

TD d'Électronique de puissance - Mécatronique : Asservissement en vitesse d'une Machine Synchrones triphasée autopilotée

Valentin Gies

1 Présentation

Ce TP propose d'étudier le pilotage d'une machine synchrone à pôles lisses couplée à une charge. Dans un premier temps un modèle de la machine synchrone triphasée sera proposé et le pilotage scalaire de cette machine sera envisagé.

Un autopilotage vectoriel sera ensuite étudié.

Enfin, une charge dissymétrique sera ajoutée au système, ce qui permettra d'étudier les effets de cette charge sur l'asservissement en vitesse.

2 Modèle de la machine synchrone triphasée

On considère une machine synchrone à pôles lisses. Les tensions statoriques dans une machine synchrone sont définies comme suit :

$$[v_{abc}] = R[i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{abc}]$$
$$[v_{abc}] = R[i_{abc}] + \begin{bmatrix} L_0 & M & M \\ M & L_0 & M \\ M & M & L_0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt}[i_{abc}] + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \cos \theta_e - \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta_e + \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} \Phi_f$$

Dans ce TD, on négligera le rôle des mutuelles entre enroulement (hypothèse acceptable dans la mesure où il est possible de regrouper L et M après une transformation de Park). On obtient donc les équations suivantes :

$$[v_{abc}] = R[i_{abc}] + L_0 \frac{d}{dt}[i_{abc}] - \Omega \begin{bmatrix} \sin \theta_e \\ \sin \theta_e - \frac{2\pi}{3} \\ \sin \theta_e + \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} \Phi_f$$

Le couple dans une machine synchrone triphasée est défini par :

$$C = \frac{3VI \cos \phi}{\Omega} = \frac{3EI \cos \psi}{\Omega} = 3I\Phi_f \cos \psi$$
$$= \Phi_f [i_{abc}] \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta_e \\ \sin \theta_e - \frac{2\pi}{3} \\ \sin \theta_e + \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix}$$

On a bien évidemment toujours l'équation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = C - C_r$$

avec

$$\theta_e = p\theta_m$$

p étant le nombre de paires de pôles de la machine. Dans la plus-part des machines réelles, il n'y a pas trois paires de bobines (pôles) pour créer le champ tournant à partir des tensions triphasées. Il y a en réalité $3p$ paires bobines le champ tournant tourne donc d'un angle $\frac{2\pi}{p}$ à chaque période (au lieu de 2π si il y a seulement 3 bobine).

⇒ Proposer un modèle de la machine synchrone triphasée utilisant ces équations.

⇒ Implanter ce modèle sous Matlab Simulink. La partie correspondant aux équations en $\sin \theta_e$ sera implantée à l'aide d'un bloc fonction accessible dans :

Simulink → User Defined Functions → Fcn

Pour plus d'informations sur son utilisation, reportez-vous à l'aide en ligne. En cas de blocage, demander l'aide du professeur.

⇒ En faire un sous-système **machine synchrone** : les entrées de ce sous-système seront les tensions V_a, V_b, V_c et le couple résistant C_r . Les sorties seront les courants i_a, i_b, i_c , la vitesse mécanique $\frac{d\theta_m}{dt}$, l'angle mécanique θ_m , et l'angle électrique θ_e .

