

Projet ES206 - Contrôle commande d'un entraînement électrique

Zhaoyi Guan & Dajing Gu

Mai 2020

Tous les codes de ce projet peuvent être téléchargés sur le lien :
github.com/PPatrickGU/ES206-electrical-motor-simulation/tree/master

1 Machine synchrone

1.1 Première simulation

Dans l'exercice 1, on veut représenter sous Matlab une machine électrique avec l'inertie, et l'alimenter par un onduleur triphasé dit « pleine onde ». La simulation est seulement sur la partie de power. Dans la simulation, il faut que toutes les quantités existent dès début en raison de l'alimentation de l'entrée. Comme la forme de l'alimentation ne change jamais, toutes les quantités vont osciller enfin autour d'un régime stable.

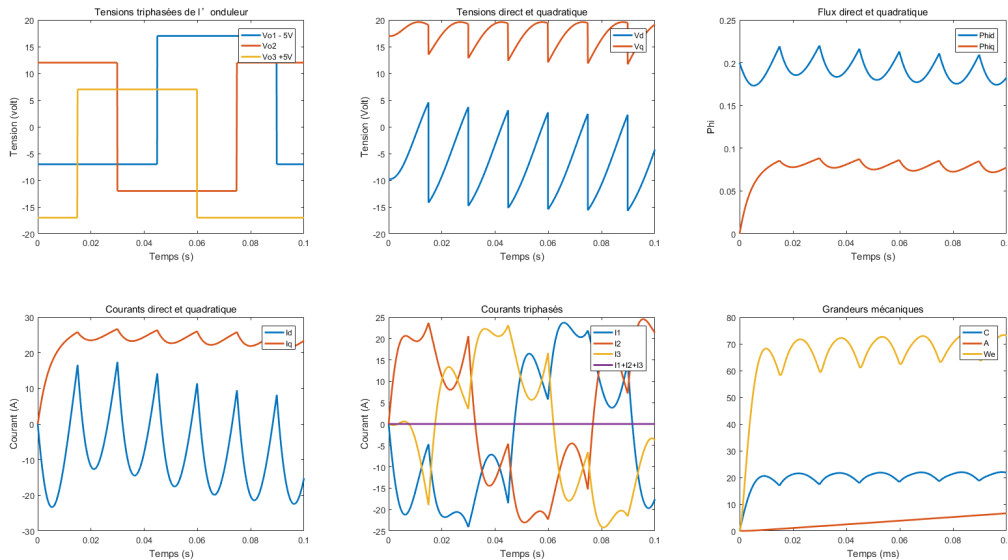


FIGURE 1 – Courbes de l'exercice 1

La première courbe est juste la figure de l'entrée, dont les formules sont : $V_{o1}(i) = E * \text{sign}(\sin(Wv * t(i) + \pi))$, $V_{o2}(i) = E * \text{sign}(\sin(Wv * t(i) + \pi - 2 * \pi/3))$ et $V_{o3}(i) = E * \text{sign}(\sin(Wv * t(i) + \pi - 4 * \pi/3))$.

La deuxième courbe est la représentation des tensions direct et quadratique, qui sont calculés par la transformation de park, dont la formule est : $V_d = (2/3)^{1/2} \cdot [\cos(\theta) \cdot V_1 + \cos(\theta - 2\pi/3) \cdot V_2 + \cos(\theta - 4\pi/3) \cdot V_3]$ et $V_q = (2/3)^{1/2} \cdot [\sin(\theta) \cdot V_1 - \sin(\theta - 2\pi/3) \cdot V_2 - \sin(\theta - 4\pi/3) \cdot V_3]$, où le θ est A.

Table 1 : Les valeurs demandées

Courant crête dans la phase I1 (A)	2.4×10
Courant crête dans la phase I2 (A)	2.5×10
Courant crête dans la phase I3 (A)	2.3×10
Vitesse moyenne (rad/s)	6.6×10
Couple moteur moyen (N.m)	2.0
Angle électrique A (rad)	1.1

La troisième courbe de Φ et la quatrième courbe de I ont une corrélation positive. Selon les formules, $\Phi_d = L_d \cdot I_d + \Phi_m$, Φ_d est en relation linéaire I_d , qui est représentée par la similarité des deux lignes bleus dans ces deux courbes. De même, en fonction de la formule : $\Phi_q = L_q \cdot I_q$, il y a aussi la similarité entre les deux lignes oranges dans ces deux courbes. Le calcul de Φ et I est fait par double boucle.

