\phi_s(t)$  et de même sens, et de sens opposé pour le diminuer ; Tandis que l'application d'un vecteur tension en quadrature avec  $\phi_s(t)$  fait varier sa phase et n'agit pas sur son amplitude.

Le choix de la séquence adéquate des vecteurs  $V_s$  durant chaque période d'échantillonnage, permet de garder l'amplitude de  $\phi_s(t)$  autour d'une valeur constante, et l'extrémité du vecteur  $\phi_s(t)$  aura une trajectoire pseudo circulaire, à conditions que la période d'échantillonnage  $T_e$  soit très faible devant celle du flux statorique.

### 3.3.2 Contrôle du couple électromagnétique :

On utilise les expressions vectorielles de la machine asynchrone dans le référentiel lié au stator ( $\alpha, \beta$ ), et à partir des expressions des flux, les équations deviennent:

$$\begin{cases} \overline{V_s} = R_s \overline{I_s} + \frac{d\overline{\phi_s}}{dt} \\ \overline{V_r} = 0 \Rightarrow \frac{d\overline{\phi_r}}{dt} + \left( \frac{1}{\sigma T_r} - j\omega_r \right) \overline{\phi_r} = \frac{M\overline{\phi_s}}{\sigma L_r T_r} \end{cases} \quad (3.3)$$

Ces relations montrent qu'il est possible de contrôler le vecteur  $\overline{\phi_s}$  à partir du vecteur  $\overline{V_s}$ , en négligeant chutes de tension  $R_s \overline{I_s}$ .

Le flux  $\overline{\phi_r}$  suit les variations de  $\overline{\phi_s}$  avec une constante de temps ( $\sigma T_r$ ). le rotor agit comme un filtre de constante de temps ( $\sigma T_r$ ) entre les flux  $\phi_s$  et  $\phi_r$ .

l'équation du couple comme suit :

$$C_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} \overline{\phi_r} \otimes \overline{\phi_s} \quad (3.4)$$

L'équation (2.4) devient :

$$C_{em} = P \frac{M}{\sigma L_s L_r} |\phi_r| \cdot |\phi_s| \sin \theta_{sr} \quad (3.5)$$

$\theta_{sr}$  : L'angle entre le flux statorique et le flux rotorique.

Le couple dépend des amplitudes des deux vecteurs  $\overline{\phi_s}$  et  $\overline{\phi_r}$ , et de leur position relative ; Si l'on parvient à contrôler le vecteur de flux  $\overline{\phi_s}$  en module et en position, on peut donc contrôler  $\overline{\phi_r}$ , en module et en position, et donc le couple.

Ceci est possible à condition que la période d'échantillonnage est telle que  $T_e \ll \sigma T_r$

### 3.4 Sélection de vecteur de tension :

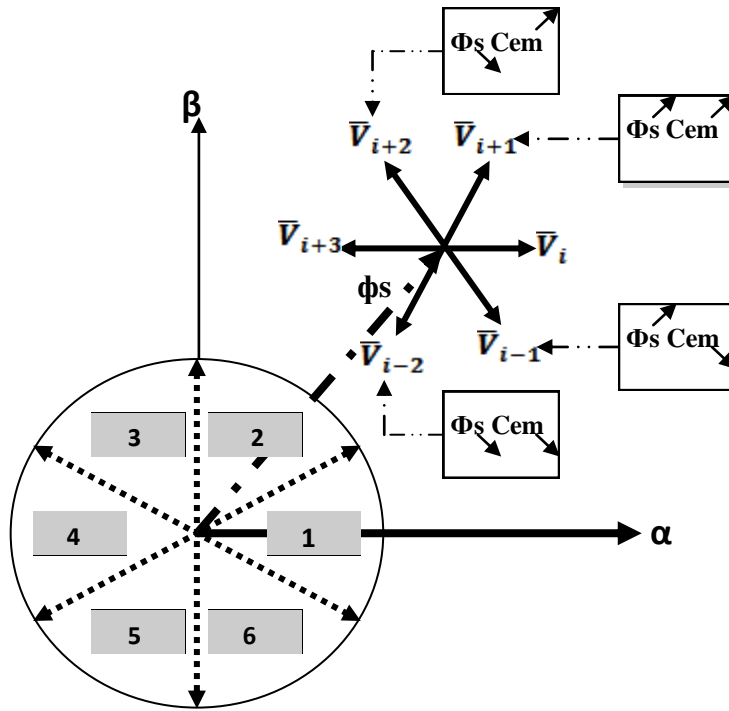
Le choix du vecteur de tension statorique  $\overline{V_s}$  dépend de la variation souhaitée pour le module de flux statorique  $\overline{\phi_s}$ , du sens de rotation de  $\overline{\phi_s}$ , et également de l'évolution souhaitée pour le couple [17].

En se plaçant dans le repère statorique ( $\alpha, \beta$ ), on peut délimiter l'espace de  $\overline{\phi_s}$  en le décomposant en six zones appelées secteurs ; déterminées à partir des composantes de flux

suivant les axes ( $\alpha$ ) et ( $\beta$ ).

Lorsque le flux  $\overline{\phi_s}$  se trouve dans une zone  $i$  ( $i=1,\dots,6$ ), le contrôle du flux et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tension suivants :

- ✓ Si  $\overline{V}_{i+1}$  est sélectionné alors  $\overline{\phi_s}$  croît et  $C_{em}$  croît.
- ✓ Si  $\overline{V}_{i-1}$  est sélectionné alors  $\overline{\phi_s}$  croît et  $C_{em}$  décroît.
- ✓ Si  $\overline{V}_{i+2}$  est sélectionné alors  $\overline{\phi_s}$  décroît et  $C_{em}$  croît.
- ✓ Si  $\overline{V}_{i-2}$  est sélectionné alors  $\overline{\phi_s}$  décroît et  $C_{em}$  décroît.
- ✓ Si  $V_0$  et  $V_7$  sont sélectionnés alors la relation du flux  $\overline{\phi_s}$  est arrêtée, d'où une décroissance du couple alors que le module du flux  $\phi_s$  reste inchangée.



