

loic.michel54@wanadoo.fr  
geah46@etn.univ-lyon1.fr  
tvu

I.N.P.T. – E.N.S.E.E.I.H.T.  
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE – AUTOMATIQUE

3<sup>ème</sup> Année – option TAEE

EXAMEN D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE 2005-2006  
COURS DE H. PIQUET, F. RICHARDEAU et P. LADOUX

Durée 2 heures – 1 feuille « Aide Mémoire » A4 autorisée pour chaque cours - Téléphones éteints et dans les sacs

### Etude d'un chaîne de conversion pour locomotive

On considère le schéma de la figure suivante, dédié à l'alimentation électrique des bogies d'une locomotive.

Ce système est constitué de quatre chaînes placées en parallèle, possédant un même bus continu commun. Chacune d'entre elle alimente un des moteurs de traction et reçoit de l'énergie sur un des secondaires d'un transformateur, dont le primaire est relié à la caténaire.

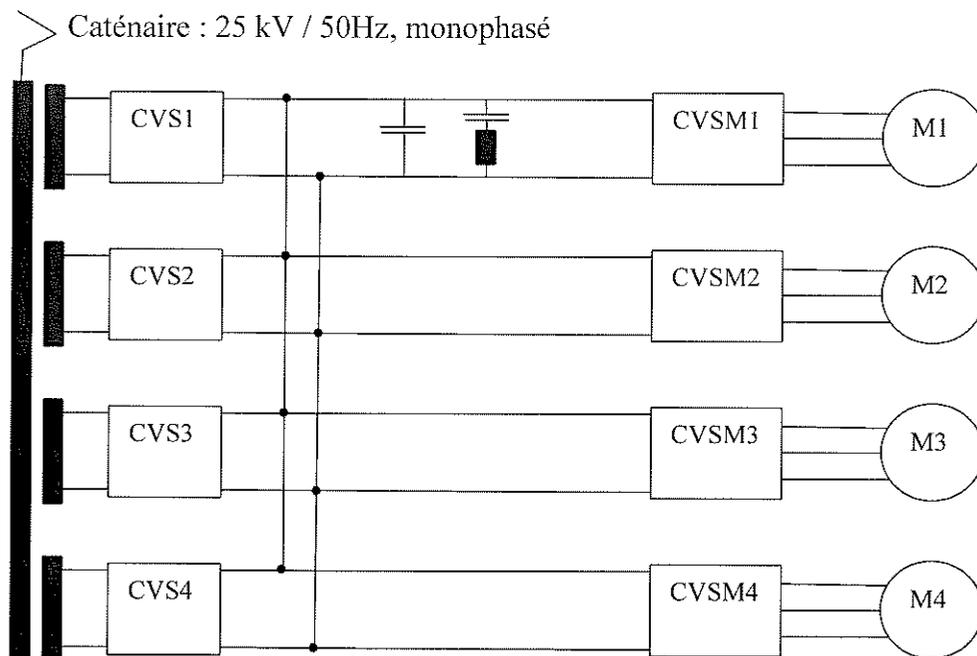


figure 1

En prenant en compte l'inductance de fuite du transformateur, le schéma équivalent, ici limité aux deux premières chaînes est présenté en figure 2.

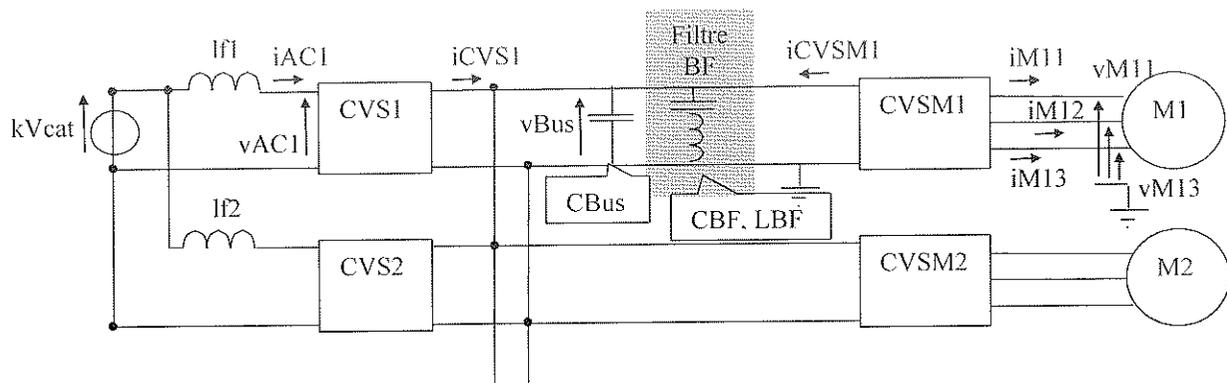


figure 2

La tension du bus continu commun,  $V_{bus}$ , doit être maintenue stable.

### A. Etude d'une chaîne de conversion :

**A.1** Préciser, pour CVS1 et CVSM1 quelles sont les grandeurs, imposées par le reste de la chaîne de conversion, dont ils ont à subir les propriétés.

En déduire leur type (direct, indirect) et la nature de la conversion (courant-courant, courant-tension, tension-courant, tension-tension) qu'ils réalisent.

Préciser, en indiquant le sens de conversion que vous considérez, leur caractère élévateur ou abaisseur ; justifier.

**A.2** Préciser les réversibilités des grandeurs électriques sur les interfaces des convertisseurs ; préciser si ces propriétés sont intrinsèques (et donc subies par le convertisseur) ou si elles résultent du fonctionnement en commutation des interrupteurs :

- pour CVS1 :  $i_{AC1}$ ,  $v_{AC1}$ ,  $i_{CVS1}$ ,  $v_{Bus}$  ;
- pour CVSM1 :  $i_{CVSM1}$ ,  $v_{Bus}$ ,  $i_{M11}$ ,  $i_{M12}$ ,  $i_{M13}$ ,  $v_{M11}$ ,  $v_{M12}$ ,  $v_{M13}$ .

