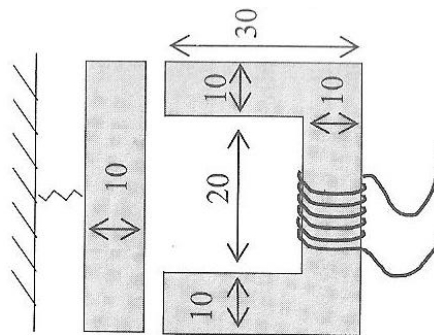


1. Conversion électro – magnéto – mécanique

Exercice 1 : Electroaimant

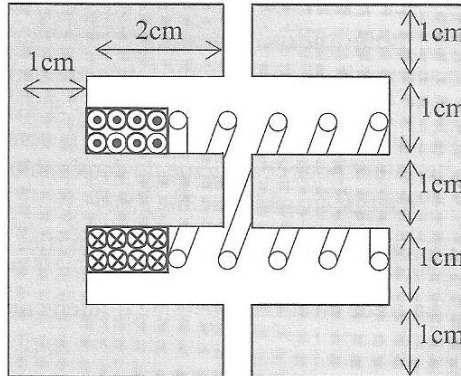
On considère l'électroaimant suivant, dont les dimensions sont en mm. Sa profondeur dans la direction perpendiculaire au plan de la figure est de 10 mm. La perméabilité relative du noyau est de 1500. Le ressort maintient la partie mobile dans une position telle que l'on ait un entrefer de $e = 3$ mm. La figure est dans un plan **horizontal**.



1. Exprimer le champ magnétique B en un point de l'électroaimant.
2. Exprimer l'inductance L en fonction notamment de e .
3. En déduire l'énergie E_{mag} emmagasinée par l'électroaimant et l'intensité F de la force électromagnétique subie par la portion mobile du circuit magnétique en fonction de e .
4. Le ressort exerce une force de rappel F_r égale à 5 N pour $e = 3$ mm. La bobine étant constituée de 200 spires, calculer le courant minimal permettant à la partie mobile de commencer à se déplacer.
5. Quel est l'intérêt d'avoir un ressort pour ce type de contacteur ?

Exercice 2 : Contacteur électromagnétique

On considère le contacteur ci-dessous formé par deux noyaux cylindriques identiques de perméabilité relative $\mu_r = 1500$. La bobine est composée de $N = 100$ spires et parcourue par un courant I . La raideur du ressort est $k = 5 \text{ N.m}^{-1}$. Lorsqu'il n'y a pas de courant, l'entrefer mesure $e = 2 \text{ mm}$.

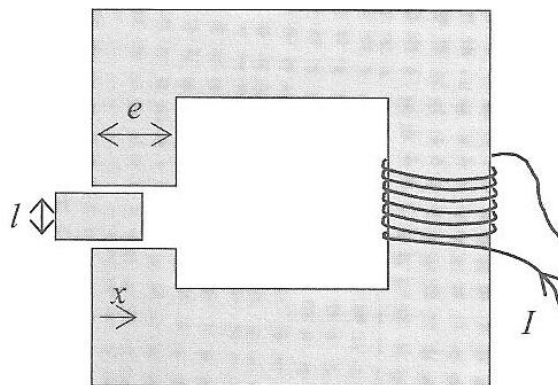


1. Exprimer et calculer le courant I qui est nécessaire pour fermer le contacteur.
2. Déterminer le courant I pour maintenir le contacteur fermé.

Exercice 3 : Oscillateur magnétique

Un milieu magnétique de perméabilité relative μ_r quasi-infinie de section carrée constante de côté e contient un entrefer de largeur $\ell + \delta$ avec $\ell \gg \delta$ dans lequel peut se glisser une pièce constituée du même milieu, de masse m , de section carrée de côté e et d'épaisseur ℓ . Une bobine constituée de N spires et parcourue par un courant I enlace le milieu magnétique. On repère la position de la pièce par l'abscisse $x(t)$. À l'instant $t = 0$, la pièce se trouve en $x(0) = \frac{e}{4}$ sans vitesse initiale.

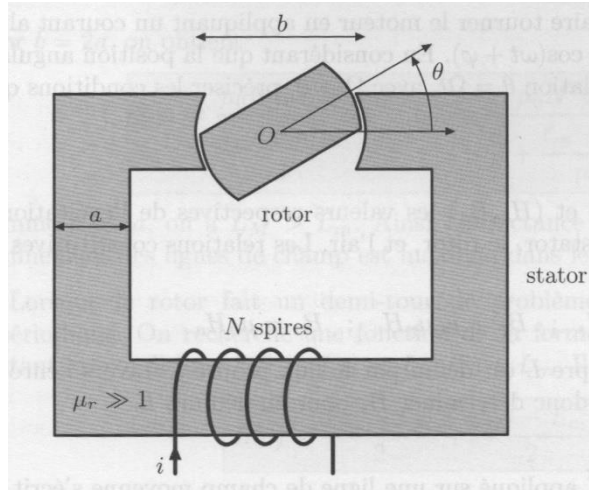
On suppose que les lignes de champ magnétique sont parfaitement canalisées par le circuit magnétique : le champ magnétique est négligeable dans la partie de la pièce située hors de l'entrefer ainsi que dans l'air situé en-dehors de l'entrefer d'épaisseur totale δ .



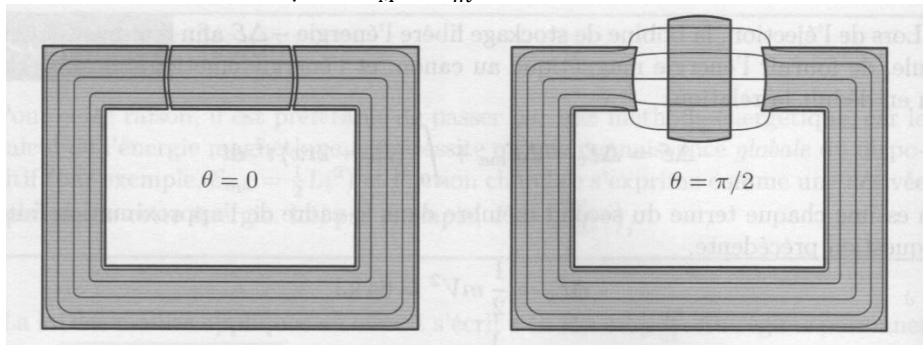
1. Dessiner l'allure des lignes de champ magnétique.
2. Montrer, moyennant les hypothèses qui vous semblent pertinentes, que le champ magnétique dans l'entrefer est donné par : $B_{air} \approx \frac{\mu_0 N I}{\delta}$.
3. Calculer l'énergie magnétique \mathcal{E}_{mag} stockée dans le champ magnétique, ainsi que la force magnétique \vec{F} subie par la pièce mobile (on distinguera les deux cas : $x < e$ et $x > e$).
4. Montrer que le mouvement de la pièce est périodique et déterminer la période du mouvement. On négligera tout frottement.

Exercice 4 : Moteur à réluctance variable

Un moteur à réluctance variable (MRV) est constitué d'un stator en fer doux de perméabilité relative $\mu_r \gg 1$ muni d'un enroulement de N spires parcourues par un courant i . Le rotor, également en fer doux, peut tourner autour d'une liaison pivot d'axe (O, \vec{u}_z) . Sa position angulaire est repérée par l'angle θ . La section du circuit magnétique est carrée de côté a . On note ℓ la longueur totale du circuit magnétique pour $\theta = 0$, et b la longueur du rotor. L'entrefer a pour épaisseur totale $2e$ supposée très inférieure à ℓ , b et a .



1. La figure ci-dessous représente l'allure des lignes de champ magnétique pour les positions $\theta = 0$ et $\theta = \frac{\pi}{2}$. Exprimer les inductances propres L_M et L_m pour ces deux configurations respectives, en supposant que la norme du champ magnétique est approximativement uniforme par morceaux dans le stator, dans le rotor et dans l'air. Simplifier ces expressions dans le cas où $b = 2a$. Comparer L_M et L_m .



2. Pour une position quelconque du rotor, l'inductance propre vaut $L(\theta)$. Quelle est la période de la fonction $L(\theta)$? On se propose de modéliser $L(\theta)$ par une fonction sinusoïdale variant entre L_M et L_m . Donner son expression et tracer sa courbe représentative.

Soit $\mathcal{E}_{mag} = \frac{1}{2}L(\theta)i^2$, l'énergie magnétique du système. On admet que le moment Γ du couple s'exerçant sur le rotor est donné par : $\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{mag}}{\partial \theta}\right)_i$.

3. Dans le cas où le courant est constant, quel est le couple moyen subi par le rotor? Conclure quant à la réalisation d'un moteur.

Le principe d'alimentation d'un MRV est d'injecter un courant lorsque l'inductance $L(\theta)$ est croissante, et de ne pas en injecter lorsque $L(\theta)$ est décroissante, avant d'annuler le couple instantané lors des phases de décroissance de $L(\theta)$. On utilise à cette fin un onduleur permettant d'obtenir un créneau de courant $i = I$ ou $i = 0$.

4. Déterminer les plages angulaires d'alimentation en courant. En déduire la valeur du couple moyen en fonction de I , L_M et L_m .
5. On peut aussi choisir de faire tourner le rotor en appliquant un courant alternatif sinusoïdal $i(t) = I_{eff}\sqrt{2}\cos(\omega t + \varphi)$. En supposant que le rotor tourne à vitesse angulaire constante $\Omega > 0$ (c'est-à-dire : $\theta(t) = \Omega t$), préciser les conditions à imposer à ω et φ pour que le fonctionnement en moteur soit effectivement possible.

