



Ingénieur Manager Entrepreneur

**TRAVAUX DIRIGES**  
**Equipements Electriques**  
**La machine à courant continu**

ITEEM 1ere année

Les exercices encadrés seront fait en TD. Il est vivement conseillé de préparer les exercices d'application du cours avant le TD.

### Exercice d'application du cours

0)

Un moteur bipolaire à courant continu absorbe un courant de 40 A dans son circuit d'induit sous une tension de 220 V en régime permanent et il tourne à 1000 tr/min. Le circuit d'induit comporte 720 conducteurs, sa résistance est  $R = 1 \text{ Ohm}$ . Calculer:

- La f.é.m.
- La puissance électrique convertie.
- Le couple électro-moteur.

### Exercice d'application du cours :

#### Moteur à courant continu fonctionnant sous tension d'induit constante

1)

Un moteur à excitation indépendante fonctionne sous 120 V, il absorbe 25 A quand il tourne à 750 tr/min. Sa résistance d'induit est 0,8 Ohm. Les pertes fer sont  $P_{\text{perte\_fer}} = 240 \text{ W}$ , les pertes par frottement sont négligeables. Calculer:

- La force électromotrice.
- La puissance absorbée à l'induit, la puissance électrique convertie, la puissance mécanique utile et le rendement.
- Le couple moteur.

#### Mode de fonctionnement du moteur à courant continu Étude d'un moteur en dérivation en régime permanent

2)

Données: résistance des inducteurs (sans rhéostat d'excitation) :  $r = 110 \text{ Ohm}$ .

Résistance de l'induit:  $R = 0,2 \text{ Ohm}$

Tension d'alimentation:  $U = 220 \text{ V}$ .

Pertes fer:  $P_{\text{perte\_fer}} = 700 \text{ W}$ , les pertes mécaniques seront supposées nulles.

A) Sur la plaque signalétique de la machine, on lit que la vitesse de rotation du moteur est de 1500 tr/min quand le circuit d'induit absorbe un courant de 75A. Calculer:

- la force électromotrice;
- la puissance totale absorbée;
- la puissance mécanique utile;
- le rendement;
- le couple utile.
- la constante  $k$

B) On insère un rhéostat de démarrage dans le circuit d'induit de la machine pour que l'intensité au démarrage soit de 160 A. Pendant la phase de démarrage, ce rhéostat sera utilisé pour maintenir le courant de démarrage à cette valeur.

- Déterminer la valeur du rhéostat.
- Quel est alors le couple de démarrage ?

C) En fonctionnement, on mesure un courant d'induit de  $I = 45 \text{ A}$ .

- Calculer la vitesse de rotation.

b) Comparez les pertes fer aux pertes par effet Joule. Que devient la valeur de la vitesse si l'on néglige un de ces deux termes ?

D) On veut régler la vitesse de rotation à 1650 tr/min avec la même intensité  $I$  qu'au A en utilisant un rhéostat en série avec l'inducteur.

- Calculer la nouvelle valeur de la constante  $k$

b) Le flux restant proportionnel à l'intensité du courant d'excitation, quelle résistance faut-il donner à ce rhéostat ?

### Génératrice à courant continu à excitation indépendante

3)

Un moteur bipolaire à excitation indépendante constante, dont l'induit a une résistance  $R = 0,1$  Ohm, est alimenté par une tension continue réglable et fonctionne à courant d'intensité constante  $I = 140$  A. Il tourne à 720tr/min quand la tension est  $U = 194$ V. Les pertes fer sont proportionnelles à la fréquence de rotation et valent alors:  $P_{\text{perte\_fer}} = 960$  W. Calculer:

- La f.é.m. et le moment du couple électromagnétique dans les conditions données.
- Le rendement sachant que les pertes Joule dans le circuit d'excitation sont de 600 W.
- La vitesse de rotation pour les tensions suivantes: 50; 100; 150; 230 V.

4)

Pour un courant d'excitation de 4 A, la force électromotrice constante d'une génératrice à excitation indépendante est de 240 V. Les résistances des enroulements sont:

A l'induit:  $R = 0,08$  Ohm, à l'inducteur:  $r = 30$  Ohm.

Les pertes fer sont  $P_{\text{perte\_fer}} = 450$  W. Pour un débit  $I = 80$  A, calculer:

- La tension  $U$ .
- Cette tension est appliquée aux bornes de l'excitation. Calculez la puissance utile, les pertes par effet Joule dans l'induit, les pertes par effet Joule dans l'inducteur, la puissance absorbée.

5)

Le moteur d'une grue, à excitation indépendante constante, tourne à la vitesse de rotation 1500 tr/min lorsqu'il exerce une force de 30 kN pour soulever une charge à la vitesse (linéaire)  $v_1 = 15$  m/min; la résistance de l'induit est  $r = 0,4$  Ohm.

Ce moteur est associé à un réducteur de vitesse dont les pertes, ajoutées aux pertes mécaniques et magnétiques du moteur font que la puissance utile de l'ensemble est égale à 83 % de la puissance électromagnétique transformée dans la machine. Le moment du couple électromagnétique du moteur est proportionnel à l'intensité  $i$  du courant qui traverse l'induit:  $C_{em} = 1,35 \cdot i$ .