**A.3** En déduire la structure électrique de CVS1 et CVSM1 ; préciser pour chacun le nombre et la position des cellules de commutation mises en jeu. Synthétiser leurs interrupteurs (on considérera un fonctionnement en découpage des convertisseurs asynchrone par rapport aux grandeurs alternatives qui les concernent).

**A.4** Dans le cas où un court-circuit survient sur un point de la chaîne de conversion, ce défaut peut il être isolé par rapport à la source de tension  $k.V_{cat}$  ; si oui grâce à quelle partie du schéma et comment ? Justifier, en précisant l'endroit où se produit le défaut que vous analysez.

**A.5** On suppose que la composante basse fréquence de  $i_{AC1}$  est réglée en phase avec  $k.V_{cat}$ . On suppose que la machine triphasée alimentée par CVSM1 se présente comme une charge électrique équilibrée en BF.

- Caractériser la puissance échangée à travers CVS1 et CVSM1 (puissances moyenne et fluctuante).
- En déduire le contenu harmonique basse fréquence des courants  $i_{CVS1}$  et  $i_{CVSM1}$ .
- Quel est le premier harmonique présent dans  $(i_{CVS1} + i_{CVSM1})$  ?
- Quelle est la composante continue de ce courant ?
- Quelles sont ses autres composantes harmoniques ?

Pour contrôler les ondulations de  $v_{Bus}$ , on met en place un filtre constitué de :

- Un condensateur  $c_{Bus}$ ,
- Un ensemble série  $L_{BF}, C_{BF}$  (« filtre BF »). Celui-ci est destiné à court-circuiter la composante du courant ( $i_{CVS1} + i_{CVSM1}$ ) correspondant à la puissance fluctuante.

A quelle fréquence ce filtre « filtre BF » doit il être accordé ?

En déduire alors le contenu harmonique de  $i_{cBus}$ .

Le dimensionnement de  $c_{Bus}$  s'effectue-t'il sur la base de critères BF ou HF ; justifier.

**A.6 Etude des réversibilités :** expliquer quelles sont les caractéristiques de CVS1 et CVSM1 en termes de réversibilité en puissance. Leur association en cascade permet elle de mettre en place une solution de freinage récupératif ? Justifier.

En cas de défaut sur CVS1 ou sur la liaison électrique à la caténaire, il faut cependant garantir la capacité de la locomotive à arrêter le train (ouf !). Par quelle solution cette sécurité peut elle être assurée ? Dans ce cas, le freinage doit rester réglable et l'énergie cinétique sera convertie en chaleur.

## B. Etude de l'étage de redressement MLI

La partie 1 est générale et peut être traitée indépendamment ; la partie 2 fait référence au schéma étudié en A.

### 1 Etude de la mise en parallèle de deux onduleurs de tension.

Soit le circuit de la figure ci-dessous :

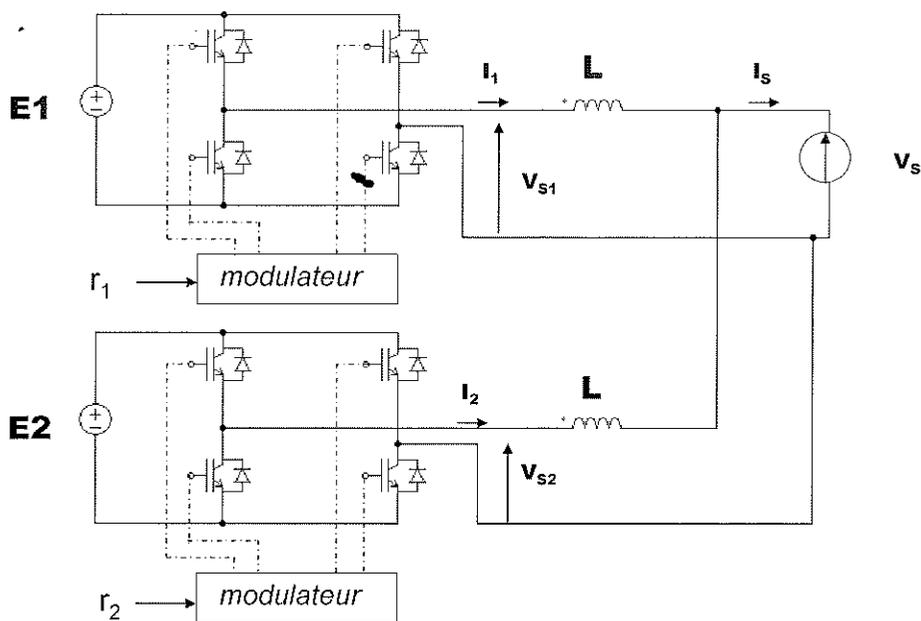


Figure 3

Les sources de tension continue  $E_1$  et  $E_2$  ont même amplitude :  $E_1 = E_2 = E$ .

Les modulateurs possèdent une entrée de réglage de la profondeur de modulation, respectivement notée  $r_1$  et  $r_2$ . ( $0 < r_i < 1$ ).

Les interrupteurs des onduleurs commutent à une fréquence fixe  $f_c$ . La période de commutation est notée  $T_c$  ( $T_c = 1/f_c$ ).

On note respectivement  $F1(t)$  et  $F2(t)$  les fonctions de connexion des onduleurs de tension 1 et 2. Ainsi  $V_{s1}(t) = E1 \cdot F1(t)$  et  $V_{s2}(t) = F2 \cdot E2$ .