Exercice 5 : Machine synchrone fonctionnant en alternateur et en moteur

Soit une machine synchrone bipolaire diphasée à rotor bobiné. On considère une des phases (bobines) du stator et l'on note $-\alpha$ et φ (supposés indépendants de la phase choisie) respectivement le déphasage de la fcm $e(t)$ et de la tension $u(t)$ par rapport au courant $i(t)$ dans cette phase. Soit R et L la résistance et l'inductance de chacun des enroulements du stator avec $R = 0,9 \Omega$.

1. La machine fonctionne en alternateur.

- On fait un premier essai à vide à la vitesse de rotation ω :
tension efficace $U_V = 220 \text{ V}$; courant d'excitation $I_{EV} = 4,0 \text{ A}$;
 - On fait un second essai en court-circuit à la vitesse de rotation ω :
courant d'excitation $I_{ECC} = 1,0 \text{ A}$; courant en ligne $I_{CC} = 3,5 \text{ A}$.
- 1.1. Représenter le schéma électrique équivalent pour une phase du stator.
 - 1.2. Que signifie ici "essai à vide" et "essai en court-circuit" ? À quels courants correspondent les appellations "courant de ligne" et "courant d'excitation" ?
 - 1.3. Justifier que la fcm induite dans une bobine du stator peut s'écrire sous la forme $e(t) = E\sqrt{2}\cos(\omega t - \alpha)$ avec $E = KI_E\omega$. Représenter le diagramme de Fresnel de la phase étudiée.
 - 1.4. Avec l'essai à vide, déterminer le produit $K\omega$.
 - 1.5. Avec l'essai en court-circuit, déterminer la réactance $L\omega$. Montrer que $R \ll L\omega$. Dorénavant, on négligera R .

2. La machine fonctionne en moteur.

En régime nominal, chaque phase fonctionne sous une tension efficace $U = 190 \text{ V}$ à une fréquence de 50 Hz ; le stator absorbe une puissance $P = 1,0 \text{ kW}$ avec un facteur de puissance $\cos \varphi = 0,87$. On néglige les frottements mécaniques.

- 2.1. Calculer le courant efficace en ligne I .
- 2.2. En faisant un bilan de puissance, calculer le moment du couple électromagnétique appliqué à l'arbre du moteur.
- 2.3. Représenter le schéma électrique équivalent pour une phase du stator. Tracer le diagramme de Fresnel correspondant dans le cas où $\varphi > 0$.
- 2.4. Déterminer la valeur efficace E de la fcm.
- 2.5. Établir la relation $U \cos \varphi = E \cos \alpha$.

Exercice 6 : Alternateur connecté à un réseau de distribution

Chaque phase de l'induit d'un alternateur est connectée au réseau de distribution afin de fournir une certaine puissance électrique. On étudie une des phases qu'on modélise par une inductance propre L , une résistance R et une force électromotrice induite par la rotation du rotor. L'alternateur étant connecté à un réseau de distribution de grande dimension et comportant d'autres éléments de production, la tension $u(t)$ aux bornes de la phase étudiée est fixée et servira de référence de phase : $u(t) = U_{eff}\sqrt{2}\cos \omega t$. Le courant circulant dans la phase, indéterminé à ce stade, est noté

$$i(t) = I_{eff}\sqrt{2}\cos(\omega t - \varphi).$$

La fém induite peut être réglée par un courant d'excitation continu I_e circulant dans l'inducteur (circuit associé au rotor). Elle est notée $e(t) = E_{eff}\sqrt{2}\cos(\omega t + \delta)$ avec $E_{eff} = KI_e$, où K est une constante et δ est l'angle de décalage interne.

1. Exprimer la puissance moyenne \mathcal{P} produite par une phase de l'alternateur en fonction de U_{eff} , I_{eff} et φ . À quelle condition cette puissance est-elle positive ? À puissance fixée, pourquoi vaut-il mieux chercher à augmenter le facteur de puissance $\cos \varphi$ dans une problématique de transport de l'énergie ?
2. Dessiner le schéma électrique équivalent d'une phase de l'induit.
3. D'une manière générale, on note $\underline{X} = X_{eff}\sqrt{2}\exp j\alpha$ l'amplitude complexe associée à la fonction sinusoïdale $x(t) = X_{eff}\sqrt{2}\cos(\omega t + \alpha)$. Exprimer, en notation complexe, la loi des mailles correspondante.
4. Dans la suite, on négligera la chute de tension à travers la résistance R . Sur un diagramme de Fresnel, représenter les images de \underline{U} , \underline{I} , \underline{E} et $jL\omega\underline{I}$ dans le cas $\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$.
5. La puissance \mathcal{P} produite par une phase de l'alternateur est égale à la puissance mécanique de la turbine entraînant le rotor, divisée par le nombre de phases. À \mathcal{P} et U_{eff} fixées, déterminer les lieux possibles de l'image de \underline{E} dans le plan de Fresnel pour différentes valeurs de I_{eff} . Pour une valeur initiale de I_{eff} conduisant à $\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, dans quel sens faut-il modifier l'excitation I_{eff} pour relever le facteur de puissance ?
6. À \mathcal{P} fixée, en négligeant les pertes, déterminer le courant d'excitation I_{eff} et l'angle de décalage interne δ pour obtenir le facteur de puissance optimal $\cos \varphi = 1$?

Exercice 7 : Traction et freinage d'un véhicule électrique par une machine synchrone

On étudie un moteur synchrone diphasé, bipolaire, dont on cherche à déterminer les principaux paramètres. Le circuit rotorique est parcouru par le courant d'excitation continu I_e maintenu constant. Le circuit statorique est alimenté par un onduleur de courant commandé qui impose dans les deux phases des courants sinusoïdaux de pulsation ω , déphasés de $\frac{\pi}{2}$, de valeurs efficaces identiques égales à I . Cet onduleur, non étudié ici, est alimenté par une batterie et l'électronique de commande est pilotée par un calculateur. Un ensemble de sondes positionnées dans la machine permet par la mesure du champ magnétique de déterminer la position angulaire du rotor. De même, deux capteurs de courant permettent de déterminer toutes les propriétés du courant dans chaque phase. Un calculateur inclus dans le dispositif d'autopilotage, non étudié, analyse ces données et génère la commande adéquate de l'onduleur de courant permettant de fixer l'angle d'autopilotage ψ (cf. infra). On supposera en outre que les matériaux magnétiques constituant la machine sont idéaux.

1. Paramètres de la machine

- 1.1 En régime permanent de rotation quelle est la relation entre Ω , vitesse de rotation du rotor et ω ?
- 1.2 On désigne par L l'inductance d'une phase et on néglige la résistance des enroulements. En régime permanent de rotation, on note \underline{U} la représentation complexe de la tension d'alimentation de la phase, \underline{I} celle du courant et \underline{E} celle de la force contre-électromotrice. Rappeler le schéma électrique d'une phase en fonctionnement moteur et en fonctionnement alternateur.
- 1.3 La valeur efficace de la force contre-électromotrice s'écrit sous la forme $E = \phi\omega$. Que représente la grandeur ϕ ? De quels paramètres dépend-elle ?

- 1.4 Afin de mesurer ϕ , on réalise un essai en circuit ouvert, le rotor de la machine synchrone étant entraîné par un moteur auxiliaire à la vitesse de 6000 tr.min^{-1} . On mesure la tension efficace aux bornes d'une phase, égale à 120 V . Calculer la valeur de ϕ .
- 1.5 Pour mesurer la valeur de l'inductance d'une phase, on réalise un essai en court-circuit, le rotor étant toujours entraîné par le moteur auxiliaire à 6000 tr.min^{-1} . La sortie d'une phase étant court-circuitée, la mesure du courant efficace de court-circuit dans la phase donne la valeur $I_{CC} = 120 \text{ A}$. Calculer l'inductance L d'une phase.

2. Traction du véhicule

Le véhicule électrique est une navette de masse voisine de 800 kg , qui doit être capable de monter une pente de 10% à la vitesse constante de 50 km.h^{-1} .

- 2.1. En supposant que la puissance perdue à cause des frottements de l'air et des pertes dans les transmissions mécaniques à cette vitesse est de l'ordre de 3 kW , estimer la puissance que doit développer le moteur afin de maintenir la vitesse du véhicule constante.

En régime permanent de rotation à la vitesse ω , on rappelle que l'angle d'autopilotage ψ représente le déphasage de \underline{E} par rapport à \underline{I} . On étudie un régime nominal de rotation du moteur à la vitesse 6000 tr.min^{-1} . Lors de ce régime, la commande de l'onduleur impose $\psi = -\frac{\pi}{3}$ et le moteur doit développer une puissance mécanique nominale de $\mathcal{P}_m = \Gamma_N \Omega_N = 15 \text{ kW}$ où Γ_N désigne le couple électromagnétique nominal.

- 2.2. Déterminer la puissance électromagnétique et en déduire la valeur efficace du courant dans chaque phase.
- 2.3. Déterminer la valeur efficace de la tension d'alimentation.
- 2.4. À 6000 tr.min^{-1} , le couple utile délivré à la charge mécanique vaut $\Gamma_{ut} = 23 \text{ N.m}$. Calculer le rendement du moteur.

3. Freinage du véhicule

3.1. Le véhicule électrique dévale une pente de 10% à vitesse constante 50 km/h . Estimer la puissance de freinage que la machine synchrone doit appliquer au véhicule afin de maintenir sa vitesse constante en tenant compte des pertes mécaniques de la question 2.1.

3.2. En régime nominal de rotation à 6000 tr.min^{-1} , la commande de l'onduleur impose $\psi = \frac{\pi}{3}$, ψ étant le déphasage de \underline{E} par rapport à \underline{I} , les deux étant définis en convention générateur. Déterminer la puissance électromagnétique que fournit l'alternateur à sa charge électrique et en déduire la valeur efficace du courant dans chaque phase.