**Fig 3.2** Choix du vecteur tension.

Cependant le niveau d'efficacité de chaque vecteur dépend de la position du vecteur flux dans la zone  $i$ .

Au début de la zone  $i$ , les vecteurs  $\overline{V}_{i+1}$  et  $\overline{V}_{i-2}$  sont perpendiculaires à  $\overline{\phi_s}$ , d'où une évolution rapide de l'amplitude du couple mais une évolution lente de l'amplitude du flux alors qu'à la fin de la zone, l'évolution est inverse. Tandis qu'aux vecteurs  $\overline{V}_{i-1}$  et  $\overline{V}_{i+2}$ , il correspond à une évolution lente du couple et rapide de l'amplitude de  $\overline{\phi_s}$  au début de la zone  $i$  alors qu'à la fin de la zone c'est le contraire. Quelque soit le sens d'évolution du couple ou de flux, dans la zone  $i$ , les deux vecteurs  $\overline{V}_i$  et  $\overline{V}_{i+3}$  ne sont jamais utilisés. En effet, ceux-ci génèrent la plus forte variation de flux mais leurs effets sur le couple dépendent de la position de  $\overline{\phi_s}$  dans la zone [15].

### 3.5 Estimateurs:

#### 3.5.1 Estimation du flux statorique :

L'estimation de flux statorique peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courant et tension de la machine. On obtient les composantes  $\alpha$  et  $\beta$  du vecteur  $\overline{\Phi}_s$ .

$$\overline{\Phi}_s = \Phi_{s\alpha} + j\Phi_{s\beta} \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} \hat{\Phi}_{s\alpha} = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt \\ \hat{\Phi}_{s\beta} = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (3.7)$$

Composantes du vecteur tension sont obtenues à partir de la mesure de la tension d'entrée de l'onduleur et les états des interrupteurs ( $k_a, k_b, k_c$ ), en appliquant la transformation de concordia nous obtenons.

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} E (K_a - \frac{1}{2}(K_b + K_c)) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} E (K_b - K_c) \end{cases} \quad (3.8)$$

Le module de flux statorique s'écrit :

$$\hat{\Phi}_s = \sqrt{(\hat{\Phi}_{s\alpha})^2 + (\hat{\Phi}_{s\beta})^2} \quad (3.9)$$

L'angle  $\vartheta_s$  entre le référentiel ( $\alpha, \beta$ ) et le vecteur est  $\overline{\Phi}_s$  égal à :

$$\vartheta_s = \arctg \frac{\Phi_{s\beta}}{\Phi_{s\alpha}} \quad (3.10)$$

#### 3.5.2 Estimation du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique peut se mettre sous la forme suivante :

$$\hat{C}_{ém} = P(\Phi_{s\alpha} I_{s\beta} - \Phi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (3.11)$$

A partir de cette équation, l'estimateur de couple utilise seulement des grandeurs statoriques, les flux et les courants.

### 3.6 Elaboration du vecteur de commande:

#### 3.6.1 Le correcteur de flux :

Pour contrôler le vecteur flux  $\Phi_s$ , on utilise un contrôleur à hystérésis à deux niveaux pour maintenir le module du flux entre deux limites, en comparant sa valeur avec une valeur de référence, la sortie du contrôleur génère une valeur binaire indiquant si le module du flux doit augmenter ou doit diminuer.

$\Phi = 1$  augmenter le flux.

$\Phi = 0$  diminué le flux

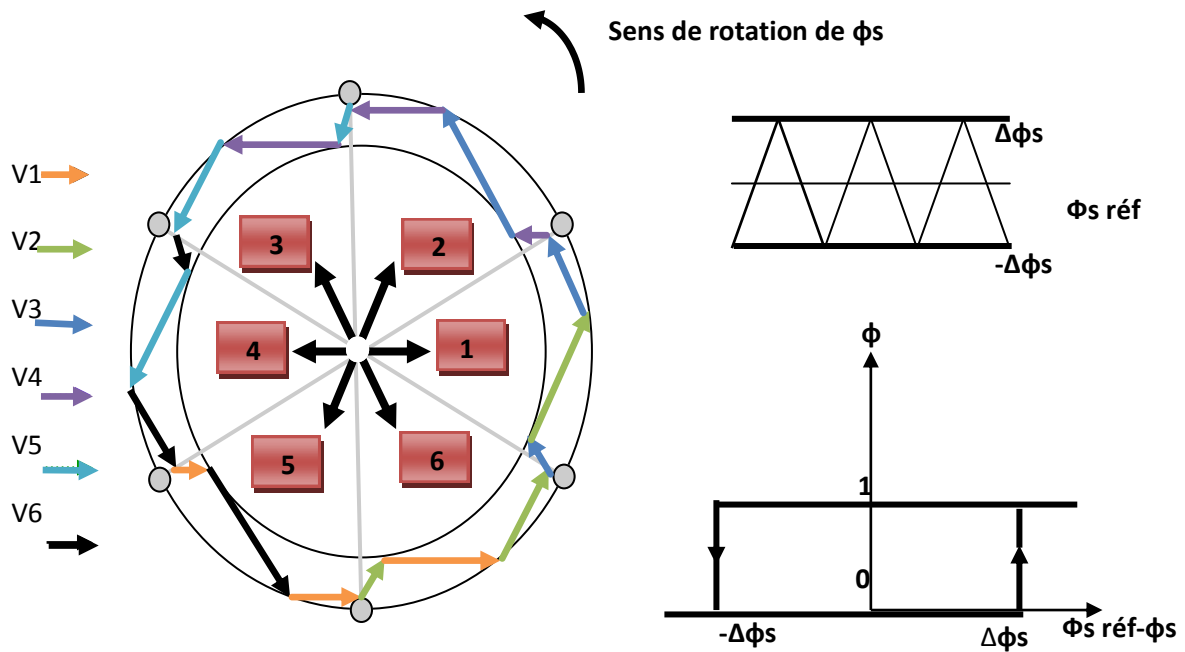
Avec ce contrôleur on garde la trajectoire de l'extrémité du vecteur flux à l'intérieur d'une couronne circulaire, comme l'illustre la **Fig 3.3**.

$$|\phi_{s \text{ ref}} - \phi_s| \leq \Delta\phi_s \quad (3.12)$$

Avec :

$\phi_{s \text{ ref}}$  : la consigne de flux

$\Delta\phi_s$  : la largeur d'hystérésis du correcteur.