A) Calculer la puissance utile et le moment du couple électromagnétique.

B) Calculer l'intensité du courant, la force électromotrice et la tension  $U$ , appliquée à l'induit.

C) Sachant que la puissance consommée par l'excitation est de  $P_e = 235$  W, calculer la puissance totale absorbée et le rendement du système.

D) En descente la charge, inchangée, entraîne le rotor et le machine à courant continu fonctionne alors en génératrice. L'excitation, le rapport du réducteur de vitesse et le rendement mécanique (moteur + réducteur) sont inchangés.

On veut limiter la vitesse de descente de la charge à  $v_2 = 12$  m/min; calculer:

- la vitesse angulaire de rotation du rotor ;
- la puissance électromagnétique fournie à la génératrice;
- le moment du couple résistant de cette génératrice et l'intensité du courant débité dans une résistance additionnelle;
- la résistance  $R$  que doit avoir cette résistance.

## Rendement des machines à courant continu

6)

Un moteur alimenté en dérivation fonctionne sous une tension de 230 V. Sa vitesse de rotation nominale est 2 100 tr/min. Les résistances sont: à l'induit  $R = 0,24 \text{ Ohm}$ , à l'inducteur  $r = 184 \text{ Ohm}$ . Un essai à vide, en excitation indépendante et à la vitesse nominale de rotation, a donné:

$$U_v = 225 \text{ V}; I_v = 1,8 \text{ A}$$

Calculer les rendements pour chacune des intensités suivantes du courant total absorbé: 10; 20; 30; 40 A. La vitesse de rotation et la force électromotrice variant peu, on admettra que l'essai est valable pour toutes les charges.

### Application : le treuil

7)

L'énergie d'un treuil est fournie par un moteur à courant continu à excitation indépendante dont l'induit et l'inducteur sont alimentés sous une tension  $U = 230 \text{ V}$ .

En charge, le treuil soulevant verticalement une charge à la vitesse de 4 m/s, le moteur tourne à une vitesse de 1200 tr/min et son induit absorbe une puissance électrique de 17,25 kW. La résistance de l'induit est de  $0,1 \Omega$ ; celle de l'inducteur de  $46 \Omega$ ; les pertes dites constantes ont pour valeur 1 kW; l'accélération de la pesanteur sera prise égale à  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ; le rendement du treuil est de 0,75.

Calculer:

- a. les courants absorbés par l'induit et l'inducteur;
- b. la force électromotrice du moteur;
- c. la puissance utile du moteur;
- d. le couple utile du moteur;
- e. le rendement du moteur;
- f. le rendement global de l'équipement;
- g. la masse soulevée par le treuil.

## Premier Problème

8)

On considère une machine à courant continu, dont l'inducteur est bobiné, et dont la plaque signalétique indique 115V, 27A, 3000tr/mn (point de fonctionnement nominal en charge).

A) Mesures

La résistance du bobinage induit a été mesurée et vaut  $0.7 \Omega$ . Le couple de pertes  $C_{perte\_fer}$  du moteur à courant continu a été évalué à 1.6Nm. Un essai à vide consiste à entraîner cette machine par une autre qui fonctionne donc en moteur. Le circuit d'induit de la machine entraînée étant ouvert (d'où le nom fonctionnement à vide), on mesure 94.2 V sachant que la vitesse et le courant d'excitation sont à leurs valeurs nominales.

Déterminez la constante entre la vitesse et la f.e.m..

B)

Le courant dans le circuit inducteur est maintenu constant et égal à sa valeur nominale. L'induit est alimenté par une source de tension continue  $U$  variable entre  $-120V$  et  $+120V$  et réversible en courant ( $-35A \leq I \leq 35A$ ).

1.1 Déterminer l'expression du couple électromagnétique du moteur  $C_{em}$ , en fonction de la vitesse de rotation  $N$  (en tours/s), paramétrée par la tension d'alimentation  $U$ .

En déduire l'expression du couple utile mécanique en fonction de  $N$ .

1.2 Le moteur entraîne une charge présentant un couple résistant mécanique  $C_{pertes\_mécaniques} = 0.2 N$ , où  $N$  est la vitesse exprimée en tr/s et nécessite un couple utile mécanique de 0.5 Newtons. On veut que le point de fonctionnement se stabilise en régime permanent à 2400 tr/mn. Quelle est la valeur de  $U$  qui permet ce point d'équilibre ?

1.3 L'ensemble mécanique étant stabilisé à ce point de fonctionnement, on veut le freiner jusqu'à l'arrêt. Pour ceci, on impose grâce à l'électronique de réglage de la source d'alimentation, un courant induit égal à  $-30A$  jusqu'à l'arrêt du moteur.

A/ Tracer l'évolution du point de fonctionnement dans le plan  $C_u(N)$  si on néglige les transitoires électriques devant les transitoires mécaniques.

