

Génie électrique
1ère TSI 1
Devoir Surveillé : N°3

-
- Dans le cas où un(e) étudiant(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.
 - L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire est rigoureusement interdit.
 - Il est rappelé aux candidats que la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des explications entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies.
-

Systeme à étudier :
Trottinette électrique



Le sujet comporte trois parties indépendantes :

- **Partie 1** : Etude de déplacement de la trottinette électrique
- **Partie 2** : Motorisation de la trottinette électrique
- **Partie 3** : Variation de vitesse de la trottinette électrique

I. Présentation du système

Autrefois jouet d'enfant, le concept de la trottinette a évolué pour devenir un moyen de transport pour tous. Les modèles électriques tout comme le vélo électrique sont de plus en plus populaires. Elle est disponible en plusieurs déclinaisons avec des performances et spécificités différentes. Avant donc d'acheter un modèle qui vous plait, il est important de répondre à la question qu'est-ce qu'une trottinette électrique.



La trottinette électrique est un mini-véhicule qui convient dans tout type de situations : pour une balade, pour aller au travail, pour le sport ou pour une mobilité urbaine. La trottinette était autrefois sans moteur et plus utilisée par les enfants et les adolescents.

Une trottinette électrique (fig1), c'est l'interaction entre les différents composants (moteur, batterie, commande d'accélération et système de freinage) qui permet de faire rouler l'ensemble. Elle est composée d'un plateau, d'un guidon, d'une batterie Lithium ou plomb et d'un système de freinage et de pilotage.



Figure 1

Le système à étudier est une Trottinette à propulsion électrique qui permet en considération des contraintes telle que : l'encombrement, le poids et la protection de l'environnement, tout en offrant des performances comparables à celle d'un scooter thermique. L'énergie motrice est produite par un moteur à courant continu alimenté par un bloc de trois batteries de 6V chacune.

La figure 2 représente le schéma bloc d'une trottinette :

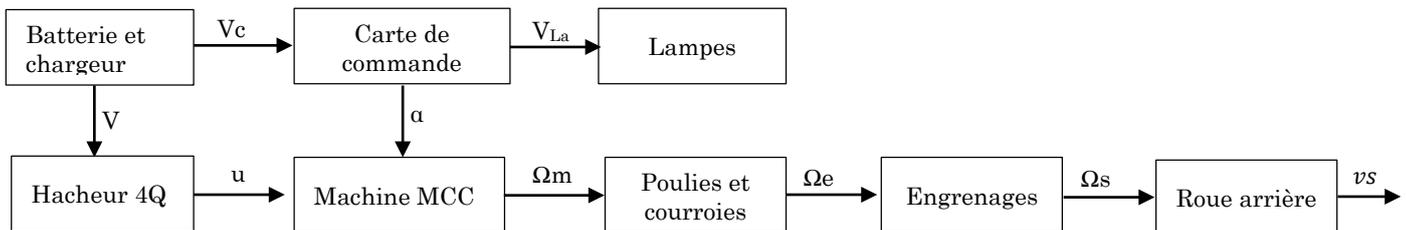


Figure 2

Ce circuit est constitué par :

- Un chargeur : Placé sous la selle et muni d'un cordon de charge 230v – 16A.
- Une batterie : Trois monoblocs de batterie (100 Ah / 6 V) rechargeables tous les 100 Km.
- Un moteur (M) à courant continu et à excitation indépendante.
- Une unité UCE : Unité de commande électronique comportant :
Des capteurs (vitesse, GPS, vent ...), un hacheur 4 quadrants et un microcontrôleur PIC16F620A.

II. Etude de déplacement de la trottinette

Objectif :

- Estimation de la vitesse de rotation maximale du moteur N_m max,
- Moment d'inertie totale au niveau de l'arbre moteur J_m .