3.3. Déterminer la valeur efficace de la tension délivrée par chaque phase de l'alternateur.

Exercice 8 : Moteur synchrone monophasé

On considère un dispositif voisin de celui de la machine synchrone diphasée à excitation extérieure bipolaire. Ce dispositif ne possède qu'une seule phase statorique parcourue par un courant

$i_s(t) = I_s \sqrt{2} \cos \omega t$. Le circuit rotorique est parcouru par un courant constant I_r .

1. Déterminer l'expression du champ magnétique statorique \vec{B}_S dans l'entrefer de la machine. Est-il glissant ?
2. Déterminer l'expression du couple instantané Γ subi par le rotor, donné par $\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{mag}}{\partial \theta} \right)_{i_s}$ où θ repère la position angulaire du rotor. Montrer qu'on peut le mettre sous la forme : $\Gamma = \frac{\Gamma_0}{2} (\sin(\omega t - \theta(t)) - \sin(\omega t + \theta(t)))$.
3. A quelle condition un fonctionnement en moteur est-il possible ? Comparer, dans ce cas, le fonctionnement du dispositif à celui de la machine synchrone diphasée.

Exercice 9 : Stabilité du fonctionnement d'une machine synchrone

On considère une machine synchrone diphasée à excitation extérieure bipolaire. On suppose que la machine fonctionne en moteur et que la condition de synchronisme est vérifiée : $\omega t = \theta(t) + \alpha$, où $\theta(t)$ repère la position angulaire du rotor. On note Γ le couple électromagnétique subi par le rotor et Γ_0 sa valeur maximale ; on rappelle que $\Gamma = \Gamma_0 \sin(\omega t - \theta(t))$. Le moment résultant Γ_c des autres actions subies par le rotor (frottements, charge...) vaut $\Gamma_{c,0}$ lorsque la condition de synchronisme est strictement vérifiée. On note J le moment d'inertie du rotor.

1. Donner la relation liant Γ_0 , $\Gamma_{c,0}$ et α .

On envisage une petite désynchronisation entre le champ glissant statorique et le champ glissant rotorique consécutive à une légère variation du couple Γ_c . Cette désynchronisation est quantifiée par l'intermédiaire d'un paramètre sans dimension noté $\varepsilon(t)$, avec $|\varepsilon| \ll 1$. On pose :

- $\Gamma_c = \Gamma_{c,0} + \varepsilon \frac{d\Gamma_c}{d\varepsilon}(0)$
- $\dot{\theta} = \omega(1 + \varepsilon)$
- $\theta(t) \approx \omega(1 + \varepsilon(t))t - \alpha$

2. Montrer qu'au premier ordre en ε : $\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon} = \frac{1}{J\omega} \left(\frac{d\Gamma_c}{d\varepsilon}(0) - \Gamma_0 \omega t \cos \alpha \right)$.
3. Pour quelles valeurs de α le fonctionnement est-il stable ? instable ?

Exercice 10 : Mesure des caractéristiques d'une machine à courant continu

On s'intéresse ici à un ensemble constitué d'un moteur à courant continu à excitation séparée et d'une charge mécanique tous deux montés sur un même arbre. On note J le moment d'inertie du rotor.

1. On postule pour la charge la caractéristique couple-vitesse $C_r = -\alpha\omega$ où α est une constante. Quel est le signe de α ? Exprimer la transmittance $T_m(p) = \frac{\Omega(p)}{C(p)}$ où $\Omega(p)$ et $C(p)$ sont les transformées de Laplace respectives de la vitesse angulaire et du couple moteur.

On désire déterminer expérimentalement les paramètres J et α . A cet effet, on effectue deux essais :

- **Essai 1.** Pour différentes valeurs de couple moteur C , on mesure, après établissement du régime permanent, la valeur ω de la vitesse angulaire. On obtient les résultats suivants :

C (N.m)	5	10	15
ω (rad.s ⁻¹)	50	100	150

- **Essai 2.** Lorsque la charge est en rotation à vitesse angulaire ω_0 , on coupe l'alimentation du moteur à partir de l'instant $t = 0$ et on mesure le temps Δt_0 au bout duquel la vitesse ne vaut plus que 50 % de sa valeur initiale. Pour $\omega_0 = 150$ rad.s⁻¹, on a mesuré $\Delta t_0 = 10,4$ s.
2. Déterminer α et J . Dans l'essai 2, si l'on modifie la valeur initiale ω_0 , comment doit se trouver modifié Δt_0 si le modèle est correct ?
 3. La loi $C_r = -\alpha\omega$ rend-elle compte de l'arrêt de la machine au bout d'un temps Δt_1 ? On a mesuré $\Delta t_1 = 42,0$ s. Proposer une correction à la loi liant C_r à ω pour pallier ce problème. Calculer numériquement le ou les paramètres introduits à cet effet, en conservant les valeurs précédemment obtenues pour α et J . Le nouveau modèle est-il en contradiction avec les résultats de l'essai 1 ?





Exercice 11 : Moteur à courant continu à excitation série

Un moteur à courant continu à excitation série (l'inducteur et l'induit sont en série) est alimenté par une source de tension continue $U = 220$ V. On note I le courant circulant dans l'induit et l'inducteur et Ω , la vitesse de rotation du rotor. On néglige toutes les pertes.

1. Montrer que le couple moteur vérifie les lois $C = aI^\alpha$ et $C = b\Omega^\beta$ où a et b sont des constantes, à tension imposée. On précisera évidemment les valeurs prises par les exposants α et β . On précisera également le lien entre les deux constantes a et b .
2. Que se passe-t-il si le moteur fonctionne à vide ?
3. Sur la notice du moteur, on lit : 220 V ; 1200 tr/min ; 6,8 A. En déduire la valeur numérique des constantes b et a .
4. Le moteur entraîne un compresseur de couple résistant constant 10 N.m. En déduire la vitesse de rotation de l'ensemble.
5. Le moteur entraîne un ventilateur dont le couple résistant est proportionnel au carré de la vitesse de rotation (15 N.m à 1500 tr/min). En déduire la vitesse de rotation de l'ensemble.

Exercice 12 : Lecture de la plaque signalétique d'un moteur à courant continu

Voici la plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation séparée, fabriqué par l'entreprise Leroy-Somer dans son usine d'Angoulême :

 LR 57008 IEC 34.1.1990				2 102 451 / A MADE IN FRANCE			
		MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR					
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 700000/10		9/1992		M 249 kg	
Classe / Ins class H		IM 1001		IP 23		IC 06	
M_{nom} / Rated torque 301 N.m		Altit. 1000 m		Temp. 40 °C			
	kW	min ⁻¹	V	A	V	A	
Nom./Rat.	36,3	1150	440	95,5	360	3	
	3,63	115	44	95,5	360	3	
	36,3	1720	440	95,5	240		
T		Système peinture: I		Induit / Arm		Excit. / Field	
○ Service / Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3		○	

1. Calculer le couple utile nominal et la résistance de l'induit. Vérifier la cohérence de la valeur du couple nominal.
2. Calculer la résistance de l'inducteur et le rendement nominal.

Exercice 13 : Fonctionnement d'une machine à courant continu à excitation séparée

On étudie un moteur à courant continu à excitation indépendante. Le courant d'excitation est fixé à $I_e = 1,5 \text{ A}$. La résistance de l'induit est $r = 1,0 \Omega$.

À vide, avec une tension d'alimentation $U_0 = 308 \text{ V}$, on mesure une vitesse de rotation $N = 2100 \text{ tr. min}^{-1}$ en régime permanent.

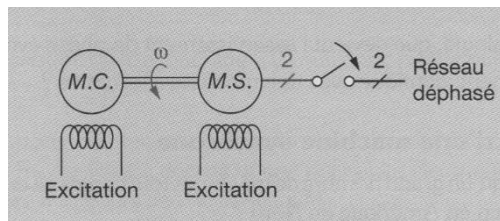
1. Calculer le rapport de proportionnalité entre la f.c.é.m E et la vitesse de rotation Ω .
2. Donner l'expression du couple magnétique en fonction de la tension d'alimentation U et de la vitesse de rotation Ω .

Le moteur entraîne une charge dont le couple résistant varie en fonction de la vitesse de rotation. La caractéristique $C_r = f(N)$ de cette machine est assimilée à une droite passant par les points $\{N = 0, C_r = 12 \text{ N. m}\}$ et $\{N = 2000 \text{ tr. min}^{-1}, C_r = 30 \text{ N. m}\}$

3. Pour régler la vitesse de rotation de l'ensemble {moteur + charge}, on agit sur la tension d'alimentation de l'induit. Le démarrage du groupe se fait sans rhéostat. Calculer la tension minimale à appliquer et le courant dans l'induit au moment du démarrage.
4. Déterminer la relation entre la vitesse de rotation Ω et la tension d'alimentation U en régime permanent.
5. Calculer la vitesse de rotation Ω et le courant dans l'induit pour $U = 110 \text{ V}$ et $U = 220 \text{ V}$.

Exercice 14 : Expériences sur un banc de machines

Un banc de machines comprend une machine à courant continu (MC) et une machine synchrone (MS) à stator diphasé, montées sur le même arbre de rotation. Toutes deux sont à excitation séparée et on suppose l'excitation constante au cours de l'ensemble des expériences réalisées.