B/ Calculer le temps nécessaire à l'arrêt du moteur (on donne le moment d'inertie de l'ensemble  $J = 0.16 \text{kg.m}^2$ )

C/ Tracer l'évolution de la tension au cours du temps durant cet essai.

1.4 On suppose maintenant que la source de tension n'est plus réversible et pour freiner le moteur, on choisit le méthode rhéostatique; la source de tension est déconnectée et un rhéostat  $R_h$  est placé entre les bornes de l'induit.

A/ Si on veut imposer au moteur le même courant que dans le cas précédent, quelle doit être la valeur de  $R_h$  à l'instant origine ?

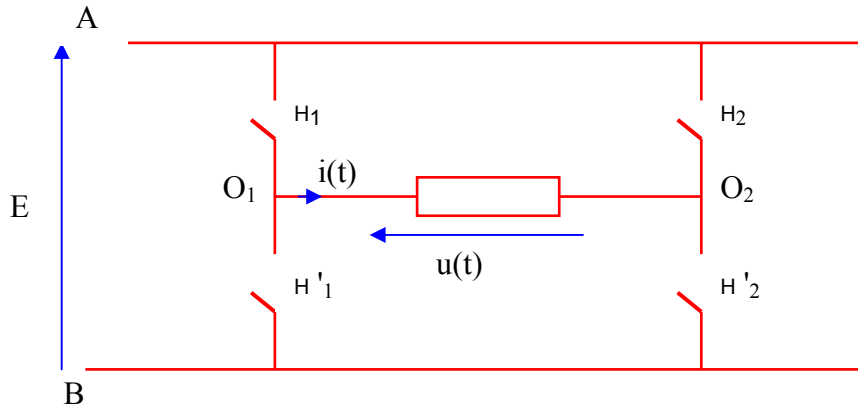
B/ Jusqu'à quelle valeur de  $N$  va-t-on pouvoir freiner à courant constant, égal à  $-30A$  ?

C/ On freine le moteur en réglant  $R_h$  à chaque instant pour que  $I = -30A$  dans la limite du possible. Quelle est alors la durée totale du freinage jusqu'à l'arrêt du moteur ?

## 9) Onduleurs en pont (ou en H)

### 9.1). Principe

Cette représentation d'onduleur représenté ci-dessous utilise deux bras (  $T_1-T'_1$  ) et (  $T_2-T'_2$  ) à interrupteurs en série . L'onduleur en pont ne nécessite pas de source de tension d'alimentation à point milieu :

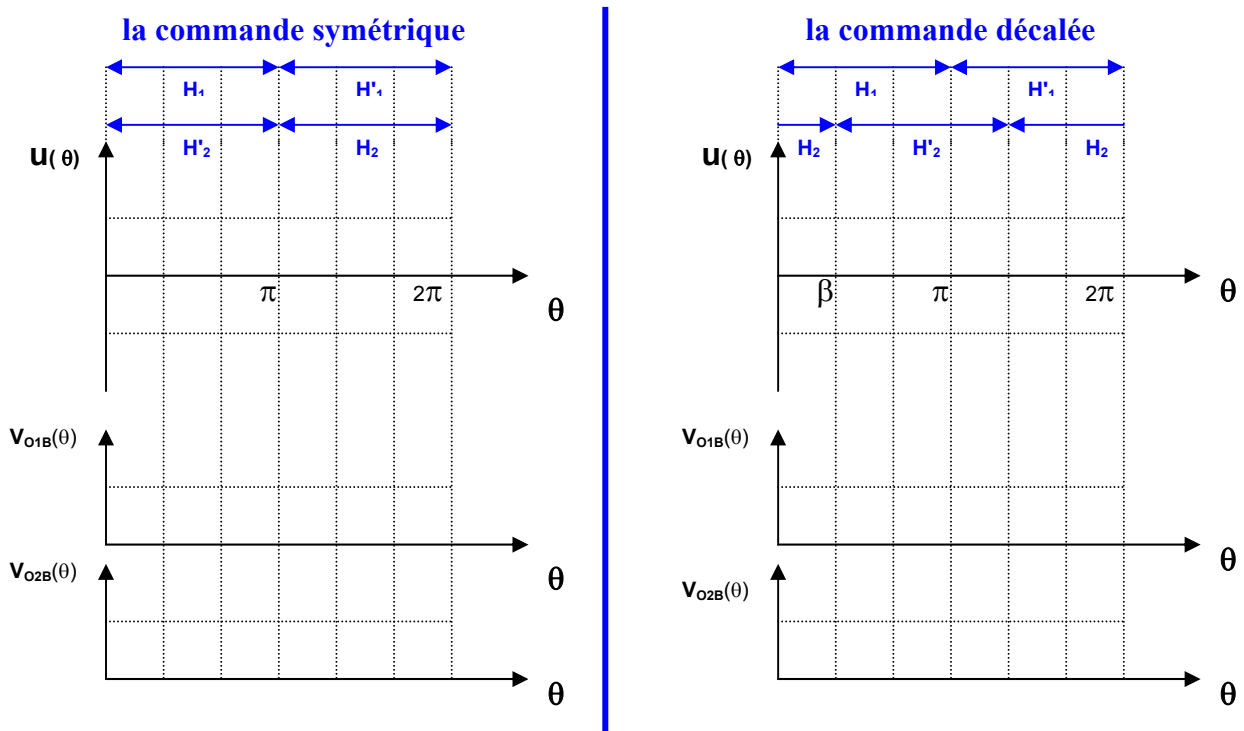


Les allures des graphes seront données dans le cas d'une charge RL. Nous allons étudier les deux modes de commande habituellement utilisés. Afin de simplifier l'écriture, nous remplacerons les intervalles temporels par les intervalles angulaires, en remarquant que nous passerons des premiers aux seconds en effectuant des multiplications par la pulsation  $\omega$  .