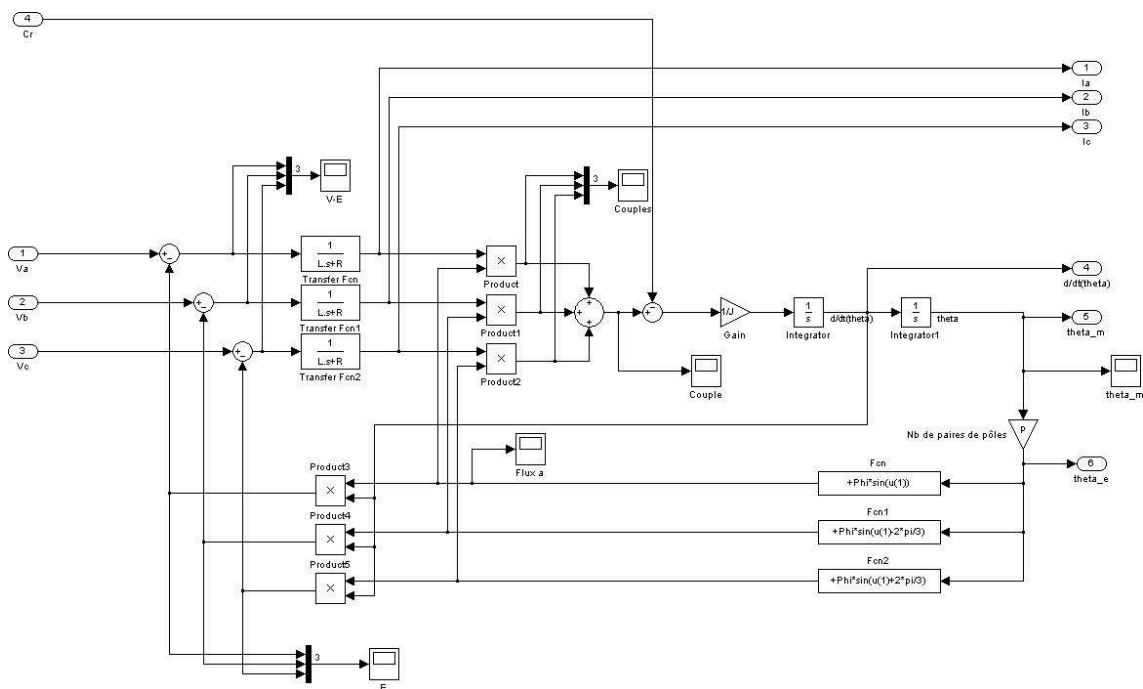


FIGURE 1 – Bloc Machine synchrone

3 Modèle de l'onduleur de tension

Un onduleur est un composant de puissance permettant d'asservir des tensions ou des courants sur des consignes. Nous utiliserons dans ce TD un onduleur de tensions sinusoïdales.

Avant de considérer un véritable onduleur réalisant un asservissement de tension sur une consigne, nous proposons de simplifier l'étude en considérant que l'asservissement effectué par l'onduleur est parfait (les consignes sont alors les signaux obtenus).

⇒ Proposer un bloc permettant de générer en fonction de U_0 , θ et ψ des tensions triphasées du type :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = U_0 \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e - \psi) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3} - \psi) \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3} - \psi) \end{bmatrix}$$

Ce bloc utilisera également les fonctions mathématiques définies par l'utilisateur, mais cette fois-ci à plusieurs entrées.

⇒ En faire un sous-système **consigne onduleur**. Ce bloc aura comme entrées : U_0 , θ et ψ et comme sorties V_a , V_b et V_c .

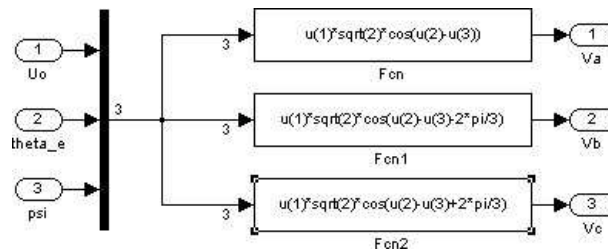


FIGURE 2 – Bloc Consignes Onduleur

4 Couplage de l'onduleur et de la machine synchrone

⇒ Lier ensemble l'onduleur et la machine synchrone en fixant $\psi = \frac{\pi}{4}$ dans un bloc constante et $U_0 = 220V$ dans un bloc constante. On simule la valeur instantanée de l'angle électrique θ_e utilisé en entrée par l'onduleur à l'aide d'un bloc horloge accessible dans :

Simulink → *Sources* → *Clock*

Pour avoir des valeurs de θ_e crédibles, on multiplie la valeur de la sortie du bloc horloge par un gain de 20 et on la lie la sortie du bloc Gain à l'entrée θ_e de l'onduleur.

⇒ Définir les constantes dans un fichier :

- Résistance induct $R = 0.895 \Omega$
- Inductance induct $L = 12.1610^{-3} H$
- Moment d'inertie du rotor : $J = 0.2 kg.m^2.s^{-2}$
- Constante électromécanique : $K = 0.9 V.s.rad^{-1}$
- nombre de paires de pôles : $p = 3$
- Constante électromécanique $\Phi_f = K/p$

⇒ Paramétrer le modèle pour que le fichier de configuration soit chargé automatiquement à chaque simulation.

⇒ Simuler le comportement du système sur une durée de 4s. Observer les courants i_{abc} , les tensions V_{abc} , la vitesse de rotation de la machine Ω et sur un même oscilloscope : l'angle électrique θ_e réellement parcouru et sa consigne (générée par le bloc horloge et son gain).