La cinquième courbe présente I_1 , I_2 , I_3 et la somme de ces trois courants, qui peuvent être calculés par la transformation inverse de Park : $I_1 = (2/3)^{1/2} \cdot [\cos(\theta) \cdot I_d - \sin(\theta) \cdot I_q]$, $I_2 = (2/3)^{1/2} \cdot [\cos(\theta - 2\pi/3) \cdot I_d - \sin(\theta - 2\pi/3) \cdot I_q]$ et $I_3 = (2/3)^{1/2} \cdot [\cos(\theta - 4\pi/3) \cdot I_d - \sin(\theta - 4\pi/3) \cdot I_q]$, où le θ est A. On peut trouver que la somme de ces trois courants est 0, qui est bien représenté dans la courbe.

La sixième courbe représente les grandeurs mécaniques. La formule du torque C est : $C = Pp \cdot [(\Phi_d) \cdot I_q - (\Phi_q) \cdot I_d]$. On a alimenté le moteur par un onduleur triphasé. Il faut que le courant quadratique du stator crée le champs magnétique, qui fournit le torque pour faire le tournement du rotor. En fonction de ces courbes, le torque augmente rapidement au début et atteint un régime stable, qui correspond à notre demande. La vitesse électrique partage le même changement, et l'angle augmente toujours car l'angle est l'intégration de la pulsation électrique.

1.2 Deuxième simulation

Dans la simulation sans résistance, la fréquence de chaque quantité ne change pas mais l'amplitude devient de plus en plus grande. Le torque a une oscillation autour de 0, qui signifie que le rotor ne peut pas faire le tournement, et l'angle A est toujours 0. Donc le moteur ne peut pas fonctionner sans résistance de frottement.

2 Modulation de largeur d'impulsion

Cette fois, V_{o1} , V_{o2} , V_{o3} ne seront plus les entrées du système, mais RV_{o1} , RV_{o2} , RV_{o3} . Dans cette partie, on va ajouter la simulation du PWM.

La septième courbe représente le RV_{o1} , RV_{o2} et RV_{o3} que l'on fournit, avec $RV_{o1}(i) = E \cdot \sin(Wv \cdot t(i) + \pi)$, $RV_{o2}(i) = E \cdot \sin(Wv \cdot t(i) + \pi - 2 \cdot \pi/3)$ et $RV_{o3}(i) = E \cdot \sin(Wv \cdot t(i) + \pi - 4 \cdot \pi/3)$.