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \text{ et } \theta = \omega t$$

$$\pi = \omega \cdot \frac{T}{2} \text{ et } 2 \cdot \pi = \omega \cdot T$$

a) En commande symétrique, dans l'intervalle  $[ 0 < \theta < \pi ]$ , les deux interrupteurs  $H_1$  et  $H'_2$  sont fermés. Puis, dans l'intervalle  $[\pi < \theta < 2 \cdot \pi]$ , les interrupteurs  $H_2$  et  $H'_1$  sont fermés . Représentez  $u(t)$  sur une période  $Vo1b(t)$  et  $Vo2b(t)$



d) Calculez la valeur moyenne et efficace de la tension  $u(t)$  sur une période.

Remarque : Enfin, l'onde  $u(t)$  présente une symétrie par rapport à l'origine O, et sa série de Fourier est constituée par des termes en sinus de rangs impairs :

$$u(t) = \frac{4 \cdot E}{\pi} \left( \sin\theta + \frac{1}{3} \sin 3\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \frac{1}{7} \sin 7\theta + \dots + \frac{1}{K} \sin K\theta \right) \text{ K étant un entier impair .}$$

e) **En commande décalée**, les fermetures des deux bras d'interrupteurs sont décalées de l'angle  $(\beta + \pi)$ . Représentez  $u(t)$  sur une période

f) Calculez la valeur efficace U de la tension  $u(t)$  sur une période.

Remarque :

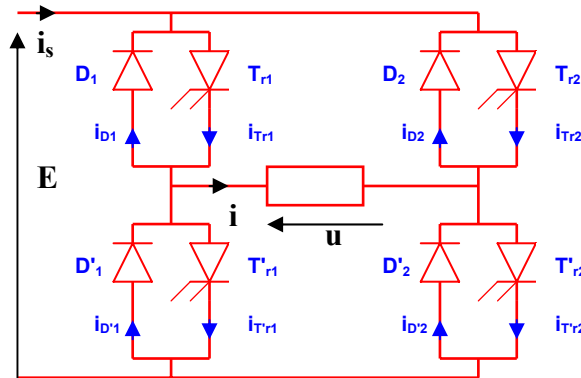
La série de Fourier est maintenant constituée par des termes impairs en sinus :

$$u_{\alpha}(t) = \frac{4 \cdot E}{\pi} \left( (\cos\alpha) \sin\theta + \frac{1}{3} (\cos 3\alpha) \sin 3\theta + \frac{1}{5} (\cos 5\alpha) \sin 5\theta + \dots + \frac{1}{K} (\cos K\alpha) \sin K\theta \right)$$

Si  $\alpha = 30^\circ$  tous les termes impairs multiples de trois s'annulent .

