

Ecrit réparti n°2 : lundi 12 décembre 2016

Durée : 2h00 – Sans document ni téléphone - Calculatrice autorisée

Exercice 1 : Onduleur à commande décalée pour chauffage par induction

On se propose d'étudier l'alimentation d'un four à induction par un onduleur à commande décalée. Le four à induction est équivalent à une charge composée d'une résistance R en parallèle avec une inductance L . Cette charge est alimentée par une tension alternative v_s de fréquence f . La puissance de chauffage est la puissance active dissipée dans la résistance équivalente R . L'inductance L modélise le comportement inductif de la bobine de chauffe. La Figure 1 représente le schéma de principe du convertisseur qui assure l'alimentation du dispositif.

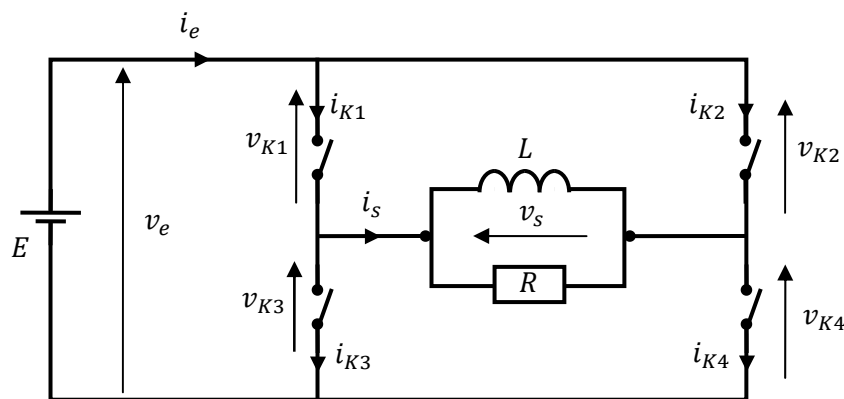


Figure 1 : Schéma de principe de l'onduleur qui alimente le four

La valeur de la tension d'alimentation continue est $E = 150 \text{ V}$.

Les interrupteurs K1, K2, K3 et K4 sont des interrupteurs commandés, et on note b_1, b_2, b_3 et b_4 les bits d'états correspondant. Un état haut du bit d'état b_i ($b_i = 1$) indique que l'interrupteur K_i est fermé alors qu'un état bas ($b_i = 0$) indique qu'il est ouvert. On travaille dans l'hypothèse d'interrupteurs parfaits à commutation instantanée.

Etude de la commande décalée :

La Figure 2 représente les chronogrammes des bits d'états b_1, b_2, b_3 et b_4 en fonction de l'angle $\theta = \omega t$. L'angle d est appelé angle de décalage et permet de contrôler la forme de la tension de sortie.

