

EXAMEN 1

Document autorisé : 1 feuille recto-verso écrite à la main

Durée : 1h50

Introduction générale pour les 3 exercices :

Dans les navires modernes, une propulsion électrique a l'avantage de fournir un couple maximal sur toute la plage de vitesse, dans les deux sens de rotation. Il est intéressant d'utiliser des machines synchrones de forte puissance, alimentées par des convertisseurs statiques, pour assurer la fonction de motorisation avec freinage régénératif. La production d'énergie électrique (ou réseau de bord) est généralement réalisée par un ensemble moteur diesel + alternateur synchrone qui fonctionne à vitesse constante, pour maximiser son rendement. La figure 1 illustre la structure typique de la chaîne de motorisation d'une hélice.

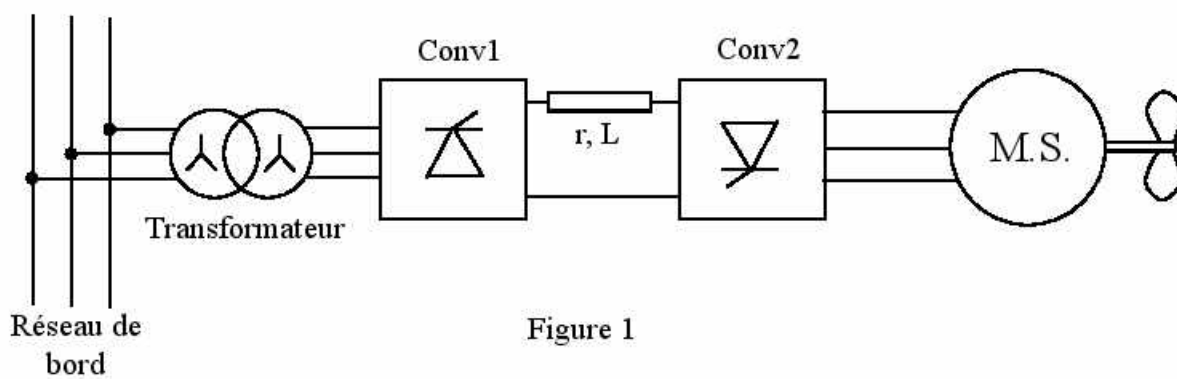


Figure 1

Exercice 1 : Analyse de fonctionnement et dimensionnement (30 pts)

On suppose que les convertisseurs présentés sur la figure 1 sont des ponts de Graëtz triphasés. La tension efficace entre deux phases du réseau de bord est égale à 6600 V. On suppose que la valeur maximale du courant continu dans l'inductance de lissage est 2000 A et on néglige son ondulation. La résistance interne de l'inductance de lissage ; r est égale à $0.5 \text{ m}\Omega$. La valeur efficace de la tension entre phase de la machine est égale à 3300 V.

- 1) Expliquer le fonctionnement du montage de la figure 1 lorsque la machine fonctionne en moteur et lorsqu'elle fonctionne en génératrice. Tracer un modèle continu équivalent du système complet.
- 2) Déterminer la puissance active maximale de la machine synchrone.
- 3) Déterminer les caractéristiques du transformateur (rapport de transformation, puissance apparente)
- 4) Quel est le facteur de puissance maximal du système vu du côté du réseau de bord? Existe-t-il des solutions pour l'améliorer sans parler d'une compensation d'énergie réactive à l'entrée? Discuter des avantages qu'apporterait un montage gradateur + transformateur + redresseur à diodes pour le convertisseur. Est-ce que cette solution vous semble intéressante? (*Justifier toutes vos réponses*).
- 5) Les inductances de la machine ne sont pas négligeables. Expliquer les problèmes liés à la présence de ces inductances pour les commutations de courant dans le convertisseur 2. Proposer un modèle continu équivalent du fonctionnement du convertisseur qui permet de tenir compte des effets des commutations sur la tension moyenne. Quelles précautions faut-il prendre lors du fonctionnement du montage?

Exercice 2 : Tracés de formes d'onde du convertisseur 2 (40 pts)

On souhaite étudier le fonctionnement du convertisseur 2 de la figure 1 dans le cas d'une conduction continue. Dans cet exercice, on assimile le fonctionnement du convertisseur 1, à celui d'une source de courant continu, tel que présenté sur la figure 2. On néglige aussi l'impédance interne de la machine.

