

AGREGATION
SESSION 2002

CONCOURS INTERNE

Section : GENIE ELECTRIQUE

Option B : ELECTROTECHNIQUE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

ÉTUDE D'UN SYSTÈME INDUSTRIEL

DUREE : 8 HEURES, COEFFICIENT : 1

Aucun document n'est autorisé.

Calculatrice autorisée (conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999)

BB 15000

Ce sujet comporte 3 dossiers distincts :

📁 Texte du sujet	(16 pages)
📁 Dossier figures [A1 à A5, B1 à B2] et tableaux [T1 à T2]	(9 pages)
📁 Documents réponses [A1 à A3 et B1 à B3]	(6 feuilles)

Ce sujet comporte trois parties indépendantes :

- Partie 1 : Étude de la motorisation,
- Partie 2 : Étude des convertisseurs statiques,
- Partie 3 : Exploitation pédagogique.

Ces trois parties sont à traiter obligatoirement.

Il est vivement conseillé au candidat, de lire entièrement le sujet avant de répondre aux questions posées. Le temps de lecture préconisé est d'environ 30 mn.

Les candidats utiliseront les notations propres au sujet, présenteront clairement leurs calculs et encadreront les résultats attendus.

Le passage d'une forme littérale à son application numérique se fera dans le respect de la position de chaque grandeur exprimée. Le résultat numérique sera donné avec son unité.

PRESENTATION DU SUJET

Traction électrique sous caténaire monophasée 25 kV

Étude de la BB 15000

Le support de l'étude qui vous est proposée est la locomotive BB 15000 en service sur le réseau Est de la SNCF. Il s'agit d'une locomotive mono-tension qui fonctionne uniquement sous caténaire monophasée 25 kV 50 Hz. Les BB 15000 ont été fabriquées à 65 exemplaires et mises en service de 1971 à 1978. Elles remorquent indifféremment et sans aucune préparation intermédiaire, soit des trains de voyageurs rapides jusqu'à des vitesses de 180 km/h, soit des trains de marchandises ordinaires ou accélérés (vitesse maximale 80, 100 ou 120 km/h).

La locomotive étudiée est de type BB, elle possède deux bogies à 2 essieux moteurs (voir photos à la Figure A-1). Chaque bogie est équipé d'un moteur à courant continu à excitation série entraînant les deux essieux du bogie par l'intermédiaire d'un réducteur.

Les deux moteurs de traction, TAB 674, sont alimentés indépendamment l'un de l'autre. En fonctionnement normal, hors patinage, ils fournissent la même puissance et tournent à la même vitesse. Pour alimenter les moteurs, la tension 25 kV est abaissée par l'intermédiaire d'un transformateur, puis redressée par des convertisseurs alternatif-continu qui assurent le réglage de la tension aux bornes des moteurs (*cf figure A-2*).

Les limites de fonctionnement de la locomotive dans le plan effort vitesse sont données à la figure A-1. Deux zones de fonctionnement apparaissent : une zone à tension d'alimentation des moteurs variable et une zone de « survitesse » où la tension aux bornes des moteurs est maximale et le champ d'excitation variable.

Le freinage électrique de cette locomotive est assuré soit avec récupération (renvoi de l'énergie sur la caténaire monophasée) soit par dissipation dans des rhéostats embarqués à bord de la locomotive. A basse vitesse ou en cas de freinage d'urgence, le freinage électrique est conjugué avec le frein pneumatique agissant sur les roues.

En 1981, la SNCF a expérimenté sur cette locomotive un dispositif de relèvement du facteur de puissance à base de filtres passifs.

ETUDE DE LA MOTORISATION

Dans cette partie, le train (locomotive et wagons) est assimilé à un point matériel sur lequel s'exercent différentes forces, conformément à la figure 1.

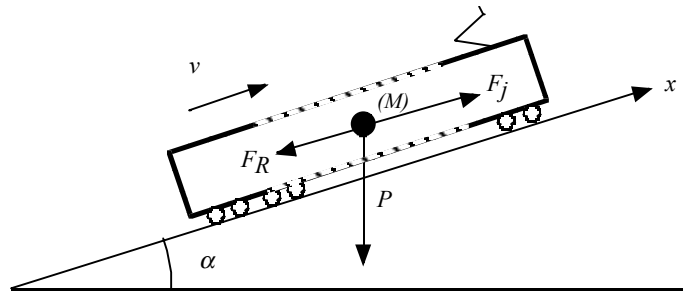


Figure 1 : Modèle du train circulant sur une voie

La masse M correspond à la masse totale du train. Les forces qui s'exercent sur le train sont les suivantes :

F_j : effort total à la jante correspond à la somme des efforts transmis par les roues motrices de la locomotive. En traction, la force F_j est comptée positive. En freinage, la force F_j est comptée négative.

P : est le poids total du train (locomotive et wagons).

F_R : représente la résistance à l'avancement du train, elle englobe les frottements roue/rail et les frottements aérodynamiques.

