

TD N°20 - Moteurs - Électronique de puissance

EXERCICE 1 : Motorisation de la foreuse du robot PHILAE (Mines-Ponts PSI)

Le robot Philæ avait notamment pour mission de forer le sol de la comète sur une profondeur de 40 cm. Il n'a pu réaliser pleinement cette partie de sa mission car le site sur lequel il s'est finalement posé après trois rebonds était trop incliné. Il a cependant pu faire de très nombreuses mesures dont l'analyse permettra de mieux comprendre la formation du système solaire. Dans cette partie nous allons étudier les caractéristiques techniques du moteur de sa foreuse. Il s'agit d'un moteur synchrone associé à un onduleur de tension. Cette structure permet de concevoir un dispositif robuste de forte puissance, délivrant un fort couple et présentant une bonne durée de vie, toutes ses qualités étant ici nécessaires. Afin de simplifier l'étude, les pertes mécaniques ainsi que les pertes fer de ce moteur synchrone seront négligées. Finalement, le moteur sera assimilé à une machine synchrone diphasée dont les deux enroulements statoriques sont identiques.

III.A. — Essais préalables

L'inducteur du moteur synchrone de la foreuse de Philæ est à aimants permanents et possède 8 pôles, soit 4 paires de pôles.

Chaque bobinage du stator possède une résistance de $0,03 \Omega$.

L'intensité nominale du courant dans un enroulement du stator est $I_N = 155 \text{ A}$. Pendant une durée limitée, elle peut atteindre la valeur maximale $I_M = 185 \text{ A}$.

La machine est étudiée en convention récepteur.

Le modèle équivalent à une phase de l'induit est représenté sur la figure 3. Les tensions et courants sont supposés sinusoïdaux de pulsation $\omega = 2\pi f$. Afin de déterminer les paramètres du modèle, divers essais ont été effectués :

- Essai n°1 : sur un banc d'essais, on a entraîné la machine synchrone à vide par l'intermédiaire d'un moteur auxiliaire à la vitesse $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. Aux bornes d'une phase, on a mesuré une tension simple de 57 V .

Cet essai correspond à des intensités nulles dans les bobinages statoriques.

- Essai n°2 : avec une alimentation électrique appropriée, on a effectué un essai de la machine en moteur à $1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ pour lequel $\psi = 0$, $I = I_M = 185 \text{ A}$, et $V = 72 \text{ V}$.

□ 16 — On admet qu'en régime permanent de vitesse, la condition de synchronisme pour un moteur possédant p paires de pôles s'écrit $\omega = p\Omega$, où Ω désigne la vitesse de rotation du rotor en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

Après avoir justifié cette relation, déterminer la fréquence des tensions statoriques quand $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.

□ 17 — Représenter le diagramme vectoriel relatif à l'essai n°2. La résistance R n'étant pas négligée, en déduire la valeur de L .

□ 18 — La valeur efficace de la force contre-électromotrice E a pour expression $E = \Phi_0 \omega$. Quelle est l'unité de la constante Φ_0 ? Que représente-t-elle? De quels paramètres de la machine dépend-elle? Montrer que $E = A\Omega$, où A est une constante dont on précisera l'expression et la valeur numérique.

Dans toute la suite on négligera la chute de tension ohmique ainsi que les pertes par effet Joule dans les circuits statoriques.

□ 19 — Tracer un diagramme vectoriel représentatif d'un point de fonctionnement quelconque dans le cas où $0 < \psi < \frac{\pi}{2}$. En déduire une relation entre V , E , φ et ψ .

□ 20 — Déterminer l'expression de la puissance électrique absorbée par le moteur P_a en fonction de V , I et φ puis en fonction de E , I et ψ . Quelle relation existe-t-il entre cette puissance électrique P_a et la puissance mécanique électromagnétique P_m reçue par le rotor?