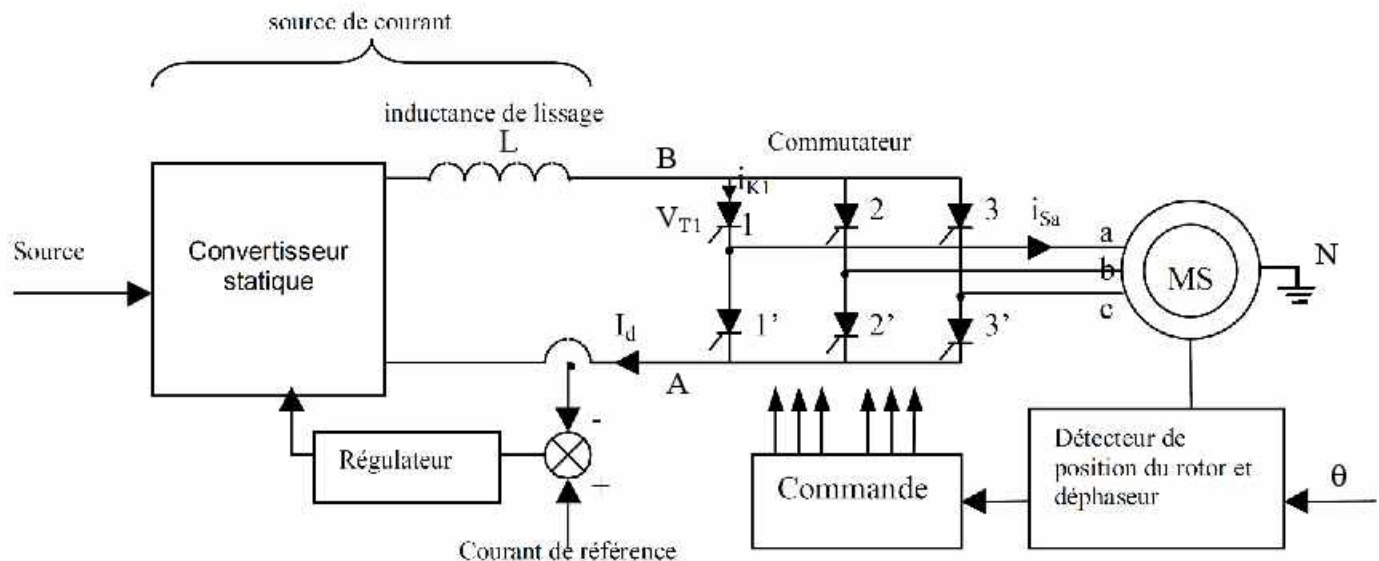


Figure 2

À l'aide des feuilles de sinusoïdes représentant les FEM ligne-neutre et ligne-ligne de la machine, on vous demande de tracer l'allure des signaux qu'on pourrait observer avec un oscilloscope, en supposant que les commutations de courant sont instantanées et que la vitesse est constante. On impose un angle de retard à l'amorçage égal à 135 degrés et le courant I_d à 2000A. La valeur efficace de la tension ligne-ligne aux bornes de la machine est égale à 2500V. **Faire des tracés sur (au moins) une période électrique.** (Aucune erreur ne sera tolérée sur chaque tracé: il n'y a pas une partie de courbe qui est correcte et l'autre pas).

- 1) Avec cet angle de retard à l'amorçage (135 degrés), préciser si la machine synchrone fonctionne en moteur ou en générateur en justifiant votre réponse.
- 2) **En haut de la feuille ci-jointe** : Tracer la forme des tensions $V_{AN}(t)$, $V_{BN}(t)$ et $V_{AB}(t)$ sur (au moins) une période entière du réseau d'alimentation. Préciser les différents interrupteurs amorcés lors de chaque séquence.
- 3) Compléter un tableau de séquences de fonctionnement sur un cycle de fonctionnement en indiquant les composants amorcés, la tension V_{AB} , V_{AKT1} et le courant I_{Sa} en respectant la convention imposée pour le sens du courant.
- 4) **En bas de la feuille ci-jointe** : Utiliser le tableau de la question 3) et les mêmes hypothèses pour tracer la forme de la tension aux bornes du thyristor T1, $V_{AKT1}(t)$. Mesurer l'angle correspondant à la durée d'application d'une tension négative. Tracer la forme du courant d'alimentation dans la phase a; $I_{Sa}(t)$.
- 5) D'après votre analyse de la question 1) et les résultats de la question précédente, indiquer le type de convention (récepteur ou générateur) qui a été utilisé pour la machine en justifiant votre réponse. Calculer la puissance active (fournie ou absorbée) par la machine synchrone et le facteur puissance.

Exercice 3 : Dimensionnement des thyristors du convertisseur 2 (30 pts)