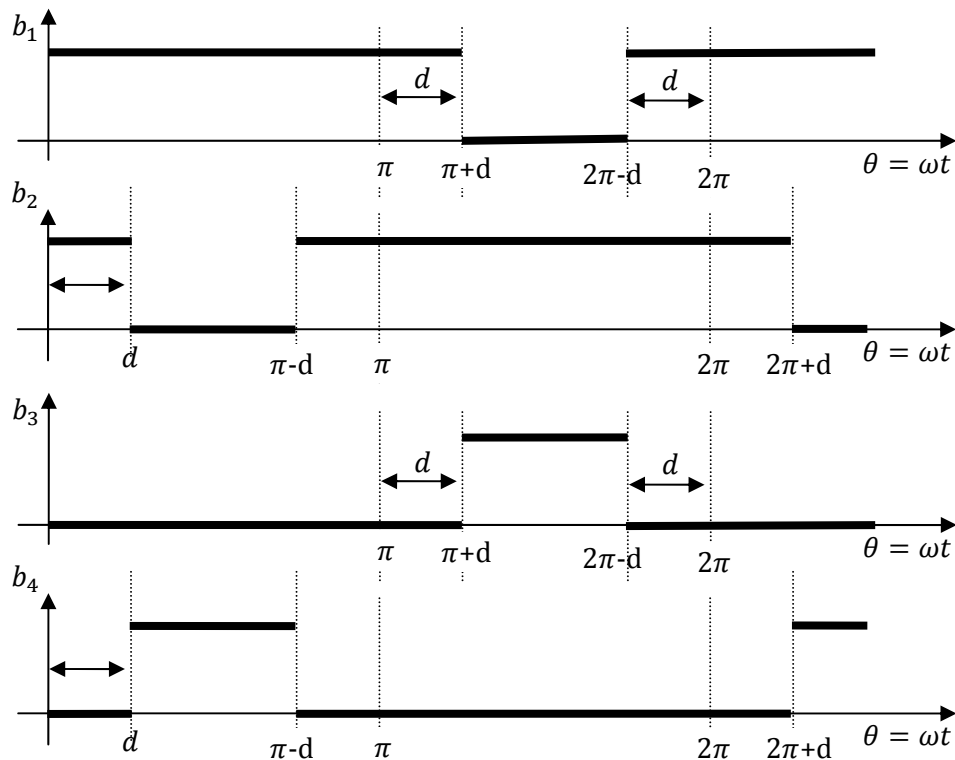


Figure 2 : Chronogrammes des bits d'état b_1 à b_4

1. A partir des chronogrammes de la Figure 2, établir l'état de conduction des différents interrupteurs sur une période et construire précisément la tension de sortie $v_s(\theta)$ sur deux périodes.
2. Montrer que la décomposition en série de Fourier du signal $v_s(\theta)$ s'écrit :

$$v_s(\theta) = \sum_{n>0} b_n \sin(n\theta) = \sum_{n>0 \text{ impair}} \frac{4E}{n\pi} \cos(nd) \sin(n\theta)$$
3. Quelle valeur de l'angle de décalage d permet d'annuler l'harmonique de rang 3 de la tension v_s ? Quel serait l'intérêt de cette opération ?
4. Calculer les coefficients b_1 , b_3 et b_5 pour $d = 30^\circ$ et pour $d = 23^\circ$. En déduire le taux de distorsion harmonique, défini par : $THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} b_k^2}}{b_1}$, en limitant le calcul de la somme aux harmoniques de rang inférieur ou égal à 5.
 A votre avis, que caractérise cet indicateur THD ? Quelle valeur de décalage recommanderiez-vous : 23° ou 30° ?

Etude de la bobine de chauffage :

On suppose maintenant que l'angle de décalage est tel que la valeur efficace du fondamental de v_s vaut $V_s = 24\text{ V}$.

La puissance dissipée dans la bobine de chauffage vaut alors $P = 1\text{ kW}$.

On néglige la présence des harmoniques de tension et de courant, ce qui permet de travailler en régime harmonique et d'utiliser les grandeurs complexes.

L'inductance de la bobine est supposée constante et vaut $L = 0,2\text{ mH}$.

5. Calculer la valeur de la résistance R .
6. Calculer la valeur de la puissance réactive consommée par l'inductance de la bobine.
7. Calculer le facteur de puissance FP de la charge. Est-il nécessaire de compenser la puissance réactive à cette fréquence ? Aurait-ce été nécessaire pour une fréquence de 1 kHz (justifier précisément) ?
8. Calculer la valeur du courant efficace I_s consommé par la charge à 50 kHz.

Exercice 2 : Interconnexion France-Angleterre IFA2

Depuis 1986, la liaison sous-marine IFA (Interconnexion France-Angleterre) permet des échanges d'électricité entre l'Angleterre et le reste de l'Europe. D'une puissance de 2 GW, l'IFA est capable de répondre aux besoins en électricité d'environ deux millions de personnes. L'utilisation d'une liaison à courant continu s'est imposée comme le meilleur compromis technico-économique, compte tenu de la distance entre les deux pays.