La vitesse de déplacement du train est notée v lorsqu'elle s'exprime en m/s. Lorsque la vitesse est donnée en km/h, celle-ci est notée en lettre majuscule V .

L'angle α caractérise le profil de la voie. Il est positif lorsque le train monte, négatif lorsque le train descend et nul lorsque le train se déplace en palier.

Les caractéristiques de la transmission de mouvement sont les suivantes :

- Diamètre des roues des bogies : $D_r = 1,215$ m.
- Rendement du réducteur : $\eta_r = 0,97$ (supposé constant et indépendant de la vitesse).
- Rapport de réduction : $\rho_r = \frac{\Omega_M}{\Omega_r} = 1,659$
- Ω_M (rd/s) est la vitesse de rotation des moteurs de traction
- Ω_r (rd/s) est la vitesse de rotation des roues de la locomotive.

Remarque : pour les calculs, on prendra $g = 9,81$ m/s²

A.1 JUSTIFICATION DU CHOIX DES MOTEURS.

Le cahier des charges de la locomotive est le suivant :

Train de voyageurs : la locomotive doit pouvoir tracter un train de voyageurs composé de 12 voitures Grand Confort à une vitesse de 180 km/h dans une montée de pente 0,3%.

Train de marchandises : la locomotive doit pouvoir tracter un train de marchandises composé de 14 wagons de type G10 à une vitesse de 110 km/h dans une montée de pente 0,88%.

A-1-1 : Pour une vitesse de déplacement constante, donner l'expression de l'effort total à la jante F_j en fonction de F_R , de la masse totale du train M et de l'angle α .

A-1-2 : Exprimer la vitesse de rotation Ω_M en fonction de la vitesse de déplacement v et du rapport de réduction de la transmission.

A-1-3 : Dans le cas d'un fonctionnement en traction, donner l'expression de la puissance utile d'un moteur P_u en fonction de F_j , v et du rendement de la transmission.

A-1-4 : La locomotive BB 15000 a une masse M_L de 89 tonnes. La résistance à l'avancement, exprimée en Newton et fonction de la vitesse de déplacement, est donnée par la relation suivante (V en km/h) : $F_{RL} = 1100 + 8,9.V + 0,3.V^2$. Calculer la valeur de F_{RL} pour $V = 110$ km/h et $V = 180$ km/h.

A-1-5 : Chaque voiture voyageur a une masse M_v de 57 tonnes. La résistance à l'avancement pour chaque voiture, exprimée en Newton et fonction de la vitesse de déplacement, est donnée par la relation suivante (V en km/h) :

$$F_{RV} = 570 + 5,1.V + 0,07.V^2$$

Calculer pour l'ensemble des douze voitures voyageurs, la valeur de la résistance à l'avancement F_{RVt} pour $V = 180$ km/h.

A-1-6 : Chaque wagon de marchandise de type G10 a une masse M_w de 64 tonnes. La résistance à l'avancement pour chaque wagon, exprimée en Newton et fonction de la vitesse de déplacement, est donnée par la relation suivante (V en km/h) :

$$F_{RW} = 380 + 6,4.V + 0,087.V^2$$

Calculer pour l'ensemble des quatorze wagons de marchandises, la valeur de la résistance à l'avancement F_{RWt} pour $V = 110$ km/h.

A-1-7 : A l'aide des résultats des questions précédentes, déterminer l'effort total à la jante nécessaire pour satisfaire les deux cas imposés par le cahier des charges.

A-1-8 : Dans les deux cas, calculer pour chaque moteur, la vitesse de rotation ainsi que la puissance utile. Le moteur TAB 674 satisfait-il au cahier des charges ? (cf tableau T1).

A.2 ETUDE DES PERFORMANCES DYNAMIQUES

Les limites de fonctionnement de la BB 15000 dans le plan Effort/Vitesse sont données sur le document réponse 1. En pratique l'effort transmissible au niveau du contact roue rail est limité par le phénomène d'adhérence. En cas de perte d'adhérence, l'effort de traction n'est plus transmis et il y a patinage des roues de la locomotive. L'effort maximal transmissible est fonction du poids adhérent de la locomotive : $F_{jmax} = \mu_r . M_L . g . \cos \alpha$.

M_L est la masse de la locomotive (89.10^3 kg), μ_r est le coefficient d'adhérence, et $\cos \alpha$ est toujours voisin de 1. Le coefficient d'adhérence est fonction de la vitesse et de l'état de surface du rail.

La formule de Curtius et Kniffler, donne la valeur moyenne du coefficient d'adhérence pour un rail sec et en fonction de la vitesse de déplacement (V en km/h) de la locomotive :

$$\mu_r = 0,161 + \frac{7,5}{3,6.V + 44}$$

A-2-1 : Sur le document réponse 1, en utilisant la formule de Curtius et Kniffler, tracer la courbe donnant F_{jmax} en fonction de la vitesse V . En déduire, dans quelle zone du plan effort vitesse il y a des risques de patinage. Quelles solutions peuvent être mises en œuvre pour éviter le patinage ?

