

EXAMEN DE FIN D'ANNEE

SECTION ELECTROTECHNIQUE
1^{er} Année

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

DUREE : 3 H
COEFF : 12

Nota :

- *Aucun document n'est autorisé ;*
- *Après lecture de l'ensemble du sujet, les parties pourront être traitées de façon indépendante.*
- *Inscrire le numéro de la question ayant la rédaction de la réponse correspondante et encadrer le résultat final.*

Les pages 7 et 9 sont des documents à rendre en fin d'épreuve.

Barème:

Partie B: 24 pts/40

B1.1).....2 pts	B2.1).....1 pt	B3).....2 pts	B4.1)..... 0,5 pt
B1.2).....1 pt	B2.2).....1 pt		B4.2).....1 pt
B1.3).....2 pts	B2.3).....0,5 pt		B4.3).....1 pt
B1.4).....2 pts	B2.4).....1 pt		
B1.5).....1,5 pt	B2.5).....1 pts		B5.1).....0,75 pt
B1.6).....1,5 pt			B5.2)..... 0,75 pt
B1.7).....1,5 pt			B5.3)..... 0,5 pt
B1.8).....1,5 pt			

Partie C: 16 pts/40

C1.1).....1 pt	C2.1).....1 pt	C3.1).....2 pts	C4.1).....2 pts
C1.2).....1 pt	C2.2).....1 pt	C3.2).....2 pts	C4.2).....1 pt
C1.3).....1 pt		C3.3).....2 pts	C4.3).....1 pt
			C4.4).....1 pt

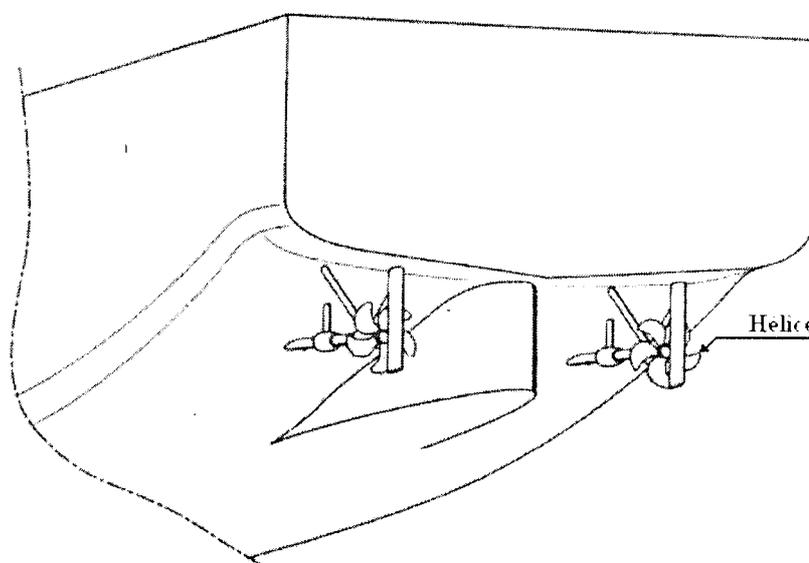
Etude de la propulsion d'un navire

A – Introduction et Présentation :

Le développement de convertisseurs de fréquence à base d'éléments semi-conducteurs de puissance a permis l'avènement puis la généralisation de la propulsion électrique sur les différents navires. Ces derniers y gagnent en souplesse d'exploitation et d'aménagement des locaux techniques.

Récemment, sur ces mêmes navires, des turbines à gaz remplacent les moteurs diesels. L'installation est dite de type COGES (COMbine Gas Electric Steam), a un rendement tout à fait comparable à celle d'une installation diesel-électrique classique, mais apporte un gain en poids, et une réduction très importante des oxydes d'azote dans les fumées ainsi qu'une diminution du niveau vibratoire.

La propulsion électrique contient un ou deux moteurs électriques qui entraînent directement l'hélice. Ils permettent de supprimer les lignes d'arbres intérieures au navire.



Les moteurs de propulsion, au nombre de 2 (cas de figure ci-dessus), sont du type synchrone. Ils possèdent un double enroulement statorique triphasé, chacun de ces enroulements étant alimenté par un ensemble transformateur + redresseur + onduleur. (Voir figure 2 page : 3).