❖ Caractéristique système poulies et courroies

Elément	caractéristiques
Poulies Courroie	Z7(motrice)=18 dents
	Z19(réceptrice)=28 dents
	Rendement : $\eta_{pc}=0.9$

$$\text{Rapport de transmission} \\ K_{pc} = \frac{\Omega_e}{\Omega_m} = \frac{Z_{motrice}}{Z_{réceptrice}}$$

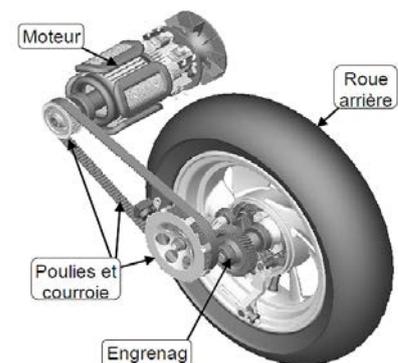
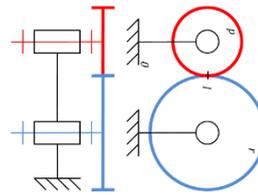


Figure 3

❖ Caractéristique système poulies et courroies

Elément	caractéristiques
Engrenage	Pignon arbré Z18=22 dents
	Roue de sortie Z23=30 dents
	Rendement : $\eta_{eng}=0.93$



Rapport de transmission

$$K_{eng} = \frac{\Omega_s}{\Omega_e} = \frac{Z_{entrée}}{Z_{sortie}}$$

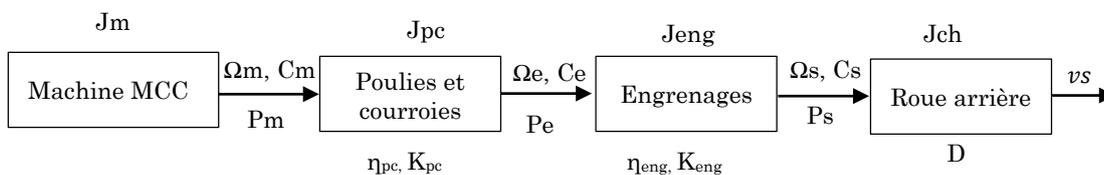


L'énergie du moteur est transmise au pneu arrière (illustration 3) dont le diamètre extérieur est de $D= 150$ mm. La vitesse maximale de la trottinette est $v_s=45$ km/h.

Dans cette section, nous nous concentrons sur l'étude du chargement complet avec des conditions maximales.

L'étude sera menée pour un utilisateur de 65 kg qui se traduit par une puissance mécanique $P_s = 8,20$ kw sur l'arbre de roue arrière.

Schéma de transmission d'énergie est le suivant :



Appellation :

Figure 4

- Ω_m La vitesse angulaire à l'arbre moteur en rad/s
- Ω_e La vitesse angulaire à l'arbre pignon arbré en rad/s
- Ω_s La vitesse angulaire à l'arbre de pneu arrière en rad/s
- P_m La puissance moteur (utile) en W
- P_e La puissance à l'arbre pignon arbré en W
- P_s La puissance mécanique de sortie en W
- V_s La vitesse linéaire du trottinette en m/s
- η_{pc} Le rendement de poulie et courroies
- η_{eng} Le rendement d'engrenage
- D Le diamètre extérieur du pneu arrière en m
- C_m Le couple moteur en Nm
- C_e Le couple à l'arbre pignon arbré en Nm
- C_s Le couple de sortie à l'arbre du pneu arrière en Nm
- J_m Le moment d'inertie moteur en $kg \cdot m^2$
- J_{pc} Le moment d'inertie de poulie et courroies en $kg \cdot m^2$
- J_{eng} Le moment d'inertie d'engrenage en $kg \cdot m^2$
- J_{ch} Le moment d'inertie de système (trottinette) en $kg \cdot m^2$
- K_{pc} Le rapport de transmission de poulie et courroies en
- K_{eng} Le rapport de transmission d'engrenage