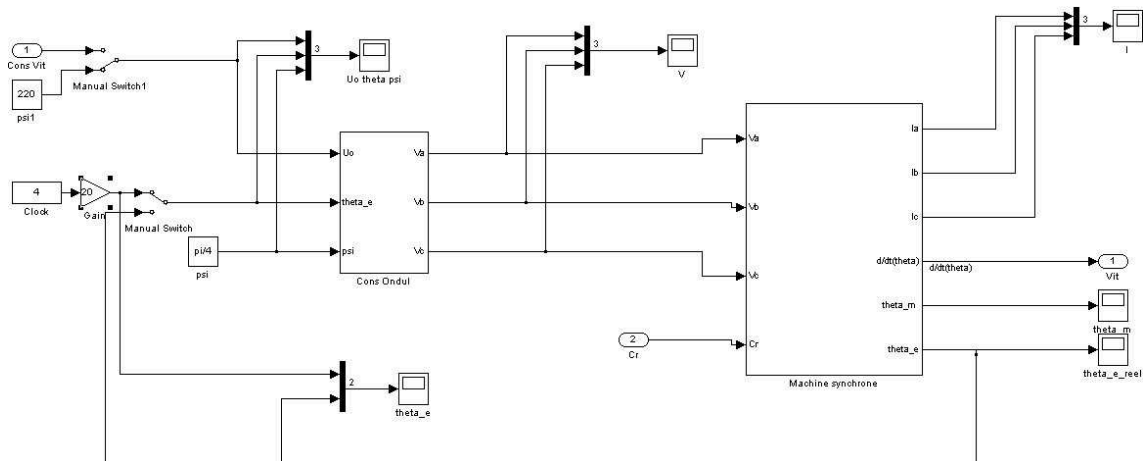
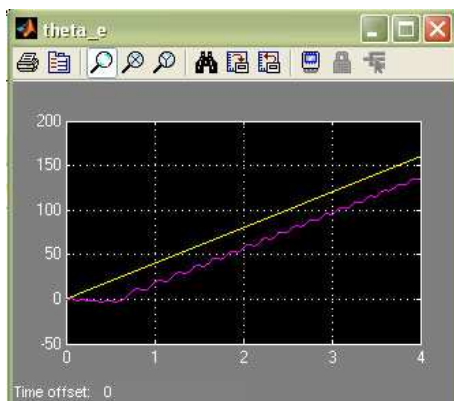
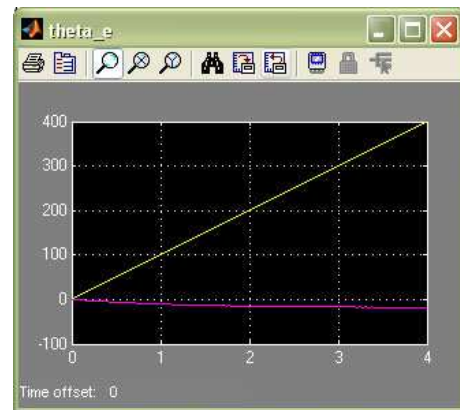


FIGURE 3 – Couplage MS - Onduleur

⇒ Augmenter le gain du bloc horloge progressivement pour atteindre la valeur 100. Que se passe-t-il? Observer en particulier le comportement du système pour un gain de 40, 60 et 100.

Si l'angle demandé est trop grand, la machine synchrone ne peut plus fournir le couple nécessaire. Il y a dans ce cas décrochage. Le décrochage a lieu à partir d'un gain de 40, mais dans ce cas, la machine se raccroche après avoir raté un tour. Pour un gain de 100, la machine décroche complètement, et l'angle n'évolue plus.

FIGURE 4 – Angles θ_e pour un gain de 40FIGURE 5 – Angles θ_e pour un gain de 100

5 Autopilotage de la machine synchrone

En fonctionnement autopiloté, l'angle électrique de la machine est réutilisé dans la génération des consignes de l'onduleur.

⇒ Enlever le générateur temporel alimentant θ_e et boucler le système.