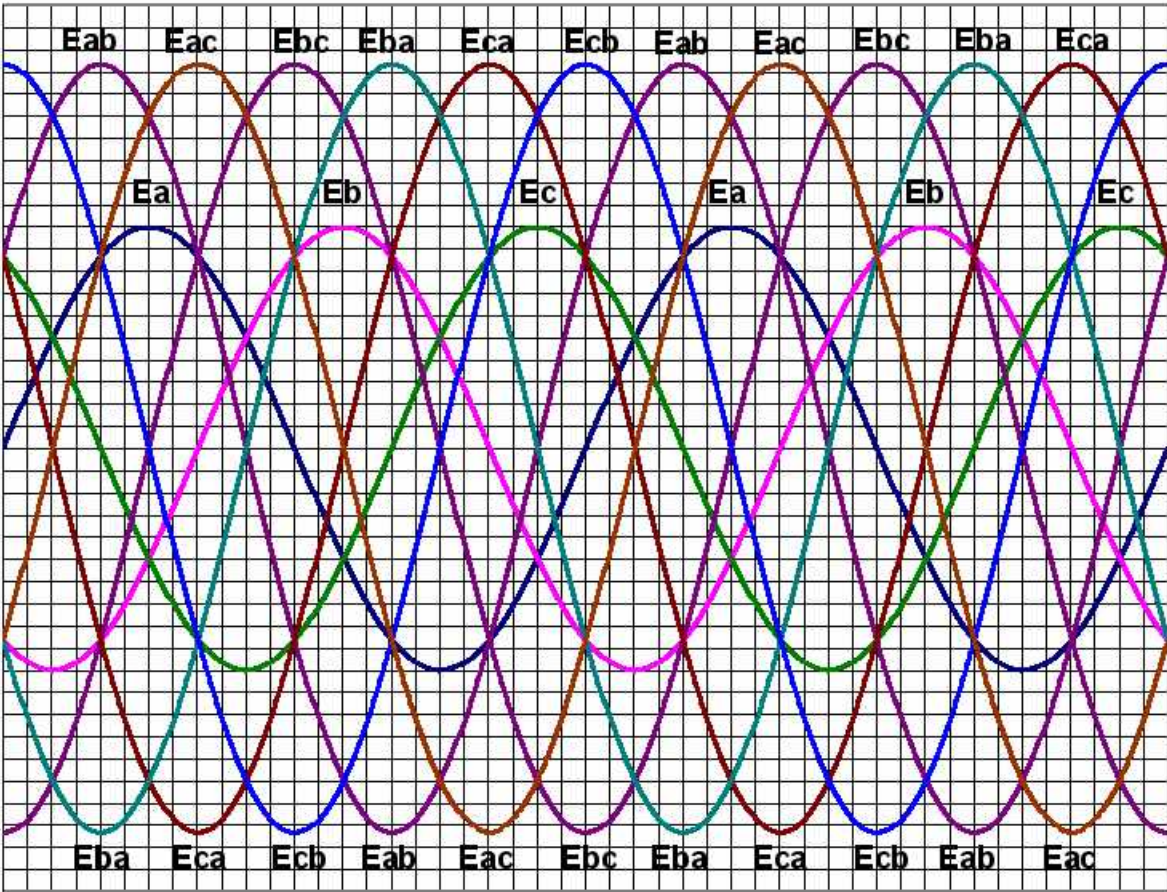
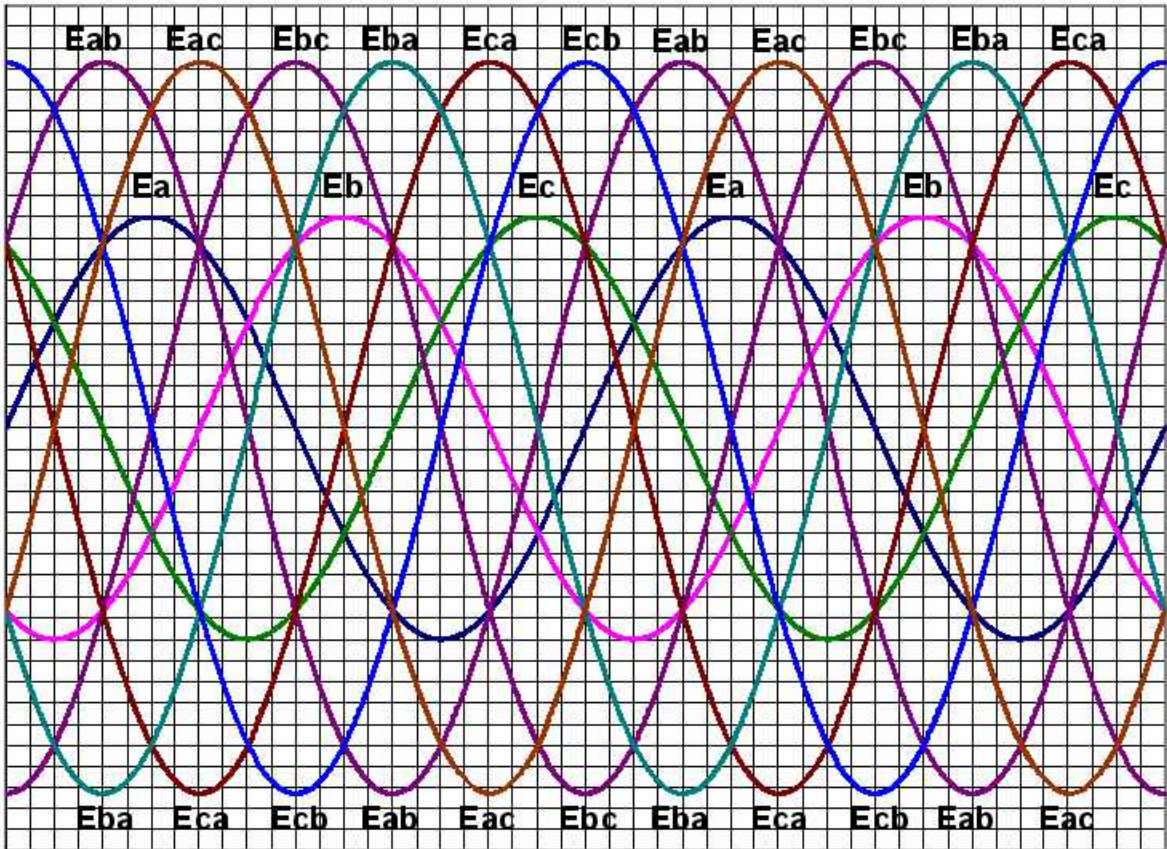
On considère le convertisseur de la figure 2. À vitesse maximale, la tension efficace entre deux phases de la machine atteint 3300 V et on suppose que la valeur maximale du courant continu dans l'inductance de lissage est 2000 A.

- 1) Connaissant les tensions maximales et les données de Semikron, déterminer le nombre minimal de thyristors à utiliser dans une valve (ou bras) du convertisseur 2 (*par exemple ; on a dessiné deux thyristors par bras dans le montage de la figure 2*). En déduire les tensions maximales, répétitives, directes et inverses que doit supporter chaque thyristor (*sans appliquer de facteur de surdimensionnement*).
- 2) Calculer les courants efficaces et moyens supportés par les thyristors du convertisseur 2 en négligeant l'ondulation dans l'inductance de lissage.
- 3) Utiliser les données de Semikron pour sélectionner le numéro du thyristor ayant le calibre le plus proche de vos besoins sans appliquer de facteur de surdimensionnement.
- 4) Calculer les pertes en conduction d'un thyristor et en déduire le rendement du convertisseur 2
- 5) Estimer la température de fonctionnement maximale qu'on pourrait relever sur le boîtier du thyristor.
- 6) Estimer la résistance thermique maximale du radiateur en régime permanent, dans le cas d'un refroidissement des deux côtés (*Double Side Cooling*) du thyristor. On supposera que la température ambiante est égale à 40 degrés celsius.

Nom :

Prénom

GEL4102



SKT 760



Capsule Thyristor

Line Thyristor

SKT 760

Features

- Hermetic metal case with ceramic insulator
- Capsule package for double sided cooling
- Shallow design with single sided cooling
- International standard case
- Off-state and reverse voltages up to 1800 V
- Amplifying gate

Typical Applications*

- DC motor control
(e. g. for machine tools)
- Controlled rectifiers
(e. g. for battery charging)
- AC controllers
(e. g. for temperature control)
- Recommended snubber network
e. g. for $V_{VRMS} \leq 400$ V:
 $R = 33 \Omega / 32$ W, $C = 1 \mu F$



V_{RRM} V	V_{RRM}, V_{DRM} V	$I_{TRMS} = 1600$ A (maximum value for continuous operation) $I_{TAV} = 760$ A (sin. 180; DSC; $T_c = 80$ °C)		
900	800	SKT 760/08D		
1300	1200	SKT 760/12E		
1500	1400	SKT 760/14C		
1700	1600	SKT 760/16E		
1900	1800	SKT 760/18C		