**Fig 3.3** correcteur de flux à hystérésis et la sélection des vecteurs de tensions

### 3.6.2 Le correcteur de couple :

Le correcteur de couple a pour fonction de maintenir le couple dans les limites,

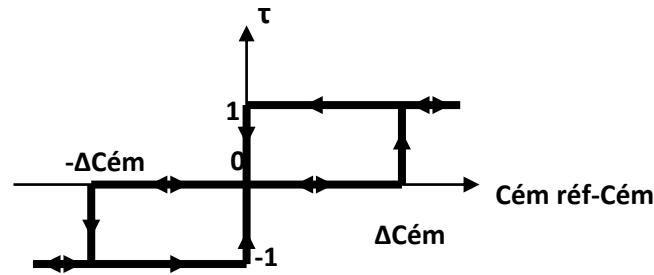
$$|C_{ém \text{ ref}} - C_{ém}| = \Delta C_{ém} \quad (3.13)$$

Avec :

$C_{ém \text{ ref}}$  : la consigne de couple référence .

$\Delta C_{ém}$  : la largeur d'hystérésis du correcteur.

Contrairement au flux , le réglage du couple nécessite un comparateur à trois niveaux. En effet ,on peut avoir besoin d'augmenter ou diminuer le couple électromagnétique de la machine mais aussi de le maintenir constant . la **fig 3.4** ci-dessous représente une schématisation du comparateur qu'on a adopté.



**Fig 3.4** correcteur de couple à hystérésis à trois niveaux.

La sortie de ce comparateur est nommée  $\tau$ . suivant que  $\tau$  prend la valeur 1,-1,0, il faut diminuer, augmenter ou maintenir constant le couple, respectivement.

### 3.7 Elaboration de la table de vérité :

La méthode de type DTC la plus classique est basée sur l'algorithme de Takahashi suivant :

- ✓ Le domaine temporel est divisé en période de durée  $T_e$ .
- ✓ A chaque coup d'horloge, on mesure les courants de ligne et les tensions par phase, on reconstruit les composantes du vecteur flux stator, en utilisant l'équation (3.7)
- ✓ L'estimateur du couple de la machine est alors possible grâce à l'estimation des composantes de flux et à la mesure des courants de lignes, en utilisant l'équation (3.13)
- ✓ L'erreur entre le flux de référence et le flux estimé est introduite dans un régulateur à hystérésis qui génère à sa sortie la variable  $\Phi$ .
- ✓ L'erreur entre le couple de référence et le couple estimé est introduite dans un régulateur à hystérésis qui génère à sa sortie une variable logique à trois niveaux.

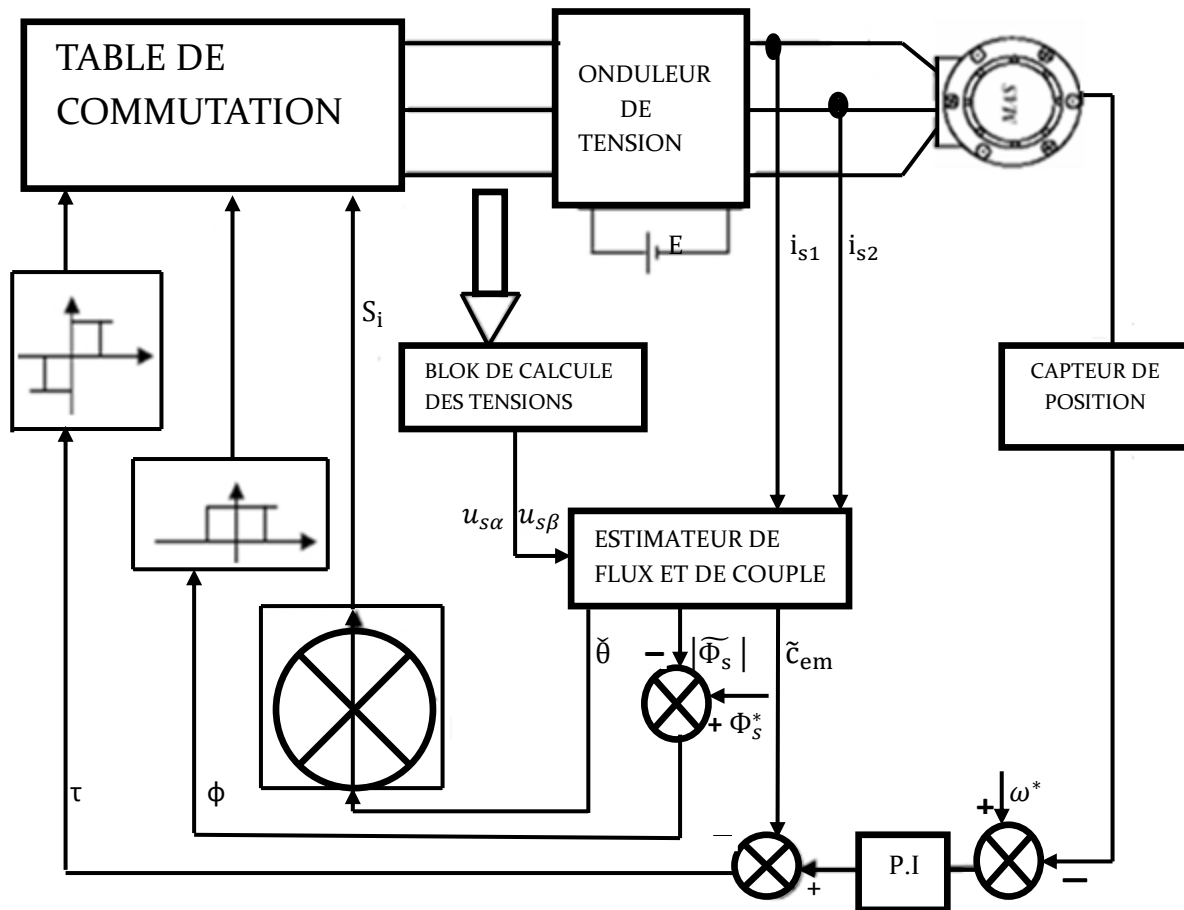
La séquence de commande des vecteurs de tension est choisie dans le tableau suivant en fonction de  $\Phi$ ,  $\tau$  et du secteur dans lequel se trouve le vecteur flux stator.