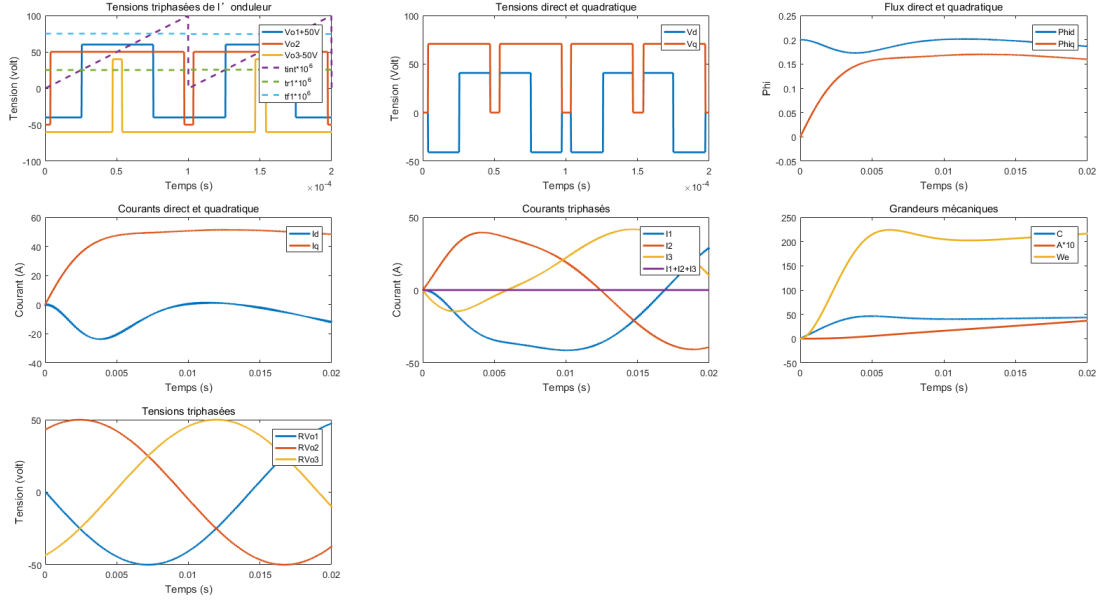


FIGURE 2 – Courbes de l'exercice 2

$$t(i) + \pi - 4 * PI/3).$$

La première courbe représente le V_{o1} , V_{o2} et V_{o3} , mais la forme est contrôlée par la valeur de RV_{o1} , RV_{o2} et RV_{o3} , c'est le délai de commutation. Or $tr_1 = tp.(1 - RV_{o1}/E)/4$, $tf_1 = tp.(3 + RV_{o1}/E)/4$, donc la durée de la tention positive est : $t_1 = tf_1 - tr_1 = tp.(1 + RV_{o1}/E)/2$, qui a une relation de corrélation positive avec RV_{o1} . Au début, $RV_{o2} > RV_{o1} > RV_{o3}$, donc on peut observer sur la courbe 1 que $t_2 > t_1 > t_3$, c'est-à-dire que le créneau rouge est plus grand que celui de bleu, qui est plus grand que celui de jaune.

De la même raison que dans l'exercice 1, la courbe 2 représente la tension après la transformation de Park. La courbe 3 de Φ a une relation de corrélation positive avec la courbe 4 de I . La courbe 5 représente les courants après la transformation inverse de Park. Et la courbe 6 représrnte les quantités mécaniques.

Table 2 : Les valeurs demandées

Courant crête dans la phase I1 (A)	2.9×10
Courant crête dans la phase I2 (A)	4.0×10
Courant crête dans la phase I3 (A)	4.2×10
Vitesse moyenne (rad/s)	1.8×10^2
Couple moteur moyen (N.m)	3.9
Angle électrique A (rad)	3.7

3 Commande en tension progressive, et surveillance

Par rapport à la question précédente, dans cette partie, on veut rajouter une commande en système en tension progressive. On sait que la vitesse du rotor doit croître avec les tensions. Alors on entre les références de tensions direct et quadratique RVd et RVq et on leur

fait croître avec une pente constante 5000V/s pendant 20ms, pour que la vitesse de rotation augmente progressivement pendant cette période. De plus, on veut aussi surveiller le système en prenant de mesures échantillonnées. Afin d'éviter surintensité, on mesure les intensités de courant de trois phases au début de chaque période de découpage et on les note MI1, MI2, et MI3. Pour éviter le décrochement, on mesure la position du rotor par MA et on applique toujours un torque C sur le rotor. Par la transformation de Parker, on peut mesurer les courants direct et quadratique MI_d et MI_q.

Maintenant, on change l'amplitude de tension d'alimentation à 2E=800V et le coefficient du frottement visqueux k=0.1. Toutes les autres parties du système restent les mêmes que la question précédente. Le résultat est présenté ci-dessous dans la figure 3 :