A-2-2 : Lorsque le train est en mouvement, l'énergie cinétique totale au niveau du convoi dépend de la masse déplacée et de l'inertie des parties tournantes (moteurs de traction, roues, essieux...). La part de l'énergie cinétique due aux parties tournantes est prise en compte en majorant la masse du convoi, notée alors M^* et de telle sorte que :

$$\frac{1}{2} M^* v^2 = \frac{1}{2} (M \cdot v^2 + \sum J_i \cdot \Omega_i^2)$$

La BB 15000 a une masse M_L de 89 tonnes. Le moment d'inertie J_M de chaque moteur de traction est de $370 \text{ m}^2\text{kg}$.

En négligeant l'influence des autres parties tournantes (roues, essieux, réducteurs), donner l'expression de M_L^* en fonction de M_L , J_M , du rapport de réduction de la transmission et du diamètre des roues. Effectuer l'application numérique et donner la valeur du rapport M_L^*/M_L .

A-2-3 : Un train de marchandises de masse totale $M = 985$ tonnes est démarré dans une montée de rampe 0,88%. Lors de la phase d'accélération, afin d'éviter le patinage, l'effort total à la jante F_j est maintenu à 155 kN. Compte tenu des remarques du A-2-2, l'équation fondamentale de la dynamique est telle que : $\sum \overset{0}{F} = M^* \cdot \overset{0}{a}$

On admettra que pour un train complet : $M^* = 1,06 M$

On suppose que la résistance à l'avancement du train s'exprime par : $F_R = F_{R0} + f_r \cdot v$ où v est la vitesse de déplacement en m/s ($F_{R0} = 6\,420 \text{ N}$ et $f_r = 955 \text{ N/m/s}$). Établir l'équation différentielle du premier ordre en $v(t)$ et calculer le temps mis par le convoi pour atteindre la vitesse de 110 km/h.

A.3 MODELISATION DES MOTEURS DE TRACTION TAB 674 ET CALCUL DES GRANDEURS ELECTRIQUES.

Le modèle électrique du moteur série est donné à la figure ci-dessous :

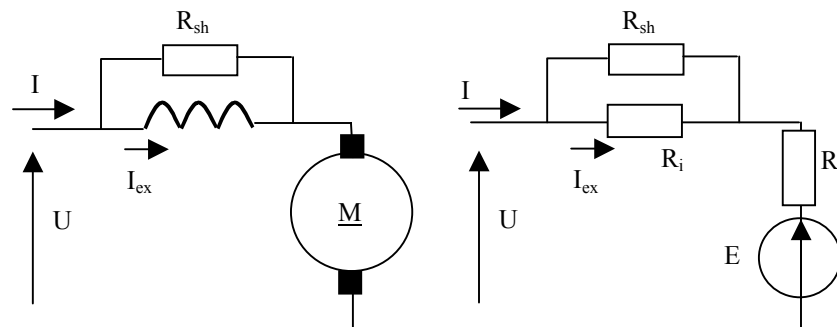


Figure 2 : Modèle électrique du moteur série

R_l est la résistance correspondant au bobinage d'induit et aux pôles auxiliaires.

R_i est la résistance du bobinage inducteur.

R_{sh} est la résistance de shuntage de l'inducteur.

Les grandeurs électriques sont supposées continues.

Les relations entre les grandeurs électriques et mécaniques sont les suivantes :

$$E = \Phi(I_{ex}) \cdot \Omega_M \text{ et } C_{EM} = \Phi(I_{ex}) \cdot I$$

E est la FEM du moteur, C_{EM} est le couple électromagnétique, et $\Phi(I_{ex})$ exprimée en $(V \cdot s/rd)$ est une grandeur proportionnelle au flux d'induction magnétique et fonction du courant d'excitation.

Le couple utile développé par le moteur est tel que $C_u = C_{EM} - C_{fv}$ où C_{fv} est le couple de pertes par frottement et ventilation.

Les pertes fer sont supposées négligeables.

Afin de simplifier les expressions, on appelle k_{sh} le facteur de réduction de l'excitation magnétique ($0 < k_{sh} < 1$) et on pose : $k_{sh} = I_{ex}/I$ et $R = R_l + R_i \cdot k_{sh}$

A-3-1 : En négligeant la saturation du circuit magnétique ($\Phi(I_{ex}) = K \cdot I_{ex}$) :

- Établir l'expression du couple électromagnétique C_{EM} en fonction de I , K et k_{sh} .
- Établir l'expression de C_{EM} en fonction du U , K , k_{sh} , R et Ω_M .
- Donner l'allure des caractéristiques $C_{EM} = f(\Omega_M)$ pour k_{sh} constant et U variable.
- Donner l'allure des caractéristiques $C_{EM} = f(\Omega_M)$ pour U constant et k_{sh} variable.