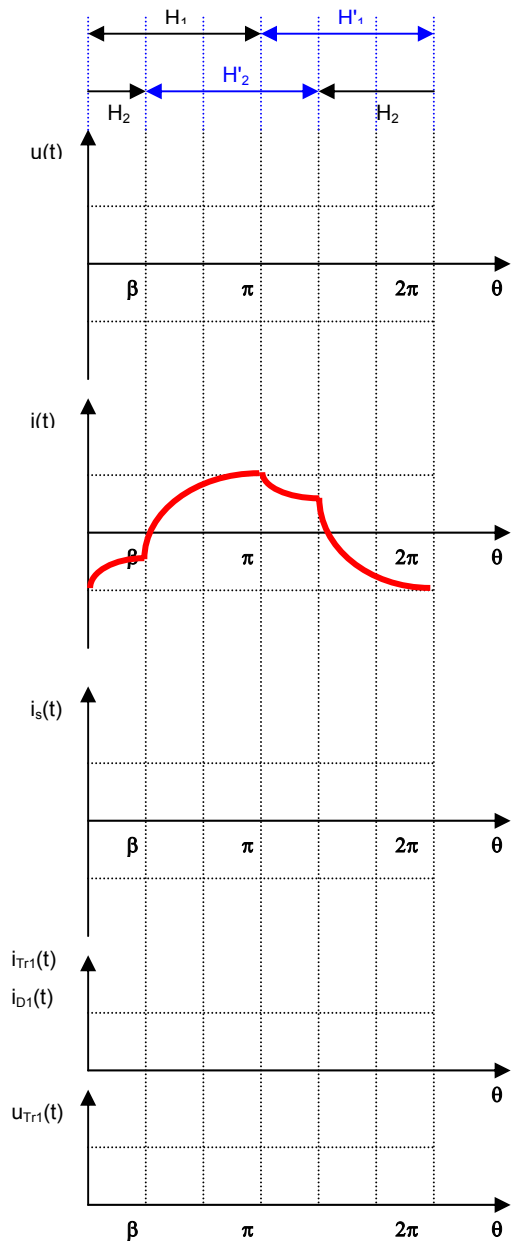
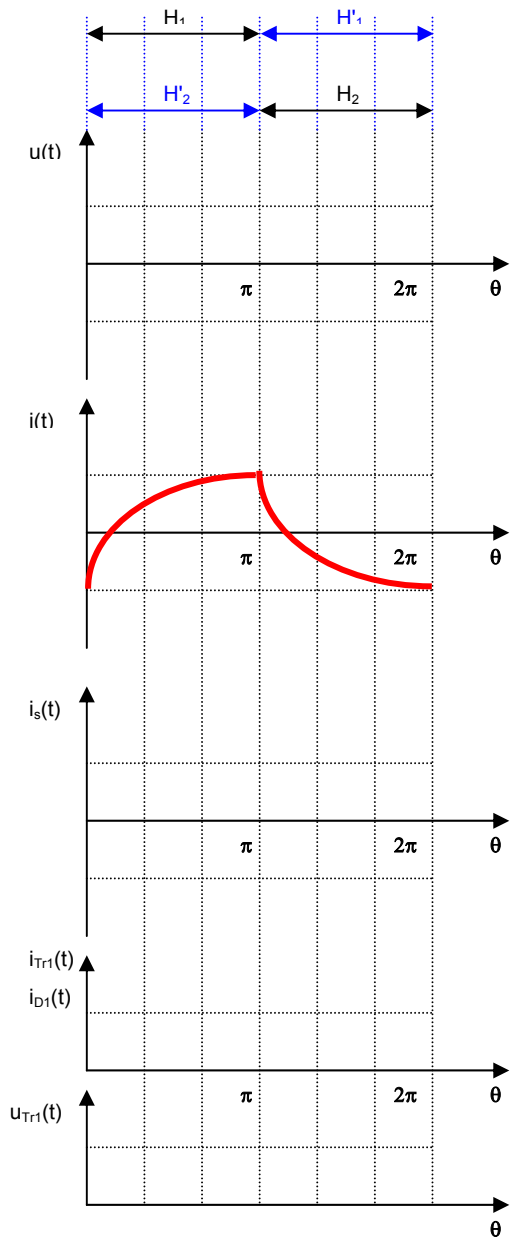
## 9.2. Configuration à transistors

Considérons le schéma ci-dessous :



Les deux cellules de commutation sont constitués par des interrupteurs bidirectionnels, par exemple  $H_1 : [ T_{r1} ; D_1 ]$ . Les allures des graphes des courants et des tensions seront données dans le cas d'une charge RL, pour les deux modes de commande : **symétrique** et **décalée** .

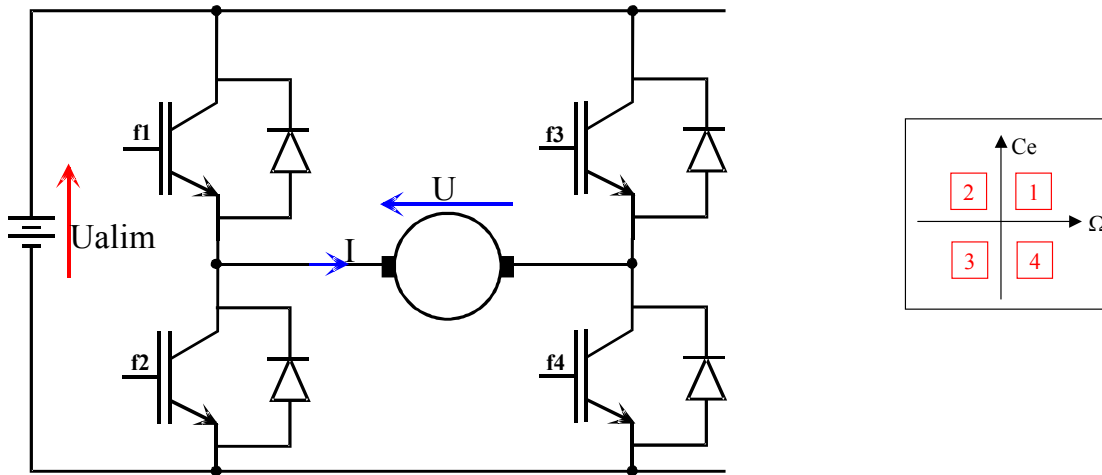
a) **Représentez** les grandeurs électriques manquantes.