Par la suite on n'étudiera que l'ensemble Redresseur + Hacheur de freinage. Toutefois la partie **B** qui concerne l'étude du redresseur *est indépendante* de la partie **C** concernant l'étude du hacheur de freinage.

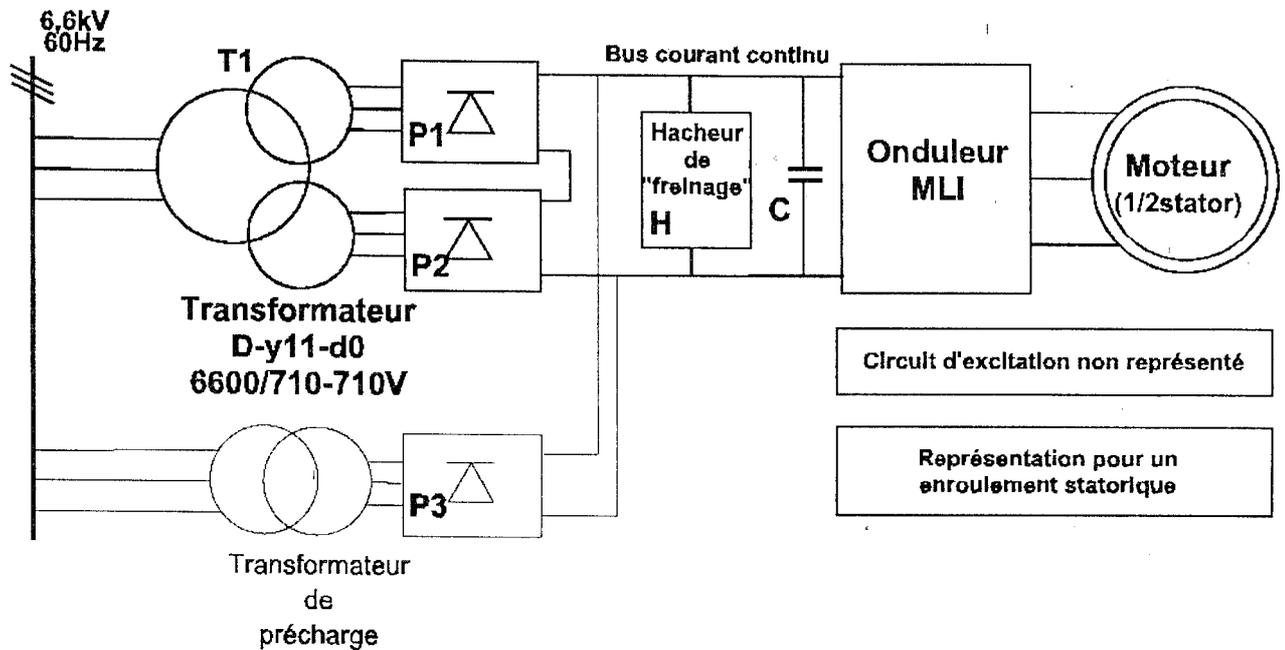


Figure 1 : Alimentation des moteurs de propulsion

B – Etude simplifiée du Redresseur associé à son Transformateur :

Dans cette partie, on considère que le transformateur T1 se ramène à un transformateur D-y11 (équivalent mais différent du transformateur précédent). Il n'y a plus qu'un seul redresseur. La charge est supposée constante, le courant est *lissé* de façon à ce que la charge soit équivalente à une source de courant constant I_0 . La tension secondaire V_s vaut ici $V_s = \frac{700}{\sqrt{3}} = 404\text{v}$ (Voir Figure 2).