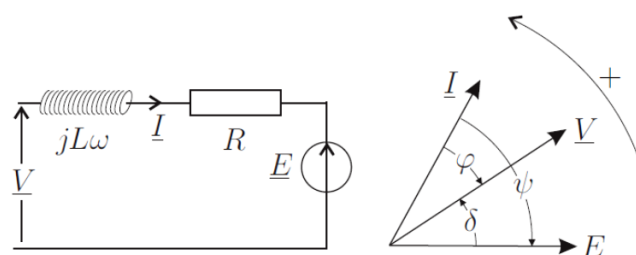


FIG. 3 – Schéma électrique et diagramme vectoriel d'une phase du moteur.

□ 21 — Exprimer le couple électromagnétique C développé par le moteur en fonction de A , I et ψ . Pour une intensité efficace I donnée, que doit-on faire pour maximiser le couple développé par la machine ? De quelle unique variable le couple dépend-il alors ? A quel autre moteur ce fonctionnement fait-il penser ?

□ 22 — On se placera sur un point de fonctionnement à $\psi = 0$, $I = I_N$, et $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. Que vaut le moment du couple C développé par le moteur ? Représenter le diagramme vectoriel représentatif du fonctionnement. Placer les vecteurs représentatifs des complexes \underline{E} , \underline{V} , \underline{I} . En déduire les expressions de V et φ . Calculer leurs valeurs numériques correspondantes.

III.B. — Etude simplifiée de la logique de commande MLI

Le moteur est alimenté par un onduleur à commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Nous simplifierons l'étude de l'onduleur par le schéma monophasé de la partie gauche de la figure 4.

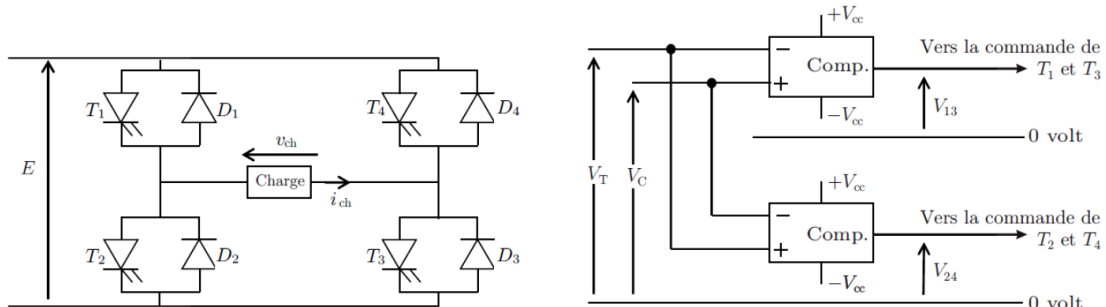


FIG. 4 – Schéma de l'onduleur (à gauche) et de son circuit de commande (à droite)

Les deux comparateurs à base d'ALI supposés idéaux sont alimentés entre $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$. La tension de sortie de ces deux comparateurs commute entre $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$. Lorsque la tension de sortie d'un comparateur est au niveau $+V_{cc}$, les interrupteurs associés sont commandés à la fermeture ; quand cette tension est au niveau $-V_{cc}$, les interrupteurs associés sont commandés à l'ouverture. Les tensions V_T et V_C sont définies sur la partie droite de la figure 4 représentant le circuit de commande de l'onduleur. Leurs chronogrammes sont représentés sur la figure 5.

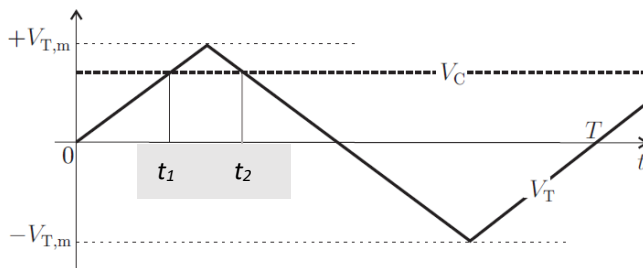


FIG. 5 – Chronogrammes des tensions V_T et V_C .