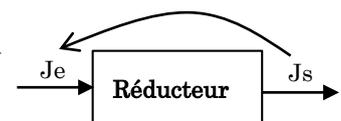
Estimation de la vitesse de rotation maximale du moteur N_m max

- Q.1. Exprime puis calcule la vitesse angulaire maximale Ω_s à l'arbre du pneu en fonction de la vitesse linéaire v et du diamètre D de la roue arrière (pneu).
- Q.2. Calculer les rapports de transmission K_{pc} (poulie et courroies) et K_{eng} (engrenage).
- Q.3. Calculer les vitesses angulaires maximales Ω_e et Ω_m et déduire la fréquence de rotation maximale N_m max du moteur en tr/min.

Le moment d'inertie totale présenté à l'arbre moteur J_m .

- Q.4. Calculer la puissance moteur P_m pour ce faire : calculer tout d'abord en fonction de P_s la puissance maximale P_e .
- Q.5. Calculer les déférents moments de couple : C_s , C_e et C_m .

Rappel : pour ramener un moment d'inertie J_s présenté à la sortie d'un réducteur vers l'arbre l'entrée J_e , on applique la relation suivante : $J_e=K^2 \cdot J_s$ avec $K < 1$.



- Q.6. Exprimer puis calcule le moment d'inertie total J ramené à l'arbre moteur en fonction J_{ch} , J_{eng} , J_{pc} , J_m , K_{pc} et K_{eng} .
On donne : $J_{ch}= 4$ $kg \cdot m^2$, $J_{eng}= 1.5$ $kg \cdot m^2$, $J_{pc}=0.5$ $kg \cdot m^2$, $J_m=0.05$ $kg \cdot m^2$,
- Q.7. Montrer que au démarrage, le couple moteur doit être supérieur au couple résistant $C_m > C_r$ pour que la trottinette se déplacer.

III. Motorisation de la trottinette électrique

Objectif :

- Etude énergétique de la machine utilisée : puissances et rendement

La machine utilisée dans cette trottinette est une machine à courant continu à aimant permanent KMS-234 de caractéristique suivantes :

Grandeurs	Valeurs
La tension nominale d'induit	$U_n = 18 \text{ V}$
Le courant nominal d'induit	$I_n = 20 \text{ A}$
La Résistance d'induit	$R = 0.025 \Omega$
La vitesse nominal	$N_n = 3840 \text{ tr/min}$
Les pertes collectives	$P_c = 14.65 \text{ W}$
Le coefficient de vitesse	$K = 0.044 \text{ V.s/rad}$



Figure 4

La machine à courant continu fonctionne maintenant en régime permanent où les grandeurs sont toutes constantes. Notre objectif est de valider le rendement pour que ça soit supérieur à 0.9.

La figure ci-après représente le modèle de la MCC en régime permanent.

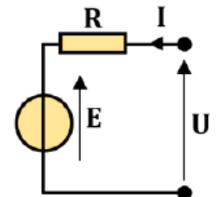


Figure 5

Etude de puissance et rendement

- Q.8.** Déterminer la relation entre la force électromotrice E et la vitesse angulaire Ω et le coefficient K ainsi que le couple électromagnétique C_{em} en fonction du courant absorbé par l'induit I et le coefficient K .
- Q.9.** Exprimer puis calculer la vitesse angulaire Ω et déduire la valeur de la force électromotrice E ainsi que la valeur du couple électromagnétique C_{em} .
- Q.10.** Calculer :
- La puissance nominale absorbée par la machine P_a .
 - La puissance des pertes par effet Joule dans l'induit P_j .
 - La puissance électromagnétique P_{em} .
 - La puissance utile P_u .
 - Calculer le rendement. Est-il validé ?
 - Les couples C_{em} , C_p et C_u respectivement le couple électromagnétique, le couple des pertes constantes et le couple utile.
- Q.11.** La machine lorsqu'elle est à vide consomme un courant à vide noté I_0 . Montrer que $C_u = K(I - I_0)$ et déduire la valeur de ce courant et la comparer avec le courant nominal.