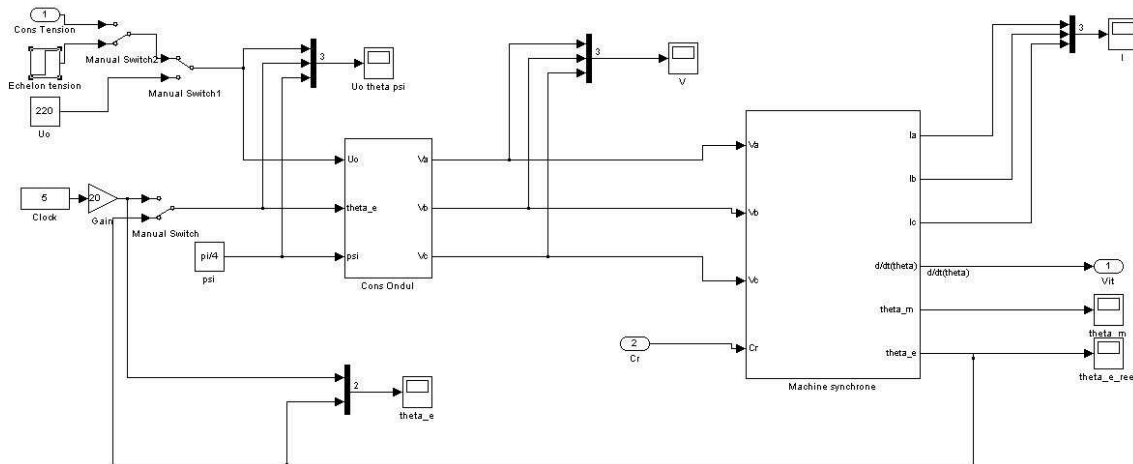
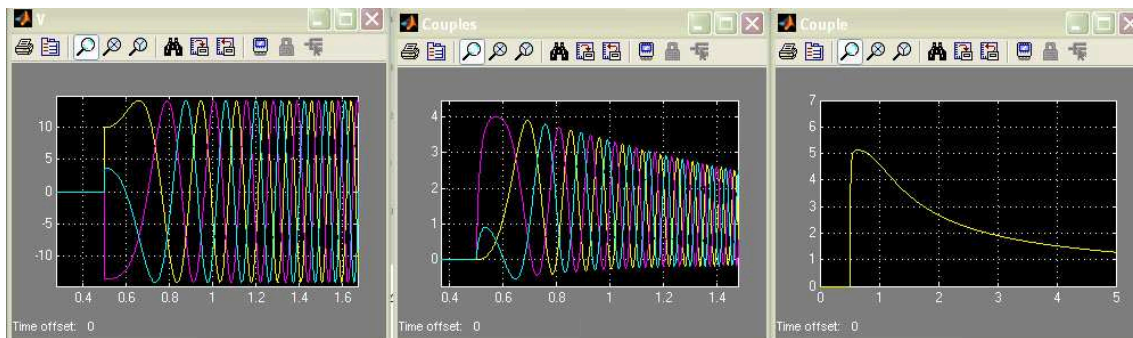


FIGURE 6 – MS autopilotée

⇒ Simuler le comportement de la machine synchrone autopilotée en l'alimentant par un créneau de tension U_0 de valeur $10V$ avec $\psi = \frac{\pi}{4}$. Observer les formes des tensions en sortie de l'onduleur, les courants dans la machine, les couples instantanés par phase et le couple global résultant. Vérifier le caractère continu et lisse du couple au démarrage de la machine synchrone.

FIGURE 7 – Tensions de phase, couples par phase et couple résultant en réponse à un échelon de tension $U_0 = 10V$

⇒ A l'aide du module d'analyse linéaire, déterminer la réponse à un échelon unitaire de vitesse et le diagramme de Bode de la machine. Quel est l'ordre de grandeur de la constante de temps dominante de la machine synchrone? Quel est l'ordre de la fonction de transfert? Quelle critique pouvez-vous faire quant à la pertinence de l'analyse de la fonction de transfert?

La constante de temps en boucle ouverte est de l'ordre de 2 secondes, ce qui est important. La fonction de transfert obtenue n'a de sens que pour l'amplitude d'entrée choisie. En effet, la réponse dépend de l'amplitude d'entrée : en particulier, une trop grande amplitude conduira à un décrochage de la machine qui n'est absolument pas visible dans le diagramme de Bode. Ceci est dû au fait que le modèle est linéarisé avant d'être étudié.

⇒ Faire varier ψ entre 0 et $\frac{\pi}{2}$. Observer l'effet sur la vitesse de rotation en régime permanent.

On constate que la vitesse de rotation de la machine synchrone en boucle ouverte dépend de ψ .

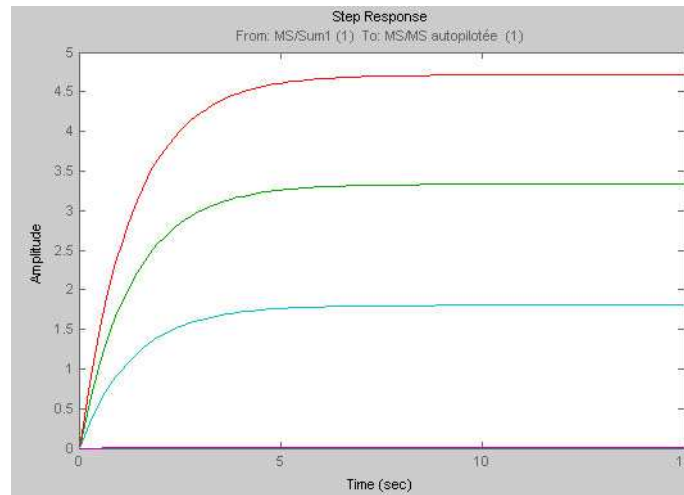


FIGURE 8 – Réponse de la machine synchrone à un échelon de tension pour différentes valeurs de ψ .