Chaque onduleur est commandé avec une MLI unipolaire. Ainsi les fonctions de connexion peuvent prendre les valeurs -1, 0 ou 1. Cette commande MLI est à doublement de fréquence, ce qui veut dire que sur la tension de sortie de chaque onduleur, la fréquence apparente de découpage est le double de la fréquence de commutation des interrupteurs.

**B.1** Que doit on rajouter au niveau de la commande pour assurer en régime permanent l'équilibrage des courants moyen entre les deux onduleurs ? Proposer un schéma de principe de réalisation de la commande des onduleurs.

**B.2** Quelle condition doivent remplir les fonctions de connexion  $F1$  et  $F2$  en régime permanent ?

**B.3** La figure 4 présente le schéma de Thévenin équivalent pour la mise en parallèle des onduleurs de tension. Donner l'expression de  $V_{th}$  en fonction de  $F1$ ,  $F2$  et  $E$  et l'expression de  $L_{th}$  en fonction de  $L$ .

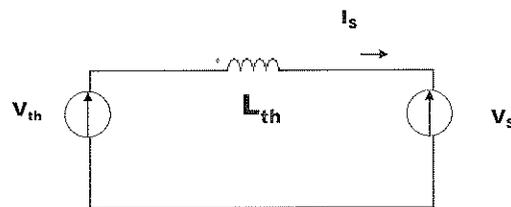


Figure 4

**B.4** On s'intéresse à un fonctionnement en régime permanent des onduleurs avec une tension  $V_s$  supposée constante et positive. Au niveau de la commande des onduleurs, les profondeurs de modulation sont identiques  $r_1 = r_2 = r$ . Le rapport cyclique des signaux  $F1$  et  $F2$ , de fréquence  $2 \cdot f_c$ , est noté  $\delta$  ( $\delta = 2 \cdot r - 1$ ). Compléter le **document réponse 1** en traçant l'allure de la tension  $V_{th}(t)$  et du courant  $i_s(t)$ . Quel est alors la fréquence de l'ondulation de  $i_s(t)$  ? Pourquoi obtient-on ce résultat ?

**B.5** A partir des tracés de  $V_{th}(t)$  et  $i_s(t)$ , établir en fonction de  $E$ ,  $f_c$  et  $L$  l'expression de l'ondulation du courant de sortie  $i_s$  notée  $\Delta I$ . Pour cela, on considèrera séparément les cas où  $0 < \delta < 0,5$  et  $0,5 < \delta < 1$ . Quelle est l'expression de l'ondulation maximale  $\Delta I_{max}$ . Effectuer l'application numérique pour  $E = 2800$  V,  $f_c = 300$  Hz et  $L = 2$  mH.

**B.6** La figure 5 illustre le fonctionnement des deux onduleurs en parallèle dans le cas d'une tension  $V_s(t)$  évoluant linéairement de -2600 V à +2600 V en 1 seconde. La valeur moyenne du courant  $i_s$  est fixée à 1000 A. La fréquence de commutation des interrupteurs est de 300 Hz. Commenter l'évolution des grandeurs de la figure 5. On précisera notamment les différentes plages de fonctionnement et les points de fonctionnement particuliers.