Etude pour un point de fonctionnement en charge

Une charge donnée présente un couple résistant à l'arbre moteur de valeur $C_r = 0.52 \text{ Nm}$. D'après la documentation technique du moteur, la caractéristique mécanique de la machine $C_u = f(N)$ est donnée par :

$$C_u(N) = - 6.03 \cdot 10^{-3} N + 24$$

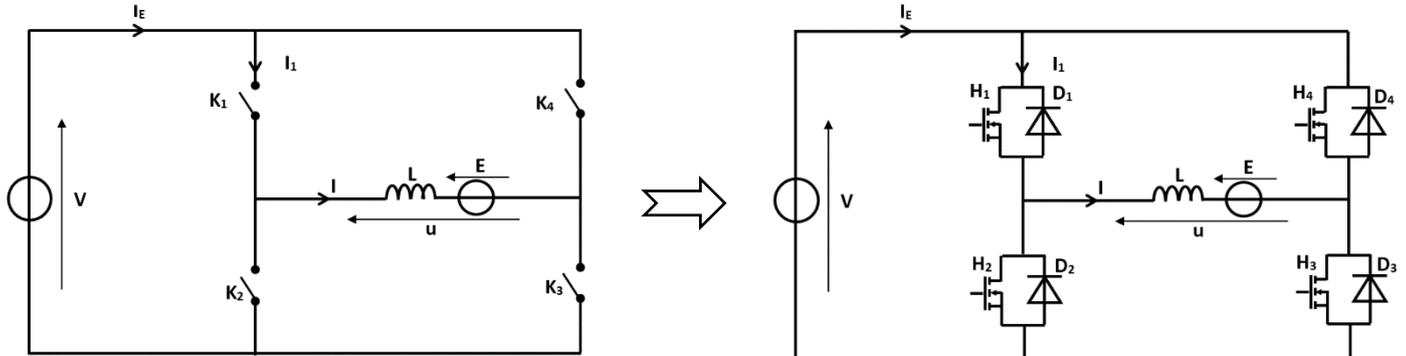
Avec C_u est le couple utile en Nm et N est la fréquence de rotation en tr/min.

- Q.12.** D'après le principe fondamental de la dynamique. Déterminer la valeur de couple utile C_u .
- Q.13.** A partir de la caractéristique mécanique $C_u(N)$. Déterminer la valeur de la vitesse N_c pour ce point ($C_r = 0.52 \text{ Nm}$)
Déduire la force électromotrice E_c ainsi que le courant absorbé par la machine I_c .
- Q.14.** Calculer la puissance absorbée P_a pour le point de fonctionnement précédent ($C_r = 0.52 \text{ Nm}$).

IV. Variation de vitesse de la trottinette

La variation de la vitesse est réglée par l'utilisateur en agissant sur une résistance réglable installée dans le guidon de la trottinette, en effet, cette résistance fait varier un rapport cyclique d'un signal carré généré par la carte de commande, il contrôle une carte de puissance à base d'un hacheur à quatre quadrants à commande séquentielle. L'étude suivante nous intéresse que au fonctionnement moteur où le courant est positif ($i(t) > 0$).

La figure suivante représente la structure d'un hacheur quatre quadrants à MOSFET :



Hypothèses :

- La tension d'alimentation du hacheur est équivalente à la tension nominale du moteur $V=18V$.
- Les transistors H1, H2, H3 et H4 ainsi que les diodes D1, D2, D3 et D4 sont supposés parfaits.
- On suppose que la conduction est continue et que le courant varie entre deux valeurs positives I_m et I_M .
- La résistance de l'induit est négligeable (Moteur équivalent à sa force électromotrice E et à son inductance Lm).
- L'inductance L représente l'inductance de lissage L_s et l'inductance d'induit du moteur.