Symbol	Conditions	Values	Units
I_{TAV}	sin. 180; $T_c = 100$ (65) °C;	488 (696)	A
I_D	2 x P6/180; $T_a = 45$ °C; B2 / B6	440 / 620	A
	2 x P6/180 F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	1200 / 1700	A
I_{RMS}	2 x P6/180; $T_a = 45$ °C; W1C	480	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	15000	A
	$T_{vj} = 125$ °C; 10 ms	13000	A
ρt	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	1125000	A ² s
	$T_{vj} = 125$ °C; 8,3 ... 10 ms	845000	A ² s
V_T	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 2400$ A	max. 1,65	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 125$ °C	max. 0,92	V
r_T	$T_{vj} = 125$ °C	max. 0,3	m Ω
I_{DD}, I_{RD}	$T_{vj} = 125$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}, V_{DD} = V_{DRM}$	max. 90	mA
t_{gu}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/ μ s	1	μ s
t_{gr}	$V_D = 0,67 \cdot V_{DRM}$	2	μ s
$(di/dt)_{cr}$	$I_{vj} = 125$ °C	max. 125	A/ μ s
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 125$ °C; SKT ...D / SKT ...E	max. 500 / 1000	V/ μ s
t_q	$I_{vj} = 125$ °C	100 ... 200	μ s
I_H	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 500	mA
I_L	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	500 / 2000	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 200	mA
V_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 0,25	V
I_{GD}	$T_{vj} = 125$ °C; d.c.	max. 10	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.; DSC	0,038	K/W
$R_{th(j-a)}$	sin. 180; DSC / SSC	0,04 / 0,082	K/W
$R_{th(j-v)}$	rec. 120; DSC / SSC	0,045 / 0,093	K/W
$R_{th(c-s)}$	DSC / SSC	0,007 / 0,014	K/W
T_{vj}		- 40 ... + 125	°C
T_{stg}		- 40 ... + 130	°C
V_{bol}		-	V
F	mounting force	10 ... 13	kN
a			m/s ²
m	approx.	240	g
Case		B 10	