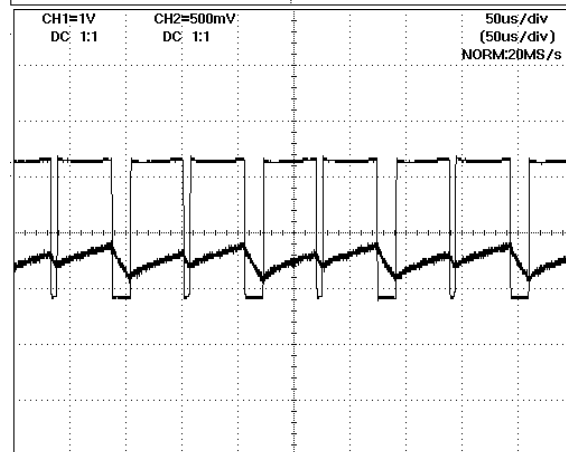
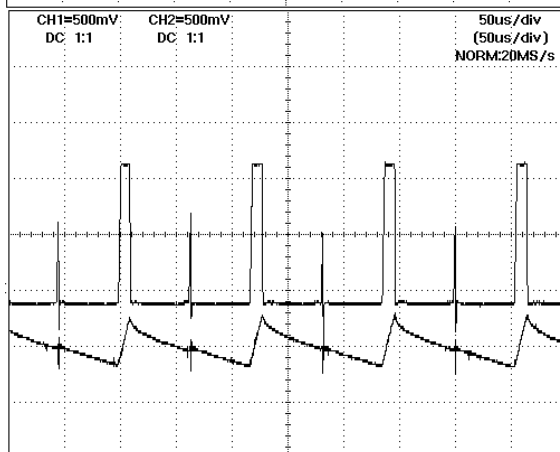
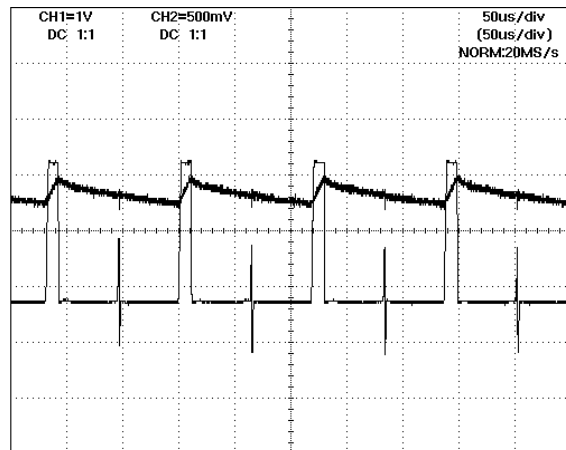
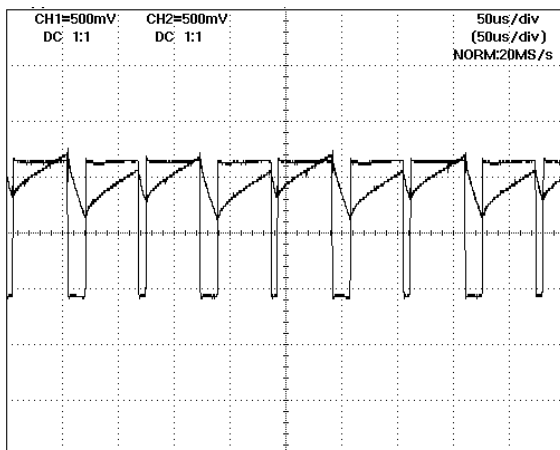


## Analyse d'un hacheur réversible

9)



- Quelles sont les différentes configurations possible des ensembles transistor-diode ?
- Quelles sont les valeurs correspondantes de la tension aux bornes de l'induit ?
- Le relevé ci-dessous représente l'évolution du courant et de la tension aux bornes du moteur à courant continu. A quels quadrants de fonctionnement ( 1, 2, 3, ou 4), ces courbes font-elles références ?



## Deuxieme problème

10)

Les machines à courant continu sont souvent mises en œuvre dans les systèmes de levage tels que les ascenseurs et monte charge : cette utilisation demande, d'une part un fonctionnement dans les quatre quadrants :

- a/ accélération, vitesse de rotation constante et décélération en montée,
- b/ accélération, vitesse de rotation constante et décélération en descente,

d'autre part un positionnement à l'arrêt.

Ces fonctions seront réalisées par un variateur de type hacheur quatre quadrants alimentant la machine. L'étude comporte quatre parties indépendantes :

- 1/ le fonctionnement quatre quadrants de la machine à courant continu
- 2/ le variateur

### Caractéristiques de la machine :

Excitation séparé, maintenue constante, machine parfaitement compensée

Tension nominale d'induit  $U = 660 \text{ V}$

Coefficient de machine :  $k = 2 \text{ Vrad}^{-1}\text{s} = 2 \text{ N.m.A}^{-1}$

Fréquence nominal de rotation  $N_N = 3000 \text{ tr.min}^{-1}$

Résistance d'induit :  $R = 1 \Omega$

Inductance d'induit :  $L = 10 \text{ mH}$

Intensité du courant nominal d'induit :  $20 \text{ A}$

Intensité maximale du courant d'induit :  $30 \text{ A}$

Moment du couple nominal :  $C_N = 40 \text{ N.m}$

Moment d'inertie total ramenée à l'arbre moteur :  $J = 0.5 \text{ kg.m}^2$

Moment du couple résistant (frottement visqueux) :  $C_{pertes\_mécaniques} = f.\Omega$ ,  $f = 20.10^{-3} \text{ N.m.rad}^{-1}.\text{s}$

On convient d'associer le sens positif de rotation de la machine à la montée de la cabine

### 1/ LE FONCTIONNEMENT QUATRE QUADRANTS DE LA MACHINE

Cette partie est consacrée à l'étude d'un onduleur utilisé pour alimenter le dispositif à induction décrit dans la partie 1. Les interrupteurs seront toujours considérés comme idéaux.