1. Essai à vide

La machine à courant continu est alimentée par une source de tension continue U que l'on augmente lentement à partir de la valeur nulle. Les deux enroulements de la machine synchrone ne sont reliés à aucune charge électrique (ils sont donc en circuit ouvert), et on se contente d'observer et mesurer les tensions qui apparaissent aux bornes de chacun d'entre eux (pulsation, valeur efficace, déphasage). Un tachymètre donne en permanence la valeur de la vitesse de rotation de l'ensemble.

- 1.1. Expliquer ce qui se produit au cours de l'augmentation progressive de la tension, et préciser l'évolution de la vitesse de rotation.
- 1.2. Comment évoluent la pulsation et les amplitudes des tensions statoriques de la machine synchrone ? Que peut-on dire de leur déphasage ?
- 1.3. On cesse de faire croître la tension U lorsqu'on constate que les tensions observées aux bornes des enroulements statoriques ont même fréquence que celle du réseau d'alimentation diphasé disponible dans le laboratoire. Peut-on raccorder les phases de la machine synchrone aux phases du réseau ? Dans le cas contraire, préciser les précautions à prendre préalablement.

- 1.4. Les éventuelles vérifications sont effectuées et on réalise le raccordement. Peut-on débrancher l'alimentation de la machine à courant continu ?

2. Essai en charge

La machine synchrone est reliée au réseau d'alimentation diphasé et la source de tension qui alimentait la machine à courant continu est remplacée par un rhéostat (résistance variable R pouvant dissiper une forte puissance).

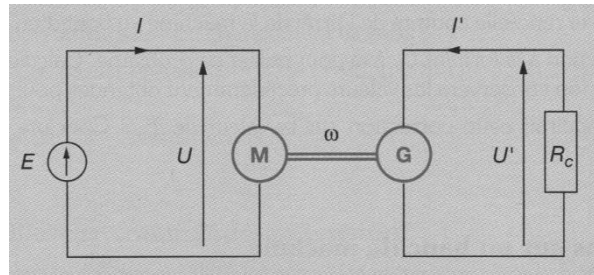
- 2.1. Comment fonctionne dans ce cas la machine à courant continu ?
- 2.2. Lorsqu'en partant d'une grande valeur de la résistance R , on diminue celle-ci, que se passe-t-il concernant la vitesse de rotation ?
- 2.3. Comment varie le courant dans la résistance ? Comment varie le couple résistant imposé par la machine à courant continu ?
- 2.4. Quelles limites pratiques vont s'imposer dans la diminution de la résistance R ?

Exercice 15 : Couplage d'un moteur et d'une génératrice à courant continu

On considère l'association de deux machines à courant continu de caractéristiques rigoureusement identiques. Les deux machines sont solidaires, montées sur le même arbre de rotation. La machine « M » est alimentée par une source de tension idéale de fém E , l'autre machine « G » est connectée à une charge électrique résistive de résistance R_c . On note R la résistance du bobinage induit de chacune des deux machines. Les pertes mécaniques sont modélisées par un couple global de frottement fluide, de coefficient f .

On s'intéresse au fonctionnement en régime permanent.

Données : $E = 100 \text{ V}$; $R = 1 \Omega$; constante électromécanique $\Phi_0 = 1 \text{ Wb}$; $R_c = 10 \Omega$;
 $f = 0,01 \text{ N.m.rad}^{-1}.\text{s}$

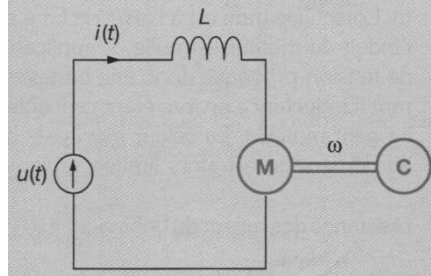


1. Ecrire les équations électriques et mécanique du système.
2. Exprimer, en fonction de la vitesse de rotation ω , le couple résistant C_r résultant des frottements et de la machine G (il s'agit du couple de la charge mécanique équivalente vue par la machine M).
3. Exprimer et calculer la vitesse de rotation ω du système en fonction de la tension d'alimentation E .
4. Calculer également les courants d'induit I et I' dans chacune des deux machines, les couples électromagnétiques C_M et C_G appliqués sur chaque rotor et la tension U' aux bornes de la charge électrique. Commenter les signes de ces grandeurs.
5. Comparer la puissance consommée par la charge électrique et la puissance fournie par l'alimentation. Effectuer un bilan de puissance détaillé.
6. Que deviennent les résultats précédents si on néglige toutes les pertes (frottements et résistances d'induit) ?

Exercice 16 : Réponse d'une machine à courant continu à une ondulation de tension

On considère un dispositif comprenant une machine à courant continu « M » alimentée par une tension $u(t)$ par l'intermédiaire d'une bobine d'inductance L (appelée *inductance de lissage du courant*). Cette machine entraîne une charge mécanique de caractéristique couple – vitesse $C_r = -\alpha\omega$.

Données : constante électromécanique $\Phi_0 = 1,4 \text{ Wb}$; $L = 5 \text{ mH}$; résistance globale $R = 0,5 \Omega$; moment d'inertie du rotor $J = 1,5 \text{ kg.m}^2$; $\alpha = 0,1 \text{ N.m.rad}^{-1}.\text{s}$



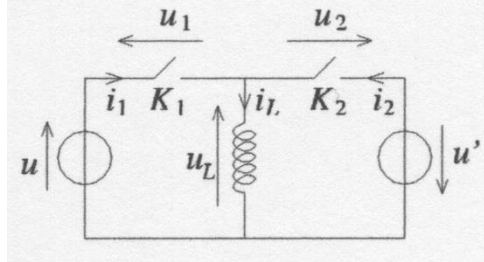
On se propose d'établir la propriété selon laquelle dans ce système, le dipôle équivalent à l'association moteur + charge peut être considéré comme une source de courant quasi-idéale.

- Déterminer la fonction de transfert électrique $T_e(p) = \frac{I(p)}{U(p)}$ du système. Quel est son ordre ? Quelle en est la nature ?
- Justifier numériquement que $T_e(p) \approx \frac{\alpha + Jp}{\Phi^2 + R/p + L/p^2}$ et qu'on peut mettre la fonction de transfert sous la forme $T_e(p) = T_0 \frac{1 + \tau_3 p}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}$ avec $\tau_2 \ll \tau_1$. Exprimer, calculer et interpréter les trois constantes de temps introduites.
- Tracer le diagramme de Bode asymptotique de $T_e(p)$. Expliquer en quoi ce dispositif atténue fortement les ondulations en « haute fréquence » (terme que l'on précisera), et en quoi il constitue une source de courant quasi-idéale.
- Reprendre l'étude précédente pour la fonction de transfert mécanique $T_m(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)}$ et montrer qu'on peut la mettre sous la forme $T_m(p) = \frac{1}{\Phi} \frac{1}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p)}$. Conclure quant à l'immunité mécanique du système aux fluctuations de la tension d'alimentation.

2. Conversion électronique statique

Exercice 17 : Hacheur indirect tension – tension à stockage inductif

Soit le montage suivant où on supposera que le courant $i_L(t)$ dans la bobine d'inductance L est toujours positif.



L'interrupteur K_1 est fermé sur $[0, \alpha T]$ et ouvert sur $[\alpha T, T]$. L'interrupteur K_2 est ouvert sur $[0, \alpha T]$ et fermé sur $[\alpha T, T]$. Les interrupteurs sont supposés idéaux.

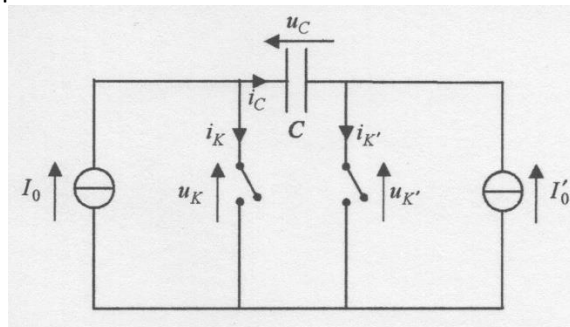
1. Vérifier que les règles d'associations sont respectées.
2. On suppose le régime périodique atteint. Tracer les chronogrammes des tensions u_1 , u_2 , u_L et des courants i_L , i_1 , i_2 . Quelle doit être la relation entre u , u' et α ?
3. Quelle doit être la nature des interrupteurs (diode ou transistor) ? Redessiner le montage avec les interrupteurs effectivement utilisés.
4. Calculer les valeurs moyennes I_1 et I_2 des courants $i_1(t)$ et $i_2(t)$ en fonction de la valeur moyenne I_L du courant $i_L(t)$ dans la bobine.
5. En déduire la valeur du rapport $\frac{I_2}{I_1}$ en fonction de α . Que peut-on dire du cas $\alpha = 1$?
6. Effectuer un bilan de puissance en calculant la puissance moyenne cédée par la source de tension u , la puissance moyenne consommée par la source de tension u' et les puissances moyennes consommées par les interrupteurs et la bobine. Ce hacheur est-il dévolteur ? survolteur ?
7. Quels interrupteurs faudrait-il choisir si le courant i_L pouvait devenir négatif ?

Exercice 18 : Hacheur indirect courant – courant à stockage capacitif

On considère le montage ci-dessous appelé hacheur à accumulation capacitive, le cycle périodique de commande étant :

- si $0 < t < \alpha T$, K est fermé tandis que K' est ouvert ;
- si $\alpha T < t < T$, K est ouvert tandis que K' est fermé.

Les interrupteurs sont supposés idéaux.



1. Peut-on laisser simultanément les deux interrupteurs dans le même état ? Justifier la réponse.
2. On note U_m la valeur minimale de la tension aux bornes du condensateur et U_M sa valeur maximale en régime permanent (c'est-à-dire périodique). Étudier les variations de u_C , u_K , $u_{K'}$, i_C , i_K et $i_{K'}$. Les représenter en fonction du temps.