- 23 – Reproduire la figure 5 et représenter en dessous, en faisant correspondre les temps, les graphes de V_{13} et V_{24} . Calculer les dates t_1 et t_2 , ainsi que l'intervalle $t_2 - t_1$ en fonction de T , V_C et $V_{T,m}$.
- 24 – Tracer $v_{ch}(t)$. Déterminer le rapport cyclique α correspondant puis la valeur moyenne de $v_{ch}(t)$ en fonction de α et E . Le signal $v_{ch}(t)$ est-il alternatif ?

La commande réelle permet d'alimenter le moteur avec une tension dont la forme est représentée sur la figure 6 (page 3) ; les angles $\alpha_i = 1...6$, compris entre 0 et $\pi/2$, sont fixés. Les angles suivants s'en déduisent par symétrie.

- 25 – Calculer la valeur moyenne de la nouvelle tension $v_{ch}(t)$ ainsi que sa valeur efficace en fonction de E et des angles $\alpha_i = 1...6$.

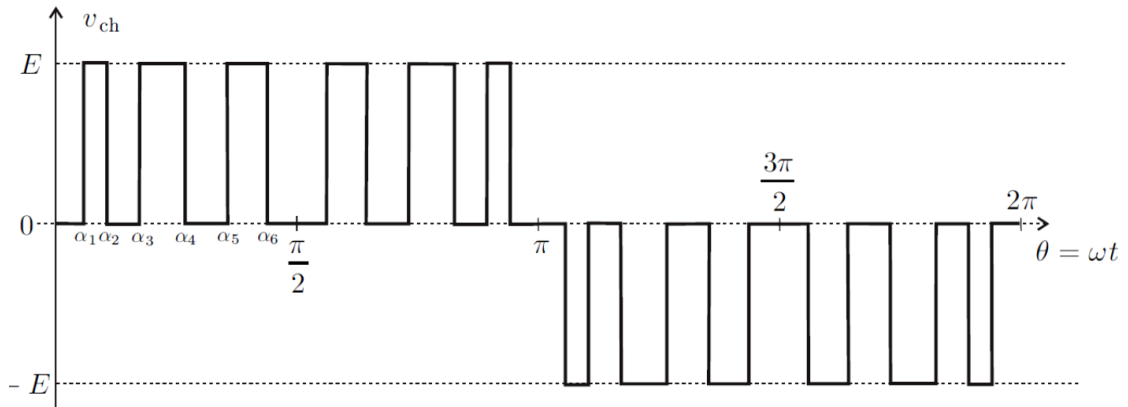


FIG. 6 – Commande réelle d'alimentation

- 26 – Pour la fonction $v_{ch}(t)$ de la question 24 avec un rapport cyclique de $\frac{1}{2}$, que nous noterons désormais v_{ch1} , le développement en série de Fourier s'écrit :

$$v_{ch1}(t) = \frac{4E}{\pi}(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{9} \sin(9\omega t) + \dots).$$

Pour la fonction $v_{ch}(t)$ de la question 25 que nous noterons désormais v_{ch2} , un choix convenable des $\alpha_{i=1..6}$ permet d'obtenir le développement en série de Fourier suivant :

$$v_{ch2}(t) = \frac{4E}{\pi}(0,8 \sin(\omega t) - \frac{2}{13} \sin(13\omega t) - \frac{2,61}{15} \sin(15\omega t) + \dots).$$

Dans les deux cas, les...correspondent à des harmoniques d'ordre supérieur.

Commenter les formes de ces signaux.

Que pensez-vous de l'idée d'intercaler un filtre (de quel type ?) entre l'onduleur et le moteur dans chacun des deux cas ?

III.C. — Etude d'une commande MLI numérique, précalculée

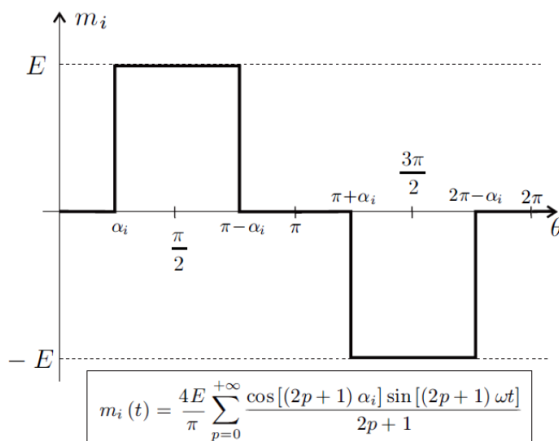


FIG. 7 – Signal de base.