#### A) Onduleur de tension à commande pleine onde

On étudie un onduleur à quatre interrupteurs

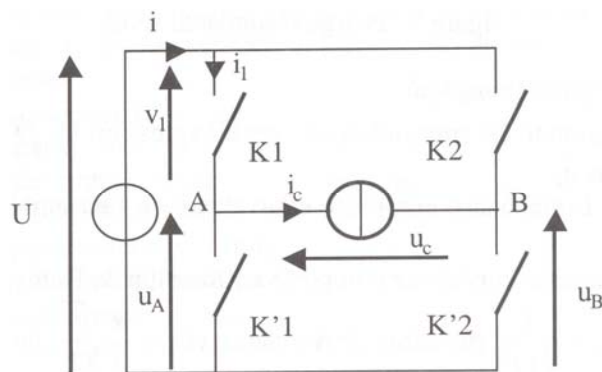


Figure 5 : structure d'un onduleur

L'état de chaque interrupteur est représenté par une fonction logique valant 1 si l'interrupteur est fermé, 0 s'il est ouvert

Interrupteur	$K_1$	$K'_1$	$K_2$	$K'_2$
Fonction logique associée	$f_1$	$f'_1$	$f_2$	$f'_2$

3.1.1 Rappelez pourquoi on doit obligatoirement  $f_1 = 1$  et  $f_2 = 1 - m_2$

3.1.2 Calculez  $u_A$  en fonction de  $U$  de  $f_1$

3.1.3 Calculer  $u_C$  en fonction de  $U, f_1$  et  $f_2$

Pour une commande pleine onde,  $f_1$  à l'allure donnée figure 6 et on à  $f_2 = 1 - f_1$

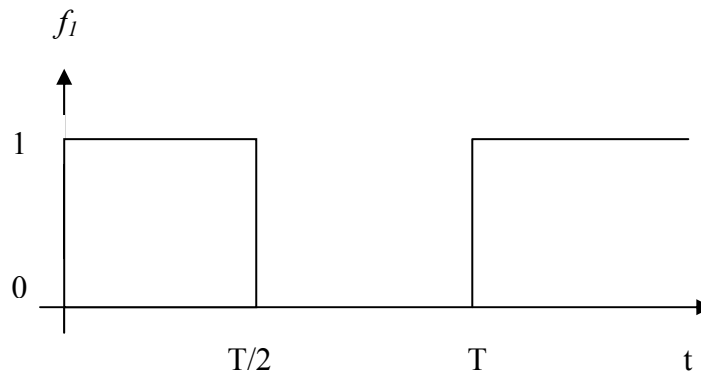


Figure : état de  $K_1$  en fonction du temps

3.1.4 Calculez  $u_c$  en fonction de  $U$  et de  $m_1$

3.1.5 Tracez  $u_c(t)$

## B) Application à l'entraînement de la machine

Les pertes de la machine seront négligées

$\Omega$  (rad.s<sup>-1</sup>) : vitesse angulaire de rotation de la machine

$C_{em}$  (N.m) : moment du couple électromagnétique de la machine

$C$  (N.m) : moment du couple mécanique à l'arbre de la machine

$E$  (V) : valeur moyenne de la force électromotrice

$I$  (A) : valeur moyenne de l'intensité du courant d'induit

La figure 1 repère les quatre quadrants de fonctionnement

La machine est alimentée par un hacheur quatre quadrants, la figure 2 présente les oscillogrammes de diverses phases de fonctionnement.

Les grandeurs instantanées  $i(t)$  et  $u(t)$  sont orientées pour que la figure 2a corresponde à un fonctionnement dans le quadrant I.

1.1 Montrer que dans l'hypothèse retenue la vitesse angulaire de rotation  $\Omega$  est proportionnelle à la valeur moyenne  $\langle u(t) \rangle = U$  de la tension instantanée  $u(t)$  appliquée entre les points  $M_1$  et  $M_2$  (figure 3 et 5)

1.2 Montrer que dans l'hypothèse retenue le moment  $C$  du couple mécanique à l'arbre de la machine est proportionnel à la valeur moyenne  $\langle i(t) \rangle = I$  de l'intensité du courant instantanée  $i(t)$ .

1.3 Dans quel quadrant, la machine fonctionne-t-elle respectivement pour les oscillogrammes b, c, f de la figure 2, compte tenu des orientations précisées précédemment ?

1.4 A partir du rez-de-chaussée la cabine monte vers les étages supérieurs, s'arrête pour redescendre et s'arrête de nouveau au rez-de-chaussée.