**Tableau 3.1** Table de commutation généralisée

$\Phi$	$\tau$	1	2	3	4	5	6
$\Phi = 1$	$\tau = 1$	$V_2$ (1 1 0)	$V_3$ (0 1 0)	$V_4$ (0 1 1)	$V_5$ (0 0 1)	$V_6$ (1 0 1)	$V_1$ (1 0 0)
	$\tau = 0$	$V_7$ (1 1 1)	$V_0$ (0 0 0)	$V_7$ (1 1 1)	$V_0$ (0 0 0)	$V_7$ (1 1 1)	$V_0$ (0 0 0)
	$\tau = -1$	$V_6$ (1 0 1)	$V_1$ (1 0 0)	$V_2$ (1 1 0)	$V_3$ (0 1 0)	$V_4$ (0 1 1)	$V_5$ (0 0 1)
$\Phi = 0$	$\tau = 1$	$V_3$ (0 1 0)	$V_4$ (0 1 1)	$V_5$ (0 0 1)	$V_6$ (1 0 1)	$V_1$ (1 0 0)	$V_2$ (1 1 0)
	$\tau = 0$	$V_0$ (0 0 0)	$V_7$ (1 1 1)	$V_0$ (0 0 0)	$V_7$ (1 1 1)	$V_0$ (0 0 0)	$V_7$ (1 1 1)
	$\tau = -1$	$V_5$ (0 0 1)	$V_6$ (1 0 1)	$V_1$ (1 0 0)	$V_2$ (1 1 0)	$V_3$ (0 1 0)	$V_4$ (0 1 1)

### 3.8 Structure générale de la commande directe du couple(DTC):

La structure d'une commande par DTC appliquée au machine asynchrone est représentée sur la **fig 3.5**. On utilise le tableau classique des séquences proposées par Takahashi.



**Fig 3.5** Structure générale de la commande directe de couple (DTC).

### 3.9 Resultats de simulation:

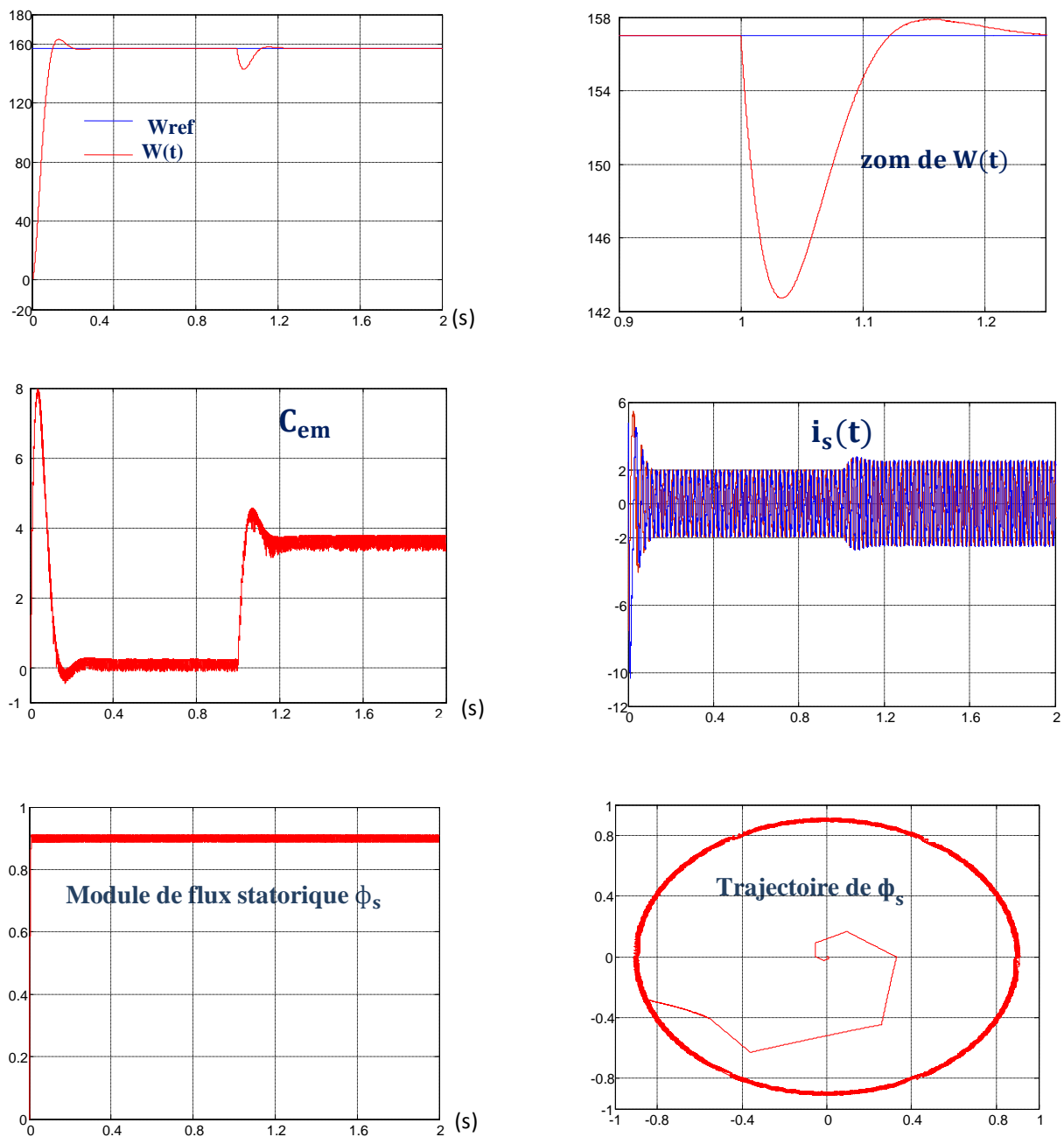
#### 3.9.1 Démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge :

La **Fig3.6** présente les résultats de simulation du système pour un démarrage à vide suivi d'un couple de charge de 3.5 Nm à l'instant 1s.