⇒ Générer un sous-système machine synchrone autopilotée ayant pour entrées U_0 et C_r et pour sortie Ω .

6 Asservissement en vitesse de la machine synchrone

⇒ Implanter un asservissement en vitesse de la machine synchrone autopilotée. Le correcteur choisi sera de type PI . On fixera $K_p = 20$. Régler T_i de manière à avoir un dépassement acceptable et une bonne dynamique. On choisira $\psi = \frac{\pi}{4}$

On prendra $T_i = 0.2$, soit $1/T_i = 5$.

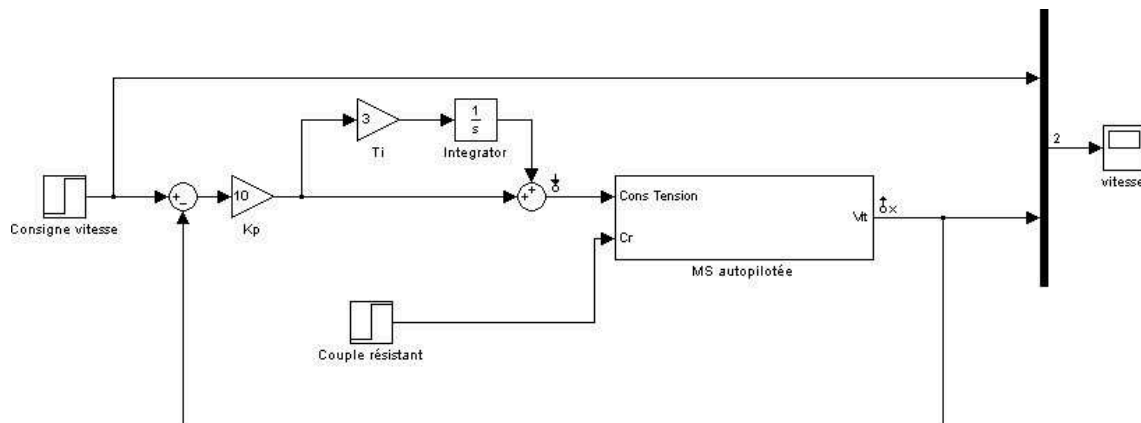


FIGURE 9 – Asservissement en vitesse d'une machine synchrone autopilotée

⇒ Vérifier le bon fonctionnement de la commande en vitesse de la machine synchrone. La commande réalisée permet de piloter une machine synchrone à la manière d'un moteur à courant continu.

La commande en vitesse de la machine synchrone autopilotée fonctionne bien. La constante de temps est de l'ordre de 0.1s, soit 20 fois moins que la constante de temps propre de la machine. Toutefois, on note des irrégularités dans l'évolution de la vitesse, dues à la non-linéarité de la fonction de transfert en boucle ouverte de la machine.