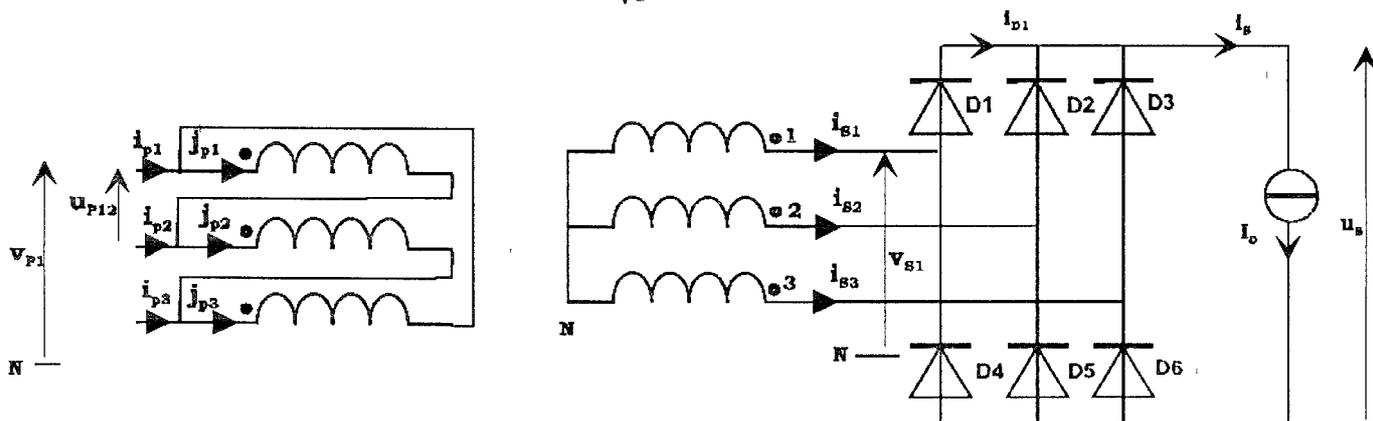


Figure 2 : Transformateur équivalent & redresseur associé

Par la suite on se propose d'étudier les courants et de dimensionner les éléments du redresseur.

B1. Formes d'onde

- B1.1. Sur le document réponse DR1 (page : 7), donner la forme de la tension de sortie u_s . Indiquer ses valeurs min et max en fonction de V_s , puis ses valeurs numériques.
- B1.2. Indiquer sur le document réponse DR1, les diodes en conduction pour chaque intervalle de temps ?

- B1.3.** Exprimer la valeur moyenne de u_s (avec justification et calculs détaillé), puis calculer sa valeur numérique.
- B1.4.** Sur le document réponse **DR1** (page : 7), donner la forme du courant i_{D1} dans la diode **D1** et des courants i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} dans les enroulements secondaires. (On prendra une échelle de 0,5cm pour I_0).
- B1.5.** En déduire l'allure des courants j_{p1} , j_{p2} , j_{p3} dans les enroulements primaires ; indiquer leurs valeurs maximales et minimales. (document réponse **DR1**)
- B1.6.** Exprimer les courants i_{p1} , i_{p2} , i_{p3} en ligne en fonction de j_{p1} , j_{p2} , j_{p3} .
- B1.7.** Tracer l'allure de i_{p1} , i_{p2} , i_{p3} ; indiquer leurs valeurs maximales et minimales. (document réponse **DR1**)
- B1.8.** Tracer le fondamental du courant i_{p1} (On prendra une échelle de 1cm pour $(I_{p1})_{Max}$). (document réponse **DR1**).

B2. Diodes

- B2.1.** Etablir l'expression de la valeur moyenne i_{D1moy} du courant i_{D1} dans la diode **D1**.
- B2.2.** Etablir l'expression de la valeur efficace i_{D1eff} du courant i_{D1} dans la diode **D1**.
- B2.3.** Calculer leurs valeurs numériques avec $I_0 = 3600A$.
- B2.4.** Indiquer le modèle électrique tenant compte de la tension de seuil V_{T0} et de la résistance dynamique R_D , équivalent à une diode polarisée dans le sens direct.
- B2.5.** Etablir l'expression de la puissance P_D dissipée par chaque diode du redresseur en fonction de R_D , V_{T0} , i_{D1moy} et i_{D1eff} (sans faire l'application numérique).

B3. Choix des diodes

Choisir à l'aide du tableau 1 (voir **Annexe** page : 8), *en le justifiant*, la diode convenant à cette application. Prendre un coefficient de sécurité de 2 pour la tension et de 1,4 pour le courant.

B4. Choix du dissipateur

- B4.1.** Calculer la puissance dissipée par chaque diode en régime nominal. (Question B2.5).
- B4.2.** En utilisant le tableau 2 de l'Annexe page : 8 et selon la diode choisie dans la question B3, Calculer la résistance thermique maximum que devra avoir le dissipateur (Prendre une température de jonction de 160°C et une température ambiante de 45°C).
- B4.3.** Choisir un dissipateur approprié dans le Tableau 3 (voir ANNEXE – page : 8). Justifier la réponse ?