On peut noter les remarques suivantes :

- ✓ Le courant présente des oscillations mais on peut constater que les valeurs au milieu des périodes de modulation suivent une évolution sinusoïdale.
- ✓ Le couple instantané présente de très fortes oscillations.



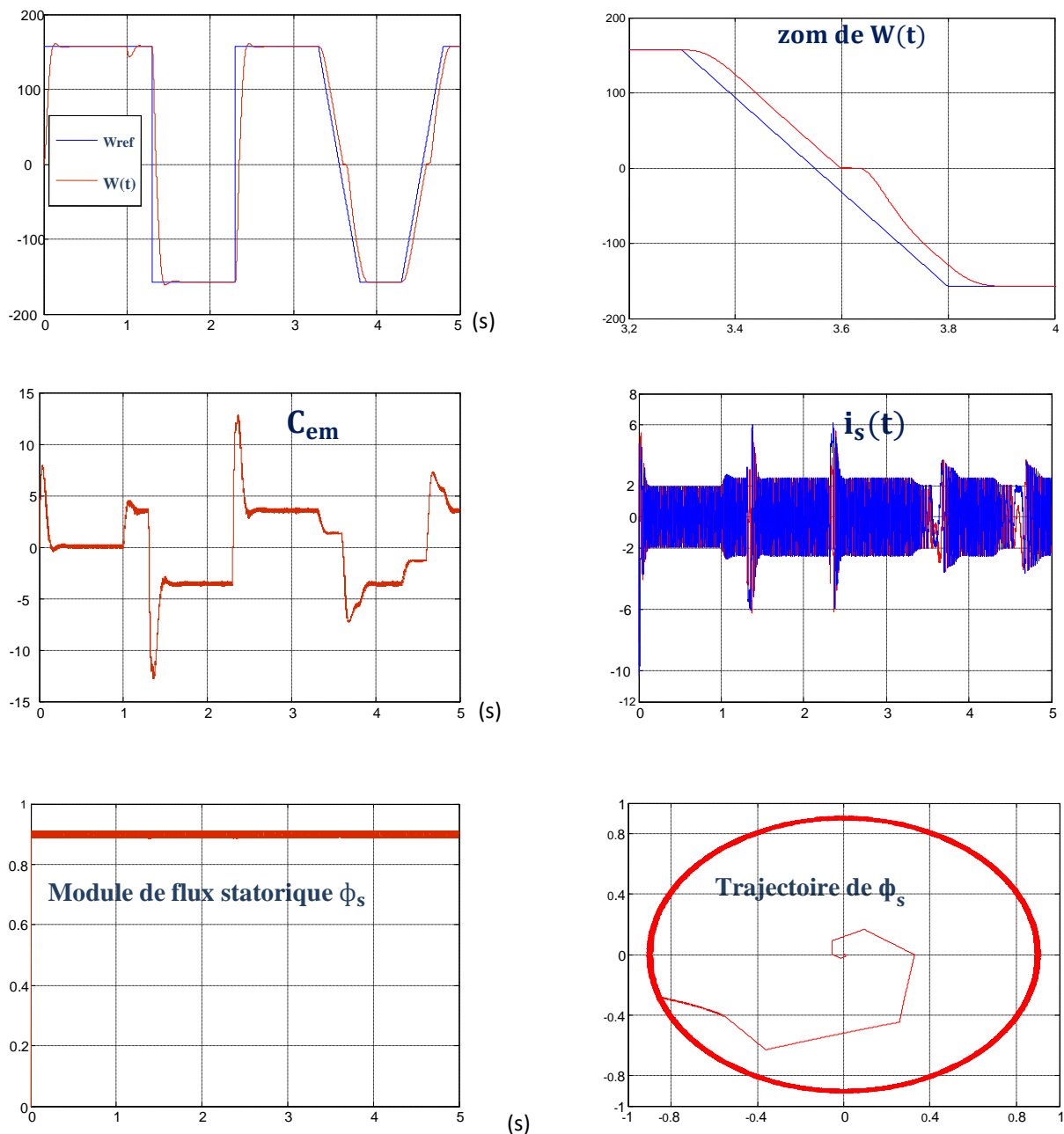


**Fig 3.6** Résultats de simulation de la CV lors du démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge

### 3.9.2 Inversion du sens de rotation:

Pour tester d'avantage la robustesse de la commande vis-à-vis à une variation de la référence de la vitesse, on introduit un changement de la consigne de vitesse .