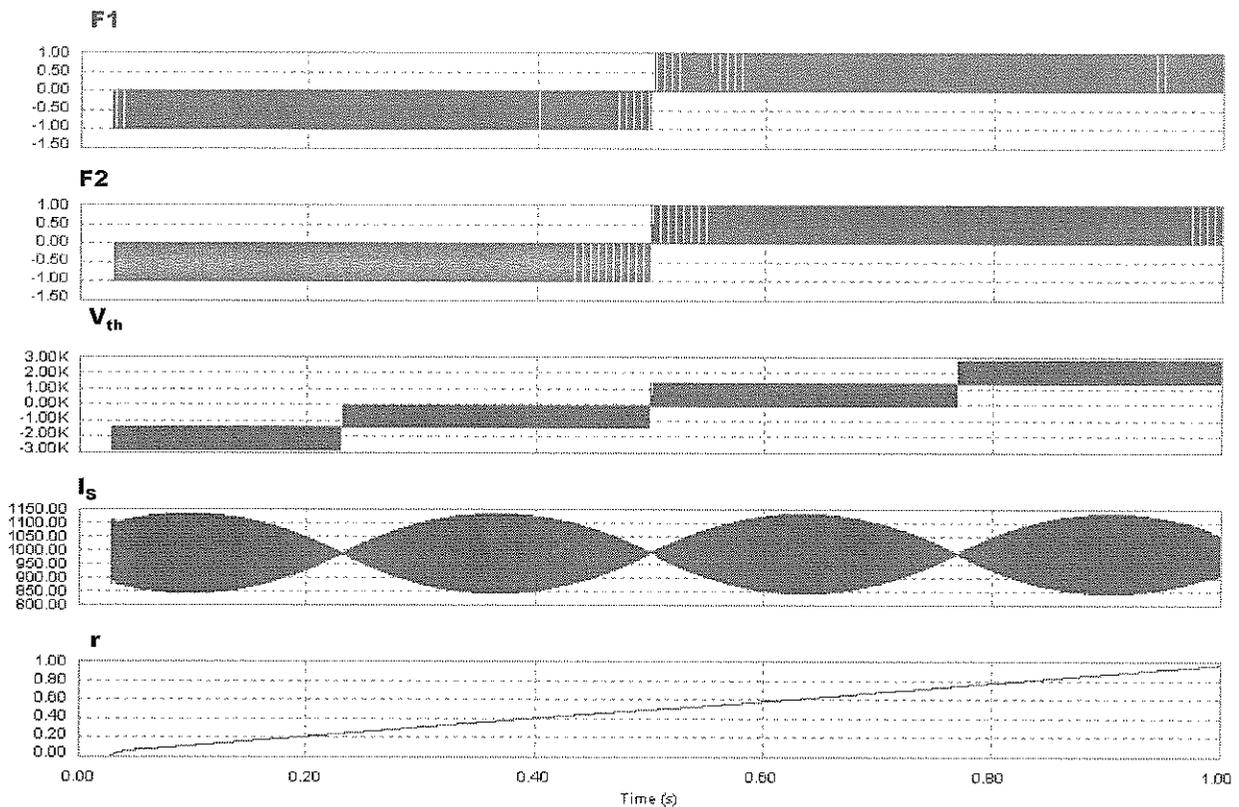


figure 5

## 2 Etude de l'étage de redressement MLI.

On s'intéresse maintenant à l'étage de redressement de la locomotive constituée de 4 onduleurs de tension MLI (CVS1, CVS2, CVS3, CVS4 de la figure 1) et d'un transformateur abaisseur monophasé à 4 bobinages secondaires.

Les inductances de fuites des bobinages secondaires du transformateur ( $lf_1$ ,  $lf_2$ ,  $lf_3$ ,  $lf_4$ ) jouent le rôle d'inductance de lissage du courant. Les interrupteurs des 4 onduleurs commutent à une fréquence fixe  $f_c$  de 300 Hz. Chaque onduleur est commandé avec une MLI unipolaire à doublement de fréquence.

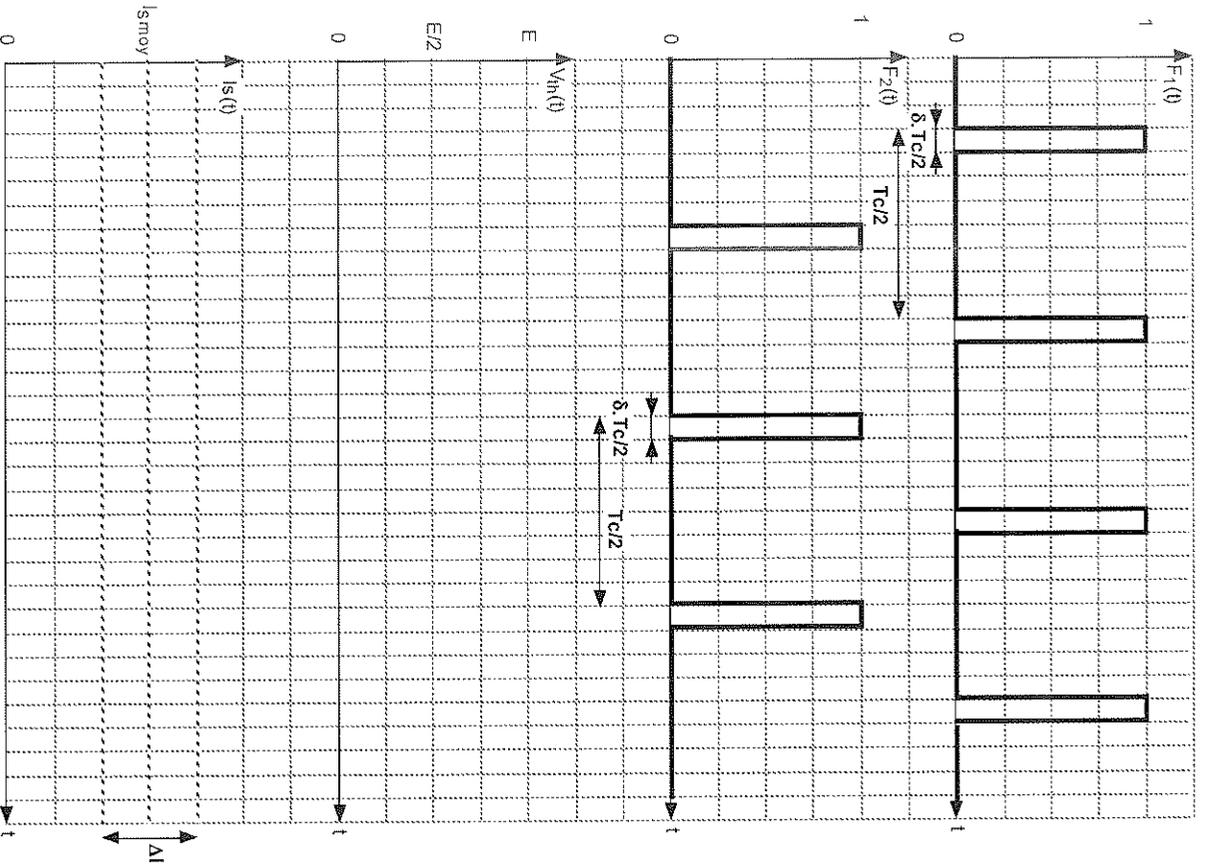
**B.7** Expliquer pourquoi les 4 onduleurs de tension peuvent être ici raccordés au même bus continu ?