B5. Bilan énergétique

- C5.1.** Exprimer puis Calculer la chute de tension due aux semi-conducteurs à la sortie du redresseur ?
- C5.2.** En déduire la puissance utile fournie par le redresseur ?
- C5.3.** Etablir le rendement du redresseur.

C – Hacheur de freinage :

L'arbre portant l'hélice doit pouvoir être stoppé rapidement lors d'un "crash-stop". Le moment d'inertie de cette ligne d'arbre est de $57 \cdot 10^3 \text{ kg m}^2$.

On fixe la durée du "crash-stop" à 12 secondes. Pour simplifier, on considère que pendant ce temps, la tension $u_s(t)$, reste constante et égale à $U_0=2000\text{V}$.

Le schéma de l'ensemble est donné Figure 3

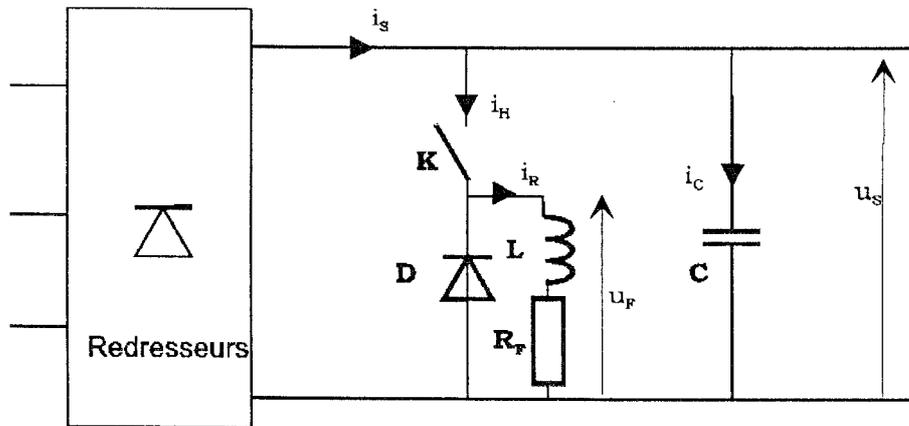


Figure 3

Fonctionnement

Lors de l'arrêt de l'arbre, l'énergie cinétique de l'arbre tournant est renvoyée vers l'étage à courant continu à travers l'onduleur : le moteur synchrone fonctionne en générateur.

Le pont de diodes n'étant pas réversible, cela se traduit par une charge du condensateur C et une élévation de la tension $u_s(t)$.

Le hacheur a pour rôle de décharger C et dissiper l'énergie dans la résistance R_F .

La mise en marche du hacheur se fait automatiquement quand $u_s(t)$ est supérieure à un seuil haut de la tension u_s .

L'arrêt du hacheur lui aussi se fait automatiquement lorsque la tension $u_s(t)$ devienne inférieure au seuil bas de u_s . (ce seuil bas de u_s est supérieur à la tension $u_{s\text{moy}}$ en fonctionnement nominal).

C1. Questions préliminaires :

Le hacheur étudié peut se présenter comme le montre la figure 4 (voir ci-dessous) :

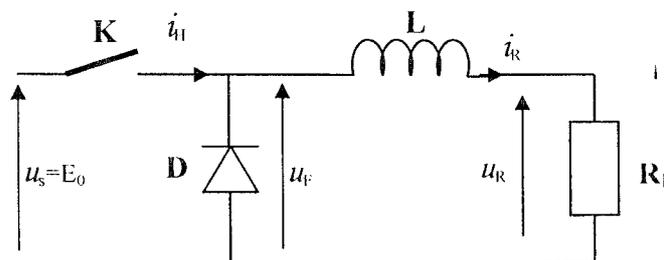


Figure 4 : Hacheur de freinage

C1.1. De quel type de hacheur s'agit-il ? justifier la réponse ?

C1.2. Spécifier le ou les semi-conducteurs pouvant réaliser la fonction de l'interrupteur K ?

C1.3. Qu'appelle-t-on la diode D ? quel est son rôle ?

C2. Energies

- C2.1. Calculer l'énergie emmagasinée par la ligne d'arbre à la vitesse nominale du moteur. ($\omega_n = 1600 \text{ tr/min}$)
On rappelle que l'énergie cinétique d'un arbre de moment d'inertie J_Δ tournant à la vitesse ω est :

$$W = \frac{1}{2} J_\Delta \omega^2$$

avec ω en rd.s^{-1} .