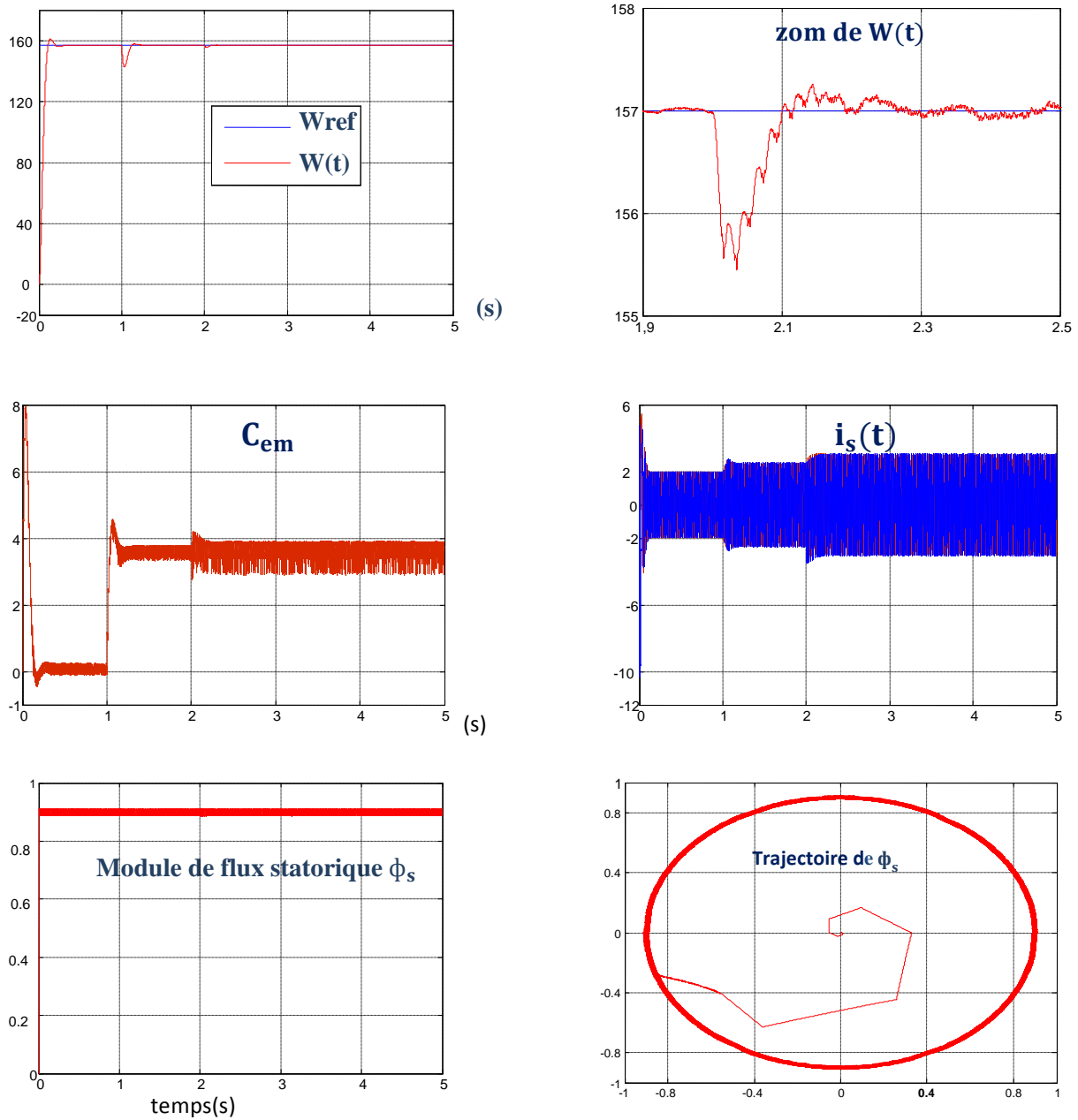
On constate que la poursuite de vitesse s'effectue sans dépassement, le courant est affecté aux instants de la variation de vitesse et revient rapidement pour se stabiliser au régime permanent et le couple instantané présente des oscillations.



**Fig 3.7** Réponse du système lors de l'inversion de sens de vitesse

### 3.9.3 Variation paramétrique :

Nous avons simulé le système pour une augmentation de 50% de la résistance rotorique introduite à  $t=2s$  aussi une diminution de 25% des inductances propres est mutuelle introduite à  $t=2s$ . Le courant présente des oscillations mais on peut constater que les valeurs au milieu des périodes de modulation suivent une évolution sinusoïdale et Le couple présente des oscillations.