La Figure 3 présente le schéma de principe de cette liaison, avec deux stations de conversion du courant alternatif en courant continu de part et d'autre de la Manche. Il s'agit de convertisseurs à thyristors, autorisant un réglage précis et rapide de la puissance échangée.

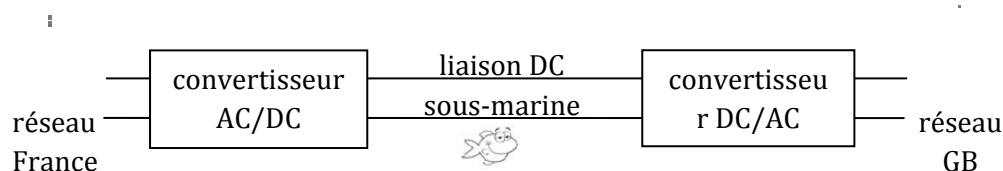


Figure 3 : Schéma de principe de l'IFA

Les stations de conversion de l'IFA gèrent des systèmes triphasés de puissances importantes, mais elles reposent sur le même principe de conversion que le convertisseur alternatif/continu monophasé à thyristors représenté sur la Figure 4 et qui va être étudié dans cet exercice.

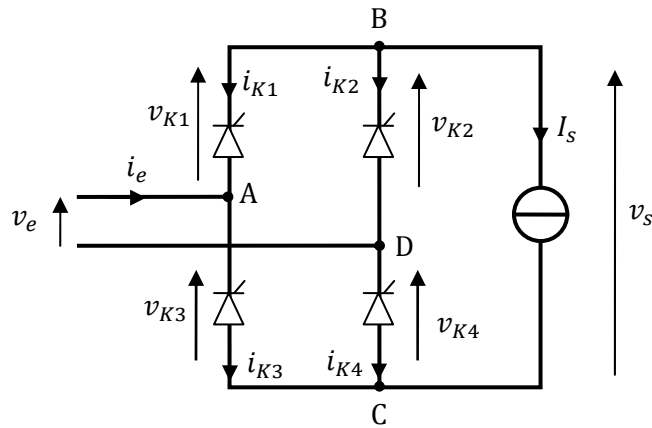


Figure 4 : Schéma de principe d'un convertisseur AC/DC à thyristors

L'alimentation monophasé est imposée par le secondaire du transformateur qui relie le convertisseur au réseau public :

$$v_e(t) = V_e \sqrt{2} \sin \omega t$$

On considère que le courant en sortie du pont est suffisamment lissé pour être considéré comme constant. Ce courant est noté I_s .

1. On considère la maille ABD du circuit.
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K1 devient-il passant ?
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K1 se bloque-t-il ?
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K2 devient-il passant ?
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K2 se bloque-t-il ?
2. On considère la maille ACD du circuit.
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K3 devient-il passant ?
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K3 se bloque-t-il ?
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K4 devient-il passant ?
 - A quelle(s) condition(s) le thyristor K4 se bloque-t-il ?
3. Les thyristors sont commandés avec un angle de retard à l'amorçage α . Représenter la tension d'entrée $v_e(\theta)$, où $\theta = \omega t$, ainsi que les signaux de commande des différents thyristors. Préciser quel est l'intervalle de variation possible de l'angle α .
4. Tracer les chronogrammes des signaux $v_e, i_e, v_s, i_s, v_{K1}, i_{K1}, v_{K2}, i_{K2}$ sur deux périodes :
 - pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$
 - pour $\alpha = \frac{5\pi}{6}$

5. Calculer la valeur moyenne de la tension de sortie $\langle v_s \rangle$ en fonction de l'angle α et tracer le graphe de cette relation.
6. Calculer la valeur moyenne de la puissance de sortie $\langle P_s \rangle$ en fonction de l'angle α .
7. On s'intéresse maintenant à l'IFA (Figure 3). La puissance qui transite à travers la liaison est contrôlée par les angles d'amorçages des convertisseurs, notés α_F pour le côté français et α_A pour le côté anglais. Les convertisseurs doivent être pilotés de manière cohérente afin d'assurer l'équilibre des puissances. On suppose que les tensions efficaces sont rigoureusement identiques de part et d'autre de l'IFA.
 - Quelles valeurs de α_F permettent d'exporter de la puissance de la France vers l'Angleterre ? Que doit valoir alors α_A ?
 - Quelles valeurs de α_F permettent d'importer de la puissance de l'Angleterre vers la France ? Que doit valoir alors α_A ?