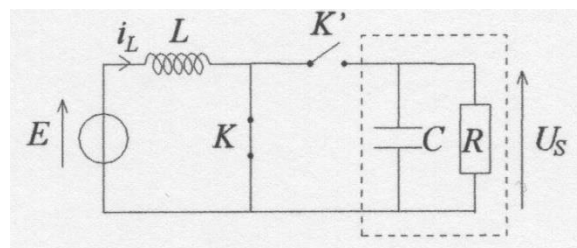
3. Indiquer la relation qui doit exister entre I_0 , I'_0 et α pour que le régime permanent soit possible.
4. Calculer la puissance moyenne fournie par la source d'entrée puis la puissance moyenne consommée par la source de sortie. Commenter.
5. En déduire les caractéristiques tension-courant des deux interrupteurs et indiquer à l'aide de quels composants électroniques ils peuvent être réalisés. Dessiner le montage correspondant.

Exercice 19 : Alimentation à découpage

On s'intéresse au système constituant un convertisseur élévateur de tension entre une source de tension idéale E et une charge résistive R (jouant le rôle du dispositif à alimenter). Cette structure est représentative de dispositifs utilisés dans les alimentations dites à découpage, fréquemment utilisées dans les appareillages électriques.

Le fonctionnement considéré ici est périodique, la séquence de commande des interrupteurs étant la suivante :

- si $0 < t < \alpha T$, K est fermé tandis que K' est ouvert ;
- si $\alpha T < t < T$, K est ouvert tandis que K' est fermé.



Données numériques : $T = 50 \mu\text{s}$, $E = 40 \text{ V}$.

1. Supposons temporairement l'association $R//C$ entourée en pointillés comme une source de tension idéale de valeur $U_S = E'$. Étudier l'évolution de i_L sur une période et en déduire la valeur de E' permettant d'obtenir un fonctionnement périodique.
2. On désire obtenir une valeur $E' = 80 \text{ V}$ avec une variation de courant dans la bobine $\Delta i_L \leq 0,2 \text{ A}$. Déterminer α puis la valeur minimale de l'inductance L .
3. Lorsque la puissance moyenne échangée est $\mathcal{P} = 160 \text{ W}$:
 - 3.1. Déterminer les valeurs minimale et maximale du courant dans la bobine si l'on adopte l'inductance minimale déterminée précédemment ;
 - 3.2. Définir les fonctions de commutation utilisables pour K et K' dans ce fonctionnement.
4. On tient compte maintenant de la structure $R//C$ du dipôle de sortie, on adopte les valeurs numériques suivantes : $R = 40 \Omega$ et l'ondulation maximale ΔU_S de la tension U_S doit rester inférieure à 1 V . En supposant les formes d'ondes obtenues à la question 1. conservées, déterminer la valeur minimale de la capacité C ; on fera les approximations suggérées par la valeur très faible de ΔU_S par rapport à E' .

Exercice 20 : Alimentation d'une MCC

Une machine à courant continu (MCC), fonctionnant en moteur, est alimentée par une source idéale de tension de force électromotrice E par l'intermédiaire d'un hacheur série de rapport cyclique α . Une bobine d'inductance L est placée en série avec la machine. Les résistances des bobines sont négligées. On notera Φ_0 la constante de flux de la machine et Ω sa vitesse angulaire de rotation. Le moteur fonctionne en régime permanent et le régime périodique est atteint dans le circuit.

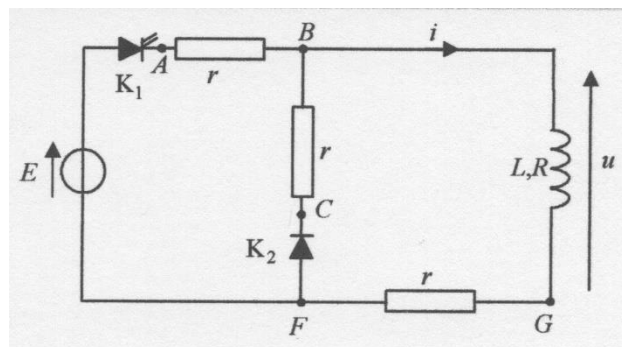
1. À quoi sert la bobine ?

2. Représenter le circuit en précisant les interrupteurs effectivement utilisés et donner le chronogramme des tensions aux bornes des interrupteurs et de la bobine, du courant i circulant dans la machine. Donner leurs valeurs moyennes. On introduira les valeurs I_{max} et I_{min} du courant i .
3. Déterminer la vitesse de rotation du moteur. Commenter.
4. Effectuer un bilan détaillé des puissances mises en jeu. Que vaut le rendement du convertisseur ?
5. Calculer l'ondulation du courant i , définie par $\Delta i = I_{max} - I_{min}$. Commenter.
6. Le rotor de la MCC est solidaire du rotor d'une autre MCC identique fonctionnant en génératrice et branchée sur une résistance R .
 - 6.1. Déterminer la valeur moyenne du courant i en fonction de R . En déduire la valeur minimale I_{min} de $i(t)$.
 - 6.2. Montrer que pour R supérieur à une résistance critique R_c que l'on déterminera, le courant i peut s'annuler. Quel problème cela pose-t-il ?
 - 6.3. On revient au régime de conduction continu où i ne s'annule pas. On tient compte de la dissipation dans les bobines et d'un couple de frottement fluide $\Gamma_r = -f\Omega$ s'exerçant sur le rotor. On notera R_1 la résistance totale dans la branche du moteur et R_2 la résistance totale dans la branche de la génératrice.

Montrer qu'on trouve encore une vitesse de rotation proportionnelle à α .

Exercice 21 : Etude expérimentale d'un hacheur série

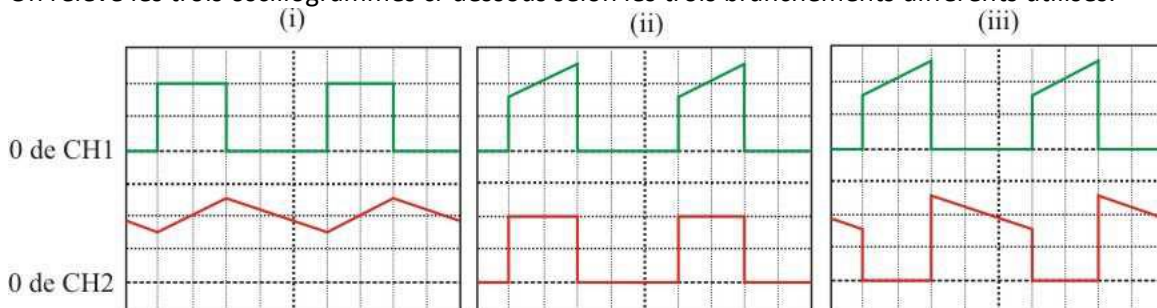
On réalise le montage ci-dessous permettant l'alimentation d'une charge inductive par une tension continue à l'aide d'un hacheur série. Les résistances $r = 0,1 \Omega$ seront négligées dans l'étude théorique du montage.



On utilise trois branchements différents pour l'oscilloscope :

- (1) : $A \rightarrow \text{CH1}$, $B \rightarrow \text{masse}$, $C \rightarrow \text{CH2}$
- (2) : $B \rightarrow \text{CH1}$, $G \rightarrow \text{masse}$, $F \rightarrow \text{CH2}$
- (3) : $A \rightarrow \text{CH1}$, $B \rightarrow \text{masse}$, $G \rightarrow \text{CH2}$

On relève les trois oscillogrammes ci-dessous selon les trois branchements différents utilisés.



Sensibilités CH1: 20V / div
CH2: 20mV / div

CH1: 20mV / div
CH2: 20V / div

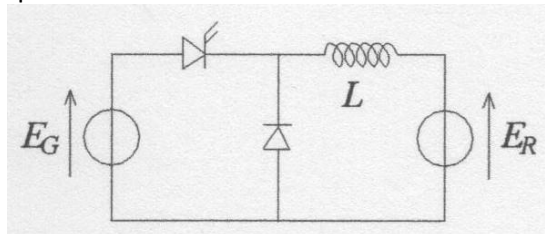
CH1: 20mV / div
CH2: 20mV / div

Base de temps (pour toutes les courbes): 0,5 ms / div

1. Associer les trois branchements envisagés aux oscillogrammes précédents (on indiquera les cas où il est nécessaire d'inverser la voie CH2). A quoi servent les trois résistances r ?
2. La période du signal est notée T . On prend comme origine des temps le début de la conduction du transistor et on note αT l'instant où il se bloque. Établir l'expression de $i(t)$ dans chaque intervalle en fonction de I_{max} , I_{min} et de $\tau = \frac{L}{R}$, notamment.
3. Au vu des oscillogrammes observés, que pensez-vous du rapport $\frac{T}{\tau}$? Simplifier en conséquence les expressions du courant $i(t)$.
4. Donner les expressions de la tension moyenne U aux bornes de la charge et du courant moyen I dans la charge.
5. Exprimer I_{max} , I_{min} et l'ondulation Δi du courant dans la charge en fonction de E , R , T , α et $\tau = \frac{L}{R}$.
6. Dédurre des oscillogrammes les valeurs de T , α , E , L et R .

Exercice 22 : Hacheur série en régime transitoire

Soit un hacheur série transférant de l'énergie d'un générateur de f.e.m E_G vers un récepteur de f.e.m E_R . Le rapport cyclique de hachage est α et la période T . On fait l'hypothèse que le courant dans la bobine ne s'annule jamais. On suppose ici, contrairement à ce qu'on fait usuellement que le régime permanent périodique n'est pas atteint.