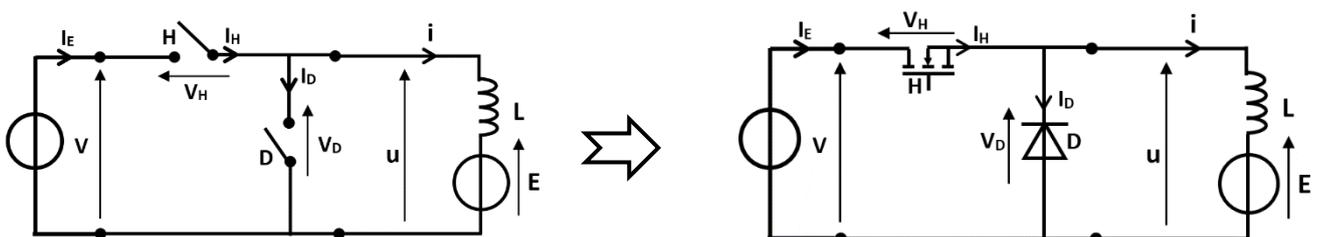
La commande séquentielle du hacheur :

- Pour $t \in [0, \alpha T]$: H1 et H3 sont commandés à la fermeture et H2 et H4 sont commandés à l'ouverture.
- Pour $t \in [\alpha T, T]$: H3 est commandé seul à la fermeture et H1, H2, H4 sont commandés à l'ouverture.

Structure simplifier de la commande séquentielle

- Q.15.** Justifier par l'utilisation des règles d'interconnexion des sources d'énergie, la complémentarité des commandes de H1 et H2 ?
- Q.16.** Dans le document réponse. Tracer le sens de courant (utiliser colleur Vert) dans les deux intervalles et déduire les interrupteurs qui sont conduits (qui passe le courant).
- Q.17.** Cette stratégie de pilotage, nous ramène au même schéma d'un hacheur série. Compléter le schéma présenté dans le document réponse en plaçant les notations des interrupteurs convenables.

La figure suivante présente un hacheur série précédent avec un MOSFET H, il est passant pour 0 à αT et ouvert de αT à T avec T est la période de hachage.



Etude de tension et de courant

- Q.18.** Quel est le rôle de la diode D ainsi la bobine de lissage.
- Q.19.** Exprimer en fonction de V , la tension $v_D(t)$, $v_H(t)$ et $u(t)$. Dans le document de réponse, tracer ses tensions.
- Q.20.** Exprimer la valeur moyenne de $u(t)$ et en déduire la relation entre V , E et α .
- Q.21.** Exprimer en fonction α , V , L , t et I_m , le courant $i(t)$ pour $t \in [0, \alpha T]$, et en déduire les expressions de $i_D(t)$ et $i_H(t)$.
Tracer ses courants dans le document réponse.

Ondulation de courant

- Q.22.** En reprenant l'équation trouvée à la question Q21, et en notant $\Delta I = (I_M - I_m)$ l'ondulation du courant de sortie $i(t)$, donner l'expression de ΔI en fonction de V , α , L et f .
- Q.23.** Pour quelle valeur de α l'ondulation du courant i est-elle maximale. Justifier la par le calcul. En déduire l'ondulation maximale ΔI_{\max} .

Choix de la diode de puissance D

On désire choisir la diode qui convient à notre application. On prendra les valeurs suivantes pour quantifier les grandeurs nécessaires à ce choix :

- Fréquence de découpage du hacheur : 20kHz
 - $V = 18 \text{ V}$
 - $I_M = 20,1 \text{ A}$ (le courant maximal)
 - Le rapport cyclique α constant à 0,5 (différent de celui du document réponse).
 - $L = 5 \text{ mH}$
- Q.24.** Exprimer de manière littérale la valeur moyenne de $i_D(t)$ notée en fonction de V , α , f , L et I_{\max} puis faire l'application numérique.
- Q.25.** Choisir la diode qui convient en utilisant le document annexe en précisant les grandeurs nécessaires à ce choix sachant que le coefficient de sécurité vaut $s=27\%$.