**B.8** Quels avantages a-t-on à placer ici plusieurs onduleurs en parallèle ?

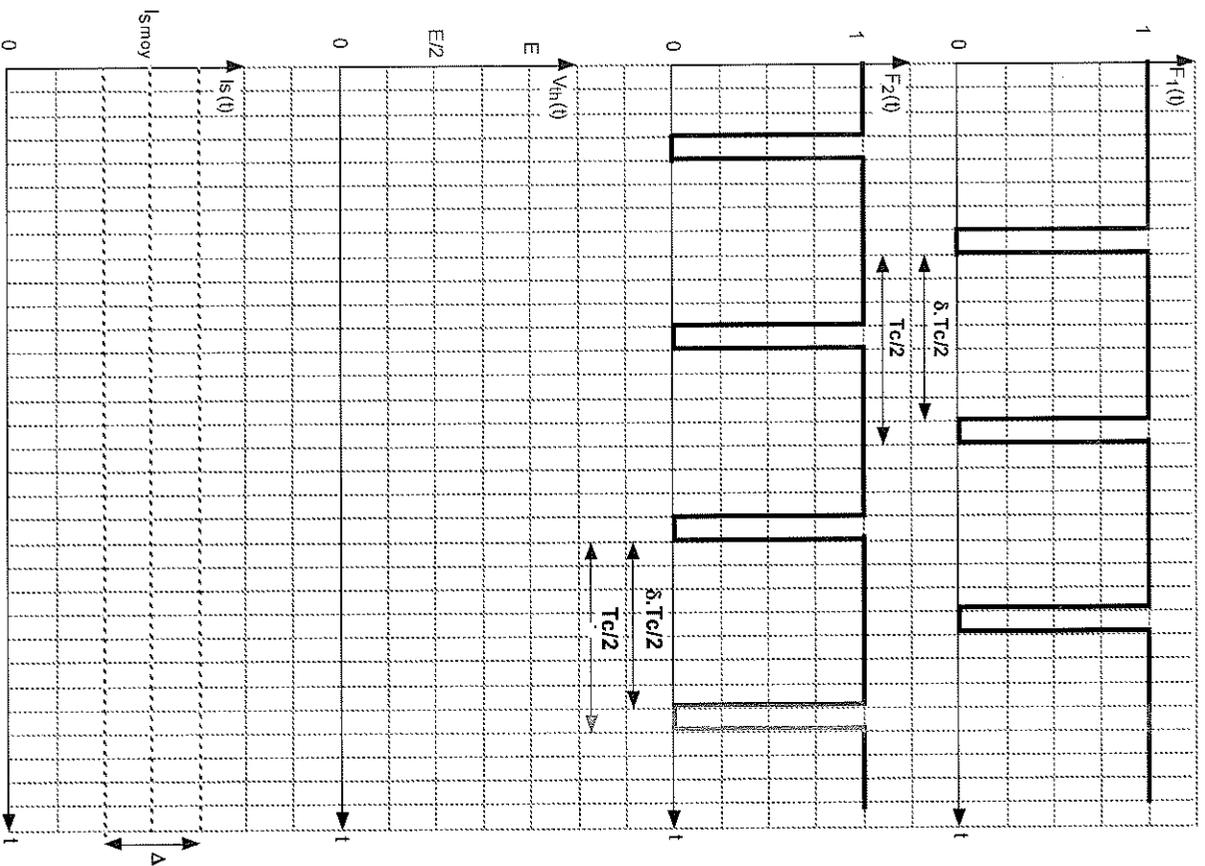
**B.9** Quel décalage temporel doit-il y avoir entre les fonctions de connexion F1, F2, F3 et F4 pour que le spectre du courant prélevé sur la caténaire soit optimal ? Quelle sera alors la fréquence de l'ondulation de ce courant ?

**B.10** Peut-on faire une remarque analogue vis-à-vis du courant haute fréquence filtré par le condensateur du bus continu ? Justifier votre réponse.

$\delta = 0,25$



$\delta = 0,75$



Nom : SYRIES

Prénom : OLIVIER

Document Réponse

### C. Etude d'une variante à l'étage d'entrée AC/DC

L'usage d'un redresseur actif à MLI comme étudié aux parties A) et B) permet de contrôler simultanément la forme d'onde du courant en entrée et de réguler la tension du bus en sortie. Cette fonctionnalité attrayante se paye par des pertes significatives et par la présence d'une self de valeur suffisante entre l'alimentation AC et l'onduleur. Nous proposons ici d'étudier le principe d'une variante plus économique où les transistors ne sont plus commandés en MLI mais selon un nouveau principe d'auto-commutation. Le schéma de principe est donné en figure 6.

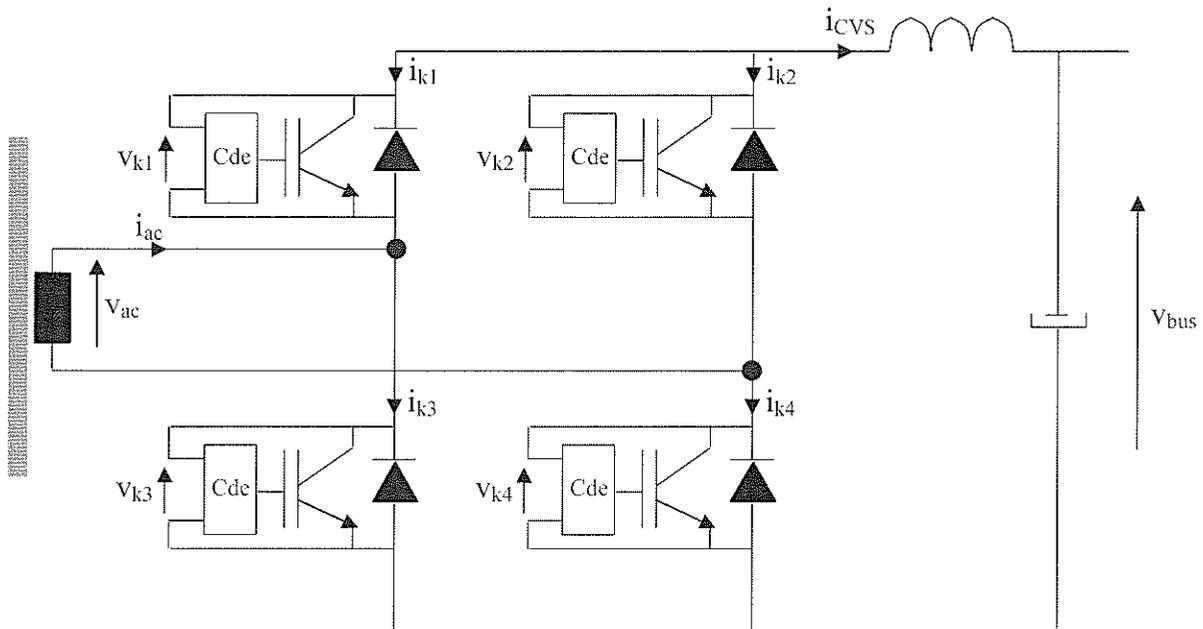


Figure 6.