Supposons qu'à l'instant $t_0 = nT$ (n entier), le courant qui traverse la bobine est i_0 .

1. Donner l'expression de ce courant à l'instant $t_0 + T$. La relation entre $i(t_0 + T)$ et i_0 est-elle encore valable si n n'est pas entier ?

Déterminer $\langle \frac{di}{dt} \rangle$. Commenter le résultat. On admet que cette relation est valable, sans la valeur moyenne, pour un dipôle quelconque si la tension à ses bornes varie lentement sur une période.

2. **Application à l'alimentation d'un moteur à courant continu**

Un moteur initialement au repos est alimenté par ce hacheur. Notons J le moment d'inertie du rotor et Φ_0 sa constante électromagnétique. On néglige la résistance du moteur. Le moteur est soumis à un couple résistant de type frottement fluide : $\Gamma_r = -f\Omega$. Comment faut-il choisir L pour que le régime permanent soit atteint le plus rapidement ?

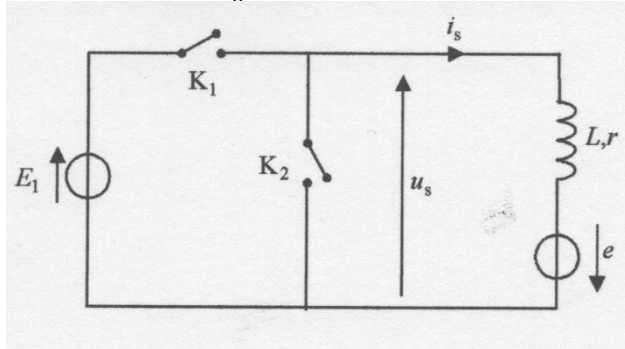
3. **Application à une alimentation à découpage**

La f.e.m du générateur est de 20 V, l'inductance de la bobine est de 10 mH, le récepteur est une résistance de 10 Ω en parallèle avec une capacité C .

Commenter l'affirmation suivante : "il faut choisir la capacité du condensateur la plus grande possible pour que la tension aux bornes de la résistance soit la plus constante possible".

Exercice 23 : Fonctionnement discontinu d'un hacheur

Le hacheur est alimenté par une source de tension de f.e.m constante E et connecté à un récepteur (L, r, e) (comme il s'agit d'un récepteur, un moteur par exemple, la fém e est négative !). La fréquence f de hachage est grande devant le rapport $\frac{r}{L}$.



1. On suppose dans un premier temps que le courant de sortie $i_s(t)$ est positif. Déterminer les expressions de $i_s(t)$ dans les deux phases de fonctionnement. On introduira les valeurs I_{max} et I_{min} du courant i_s . Tracer l'allure de $i_s(t)$.
2. Déterminer la valeur critique α_c de α pour laquelle I_{min} .

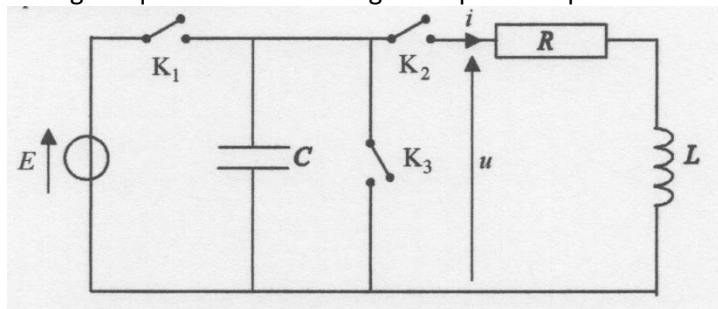
On se place par la suite dans le cas où $\alpha < \alpha_c$.

3. Représenter le chronogramme de $i_s(t)$.
4. Déterminer le courant maximal I_{max} et l'amplitude d'ondulation Δi_s en fonction de E, e, α, L et f .
5. Calculer la durée βT de la phase de décroissance du courant et la durée γT de sa phase d'annulation. Retrouver la condition de conduction discontinue.
6. Calculer le courant moyen I_0 et la puissance moyenne transférée \mathcal{P} . Comparer qualitativement ces grandeurs dans les deux modes de conduction continue et discontinue.
7. Que vaut le rendement de conversion de puissance entre la source de tension d'entrée et la source de courant en sortie ? Etes-vous surpris par ce résultat ? Proposer une explication.

Exercice 24 : Alimentation d'une bobine de magnétisation d'un aimant

On cherche à obtenir un aimant permanent à l'aide d'un matériau ferromagnétique dur dont le cycle d'hystérésis à saturation dans le plan (B, H) est quasiment un rectangle de côtés parallèles aux axes.

1. Représenter ce cycle. Définir le champ rémanent et l'excitation coercitive. Comment se caractérise un matériau dur ? Justifier que pour aimanter ce matériau, il faut une excitation intense que l'on obtient en faisant passer un courant fort dans une bobine contenant le matériau ferromagnétique. Ce courant est généré par le dispositif ci-dessous :



Le condensateur, de capacité $C = 600 \mu\text{F}$, est chargé à l'aide de l'interrupteur K_1 , sous une tension $E = 1500 \text{ V}$. L'interrupteur K_2 permet ensuite de décharger le condensateur dans la bobine

d'inductance $L = 0,3 \text{ mH}$ et de résistance $R = 0,2 \Omega$. Pour des raisons de sécurité, la séquence de fonctionnement doit se terminer à condensateur déchargé.

- On envisage la phase de magnétisation du matériau, commençant à $t = 0$. A cet instant initial, on ouvre K_1 et on ferme K_2 (K_3 restant ouvert). La tension initiale aux bornes du condensateur

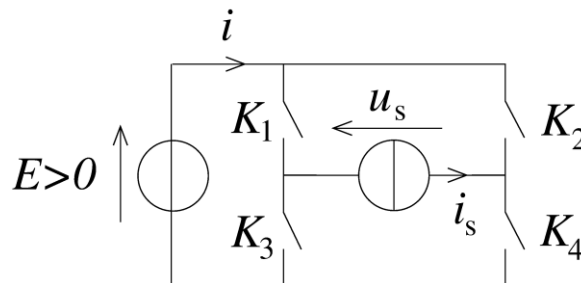
vaut $u(0) = E$. Montrer que
$$\begin{cases} i(t) \approx \frac{E}{L\omega} \exp\left(-\frac{Rt}{2l}\right) \sin(\omega t) \\ u(t) \approx E \exp\left(-\frac{Rt}{2l}\right) \cos(\omega t) \end{cases}$$
 où l'on précisera la valeur de ω .

Que vaut la tension u à l'instant où le courant i s'annule ?

- Expliquer pourquoi il est nécessaire d'utiliser un troisième interrupteur K_3 . Que se passerait-il sinon ?
- En déduire la séquence de fonctionnement. Tracer $u(t)$ et $i(t)$. Quels types d'interrupteurs faut-il choisir ?
- Calculer le courant maximal dans la bobine.

Exercice 25 : Onduleur autonome. Filtrage de la tension de sortie.

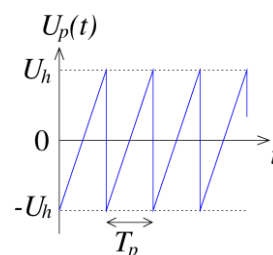
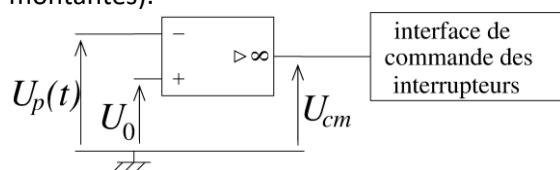
Un onduleur est un dispositif électrique asservi en fréquence destiné à produire, à partir d'une tension constante, un courant électrique alternatif susceptible d'être injecté dans le réseau de transport du courant industriel. L'onduleur est constitué d'une source de tension continue parfaite de force électromotrice E positive et de quatre interrupteurs K_n , $n \in \llbracket 1,4 \rrbracket$, commandés électroniquement à partir d'une tension de commande U_{cm} non représentée sur le schéma. La sortie de l'onduleur est connectée à une charge se comportant comme une source parfaite de courant i_s , ce courant étant une fonction continue du temps.



- Rappeler les définitions d'une source de tension parfaite et d'une source de courant parfaite. Compte tenu de la nature de la source de tension E et de la nature de la charge, quelles sont les contraintes d'ouverture et de fermeture des interrupteurs K_n ? Compléter le tableau suivant :

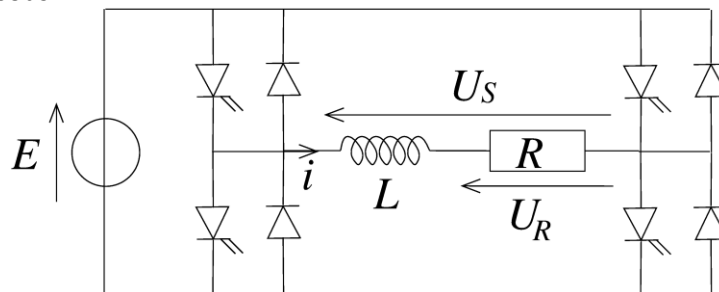
	K_1	K_2	K_3	K_4
$U_{cm} > 0$	fermé	ouvert		
$U_{cm} < 0$	ouvert	fermé		

La tension de commande U_{cm} est générée par le montage de la figure ci-dessous, dans lequel l'amplificateur linéaire intégré est idéal. La tension U_0 est constante, telle que $U_0 \in [-U_h, U_h]$, avec $U_h > 0$. La tension $U_p(t)$, appelée porteuse, est T_p - périodique et en dent de scie (suite de rampes montantes).