A-3-2 : Afin de prendre en compte la saturation du circuit magnétique, on a effectué un essai en génératrice à vide en excitation séparée pour une fréquence de rotation $N_M = 700$ tr/mn. La courbe $E = f(I_{ex})$, correspondante est donnée à la figure A-3. Compléter le tableau du document réponse A-2 et tracer ensuite sur le document réponse A-3, les courbes $C_{EM} = f(I)$ pour $k_{sh} = 86,5\%$ et $k_{sh} = 34,4\%$. ($I \leq 2700$ A).

A-3-3 : Afin de déterminer le couple de pertes par frottement et ventilation, on a effectué un essai à vide en moteur série sous faible tension. Dans cet essai les pertes joules dans l'induit, les pôles auxiliaires et l'inducteur sont négligeables. Pour $N_M = 1270$ tr/mn, on a relevé une puissance absorbée P_0 de 46,5 kW. En supposant que $C_{fv} = k_{fv} \cdot \Omega_M$, déterminer la valeur du coefficient k_{fv} .

A-3-4 : Lors de la traction d'une rame de wagons de marchandises de 900 tonnes à 110 km/h et en rampe de 0,88%, chaque moteur tourne à la vitesse de 796 tr/mn et fournit une puissance utile P_u de 1,9 MW. L'excitation du moteur étant à champ maximum ($I_{ex} = 86,5\% I$) :

- Déterminer le couple électromagnétique et en déduire le courant absorbé par le moteur.
- Calculer la valeur de la résistance équivalente R et en déduire la valeur de U .

A-3-5 : Lors de la traction d'une rame de voitures voyageurs de 700 tonnes à 180 km/h et en rampe de 0,3%, chaque moteur tourne à la vitesse de 1300 tr/mn et fournit une puissance utile P_u de 2,07 MW. L'excitation du moteur étant à champ minimum ($I_{ex} = 34,4\% I$) :

- Déterminer le couple électromagnétique et en déduire le courant absorbé par le moteur.
- Calculer la valeur de la résistance équivalente R et en déduire la valeur de U .

A.4 FONCTIONNEMENT EN FREINAGE ELECTRIQUE

Il existe deux modes de freinage électrique :

- **Le mode « normal »**, avec un freinage par récupération où les moteurs fonctionnent alors en excitation séparée conformément au schéma de la figure A-4 (une résistance dite de stabilisation est insérée en série avec l'induit du moteur). Par rapport au mode traction, le courant d'induit ne change pas de sens, et la tension U aux bornes du moteur est négative. Deux zones de fonctionnement sont possibles : Lorsque la vitesse est élevée, le courant d'excitation est diminué pour que la tension U reste égale en valeur absolue à la tension nominale. Pour les vitesses plus basses, lorsque la tension U est inférieure en valeur absolue à la tension nominale, le courant d'excitation est maintenu constant à **- 810 A**.
- **Le mode « secours »**, avec un freinage purement rhéostatique où les moteurs fonctionnent alors en excitation séparée conformément au schéma de la figure A-5. Grâce à un contacteur, deux valeurs du courant d'excitation sont possibles :

$$I_{ex} = - 390 \text{ A et } I_{ex} = - 275 \text{ A.}$$

Dans cette partie, les relations et les éléments du schéma équivalent présentés à la partie A-3 restent valables et le moteur est toujours considéré en convention récepteur.

Dans ces deux modes de fonctionnement, le circuit magnétique des moteurs n'est pas saturé et on a donc $\Phi(I_{ex}) = K \cdot I_{ex}$ avec $K = 20,3 \cdot 10^{-3} \text{ V.s/A}$.

Résistance insérée dans le circuit d'induit: $R_F = 343 \text{ m}\Omega$.

Résistance de la bobine de lissage : $R_L = 14 \text{ m}\Omega$.

Les grandeurs U , I , I_{ex} sont supposées continues, on note $\langle U_1 \rangle$ la valeur moyenne de la tension délivrée par le convertisseur CS1 et on pose $R' = R_F + R_I + R_L$.

A-4-1 : Donner les schémas électriques équivalents au circuit de l'induit du moteur dans le cas du freinage par récupération et dans le cas du freinage rhéostatique ($\langle U_1 \rangle = 0$).

A-4-2 : Établir en fonction de $\langle U_1 \rangle$, R' , K , I_{ex} et Ω_M l'expression du couple électromagnétique C_{EM} .

A-4-3 : Donner l'allure des caractéristiques $C_{EM} = f(\Omega_M)$ à tension $\langle U_1 \rangle$ variable et I_{ex} constant.

A-4-4 : Donner l'allure des caractéristiques $C_{EM} = f(\Omega_M)$ à tension $\langle U_1 \rangle$ constante et I_{ex} variable.

A-4-5 : Donner l'allure de la caractéristique $C_{EM} = f(\Omega_M)$ dans le cas du freinage rhéostatique.