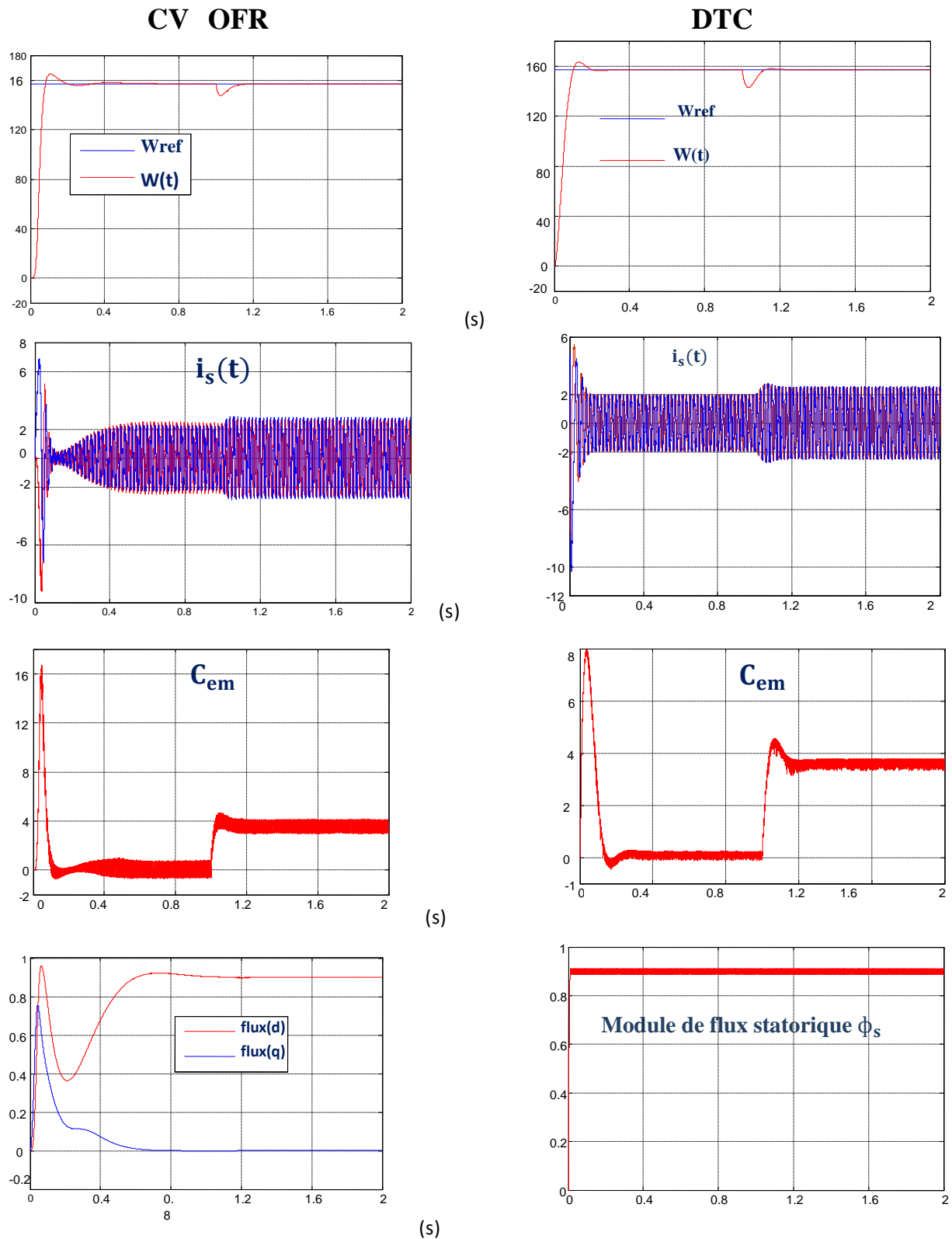


**Fig 3.8** Réponse dynamique de la machine lors de la variation des paramètres

### 3.10 Comparaison entre «CVOFR» et la « DTC » d'une machine asynchrone:

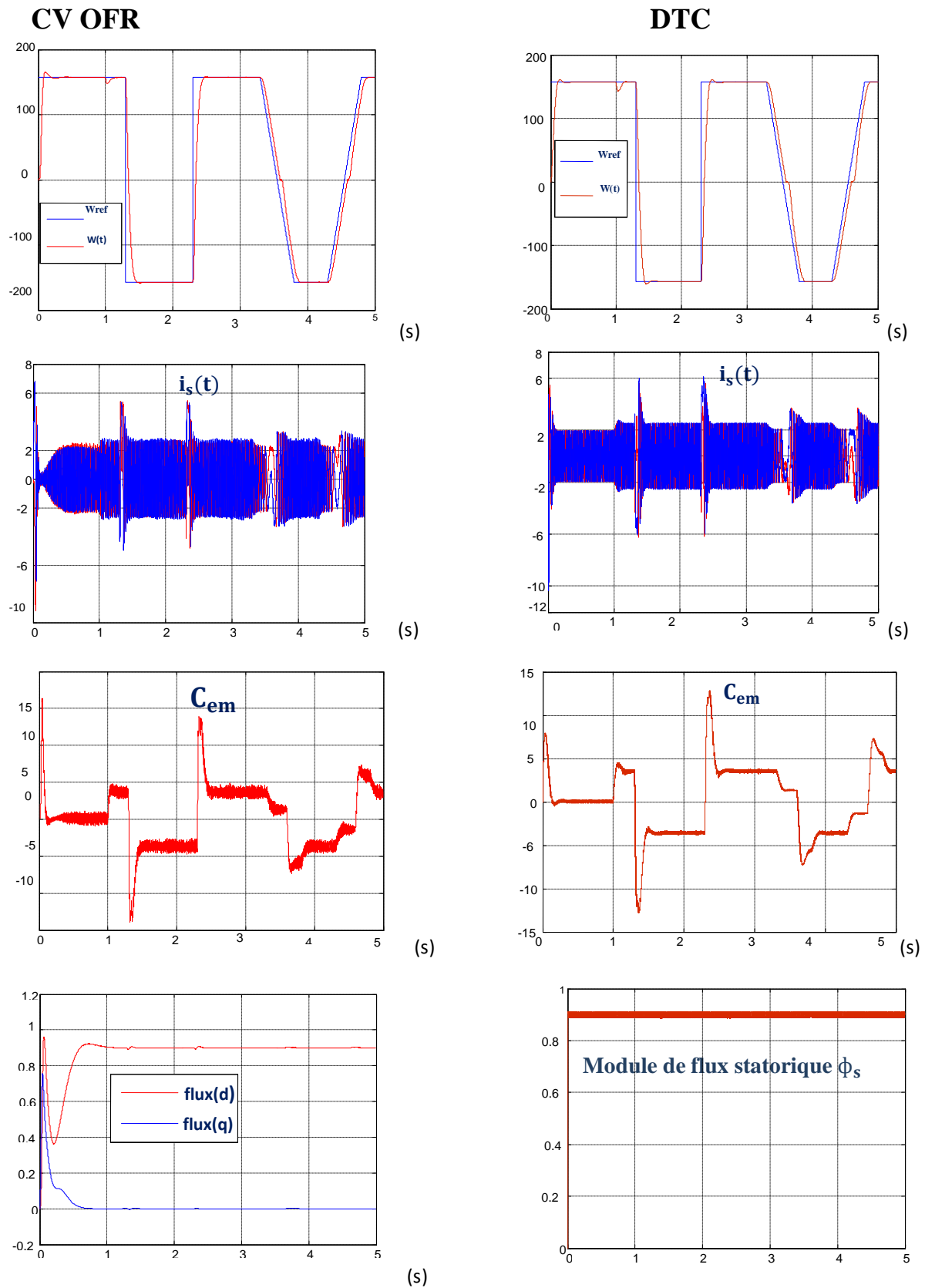
Pour mieux apprécier les performances de la commande DTC, une étude comparative avec la commande CVOFR.