Pour chaque angle $\alpha_{i=1,\dots,6}$ prédéterminé par un calculateur, on fabrique un signal de base noté $m_i(t)$ dont le chronogramme et la décomposition de Fourier sont donnés sur la figure 7. Ces signaux de base permettent de reconstruire la tension d'alimentation du moteur.

- 27 — Représenter sur un même graphe les signaux m_1 et m_2 en fonction de θ puis en déduire le graphe de $m_1 - m_2$ en fonction de θ . En déduire l'expression de la tension $v_{ch}(t)$ de la figure 6 en fonction des signaux de base $m_{i=1,\dots,6}(t)$.

- 28 — Déterminer la relation que doivent vérifier les angles α_i afin que l'on puisse éliminer l'harmonique d'ordre 5 dans le spectre de v_{ch} .

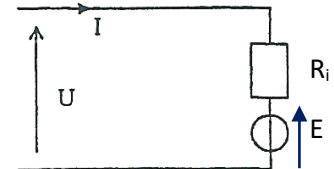
EXERCICE 2 : Etude expérimentale d'un moteur à courant continu

On s'intéresse à un moteur à courant continu, bipolaire, à excitation indépendante.

La plaque signalétique du moteur indique :

- puissance nominale : 0,80 kW
- vitesse nominale : 1500 tr/min
- tension nominale d'alimentation : 220 V
- intensité nominale d'induit : 4,6 A
- intensité nominale dans l'inducteur : 0,35 A

1) L'induit du moteur en rotation peut être modélisé par le dipôle ci-contre, E est la force contre-électromotrice (f.c.é.m.).



Ecrire la relation liant E et la vitesse de rotation du moteur.

On donne $R_e = 512 \Omega$.

3) On prendra pour R_i la valeur $4,6 \Omega$. On mesure grâce à une génératrice tachymétrique placée en bout d'arbre, la fréquence de rotation n du moteur en tour/minute.

a) On détermine pour deux valeurs du courant d'excitation I_e dans l'inducteur les valeurs de E et n.

$I_e = 0,35 \text{ A}$:

E(V)	240	220	200	150	120	75	20	0
n(tr/min)	1670	1510	1380	1035	820	510	110	0

$I_e = 0,20 \text{ A}$:

E(V)	186	150	120	90	60	30	0
n(tr/min)	1800	1450	1150	850	560	260	0

Tracer sur le même graphe E en fonction de n pour les deux valeurs de I_e : échelle 1 cm \leftrightarrow 200 tr/min et 1 cm \leftrightarrow 20 V.

Justifier brièvement l'allure des courbes obtenues.

Montrer que le flux Φ n'est pas proportionnel à l'intensité I_e du courant dans l'inducteur.

b) On relève les valeurs de E et de l'intensité I_e du courant dans l'inducteur pour une fréquence de rotation maintenue constante, $n = 1500 \text{ tr/min}$:

E(V)	219	210	204	198	194	188	179	168	158
I_e (A)	0,39	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22

E(V)	147	137	130	107	100	87	78	65	56
I_e (A)	0,20	0,18	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07

La courbe $E(I_e)$ est donnée en annexe (document 1), en fin d'énoncé.

Justifier, en quelques lignes, l'allure de cette courbe.