A-4-6 : Dans une descente de pente -1%, la locomotive maintient à la vitesse de 110 km/h une rame composée de 14 wagons de marchandises de type G10. La résistance à l'avancement du convoi, F_R est identique à celle calculée dans la partie A-1. Déterminer, compte tenu de la pente et de la masse du train, l'effort total à la jante F_j développé par la locomotive.

A-4-7 : Calculer pour un moteur, la vitesse de rotation Ω_M , la puissance utile P_u , le couple utile C_u , puis le couple électromagnétique C_{EM} . ($C_{fv} = 219 \text{ Nm}$ à $V = 110 \text{ km/h}$).

A-4-8 : Dans le cas du freinage par récupération, avec $i_{ex} = -810 \text{ A}$, calculer le courant absorbé par le moteur, la tension U aux bornes de l'induit et la tension $\langle U_1 \rangle$ délivrée par le convertisseur statique. Déterminer ensuite la puissance renvoyée au niveau du convertisseur statique ainsi que la puissance dissipée dans la résistance de stabilisation R_F .

A-4-9 : Dans le cas d'un freinage rhéostatique (mode secours), calculer le couple électromagnétique disponible pour $V = 110 \text{ km/h}$ sachant que le courant d'excitation est de 275 A. Déterminer ensuite l'effort total à la jante disponible. Ce mode freinage permet-il de freiner le convoi dans les conditions décrites à la question A-4-6 ? Quelle doit être la part du freinage pneumatique pour maintenir le convoi à 110 km/h ?

B ETUDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

B.1 ETUDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES CS1 ET CS2 EN CONSIDERANT LES SOURCES IDEALES.

Les structures de base des convertisseurs statiques CS1 et CS2, connectés en série lors du fonctionnement en mode traction, sont données à la figure B1. Les secondaires des transformateurs sont considérés ici comme des sources de tension idéale telle que :

$$v_{e1} = v_{e2} = V\sqrt{2}.\sin(\omega.t)$$

Le courant de sortie I est supposé continu ($L \rightarrow \infty$) et constant.

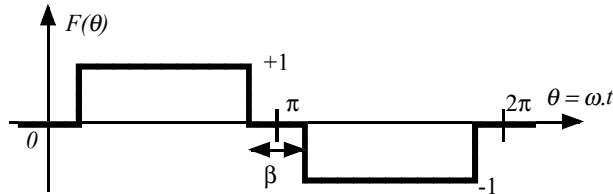


Figure 3 : signal F(t)

B-1-1 : Établir la décomposition en série Fourier du signal F(t) de la figure 3.

B-1-2 : Les interrupteurs du convertisseur CS1 sont commandés de façon à ce que le courant $i_{e1}(t)$ ait l'allure suivante :

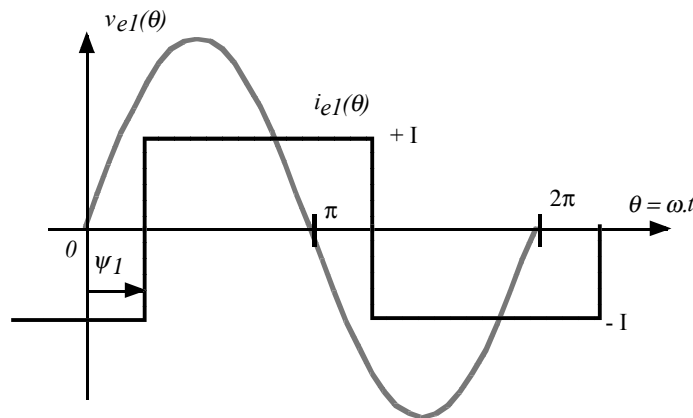


Figure 4 : Courant d'entrée du convertisseur statique CS1

Le décalage de $i_{e1}(\theta)$ par rapport à $v_{e1}(\theta)$ est noté ψ_1 . La commande des interrupteurs permet de régler ψ_1 entre 0° et 180° .

Compléter le document réponse B-1 :

- Indiquer les séquences de conduction des interrupteurs.
- Tracer l'allure de $U_1(\theta)$.
- Tracer l'allure de la tension aux bornes des interrupteurs.
- Indiquer, dans le plan (i_k, v_k) la trajectoire du point de fonctionnement de chaque interrupteur.

En vous aidant de la figure B-2, préciser quel est le type d'interrupteurs à utiliser pour réaliser le convertisseur CS1.

B-1-3 : A partir du tracé de $U_1(\theta)$, établir en fonction de ψ_1 et V, l'expression de $\langle U_1 \rangle$, valeur moyenne de $U_1(\theta)$.

B-1-4 : En utilisant le résultat de la décomposition spectrale du B-1-1, montrer que le fondamental du courant d'entrée du convertisseur peut s'exprimer par :

$$i_{e1f}(t) = \frac{4}{\pi} I \cdot \sin(\omega.t - \psi_1)$$

Donner, du point de vue de l'entrée du convertisseur CS1, les expressions de la puissance active P_1 , de la puissance réactive Q_1 , de la puissance apparente S_1 et du facteur de puissance F_{p1} .