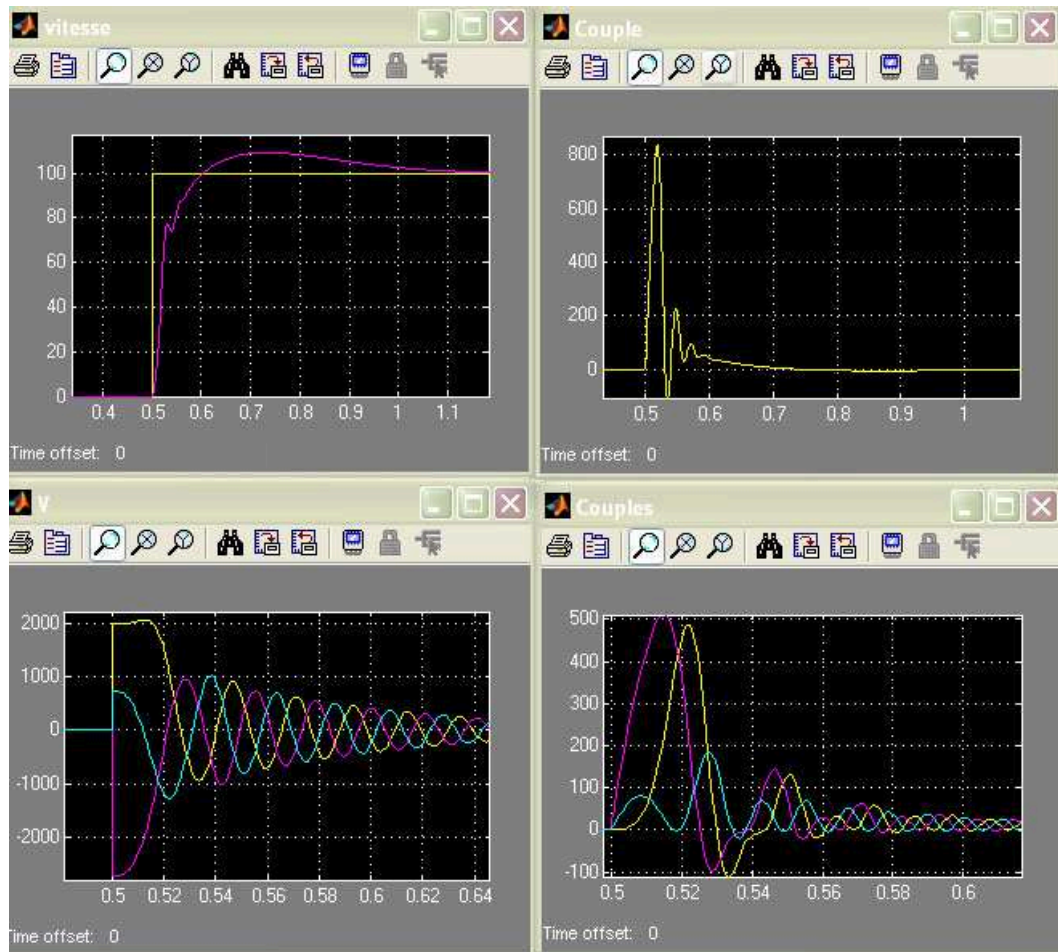


FIGURE 10 – Réponse de la machine synchrone autopilotée asservie en vitesse à un échelon de vitesse.

⇒ Les tensions en sortie de l'onduleur sont trop importante (un onduleur convertit une tension continue en tension alternative, l'amplitude de sa tension de sortie est limitée par l'amplitude de la tension continue d'entrée), il convient donc de modéliser la limitation en tension de l'onduleur en insérant un bloc de saturation à plus ou moins 220V.

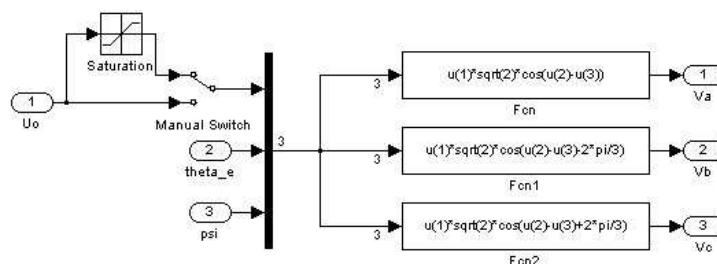


FIGURE 11 – Limitation de la tension de sortie de l'onduleur

⇒ Observer l'effet de cette limitation en tension sur la stabilité de l'asservissement.