- Justifier que l'ALI fonctionne en régime de saturation en tension (on note V_{sat} l'amplitude de la tension de sortie).
- On choisit $U_0 > 0$. Tracer la courbe représentant la tension $u_s(t)$ aux bornes de la charge en fonction du temps et préciser la valeur de sa période T_s .
- Sur une période T_s de u_s , on note t_1 la durée où $u_s > 0$. Le rapport α cyclique est défini par $\alpha = \frac{t_1}{T_s}$. Exprimer la valeur moyenne $\langle u_s \rangle$ de u_s en fonction de α et de E puis en fonction de U_0 , E , et U_h . Quelles doivent être les valeurs de α et U_0 si on veut que u_s ait une moyenne nulle ? On se placera dans ce cas dans la suite.
- Le développement en série de Fourier de la tension $u_s(t)$ ainsi générée s'écrit :

$$u_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} (1 - (-1)^n) \sin(n\omega t) \text{ avec } \omega = \frac{2\pi}{T_s}.$$
Représenter graphiquement le spectre en amplitude de cette tension. Ce spectre est-il satisfaisant en vue d'un raccordement de u_s au réseau de distribution électrique ? Si ce n'est pas le cas, quels en sont les défauts et quelles conséquences néfastes cela pourrait-il avoir ?
- La charge est constituée d'une bobine d'inductance L en série avec une résistance R . On pose $\tau = \frac{L}{R}$. On étudie le régime T_p – périodique établi du montage. On notes $-I$ la valeur de i_s à $t = 0$ et $+I$ sa valeur à $t = \frac{T_p}{2}$.
Exprimer $i_s(t)$ pour $t \in [0, \frac{T_p}{2}]$ et pour $t \in [\frac{T_p}{2}, T_p]$ en fonction de t , E , R , I , T_p et α . En déduire l'expression de I en fonction de E , R , T_p et α . Représenter les chronogrammes de i_s et de i .
- Dans la pratique, l'onduleur qui alimente la charge {résistance+bobine} est réalisée avec le montage ci-dessous.

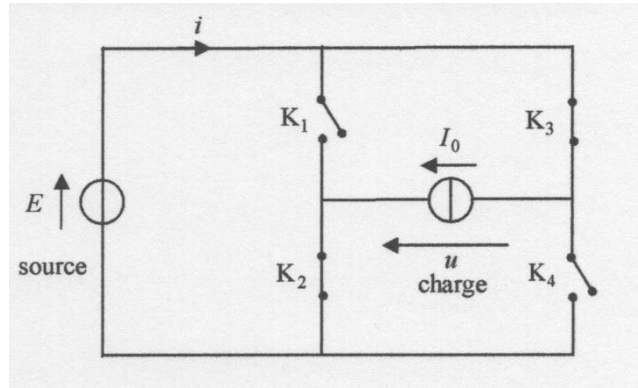


Les interrupteurs commandés K_n sont des transistors idéaux unidirectionnels et le circuit contient également quatre diodes idéales D_n . Expliquer le rôle des diodes dans le circuit.

- Le rôle de la bobine est d'effectuer un filtrage. Les grandeurs soulignées désignent les grandeurs complexes associées aux grandeurs réelles sinusoïdales de pulsation ω . Déterminer la fonction de transfert complexe $\underline{H} = \frac{\underline{U}_R}{\underline{U}_S}$ de la branche {bobine+résistance} et faire apparaître dans son expression une pulsation caractéristique ω_c . Donner l'expression du gain $G(\omega)$ et du déphasage $\varphi(\omega)$ associés à \underline{H} .
- Donner le développement en série de Fourier de $u_R(t)$. En déduire le spectre en amplitude de la tension u_R et le représenter graphiquement. En quoi ce spectre est-il meilleur que celui de u_s pour un éventuel raccordement au réseau de distribution électrique ?

Exercice 26 : Onduleur autonome à commandes simultanée et décalée

Un onduleur est un convertisseur électronique permettant de transférer de la puissance d'une source continue vers une source alternative. On se propose ici d'étudier le cas d'un onduleur à quatre interrupteurs fonctionnant entre une source de tension parfaite en entrée et une source de courant parfaite en sortie. On cherche à obtenir autant que possible une tension alternative aux bornes de la source de sortie. Les régimes étudiés sont T – périodiques.



1. Commande simultanée

La commande est la suivante :

- pour $t \in]0, \frac{T}{2}[$, K_1 et K_4 sont fermés, K_2 et K_3 sont ouverts ;
- pour $t \in]\frac{T}{2}, T[$, K_1 et K_4 sont ouverts, K_2 et K_3 sont fermés.

1.1. Tracer l'allure de la tension $u(t)$ aux bornes de la charge.

Le développement en série de Fourier de ce signal s'écrit : $u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} (1 - (-1)^n) \sin(n\omega t)$ où $= \frac{2E}{T}$.

1.2. Commenter cette expression et déterminer le rapport des amplitudes de l'harmonique de rang n et du fondamental. Le spectre du signal est-il satisfaisant en vue d'un raccordement de u au réseau de distribution électrique ? Si ce n'est pas le cas, quels en sont les défauts et quelles conséquences néfastes cela pourrait-il avoir ?

2. Commande décalée

τ est une durée inférieure à $\frac{T}{2}$. La commande est la suivante :

- pour $t \in]0, \frac{T}{2}[$, K_1 est fermé, K_2 est ouvert ;
- pour $t \in]\tau, \frac{T}{2} + \tau[$, K_4 est fermé, K_3 est ouvert ;
- pour $t \in]\frac{T}{2}, T[$, K_1 est ouvert, K_2 est fermé ;
- pour $t \in]\frac{T}{2} + \tau, T + \tau[$, K_4 est ouvert, K_3 est fermé.

2.1. Tracer l'allure de la tension $u(t)$.

Le développement en série de Fourier de ce signal s'écrit :

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\omega\tau}{2}\right) \sin(n\omega t).$$

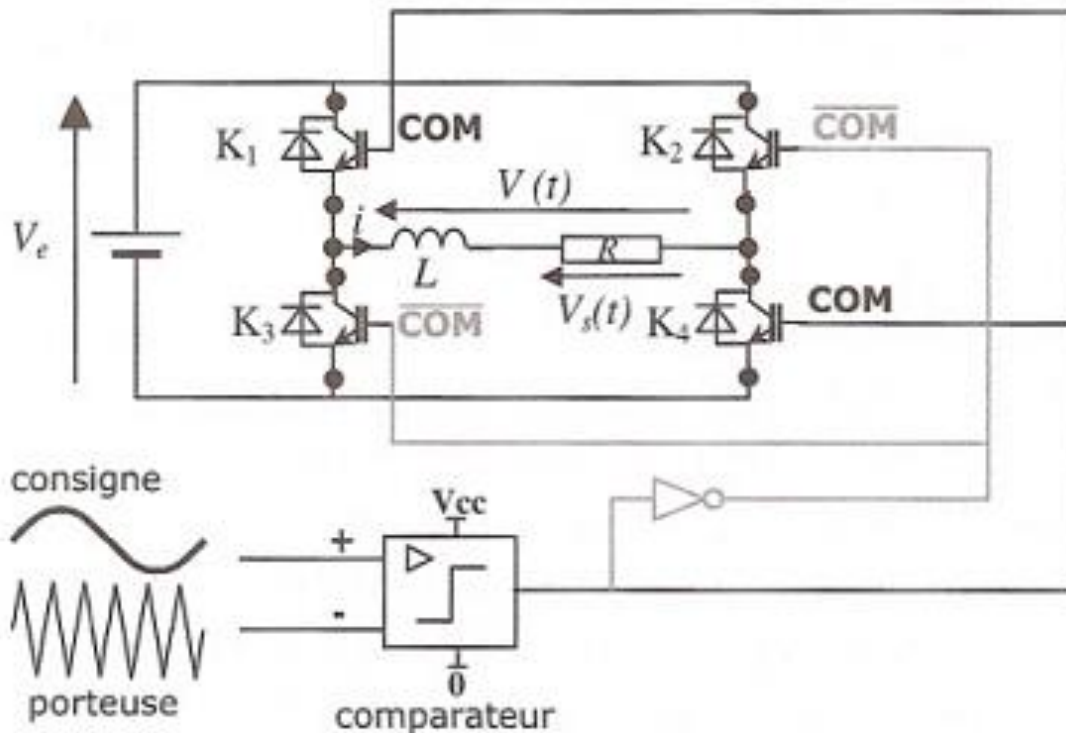
2.2. Comparer le spectre de ce signal au précédent. Comment choisir τ pour diminuer au maximum le taux de distorsion harmonique du signal ? Conclure quant à l'intérêt de la commande décalée.