Tracer la courbe $Q_1 = f(P_1)$ pour $0^\circ < \psi_1 < 180^\circ$. Ce convertisseur est-il réversible en puissance ?

B-1-5 : La commande des interrupteurs du convertisseur CS2 fait apparaître deux phases de roue libre par période et le courant $i_{e2}(t)$ a l'allure suivante :

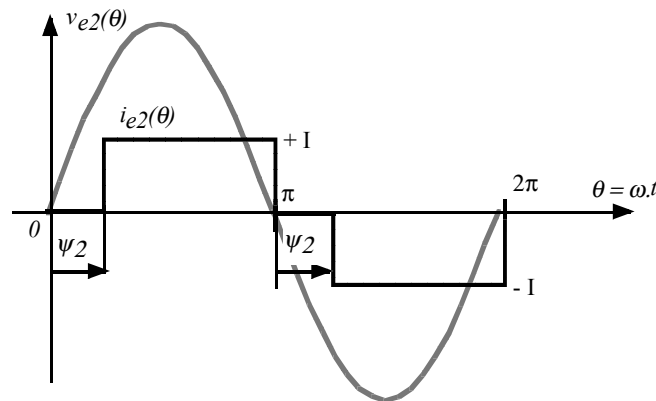


Figure 5 : Courant d'entrée du convertisseur statique CS2

L'angle de roue libre est noté ψ_2 et la commande des interrupteurs permet de régler ψ_2 entre 0° et 180° .

Compléter le document réponse B-2 :

- Indiquer les séquences de conduction des interrupteurs).
- Tracer l'allure de $U_2(\square)$.
- Tracer l'allure de la tension aux bornes des interrupteurs.
- Indiquer, dans le plan (i_k, v_k) la trajectoire du point de fonctionnement de chaque interrupteur.

En vous aidant de la figure B2, préciser quel est le type d'interrupteurs à utiliser pour réaliser le convertisseur CS2.

B-1-6 : A partir du tracé de $U_2(\square)$, établir en fonction de ψ_2 et V , l'expression de $\langle U_2 \rangle$, valeur moyenne de $U_2(t)$.

B-1-7 : En utilisant le résultat de la décomposition spectrale du B-1-1, montrer que le fondamental du courant d'entrée du convertisseur peut s'exprimer par :

$$i_{e2f}(t) = \frac{4}{\pi} I \cdot \cos\left(\frac{\psi_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega.t - \frac{\psi_2}{2}\right)$$

Donner, du point de vue de l'entrée du convertisseur CS2, les expressions de la puissance active P_2 , de la puissance réactive Q_2 , de la puissance apparente S_2 et du facteur de puissance F_{p2} .

Tracer la courbe $Q_2 = f(P_2)$ pour $0^\circ < \psi_1 < 180^\circ$. Ce convertisseur est-il réversible en puissance ?

B-1-8 : En pratique, la commande des convertisseurs est successive.

Pour une tension de sortie moyenne $\langle U_s \rangle$ comprise entre 0 et $\frac{2\sqrt{2}}{\pi}V$, le réglage de la tension s'effectue en agissant sur l'angle ψ_1 , l'angle ψ_2 étant fixé à 180° (roue libre permanente).

Pour une tension de sortie moyenne $\langle U_s \rangle$ comprise entre $\frac{2\sqrt{2}}{\pi}V$ et $\frac{4\sqrt{2}}{\pi}V$, le réglage de la tension s'effectue en agissant sur l'angle ψ_2 , l'angle ψ_1 étant fixé à 0° (pleine onde).

On pose $P = P_1 + P_2$ et $Q = Q_1 + Q_2$.

Sur le document réponse B-3, tracer dans le plan (Q, P) l'évolution du point de fonctionnement du convertisseur pour une tension moyenne de sortie comprise entre 0 et $\frac{4\sqrt{2}}{\pi}V$

B-1-9 : Lors du fonctionnement à ψ_2 variable et $\psi_1 = 0^\circ$, compléter le document réponse B-3 en traçant la tension $U_s(t)$ et le courant $i_e(t) = i_{e1} + i_{e2}$.

Établir, en fonction de I et de ψ_2 , l'expression de la valeur efficace I_{eEFF} du courant $i_e(t)$.

B-1-10 : On définit le facteur de puissance total $F_p = \frac{P}{V \cdot I_{eEFF}}$.

Suivant les zones de fonctionnement décrites au B-1-8, établir son expression en fonction de ψ_1 ou ψ_2 . Calculer les valeurs particulières de F_p pour $\psi_2 = 0^\circ, 30^\circ, 140^\circ$ et 180° ($\psi_1 = 0^\circ$).