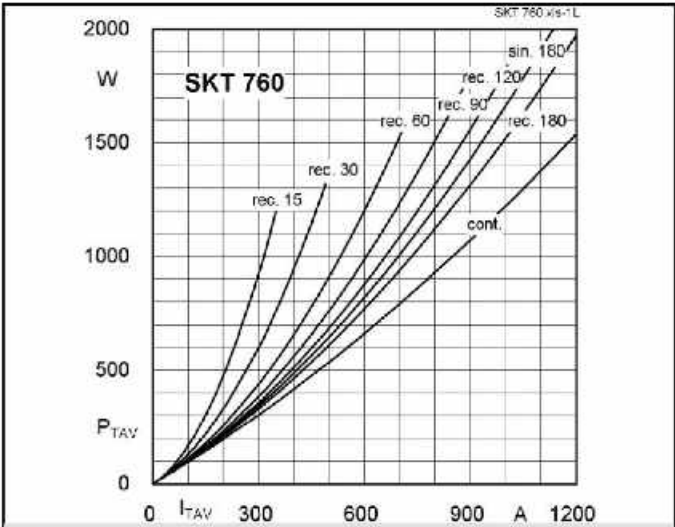


Fig. 1L Power dissipation vs. on-state current

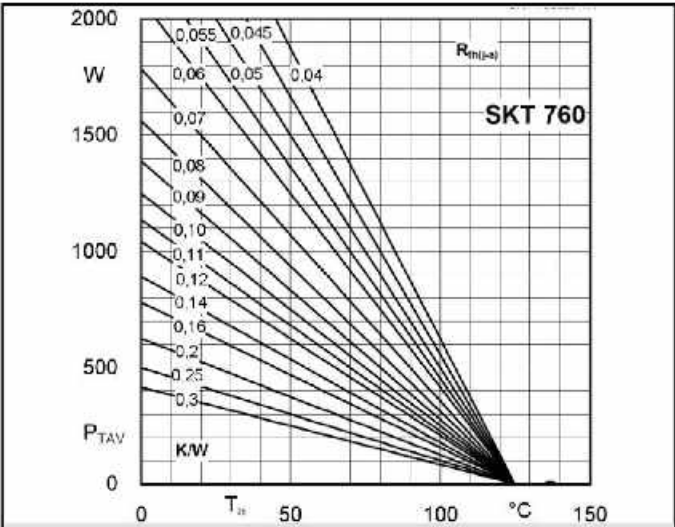


Fig. 1R Power dissipation vs. ambient temperature

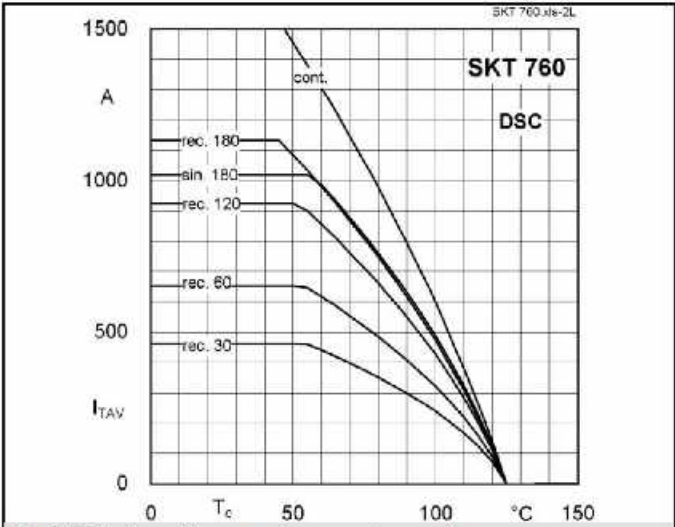


Fig. 2L Rated on-state current vs. case temperature

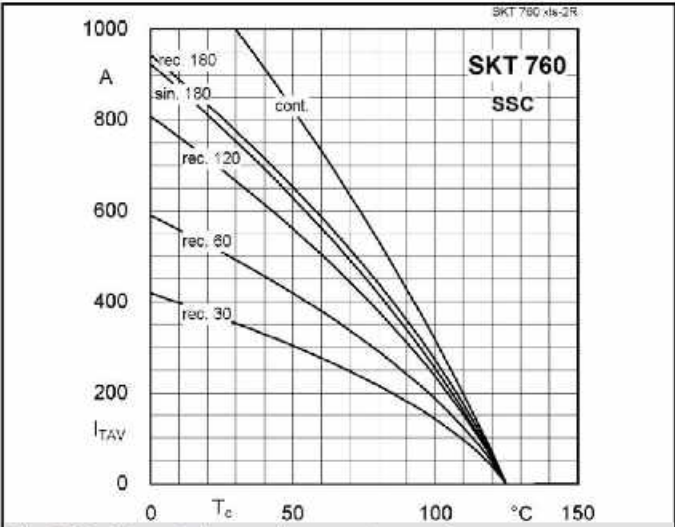


Fig. 2R Rated on-state current vs. case temperature

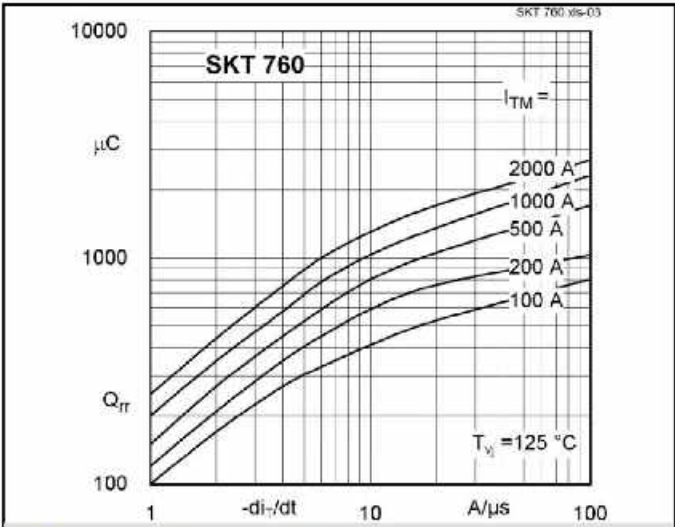


Fig. 3 Recovered charge vs. current decrease

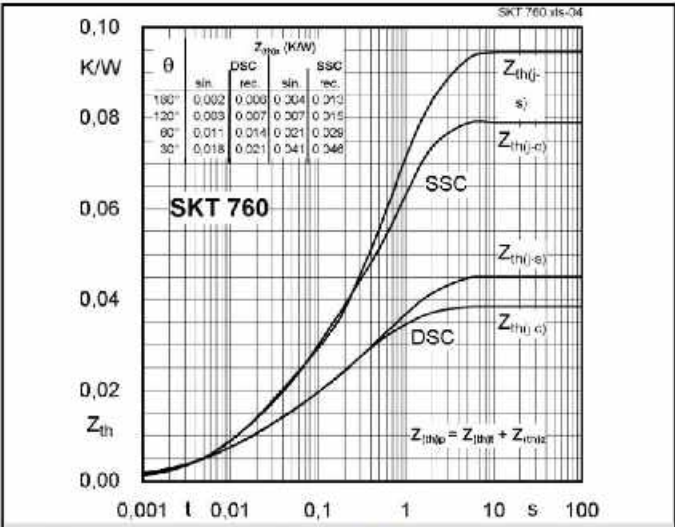
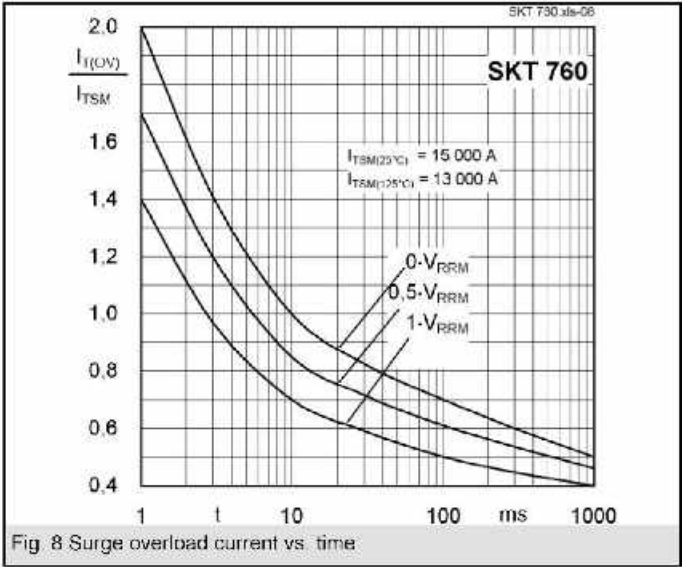
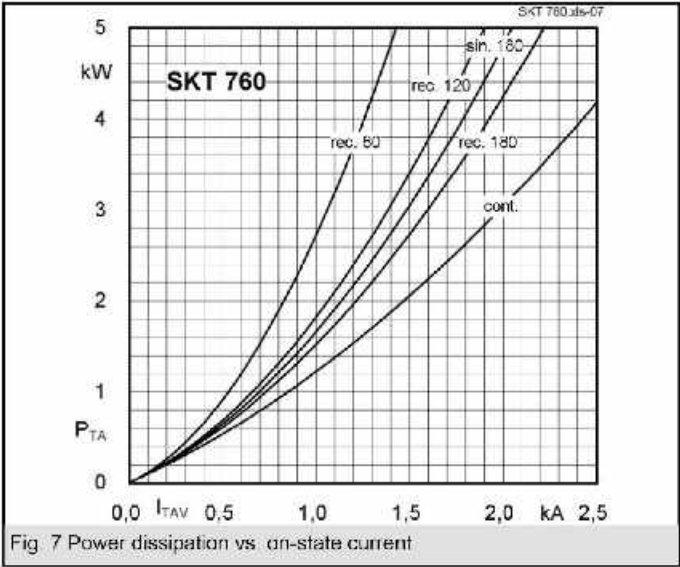
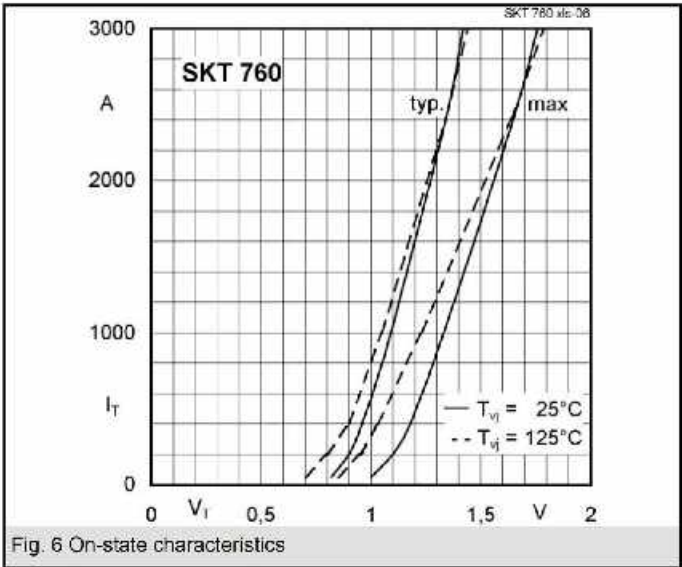
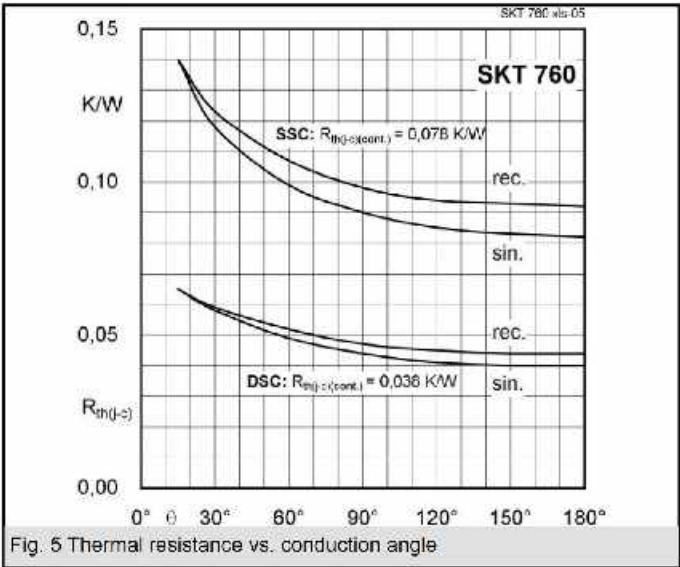