4) On note :

- P_a : la puissance électrique absorbée totale (induit et inducteur),
- P_u : la puissance mécanique disponible sur l'arbre,
- P_{Je}, P_{Ji} : les pertes par effet Joule respectivement dans l'inducteur et dans l'induit,
- P_c : les pertes autres que par effet Joule.

a) Avec les notations ci-dessus, représenter le bilan de puissance du moteur à courant continu à excitation indépendante.

b) Le terme P_c regroupe les pertes mécaniques P_m et les pertes fer P_F : expliciter brièvement ces termes, de quels paramètres dépendent-ils ?

c) Un modèle équivalent de l'induit a été donné au 1), proposer un modèle de l'inducteur quand le moteur est en régime établi et en déduire les expressions de P_a , P_{Je} et P_{Ji} .

5) Essai à vide à vitesse constante $n = 1500$ tr/min.

a) Pour les conditions expérimentales, répondre aux questions suivantes, en justifiant votre réponse :

On met sous tension l'inducteur avant l'induit ou l'inverse ?

On commence avec $U = 0$ et on augmente progressivement ou bien on démarre sous U nominale ?

Lors de l'essai, comment obtient-on une vitesse constante égale à la vitesse nominale alors que U varie et reste inférieure à U nominale ?

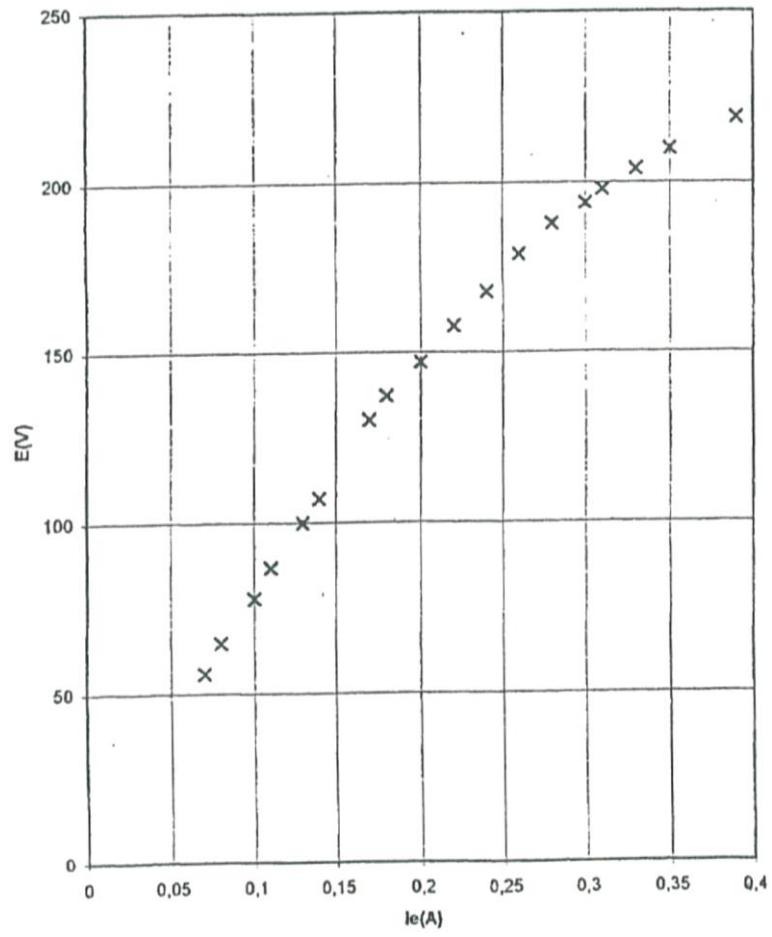
b) Montrer que l'on peut obtenir, pour chaque valeur de I_e dans l'inducteur, grâce au bilan de puissance, la valeur de P_c en mesurant la tension U aux bornes de l'induit et l'intensité I_i du courant dans l'induit.

c) On relève les valeurs suivantes :

$U(V)$	222	213	198	176	151	120	85
$I_i(A)$	0,43	0,44	0,45	0,48	0,56	0,66	0,92
$I_e(A)$	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10

Tracer P_c en fonction de I_e : échelle 1 cm \leftrightarrow 0,1 A et 1 cm \leftrightarrow 10 W.

d) Déduire de la courbe précédente la valeur des pertes mécaniques P_m à 1500 tr/min.



Courbe de la question 3.b.