Exercice 3 : Hacheur boost

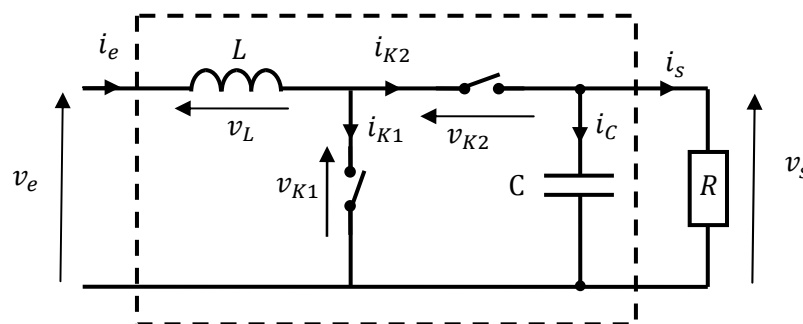


Figure 5 : Schéma d'un hacheur boost

Dans cet exercice, on étudie le fonctionnement du hacheur dont le schéma est donné sur la Figure 5. La tension d'entrée v_e est constante : $v_e(t) = V_e$. La charge est constituée de la résistance R , alimentée sous tension v_s .

Les interrupteurs $K1$ et $K2$ constituent une cellule de commutation dont la période de fonctionnement est notée T . $K1$ est fermé pendant l'intervalle $[0, \alpha T]$ et ouvert pendant l'intervalle $[\alpha T, T]$.

1. Quel est le rôle du condensateur placé en sortie de convertisseur ?

Dans la suite de l'exercice, on suppose que le filtrage est suffisant pour considérer en première approximation que la tension de sortie est constante. On notera alors $v_s(t) = V_s$. Le fonctionnement est supposé périodique et à $t = 0$, le courant d'entrée vaut : $i_e(0) = i_0$.

2. On se place sur l'intervalle $[0, \alpha T]$. Déterminer les expressions de v_{K1} , v_{K2} , v_L , i_e , i_{K1} et i_{K2} en fonction de V_e , V_s et i_0 .

3. On se place sur l'intervalle $[\alpha T, T]$. Déterminer les expressions de v_{K1} , v_{K2} , v_L , i_e , i_{K1} et i_{K2} en fonction de V_e , V_e et i_0 et T .
4. Exprimer la continuité du courant dans la bobine L à l'instant αT . En déduire le rapport de transformation $\frac{V_s}{V_e}$ en fonction du rapport cyclique α . A quoi correspond l'appellation hacheur-"boost" ?
5. Tracer les chronogrammes des signaux de v_{K1} , v_{K2} , v_L , i_e , i_{K1} et i_{K2} pour $\alpha = 0,5$.
6. Calculer l'amplitude de l'ondulation du courant d'entrée en fonction de V_e , α , L et f .
7. Tracer le lieu des points de fonctionnement "tension-courant" des interrupteurs K1 et K2. En déduire le type de composant qu'il faut choisir pour chaque interrupteur.
8. La valeur du rapport cyclique α fixe le rapport de conversion de la tension. Par ailleurs, la charge impose la valeur du courant appelé. Exprimer i_s , supposé constant, en fonction de V_e , R et α . Calculer la puissance fournie à la charge en fonction des mêmes grandeurs. En déduire la valeur moyenne de i_e en fonction de V_e , R et α .
9. Etablir et tracer le chronogramme de i_c , le courant dans le condensateur pour $\alpha = 0,5$.