Pour chacune de ces valeurs de ψ_2 , calculer aussi le rapport $\frac{P}{P_{max}} = \frac{P}{\frac{4\sqrt{2}}{\pi} V \cdot I}$

Tracer sur le document réponse B-3, l'allure de F_p en fonction de (P/P_{max}) .

B.2 JUSTIFICATION DU CHOIX DES SEMI-CONDUCTEURS DES CONVERTISSEURS CS1 ET CS2

L'analyse du fonctionnement des convertisseurs CS1 et CS2, fait apparaître deux types d'interrupteurs : des diodes et des thyristors. Chaque interrupteur est en fait constitué d'une association de plusieurs semi-conducteurs conformément à la figure 6 (on suppose une répartition équitable des courants entre les semi-conducteurs).

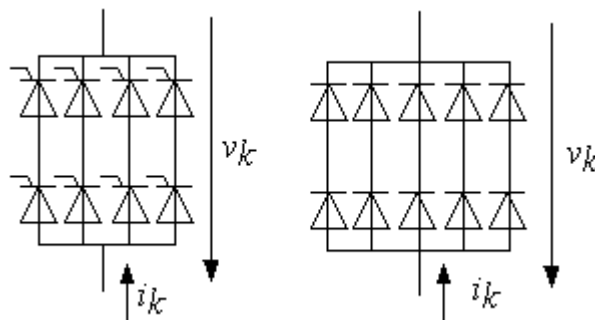


Figure 6 : Réalisation des interrupteurs de type thyristor et de type diode.

Les caractéristiques des semi-conducteurs sont données dans le tableau T2. Les composants sont en boîtier pressé et refroidis sur les deux faces par des dissipateurs à ventilation forcée.

La valeur efficace de la tension aux secondaires du transformateur de traction est de 950 V.

Dans le cas le plus contraignant, au démarrage de la locomotive, le courant I est de 2 600 A, les diodes conduisent pendant 360° et les thyristors pendant 180° .

B-2-1 : Justifier, par rapport aux calibres tension et courant, le choix des diodes R 720 18 et des thyristors T 720 18.

B-2-2 : Calculer la puissance dissipée dans chaque semi-conducteur.

B-2-3 : Sachant que la température de l'air peut atteindre 40°C , justifier le choix du dispositif de refroidissement des semi-conducteurs.

B-2-4 : La protection des semi-conducteurs est assurée par des réseaux RC connectés en parallèle et par des fusibles montés en série sur chaque branche :

- Quel est le rôle des circuits RC ?
- Quel type de fusible utilise-t-on pour la protection de ces semi-conducteurs ? Préciser les critères de choix de ces fusibles ?
- Est-il nécessaire ici d'ajouter des inductances de limitation du di/dt à l'amorçage en série avec les thyristors ?

B.3 CALCUL DE L'ONDULATION DU COURANT I(T)

Le courant $I(t)$ est lissé par une bobine dont l'inductance $L_L = 4$ mH. L'inductance totale du moteur L_M (induit + pôles auxiliaires + inducteur) est de 3 mH. On pose $L = L_L + L_M$ et les résistances du circuit sont négligées. Le schéma équivalent du circuit est alors le suivant :

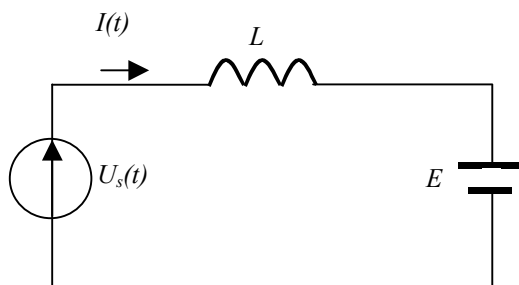


Figure 7 : Modèle utilisé pour le calcul de l'ondulation de courant.

$U_s(t)$ est la tension délivrée par les convertisseurs CS1 et CS2 (cf B-1) et E est la FEM du moteur.

B-3-1 : Au démarrage de la locomotive, la valeur moyenne du courant I est de 2 600 A. La FEM du moteur est nulle et les angles de commande de CS1 et CS2 sont tels que $\psi_1 \cong 90^\circ$ et $\psi_2 = 180^\circ$. Tracer alors l'allure de $U_s(t)$ et $I(t)$, puis établir l'expression de l'ondulation de courant ΔI en fonction de V , L et ω . Calculer ΔI sachant que la valeur efficace V de la tension sur chaque secondaire du transformateur est de 950 V.

B-3-2 : Au point de fonctionnement nominal, les angles de commande ψ_1 et ψ_2 sont tous les deux égaux à 0° et la valeur moyenne du courant I est de 2 600 A. Que peut-on dire de la FEM E et de la valeur moyenne de $U_s(t)$? Tracer l'allure de $U_s(t)$ et de $I(t)$ et établir l'expression de ΔI . Calculer ΔI avec $V = 950$ V.