Exercice 27 : Onduleur autonome et filtrage de la tension de sortie assisté par MLI

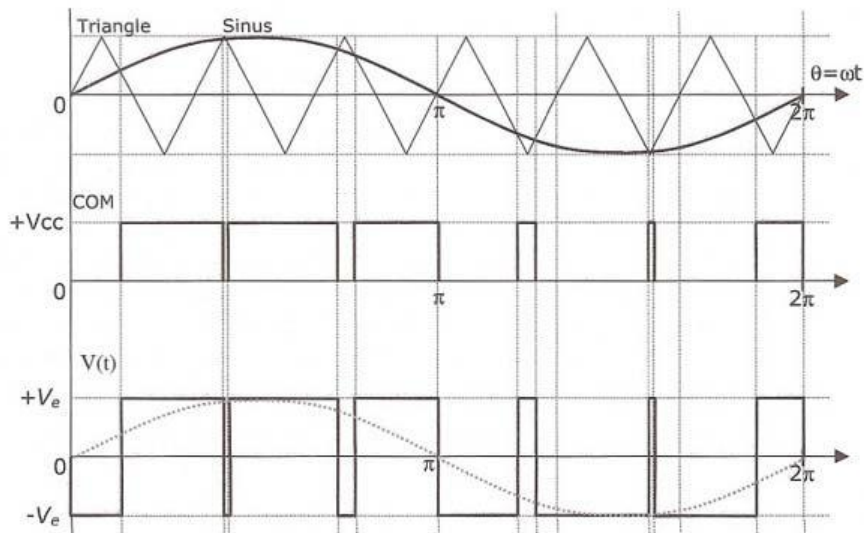
Commander un onduleur consiste à produire les signaux de commande permettant d'imposer à chaque instant les états des divers commutateurs et donc les allures des tensions et des courants du système. Si la commande dite "de pleine onde" vue en cours présente une grande simplicité (concevoir un signal carré à la fréquence désirée des grandeurs alternatives ne présente pas de difficulté), les spectres des tensions obtenues révèlent une forte "proximité" du contenu harmonique avec le fondamental et donc une grande difficulté de filtrage en vue de l'obtention d'un signal sinusoïdal.

Il est ainsi possible d'envisager d'autres types de "stratégies de commande" permettant d'obtenir des meilleures répartitions spectrales. Parmi celles-ci, la commande dite "MLI" (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou "PWM" (Pulse Width Modulation) est la plus utilisée pour sa simplicité de réalisation autant sur le plan de l'électronique associée que dans ses possibilités d'intégration à des systèmes numériques de traitement du signal.

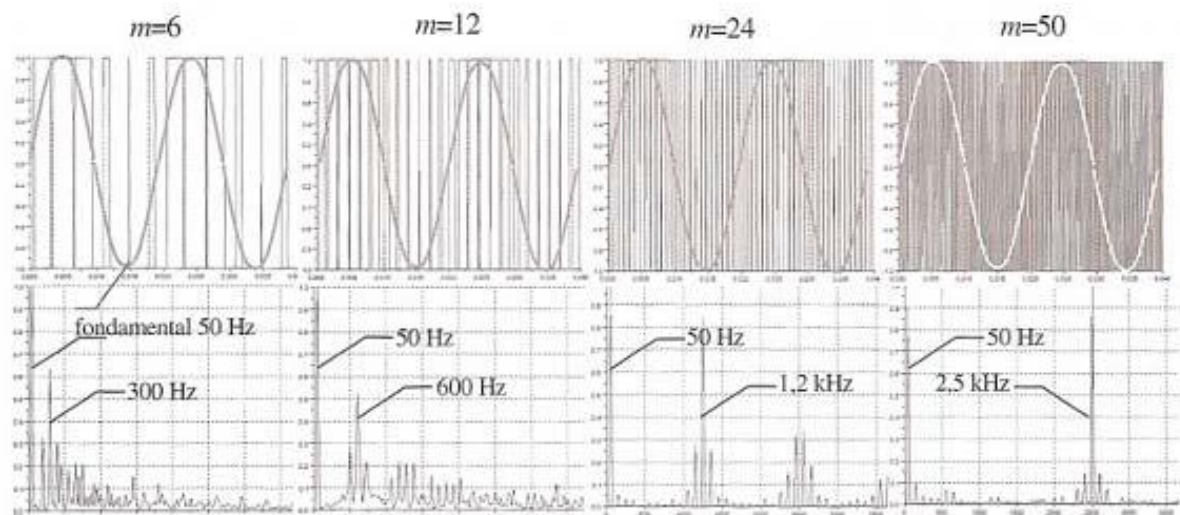
La technique de génération des signaux de commande appelée MLI consiste en la comparaison d'un signal sinusoïdal dit "de consigne" de fréquence f_s avec une "porteuse" triangulaire de fréquence f_t supérieure pilotant ainsi la fréquence des commutations et donc la bande de fréquence occupée par le contenu harmonique. Le schéma ci-dessous illustre le principe de la comparaison des deux signaux et l'utilisation du signal de sortie sur l'exemple de l'onduleur en tension. Le comparateur peut être réalisé avec un simple amplificateur opérationnel ; le signal logique en sortie étant distribué aux grilles des transistors appariés K_1 et K_4 et son complément aux transistors K_2 et K_3 .



Les différents signaux de commande, ainsi que l'allure de la tension de sortie sont représentés ci-après sur l'exemple précis d'une porteuse triangulaire de fréquence 6 fois supérieure à celle de la consigne sinusoïdale. Sur cet exemple, l'amplitude du sinus est égale à celle du triangle ce qui est un cas limite. De façon générique l'amplitude du sinus doit être inférieure ou égale à celle de la porteuse. On introduit une nouvelle grandeur m appelée "ordre de la MLI" qui représente simplement le rapport entre la fréquence de la porteuse et celle du signal de consigne. Ici $m = \frac{f_t}{f_s} = 6$.



1. Commenter l'allure du signal de sortie $V(t)$ et de son fondamental représenté en pointillés. Quelle est la fréquence du fondamental ?
2. Sont représentés ci-après les allures des tensions obtenues et de leur fondamental (pour une fréquence de 50 Hz et sur deux périodes) et les spectres correspondants dans le cas d'ordres plus importants : $m = 6, 12, 24$ et 50.

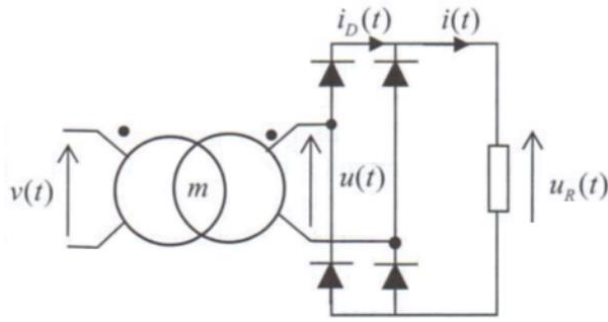


Expliquer en quoi la MLI est intéressante et pourquoi il est souhaitable d'adopter un ordre m le plus grand possible, en vue de l'obtention d'un signal aussi sinusoïdal que possible par filtrage.

3. Proposer un filtre d'ordre 2 constitué exclusivement de composants passifs, compatible avec les contraintes imposées par le fait qu'il s'agit d'effectuer une conversion de puissance, et non un simple traitement du signal. Proposer des valeurs numériques pour les composants.
4. Quel est l'ordre m minimal de la MLI permettant d'atténuer le premier harmonique « dominant » d'un facteur 100, après filtrage ?

Exercice 28 : Chargeur de piles

Un chargeur de piles utilise la fonction de redressement réalisée par un pont à 4 diodes D supposées parfaites et identiques. La tension $v(t)$ est sinusoïdale alternative de valeur efficace $V = 230$ V et de fréquence $f = 50$ Hz. Le transformateur est supposé parfait, de rapport de transformation $m = 0,06$. On note U la valeur efficace de la tension $u(t)$.



1. Calculer la valeur moyenne $\langle u_R \rangle$ de la tension u_R aux bornes de la résistance $R = 160 \Omega$.
2. En déduire les valeurs moyennes $\langle i \rangle$ et $\langle i_D \rangle$ des courants $i(t)$ et $i_D(t)$. Calculer leurs valeurs efficaces I et I_D .
3. Calculer la puissance consommée par la résistance.

On désire maintenant charger deux accumulateurs Ni-Cd de fém $e = 1,4 \text{ V}$ et de « capacité » 500 mAh. On note $u_R(t)$ la tension aux bornes de la résistance et des deux piles en série.

4. Tracer $u_R(t)$ et $i(t)$.
5. Montrer que $\langle i \rangle = \frac{2\sqrt{2}U}{\pi R} \cos \alpha - \frac{2e}{R} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right)$ où $\alpha = \arcsin\left(\frac{e\sqrt{2}}{U}\right)$.
6. En déduire les expressions de $\langle i \rangle$ et $\langle u_R \rangle$ à l'ordre le plus bas en $\frac{e}{U}$ dans l'hypothèse où $e \ll U$.
7. En déduire la puissance consommée par les piles et la durée de charge.

Exercice 29 : Alimentation à découpage flyback d'un ordinateur portable

On donne la formule de Boucherot $U_1 = 4,44 f B_{max} S N_1$ reliant la tension efficace U_1 au primaire d'un transformateur à la fréquence f de la tension au primaire, au champ magnétique maximal B_{max} dans le tore ferromagnétique, à la section S du tore et au nombre N_1 de spires au primaire.

1. Justifier cette formule.

On souhaite concevoir une alimentation d'ordinateur portable. Le cahier des charges est le suivant :

- INPUT : AC 230 V 0,8 A 50 Hz
- OUTPUT : DC 19 V 3,4 A
- Faibles perturbations acoustiques
- Poids réduit



2. Une première solution (alimentation « linéaire », à droite sur la photo) est d'utiliser un transformateur et un pont de diodes. Dessiner le montage et évaluer le rapport de transformation du transformateur. Quels sont les défauts de cette solution ?
3. On envisage une deuxième solution, mettant en œuvre une « alimentation à découpage flyback » (à gauche sur la photo). Cette solution met en œuvre successivement :

- Un pont de diodes redresseur
- Un filtre LC approprié
- Un hacheur à stockage inductif (cf exercice 17), dont l'élément de stockage est un transformateur de rapport de transformation m (ce dernier remplace donc l'inductance de stockage L de l'exercice 17)

Dessiner le montage et expliciter le rôle de chaque sous-ensemble. Quel est l'avantage de cette solution par rapport à la précédente ?