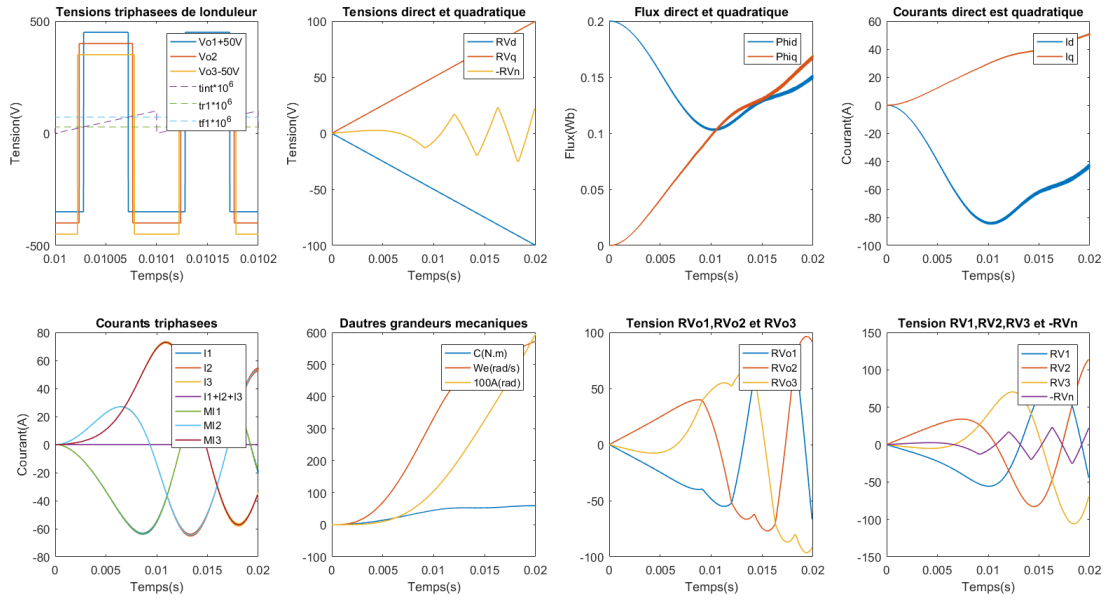


FIGURE 3 – Courbes de l'exercice 3

Si on prend 7ms comme l'état final de la simulation, on peut obtenir les états ci-dessous :

Table 3 : Etats de la machine au bout de 7ms

Courant crête dans la phase I1 (A)	-55
Courant crête dans la phase I2 (A)	26
Courant crête dans la phase I3 (A)	29
Vitesse moyenne (rad/s)	40
Couple moteur moyen (N.m)	26
Angle électrique A (rad)	0.32

En général, pour RVo1, RVo2 et RVo3, leurs amplitudes et fréquences augmentent tous les deux avec le temps. Alors on voit bien que la vitesse de rotation W_m croît avec l'accroissement de tensions, ce qui correspond à ce que l'on a prévu. W_m ne dépasse pas la vitesse mécanique de base $Pp \times W_{mbase} = 1400 \text{ rad/s}$. Le torque appliqué au rotor est toujours supérieur à zéro et inférieur au torque maximal 50N.m. L'angle électrique reste ne pas trop grand, alors il n'y pas de décrochement. Cependant, le courant crête dans la phase 1 atteint l'intensité maximale 55A. Alors les tensions de référence ne doivent plus augmenter avec la

même pente après 7ms pour éviter la surintensité.

Les variations de tous les autres variables sont raisonnables, d'après les formules posées dans les parties précédentes.

4 Commande en flux

4.1 Principe de la boucle

Dans cette dernière partie, pour contrôler plus précisément et optimiser le torque C , on veut réguler les flux ϕ_q et ϕ_d . Quand $W_m < W_{mbase}$, on a les relations suivantes :

$$RPhid = Phim, \quad RPhiq = (Lq.RC)/(Pp.Phim)$$

Pour fermer le boucle, on utilise P&I correctors pour déduire RVd et RVq de RPhid et RPhiq. Pour établir ces correctors, d'abord, on doit mesurer les flux dans la machine et les comparer avec les références. Les mesures des flux sont obtenues par les mesures des courants :

$$MPhiq = Lq.MIq, \quad MPhid = Lq.MId + Phim$$

MIq et MId sont obtenus comme dans la question précédente. Et les erreurs entre les références et les mesures sont :

$$EPhid = RPhid - MPhid, \quad EPhiq = RPhiq - MPhiq$$

Ici, pour simplifier la programmation, on néglige la partie d'intégration du corrector. On prend seulement en compte du terme de dérivation, qui est l'erreur multipliée par le gain proportionnel $Gp \approx 5000 \text{ rad/s}$. Ensuite, on peut obtenir RVd et RVq par :

$$RVd = Gp.EPhid - MWe.MPhiq, \quad RVq = Gp.EPhiq + MWe.MPhiq$$

Toutes les valeurs de mesure sont toujours renouvelées au début de chaque période de découpage. On sait que RVd et RVq sont les entrées de la question précédente, alors la boucle fermée est établie.