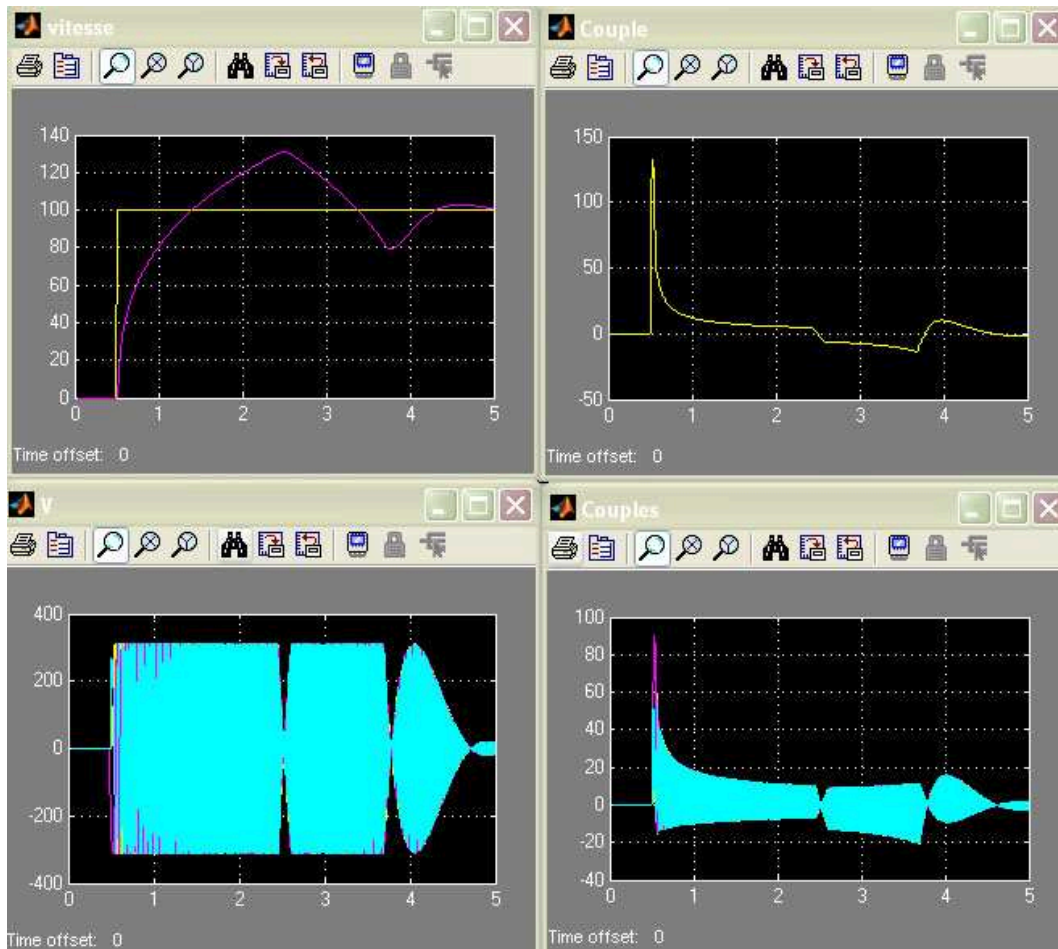


FIGURE 12 – Effet de la limitation de la tension de sortie de l'onduleur sur l'asservissement

⇒ Proposer un jeu de valeurs de K_p et T_i permettant d'obtenir un comportement plus stable.

Il faut réduire $1/T_i$ au strict minimum (pour assurer la nullité de l'écart statique, par exemple 0.1) car l'intégrateur intègre les erreurs dues à la saturation, ce qui donne des valeurs très importantes.

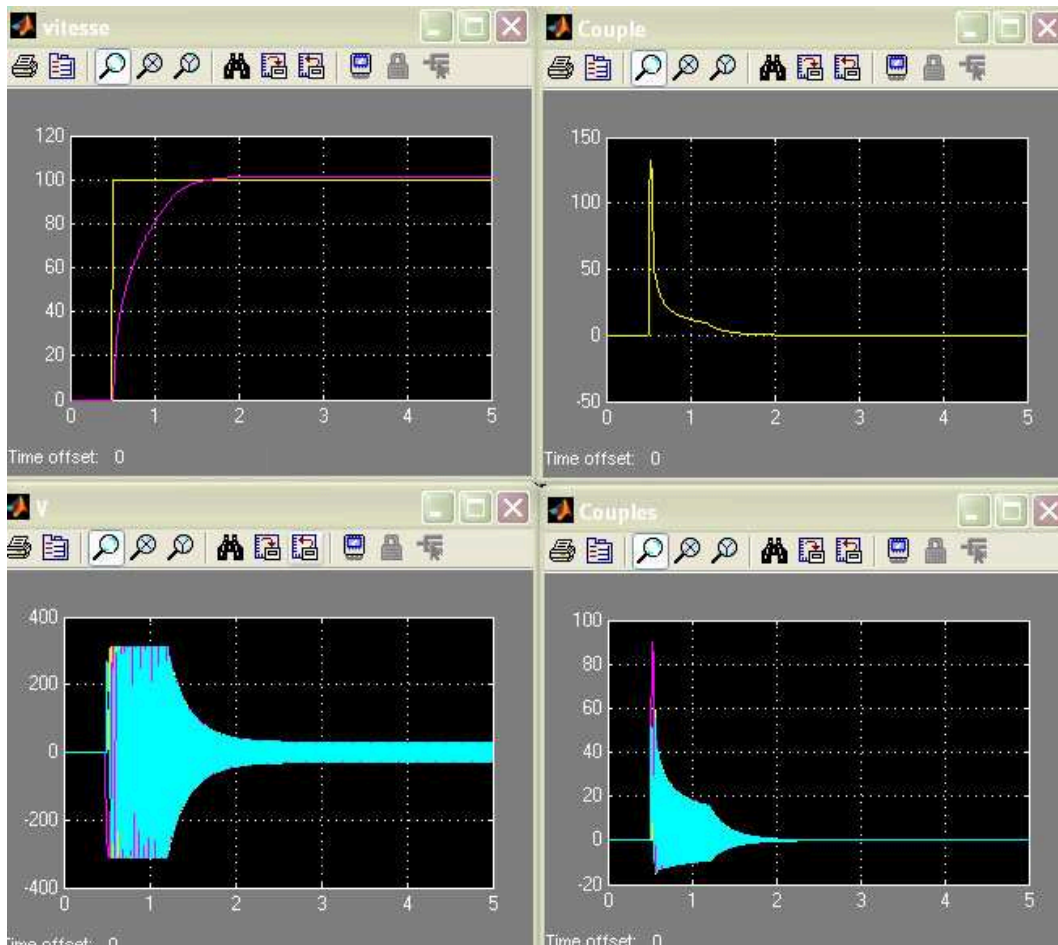


FIGURE 13 – Effet de la limitation de la tension de sortie de l'onduleur sur l'asservissement