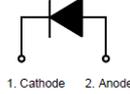
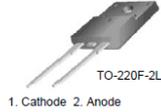
* * * Fin d'épreuve * * *

ANNEXE



FFPF03UA60S

Pin Assignments



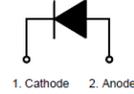
Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Rating	Unit
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	600	V
V_{RWM}	Working Peak Reverse Voltage	600	V
V_R	DC Blocking Voltage	600	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current @ $T_C = 43^\circ\text{C}$	3	A
I_{FSM}	Non-repetitive Peak Surge Current 60Hz Single Half-Sine Wave	180	A
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature Range	-65 to +150	$^\circ\text{C}$



FFPF10UA60S

Pin Assignments



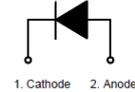
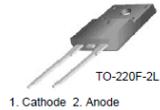
Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Rating	Unit
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	600	V
V_{RWM}	Working Peak Reverse Voltage	600	V
V_R	DC Blocking Voltage	600	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current @ $T_C = 43^\circ\text{C}$	10	A
I_{FSM}	Non-repetitive Peak Surge Current 60Hz Single Half-Sine Wave	180	A
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature Range	-65 to +150	$^\circ\text{C}$



FFPF20UA60S

Pin Assignments

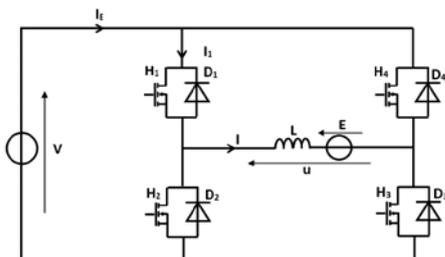


Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

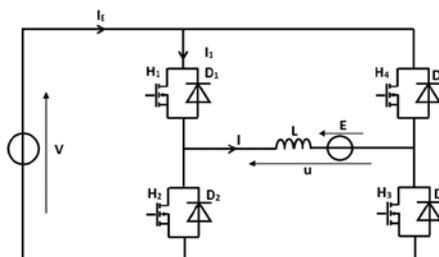
Symbol	Parameter	Rating	Unit
V_{RRM}	Peak Repetitive Reverse Voltage	600	V
V_{RWM}	Working Peak Reverse Voltage	600	V
V_R	DC Blocking Voltage	600	V
$I_{F(AV)}$	Average Rectified Forward Current @ $T_C = 43^\circ\text{C}$	20	A
I_{FSM}	Non-repetitive Peak Surge Current 60Hz Single Half-Sine Wave	180	A
T_J, T_{STG}	Operating and Storage Temperature Range	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

Q16 – utilisez que le **stylo Vert** ou **Bleu**

Phase 1 pour $t \in [0, \alpha T]$

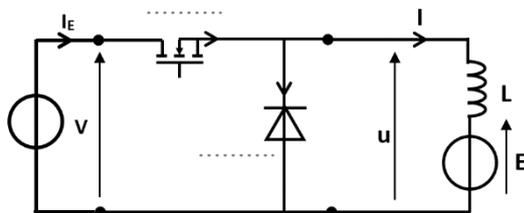


Phase 2 pour $t \in [\alpha T, T]$



Intervalle	$u(t)$	$V_1(t)$ (aux bornes de H1 et D1)	Les interrupteurs qui passent le courant
$t \in [0, \alpha T]$			
$t \in [\alpha T, T]$			

Q17 – placer les interrupteur adéquate (H1 – H2 – H3 – H4 – D1 – D2 – D3 – D4)



Q19 et Q21 – tracer $v_D(t)$, $v_H(t)$, $u(t)$, $i_D(t)$ et $i_H(t)$