**A/ Phase de montée :**

**Phase A.1 : Mise en rotation à couple nominal ( $C_{A,1} = C_N = +40\text{N.m}$ ) maintenu constant jusqu'à atteindre la vitesse angulaire nominale de rotation  $\Omega$**

**Phase A.2 : Fonctionnement à vitesse angulaire de rotation nominale  $\Omega_N$  pendant 10 secondes**

**Phase A.3 : Freinage à couple constant  $C_{A,3}$  jusqu'à l'arrêt**

**Phase A.4 : Temps d'arrêt 15 secondes**

**B/ Phase de descente:**

**Phase B.1 : Mise en rotation à couple constant  $C_{B,1}$  jusqu'à atteindre la vitesse angulaire nominale de  $-\Omega_N$**

**Phase B.2 : Fonctionnement à vitesse angulaire de rotation nominale  $-\Omega_N$  pendant 10 secondes**

**Phase A.3 : Freinage à couple constant  $C_{B,3}$  jusqu'à l'arrêt**

**Phase A.4 : Arrêt**

1.4.1 Déterminer le moments des couples  $C_{A,2}$ ,  $C_{A,4}$ ,  $C_{B,2}$  et  $C_{B,4}$  correspondants respectivement aux phases de fonctionnement A.2, A.4, B.2 et B.4

Remarque : pendant les phases d'arrêt la cabine est immobilisée en portion par un système de vérins, elle ne crée alors plus de coule au niveau de la poulie d'entraînement des câbles, : le réducteur placé entre l'arbre moteur et la polie d'entraînement est supposé mécaniquement parfait.

1.4.2. Déterminer la durée  $t_{A,1}=T$  de la phase A.1

1.4.3 On veut obtenir, pour des questions de confort des utilisateurs, au cours de la phase A.3, une décélération égale en module à l'accélération de la phase A.1

Calculer la valeur algébrique du moment du couple  $C_{A,3}$

1.4.4 De même on veut obtenir, au cours de la phase B.1, une accélération égale à celle de la phase A.1

Calculer la valeur algébrique du moment du couple  $C_{B,1}$

1.4.5 Enfin, on veut obtenir au cours de la phase B.3, une décélération égale en module à celle de la phase A.1

Calculer la valeur algébrique du moment du couple  $C_{B,3}$

1.4.6 Tracer sur le document réponse N°1, l'évolution du moment du couple à l'arbre du moteur en fonction du temps pour le déplacement complet (départ rez-de-chaussée , retour rez-de-chaussée)

1.4.7 Tracer sur le document-réponse N°1, l'allure de al courbe de puissance

1.4.8 Préciser sur le document-réponse N°1, le mode de fonctionnement de la machine "moteur" ou "génératrice" pour chacune des phases.

1.4.9 Calculer l'énergie  $W_{mt}$  prise en jeu en fonctionnement "moteur" pour le déplacement complet (départ rez-de-chaussée , retour rez-de-chaussée)

1.4.10 Calculer l'énergie  $W_{gt}$  mise en jeu en fonctionnement "génératrice" sur le déplacement complet

1.4.11 Quel est le pourcentage d'énergie récupérable ou à dissiper ?

## **2/ LE VARIATEUR**

Le variateur est un hacheur quatre quadrants en pont, à transistors. A chaque transistor est associée une diode montée en anti-parallèle (Figure 3). Les transistors sont assimilés à des interrupteurs parfaits bi-commandés :

A/ diodes idéales

B/ chute de tension nulle en état de conduction

C/ courant nul en état bloqué

D/ inductance totale  $L = L + L'$  (" $L$ " inductance de l'induit, " $L'$ " inductance de lissage additionnelle éventuelle)

E/ tension d'alimentation  $U_0 = 630 \text{ V}$

F/ fréquence  $f_H = 10 \text{ kHz}$  ou  $T_H = 100 \mu\text{s}$

$T_H$  désigne la période du hacher,  $\alpha$  son rapport cyclique

De 0 à  $\alpha T_H$ , les transistors 1 et 1' sont commandés à la fermeture

De  $\alpha T_H$  à  $T_H$ , les transistors 2 et 2' sont commandés à la fermeture.

2.1 Sur le document réponse N°2, indiquer par des hachures les composant en conduction

2.2 Exprimer la vitesse angulaire de rotation  $\Omega$  en fonction de  $U_0$  et  $\alpha$

2.3 Exprimer l'ondulation  $\Delta i = I_M - I_m$  de l'intensité instantanée  $i(t)$  en fonction de  $U_0$ ,  $\alpha$ ,  $L$  et  $T_H$  ou  $f_H$  ( $I_M$  et  $I_m$  représentent respectivement les valeurs maximale et minimale de l'intensité instantanée  $i(t)$ ).

2.4 On souhaite une ondulation de courant au plus égale à 1A, sachant que l'inductance " $L$ " de l'induit est de  $L = 10\text{mH}$ , doit on ajouter une inductance de lissage " $L'$ " ? Si oui, de quelle valeur ?