Fig. 4 Transient thermal impedance vs. time



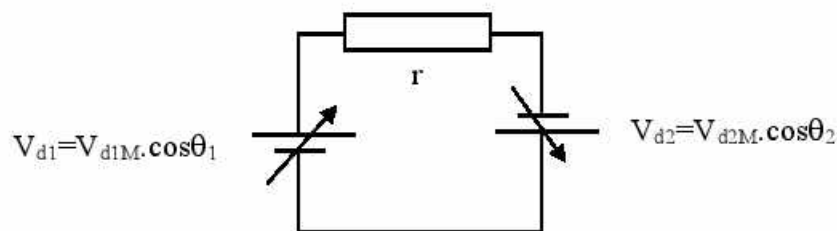
EXAMEN 1

Exercice 1 :

1) Il s'agit d'un système de conversion indirect qui transforme un signal CA (V_1, f_1) en signal CA (V_2, f_2). Il se compose d'un redresseur à thyristors et d'un onduleur de courant. L'échange d'énergie est bidirectionnel (la machine peut fonctionner en moteur ou en générateur).

Si la machine fonctionne en moteur : Conv 1 fonctionne comme un redresseur ($0 < \theta_1 < 90^\circ$) et Conv 2 fonctionne comme un onduleur de courant ($90 < \theta_2 < 180^\circ$). L'énergie est fournie par le réseau de bord pour être transférée vers la machine.

Si la machine fonctionne en générateur : Conv 1 fonctionne en onduleur de courant ($90 < \theta_1 < 180^\circ$) et Conv 2 en redresseur ($0 < \theta_2 < 90^\circ$). L'énergie est fournie par la machine pour être transférée vers le réseau de bord.



2) On peut utiliser les formules théoriques (fonctionnement en conduction continue)

$$U_{1M} = \text{valeur crête de la tension ligne - ligne au secondaire du transfo : } V_{d1\text{moy}} = \frac{3}{\pi} \cdot U_{1M} \cdot \cos \theta_1$$

$$U_{2M} = \text{valeur crête de la tension ligne - ligne de la machine } V_{d2\text{moy}} = \frac{3}{\pi} \cdot U_{2M} \cdot \cos \theta_2$$

On suppose que le conv 2 fonctionne en onduleur à la tension maximale ($\cos \theta_2 = -1$).

Comme $U_{LL2-RMS} = 3300 \text{ V}$, on trouve $V_{d2\text{moy}} = -4457 \text{ V}$.

La puissance active maximale est donc :

$$P = |V_{d2\text{moy}}| \cdot I = 4457 \cdot 2000 = 8.9 \text{ MW}$$

3) On doit calculer la tension au secondaire du transformateur

Du schéma équivalent en continu, on en déduit :

$$V_{d1moy} = r \cdot I - V_{d2moy} = 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 2000 + 4457 = 4458V$$

On peut ensuite calculer U_{1M} et $U_{LL1-RMS}$:

$$U_{1M} = \frac{\pi}{3} \cdot V_{d1moy} = \frac{\pi}{3} \cdot 4458 = 4668V$$

$$U_{LL1-RMS} = \frac{U_{1M}}{\sqrt{2}} = 3301V$$

On doit aussi calculer le courant efficace sur une phase du secondaire :

$$I_{1-RMS} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I = 1632A$$

La puissance apparente du transformateur est donc :

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{LL1-RMS} \cdot I_{1-RMS} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 3301 \cdot 1632 = 9.33MVA$$