### 3.10.1 Comparaison au niveau de démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge :



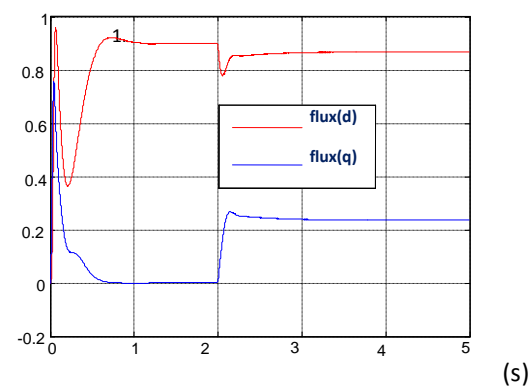
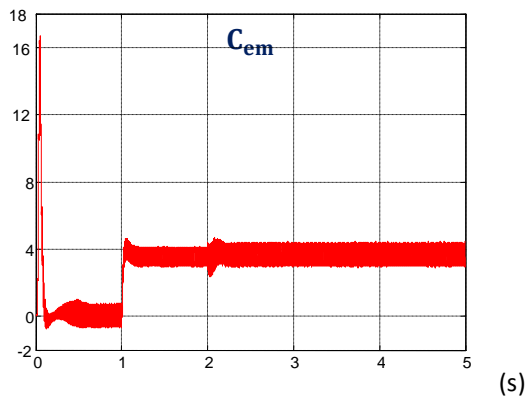
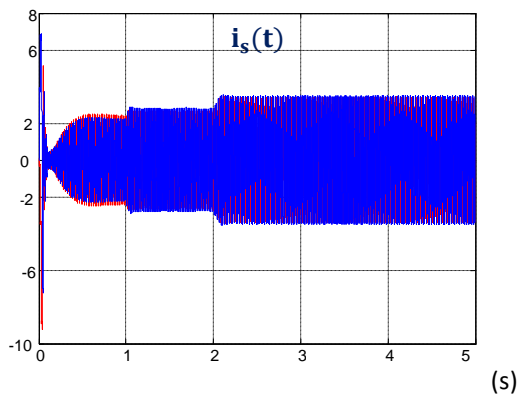
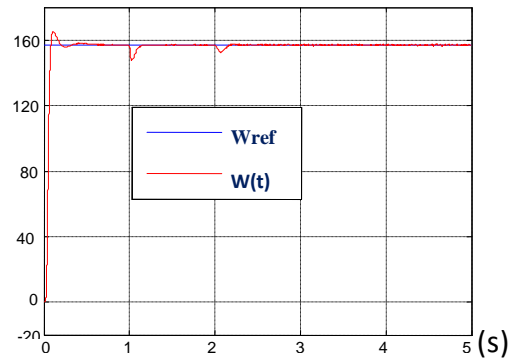
**Fig 3.9** Résultats de simulation CVOFR &DTC lors du démarrage à vide suivi d'une application d'un couple de charge.

### 3.10.2 Comparaison au niveau d'inversion du sens de rotation:

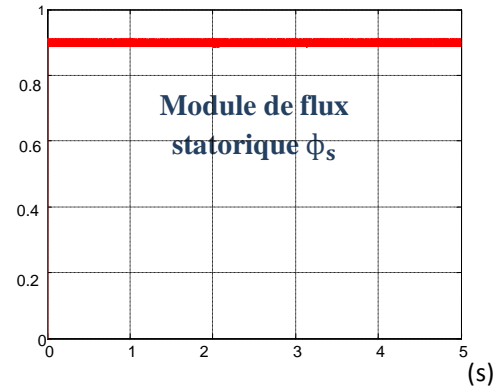
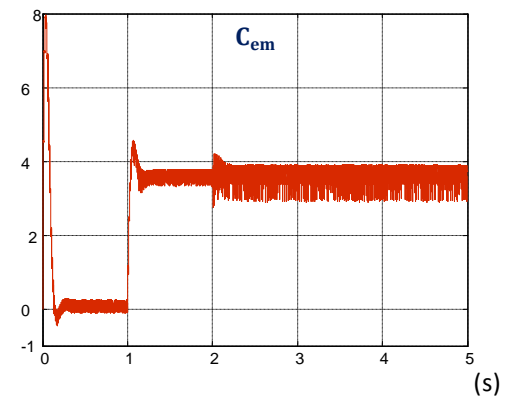
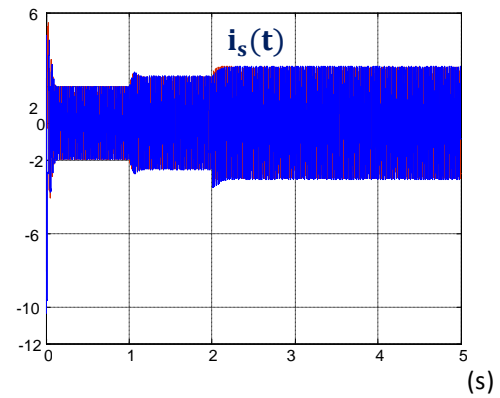
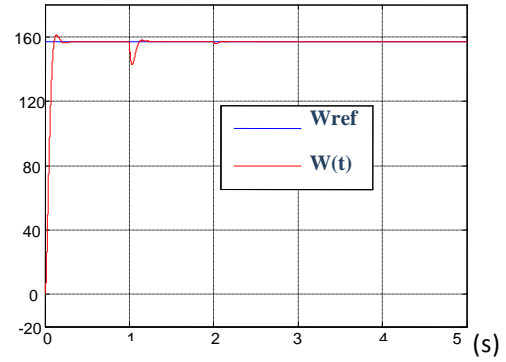


### 3.10.3 Comparaison au niveau de variation paramétrique :

#### CV OFR



#### DTC



**Fig 3.11** Résultats de simulation CVOFR &DTC lors de variation paramétrique

### 3.10.4 Discussion :

Le **tableau 3.2** résume une étude comparative des performances entre la DTC et CVOFR

**Tableau 3.2** Etude comparative des performances entre DTC et CVOFR

	<b>Commande vectorielle (FOC)</b>	<b>Commande directe du couple (DTC)</b>
Transform cordonnées	présente	Néant
dynamique	moins élevée	plus élevée
Robustesse	moins robuste	plus robuste
Découplage	Nécessité d'orientation	naturel
Fréquence commutation	Maîtrisée	Arbitraire
Complexité d'implémentation	Complexité élevée	Complexité moyenne
Captur de vitesse	Généralement nécessaire	Moins nécessaire
couple de démarrage	Plus élevée	moins élevée
Coût	plus Cher	moins Cher

Les résultats obtenus pour la commande vectorielle et pour la commande directe du couple sont nettement plus proches les uns des autres. On note pourtant que la convergence est sensiblement plus rapide dans le cas de commande directe du couple. On remarque aussi que le dépassement en couple, obtenu dans le cas du contrôle vectorielle est sensiblement plus grand par rapport au cas de la commande directe du couple.

### 3.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, les principaux concepts de base de la commande directe du couple « DTC » ont été présentés. Nous avons vu comment s'effectue le contrôle découplé du couple et du flux statorique en utilisant un choix convenable des vecteurs tension de l'onduleur et à la fin de ce chapitre on a fait une comparaison entre les deux types de commande CV OFR et DTC .