Comme on a présenté, la régulation par boucle fermée pour le flux direct peut être représenté par le schéma-blocs :

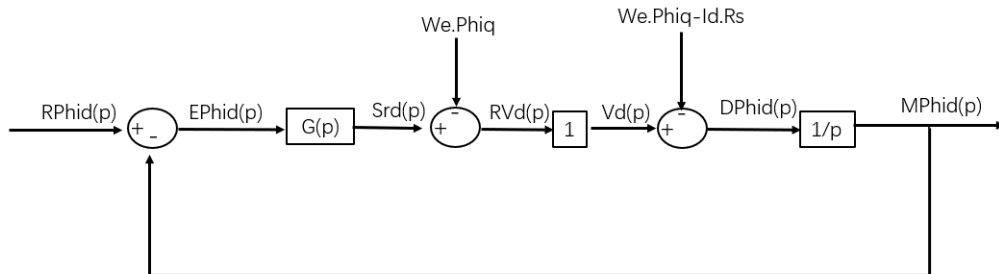


FIGURE 4 – Boucle fermée de régulation de flux direct

On peut voir que les perturbations se compensent. Donc De Srd à MPhid, le gain est à peu près une intégration. On prend $G(p)=5000 \text{ rad/s}$. Donc le schéma peut être simplifié comme ci-dessous :



FIGURE 5 – Boucle fermée sans perturbation

Si on appelle la fonction de transfert en boucle ouverte $OL(p)$ celle allant de l'erreur de la boucle fermée jusqu'à la mesure, on peut simplifier encore le schéma :

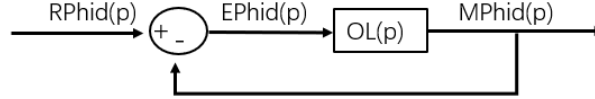


FIGURE 6 – Boucle fermée avec une fonction de transfert OL

On a $OL = Gp/p$. Pour tracer le diagramme de Bode, on réduit $p = jw$, avec $j^2 = -1$ et w la pulsation de la tension. alors $|OL| = \frac{Gp}{w}$. Donc $\log(|OL(w)|) = \log(Gp) - \log(w)$. Alors le diagramme de bode en amplitude est une droite pour la fonction de transfert en boucle ouverte, avec la pente -1. On le trace en matlab :

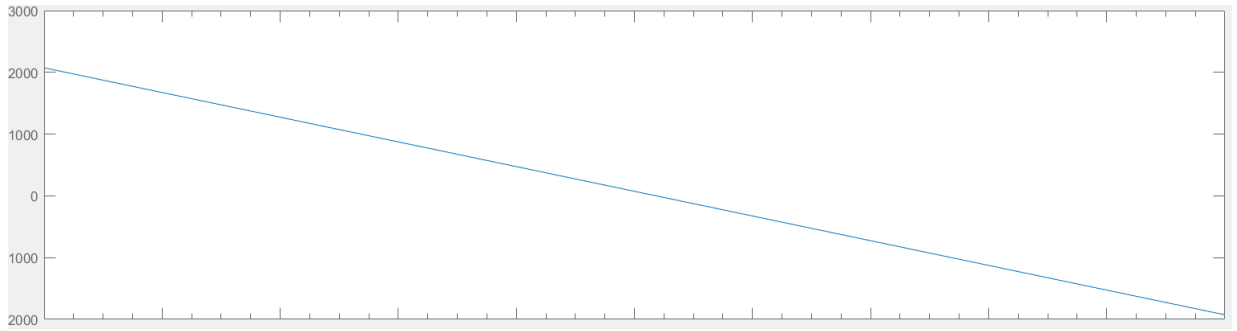


FIGURE 7 – diagram de bode pour OL

4.2 Analyse de la simulation

Afin d'optimiser le torque, dans cette partie, on fait une simulation de 7ms. De 0 à 0.5ms, on n'applique aucun torque donc laisse les tensions à 0. De 0.5ms à 1.5ms, on augmente le torque linéairement avec le temps, jusqu'au torque maximal $RC1=50N.m$. Pour le reste du temps, on le maintient à cette valeur maximale. On n'applique pas le frottement visquex dans cette partie. Le résultat est présenté dans la figure 8.