- C2.2. En déduire la puissance moyenne dissipée pendant le freinage.

C3. Formes d'ondes

Par la suite on représentera sur le document réponse DR2 (page : 9), l'allure de la tension $u_F(t)$, du courant dans la résistance $i_R(t)$ et du courant dans l'interrupteur $i_H(t)$. Dans tout le problème on prendra un rapport cyclique $\alpha=0,4$.

Le courant $i_R(t)$, sera considéré comme variant entre une valeur maximale I_M et une valeur minimale I_m (l'effet de l'inductance de lissage important : la constante de temps $\frac{L_F}{R_F}$ très grande devant la période T

\Rightarrow on considère $u_R(t) = U_{R0}$ constante).

A l'instant $t=0$ on ferme l'interrupteur K, le courant $i_R(0) = I_m$.

- C3.1. Ecrire l'équation régissant l'évolution du courant $i_R(t)$ sur l'intervalle $[0, \alpha T]$ en fonction de E_0 , U_{R0} , L , I_M et I_m ?

- C3.2. A l'instant $t=\alpha T$ on ouvre l'interrupteur K, le courant $i_R(\alpha T) = I_M$. Ecrire l'équation régissant l'évolution du courant $i_R(t)$ sur l'intervalle $[\alpha T, T]$ en fonction de E_0 , U_{R0} , L , I_M et I_m ?

- C3.3. Tracer sur le document réponse DR2 (page : 9), l'allure de :

- ✓ la tension $u_F(t)$;
- ✓ $i_R(t)$ courant dans la résistance ;
- ✓ $i_H(t)$ courant dans l'interrupteur H.

C4. Etude quantitative

- C4.1. Etablir l'expression de la valeur moyenne $\langle u_F(t) \rangle$ de la tension $u_F(t)$.

- C4.2. Etablir la valeur moyenne I_R du courant $i_R(t)$, montrer que la tension moyenne aux bornes de l'inductance L est nulle.

- C4.3. Etablir la puissance dissipée dans R_F en fonction du rapport cyclique α (on négligera l'ondulation du courant).

- C4.4. En utilisant le résultat établi en C2.2, et sachant que la résistance R_F vaut $0,86\Omega$, déterminer le rapport cyclique nécessaire durant un « crash-stop ».

Fin du sujet

ANNEXE

VRSM VRRM (V)	IFAV (Tcase= 75°C)	
	1550A	2000A
400	SKN 1500/04	
600		SKN 2000/06
1200	SKN1500/I2	SKN2000/12
1600	SKN1500/16	SKt42000/16
2000	SKN 1500/20	SKN 2000/20
2400	SKN 1500/24	SKN 2000/24
2900	SKN 1500/29	

Tableau 1

	Symbol Conditions	SKN 1500	SKN 2000
IFAV	T =25°C DSC	1550 A	2000 A
IFSM	Tvj=25°C;10ms	19kA	30kA
I ² t	Tvj = 25 °C; ,10 ms	1800 kA ² s	4500 kA ² s
VF	Tvj= 25 °C;	1,3V (1800A)	1,3V (3400A)
V _{TO}	Tvj = 25°C	0,85 V	0,85 V
r _D	Tvj=25°C	0,25mΩ	0,12mΩ
R _{thjc}	DSC	0,033 ⁰ C/W	0,021 ⁰ C/W
	SSC	0,066 ⁰ C/W	0,050 ⁰ C/W
R _{thch}	DSC	0,007 ⁰ C/W	0,004 ⁰ C/W
	SSC	0,014 ⁰ C/W	0,010 ⁰ C/W
DSC : Refroidissement double face SSC : Refroidissement simple face			
w	300g	530g	
Case	E20	E21	

Tableau 2

	Type	R _{thca} (°C/W)
SKN 1500	2xP8/180	0,29
	2xP8/180F	0,071
	2xP9/210F	0,045
SKN 2000	2xP8/180	0,29
	2xP8/180F	0,071
	2xP9/210F	0,045
F : ventilation forcée		

Tableau 3

Documentation sur les diodes de puissance (D'après SEMIKRON)

heater:: radiateur ;

case : Boîtier