On s'intéresse à présent à l'effet d'un **échelon de couple** sur le fonctionnement du moteur synchrone autopiloté. Dans cette partie, on désactive la limitation de tension en sortie de l'onduleur.

⇒ Observer les formes des courants, tensions et vitesse au démarrage et pour un échelon de couple résistant. Pour cela placer un échelon débutant à l'instant $t = 3s$ et augmenter la valeur de l'échelon progressivement à partir de $40Nm$.

La machine synchrone autopilotée asservie en vitesse s'adapte à l'échelon de couple, il est toutefois important de noter que plus l'échelon est grand, plus le temps de retour de la machine à sa vitesse normale est grand. En effet, le couple disponible pour faire réaccélérer la machine est égal à la différence entre le couple moteur et le couple résistant.

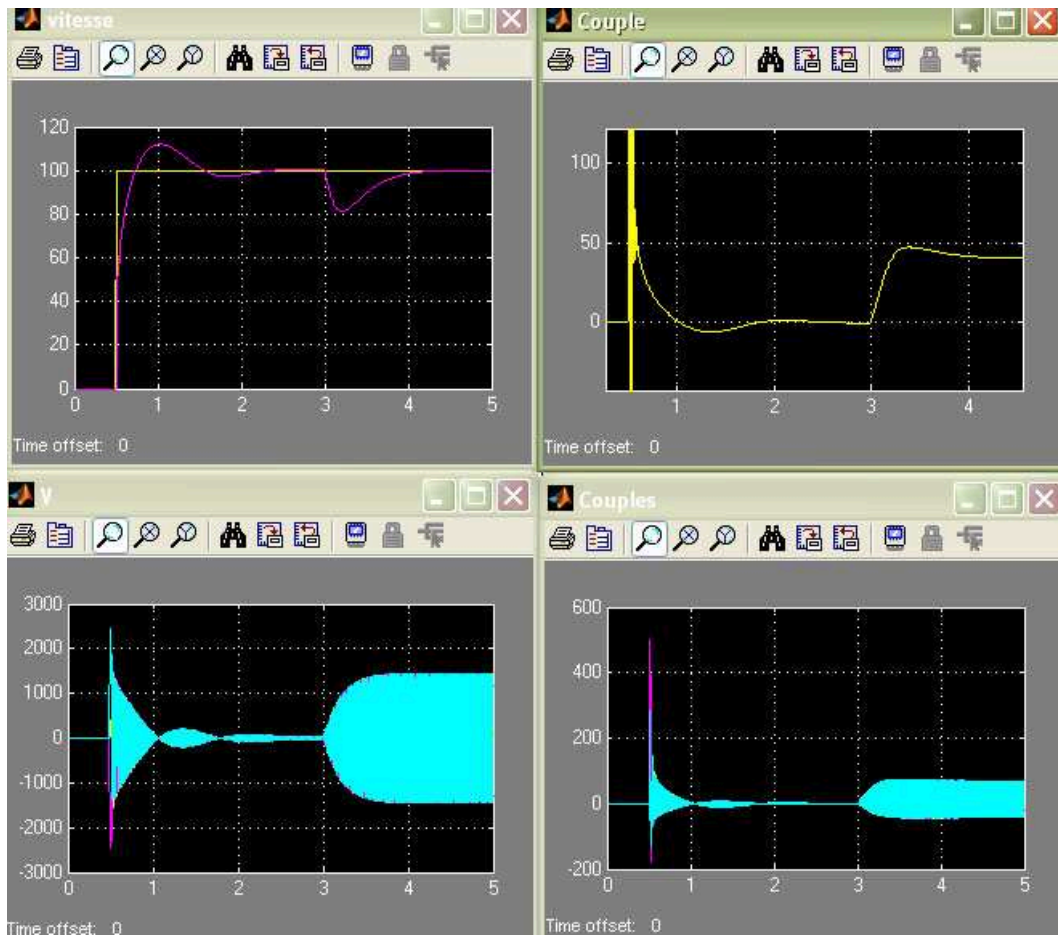


FIGURE 14 – Effet d'un échelon de couple résistant sur l'asservissement ($C_r = 40Nm$)