Sur la troisième image, on voit bien que les évolutions des flux correspondent bien les entrées de la simulation. Grâce à cela, selon les courbes dans la sixième image, le torque réel suit bien la référence de torque, ce qui est notre objectif. En raison du torque appliqué, la vitesse de rotation Wm augmente linéairement avec le temps. Par rapport à la question précédente, cette augmentation est plus lisse. Pour la puissance absorbée par le moteur P, comme la vitesse de rotation augmente toujours et que le torque de la machine est croissant, la puissance mécanique de sortie augmente. Alors la puissance électrique absorbée par la

machine doit aussi augmenter. De plus, tous les autres paramètres présentés dans ces images peuvent être justifiés par les formules posées avant. Les valeurs de mesures correspondent bien à leurs valeurs en temps réel. La seule différence est que si on amplifie ces courbes, ces valeurs de mesures varient par étage, avec la période égale à celle du découpage, ce qui est raisonnable.

Les valeurs de surveillance sont présentés dans le tableau ci-dessous, au bout de 7ms :

Table 4 : Etats de la machine au bout de 7ms	
Courant crête dans la phase I1 (A)	40
Courant crête dans la phase I2 (A)	-48
Courant crête dans la phase I3 (A)	7.2
Vitesse moyenne (rad/s)	3.5×10^2
Couple moteur moyen (N.m)	48
Angle électrique A (rad)	4.1

Alors il n'y a pas de surintensité, ni décrochement dans la simulation.

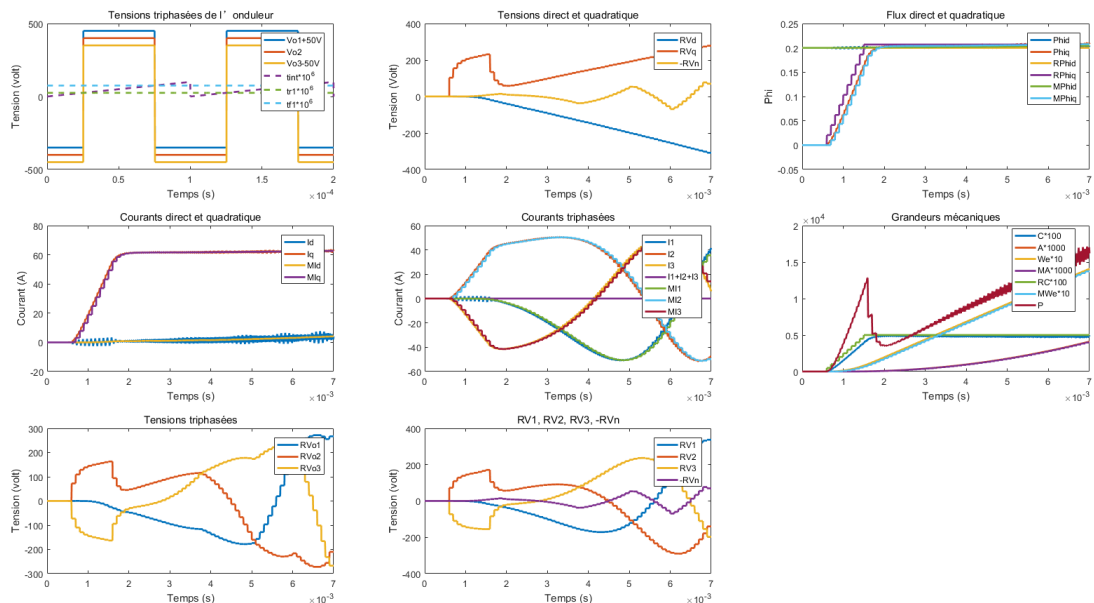


FIGURE 8 – Courbes de l'exercice 4