La source d'entrée est assimilée à une tension sinusoïdale et l'inductance de sortie à une source de courant pour toute l'étude.

**C.1** Identifier les cellules de commutation. Les transistors sont supposés tous bloqués. A quel montage simple s'apparente la structure ? Déterminer l'expression de la valeur moyenne de la tension  $v_{bus}$ . En déduire la nouvelle valeur de la tension aux secondaires du transformateur pour obtenir la même valeur  $\langle v_{bus} \rangle$  qu'en partie B), soit :  $\langle v_{bus} \rangle = 2800V$ . Tracer la forme d'onde du courant en entrée. Ce montage est-il réversible en puissance ?

**C.2** Pour analyser la commutation, on considère le schéma réduit équivalent en figure 7. Les transistors sont auto-commutés selon le principe décrit en figure 8.

L'amorçage d'un transistor se produit automatiquement dès que la tension à ses bornes devient inférieure à  $V_{seuil}$ .

Le blocage d'un transistor se produit automatiquement dès que la tension à ses bornes devient supérieure à  $V_{seuil}$ .

$l_f$  représente l'inductance de fuite du transformateur d'entrée.  $V_z$  est un écrêteur de tension parfait avec  $V_z > |v_{ac \max}|$ .

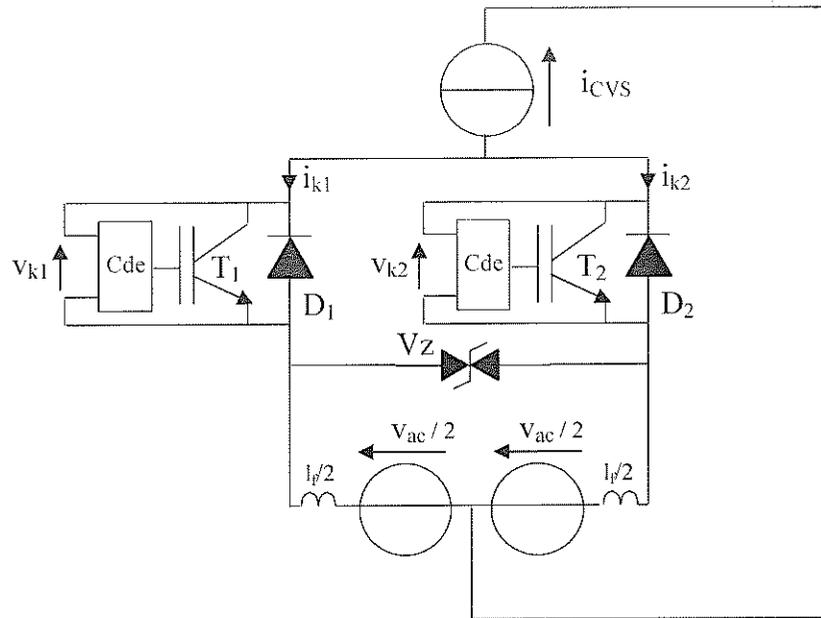


Figure 7

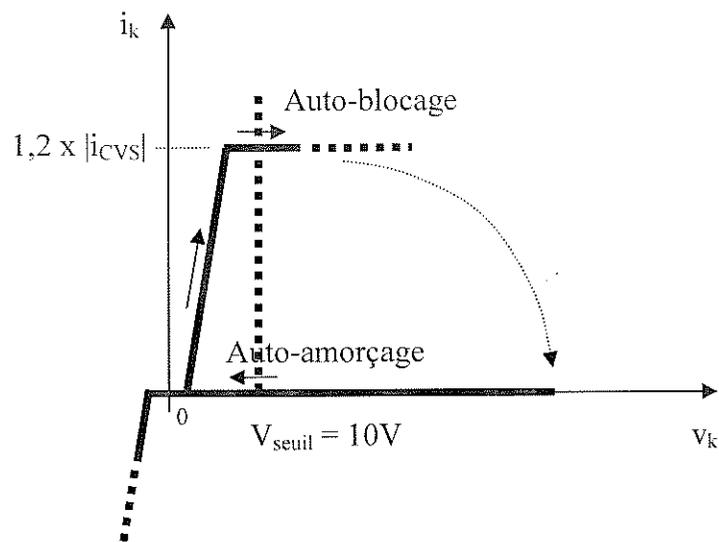


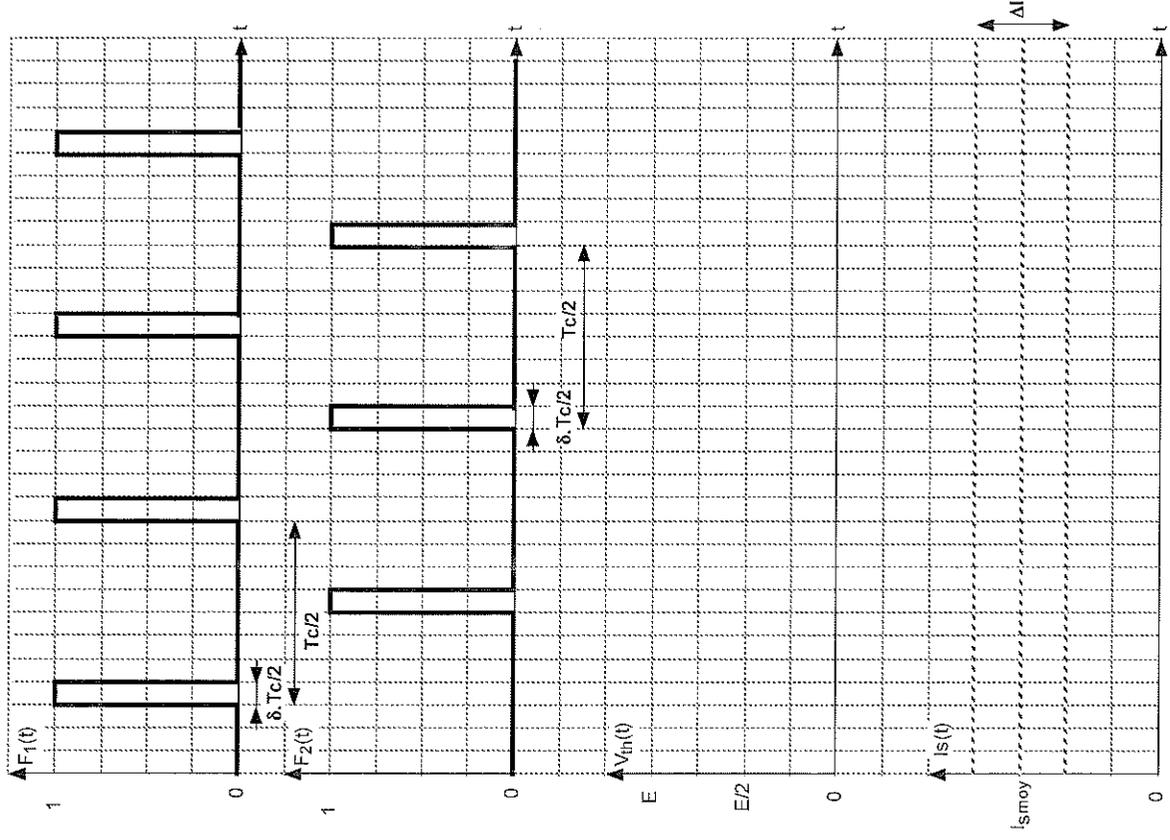
Figure 8

On se propose de tracer les chronogrammes uniquement pour  $i_{cvs} < 0$ . Comme condition initiale ( $t=0$ ), on pose  $v_{ac} > 0$ , T1 passant, T2 bloqué.

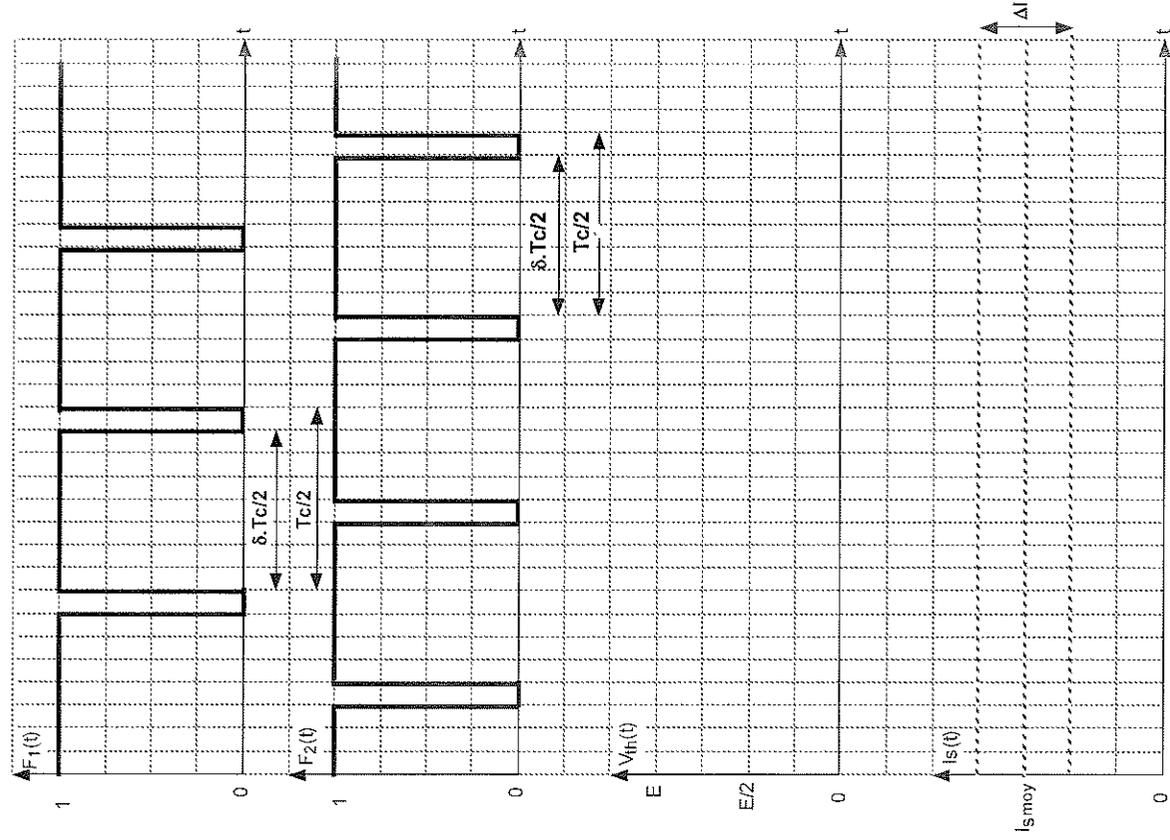
Tracer les formes d'ondes  $i_{k1}$ ,  $i_{k2}$ ,  $v_{k1}$  et  $v_{k2}$ .