Le rapport de transformation :

$$a = \frac{U_{LL1-RMS}}{U_{LL-reseau}} = \frac{3301}{6600} = 0.5$$

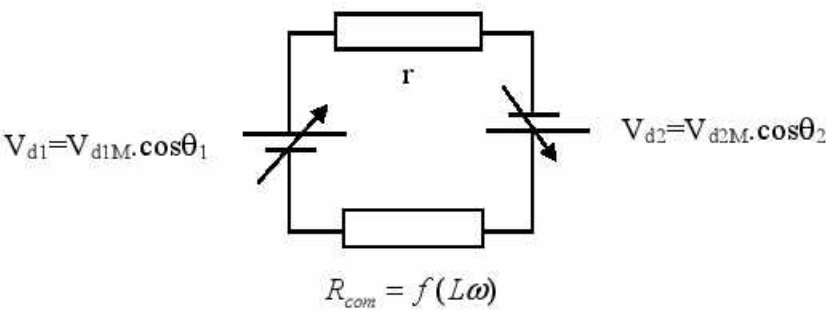
$$4) \quad FP = \frac{P}{S} = \frac{8.9}{9.33} = 0.954$$

On pourrait augmenter le nombre de phases du redresseur pour améliorer le facteur de puissance.

Un montage gradateur+transformateur+ redresseur permet de minimiser la puissance apparente du transformateur lorsqu'on doit utiliser un angle de retard à l'amorçage élevé. Il améliore aussi le facteur de puissance. Ce n'est pas une solution pour ce système de propulsion car le montage doit être réversible en puissance. Ce n'est pas le cas si on utilise un redresseur à diodes.

5) La présence d'inductance augmente la durée des commutations et dégrade le facteur de puissance. Cela peut entraîner des problèmes de court-circuit entre phase (défaut de commutation) lors d'un fonctionnement en onduleur de courant avec un angle de retard à l'amorçage très élevé. C'est pourquoi, on limite l'angle de retard à l'amorçage à 150 degrés.

On rajoute une résistance R_{com} dans le modèle continu équivalent pour tenir compte de la diminution de la tension continue en fonction du courant dans le bus DC (effet de charge).



Exercice 2

- 1) Le convertisseur 2 fonctionne en onduleur de courant et la machine absorbe de la puissance électrique. Elle fonctionne en moteur. Dans ce cas, la tension VAB est négative. La convention générateur sur le schéma équivalent continu, on trouve que $P = V_{ab} \cdot I < 0$ ce qui correspond à une puissance absorbée
- 2) Voir tracés à la page suivante.
- 3) Tableau de séquences

	T'1		T'2		T'3		T'1		T'2
	T3		T1		T2		T3		
V_{AN}	Ea		Eb		Ec		Ea		Ebc
V_{BN}	Ec		Ea		Eb		Ec		
V_{AB}	Eac	Ebc	Eba	Eca	Ecb	Eab	Eac	Ebc	
$V_{AK-T1} = V_{BN} - Ea$	Eca		0		Eba		Eca		
$I_{sa} = I_{T1} - I_{T'1}$	-I	0	I	I	+0	-I	-I	0	

Nom :

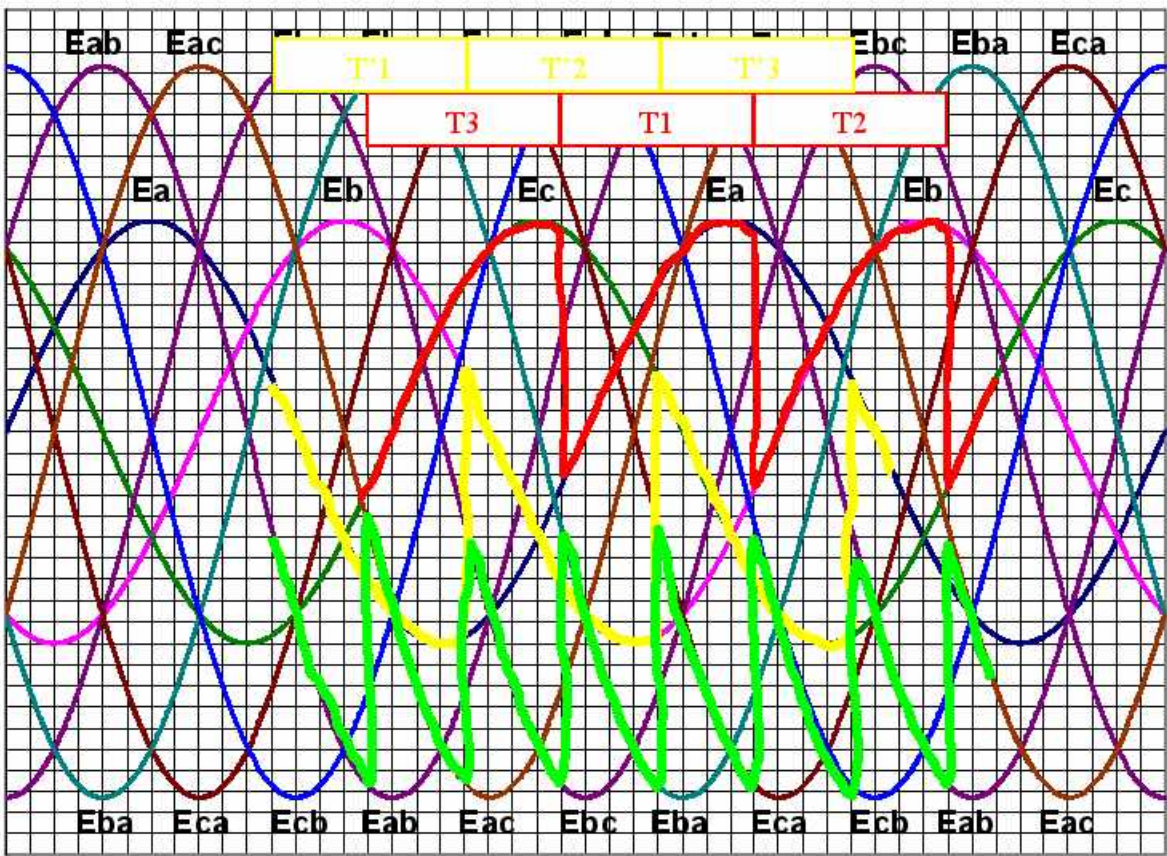
Prénom

GEL4102

VBN

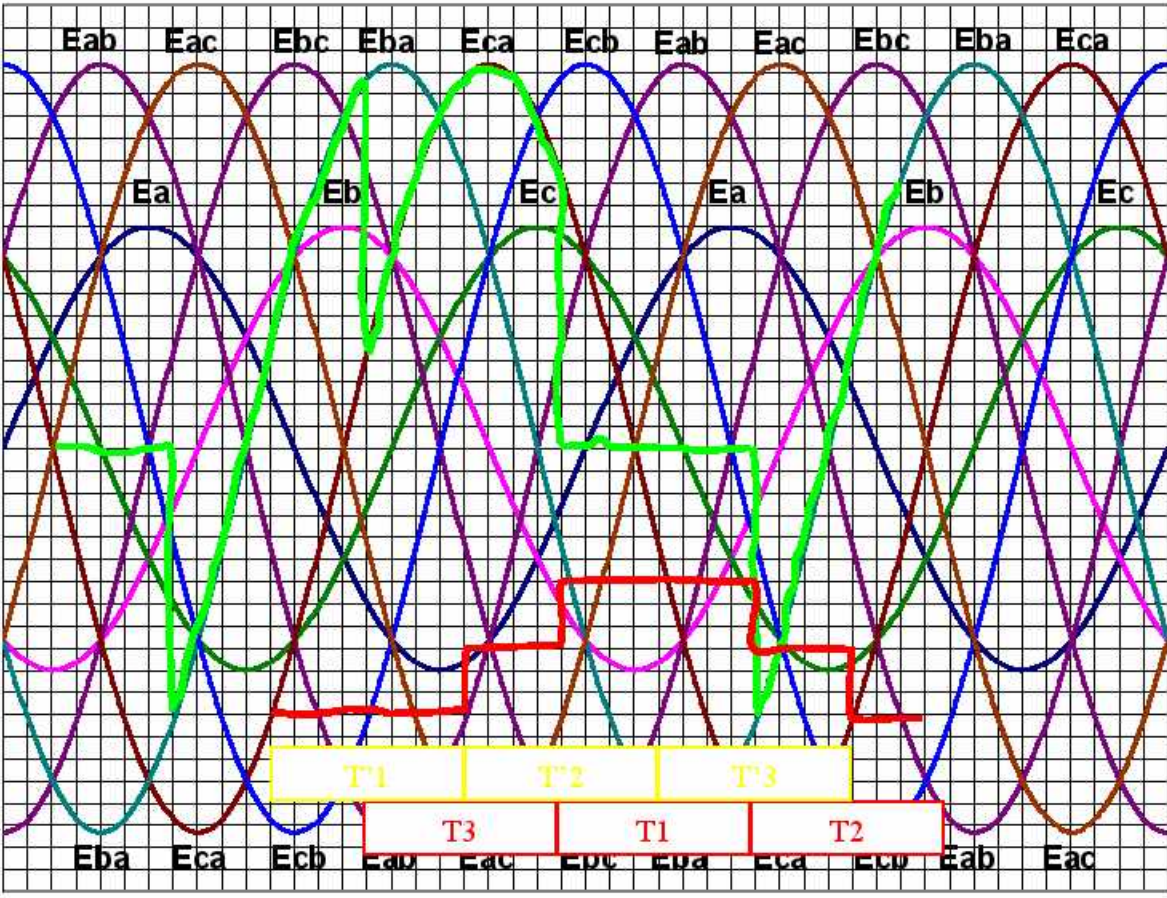
VAN

VAB



V_{AKTI}

Isa



4) L'angle d'application de tension négative est 45 degrés. Voir tracés

5) Sur la feuille de tracé, on peut mesurer le déphasage entre E_a et I_{sa} . On voit que le courant est en avance par rapport à E_a , avec un déphasage de 45 degrés environ. Il s'agit d'une convention récepteur pour la machine dans cette situation (la puissance qui est absorbée est positive).

Exercice 3

1) La tension entre phases de la phase est égale à 3300 Vrms soit une valeur maximale de 4667 V, ce qui correspond à la tension maximale que doit supporter chaque interrupteur.

On en déduit qu'il faudra mettre en série, 3 thyristors au minimum pour supporter cette tension. Dans ce cas, il y aura 6 thyristors par bras. Chaque thyristor devrait supporter une tension VRRM et VDRM de 1556 V.

$$2) \quad I_{T_{FAV}} = \frac{I}{3} = 667 \text{ A} \quad I_{T_{FRMS}} = \frac{I}{\sqrt{3}} = 1155 \text{ A}$$

3) Numéro du thyristor : SKT760/16E

4) On utilise la figure 1L : avec $I_{TAV} = 667 \text{ A}$, on trouve $P_{av} = 1020 \text{ W}$ environ par composant.

Les pertes totales sont : $P_{Tot} = 3 \cdot 6 \cdot 1020 = 18360 \text{ W}$

La puissance sur le bus DC : $P_{DC} = V_{DC} \cdot I = 4457 \cdot 2000 = 8.91 \text{ MW}$

Le rendement du convertisseur 2 : $\eta = \frac{P_{DC} - P_{Tot}}{P_{DC}} = \frac{8914000 - 18360}{8914000} = 0.998$

5) On utilise la figure 2L : avec $I_{TAV} = 667 \text{ A}$, on trouve $T_{case} < 80$ degrés Celsius environ

6) Résistance thermique du radiateur de chaque thyristor $R_{th_{SA}} < \frac{T_{case} - T_{ambiance}}{P_{av}} - R_{th_{CS}}$

Si la température ambiante est égale à 40 degrés, on trouve :

$$R_{th_{SA}} < \frac{80 - 40}{1020} - 0.007 = 0.0385 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

Il s'agit de la résistance thermique totale des 2 radiateurs (1 de chaque côté du thyristor)