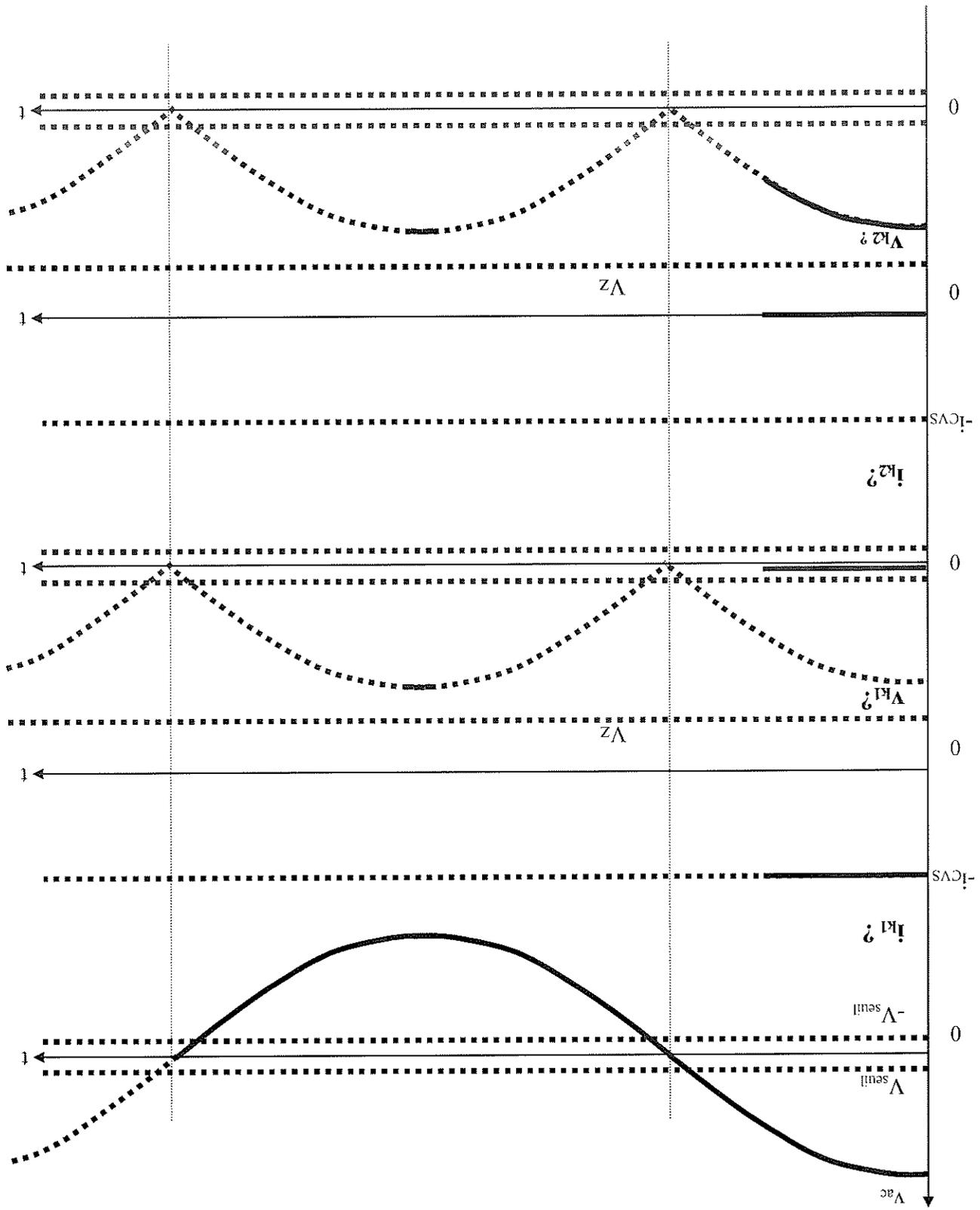
Quelle est la valeur maximale du courant  $i_{cvs}$  assurant le bon fonctionnement ? En idéalisant les formes d'ondes, tracer sur deux périodes  $i_{ac}$  pour un fonctionnement en mode alimentation ( $i_{cvs} > 0$ ) et pour un mode récupération ( $i_{cvs} < 0$ ).

$\delta = 0,25$



$\delta = 0,75$





Rappel :  $i_{cvs} < 0$

NOM : SHRIES



**Département de Formation Génie Electrique – Automatique**

**Examen sur le cours de Stéphane ASTIER 2005-2006**

**Alimentation des machines à courant alternatif par convertisseur statique  
Adéquation alimentation – structure des machines**

**Sans documents  
sauf fiche de synthèse de 2 pages**

**Durée : 2 heures**

De nombreuses applications modernes utilisent, pour du positionnement ou de la variation de vitesse, une machine électrique à courant alternatif alimentée par un onduleur de tension à MLI .

- 1 - Rappeler les principes et les propriétés qui fondent les fonctionnements de cette association (propriétés du convertisseur et de la machine) qui rendent cette association particulièrement intéressante et judicieuse.
  
  - 2 – Présenter les principales stratégies de commande des actionneurs sinus (“ AC Brushless ”) à machines synchrones à fem sinusoïdales, en indiquant les différences de propriétés et de comportement entre les machines synchrones à aimants permanents et les machines synchrones à inducteur bobiné vis-à-vis de ces différents types de fonctionnement.
  
  - 3 – Présenter les principes de fonctionnement des « actionneurs trapèze » (“ DC Brushless ”) à aimants permanents et leurs propriétés par comparaison à d’autres actionneurs (actionneur sinus et actionneurs à collecteur en particulier).
-