B.4 PRISE EN COMPTE DE L'IMPEDANCE INTERNE DU TRANSFORMATEUR DE TRACTION.

Le modèle du transformateur de traction est donné à la figure 8. Dans ce modèle, les pertes fer sont supposées négligeables et les impédances de chaque secondaire sont supposées identiques.

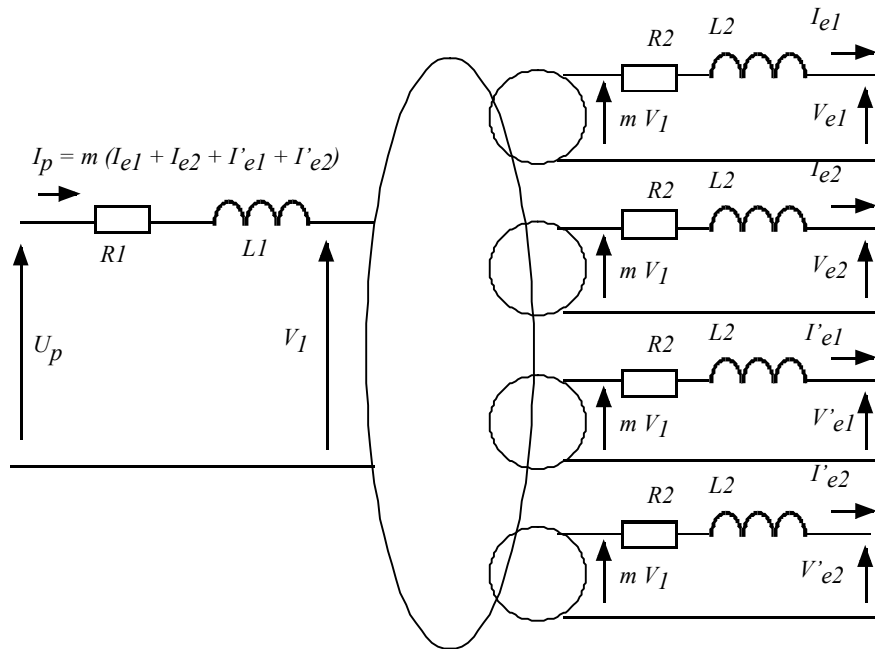


Figure 8 : modèle du transformateur de traction.

Pour déterminer les éléments du modèle on a effectué les essais suivants :

- Mesure en continu de la résistance d'un enroulement secondaire : 5 mΩ.
- Mesure en continu de la résistance de l'enroulement primaire: 0,75 Ω.
- Essai à vide : $U_p = 25 \text{ kV}$, $V_{e1} = V_{e2} = V'_{e1} = V'_{e2} = 950 \text{ V}$
- Essai en court-circuit avec deux secondaires en série (les autres secondaires étant ouverts) : $U_{pcc} = 2\,812 \text{ V}$ et $I_{e1cc} = I_{e2cc} = 1\,550 \text{ A}$.
- Essai en court circuit sur un seul secondaire (les autres secondaires étant ouverts) : $U_{pcc} = 1\,812 \text{ V}$ et $I_{e1cc} = 1\,550 \text{ A}$.

On pose $\underline{Z1} = R1 + j.L1\omega$ et $\underline{Z2} = R2 + j.L2\omega$

B-4-1 : Établir l'expression du courant de court-circuit I_{pcc} en fonction de U_{pcc} , $\underline{Z1}$, m et $\underline{Z2}$ pour les deux essais en court-circuit.

B-4-2 : Calculer les valeurs des inductances de fuite L2 et L1.

B-4-3 : Préciser les éléments du modèle de Thévenin vu des bornes d'un secondaire du transformateur lorsque les quatre courants I_{e1} , I_{e2} , I'_{e1} et I'_{e2} sont identiques.

Lors du fonctionnement au point nominal, les convertisseurs statiques fonctionnent comme des ponts redresseurs à diodes ($\psi_1 = \psi_2 = 0^\circ$) et le courant I est de 1 500 A. Le schéma équivalent pour un des convertisseurs est le suivant (la résistance des enroulements est négligée et $m.V_p(t) = V\sqrt{2}.\sin \omega.t$) :

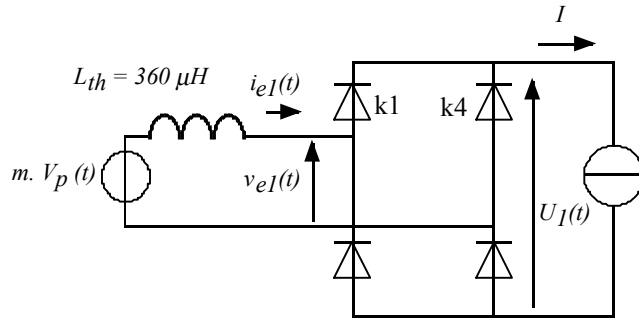


Figure 9 : Schéma équivalent pour l'étude de la commutation

B-4-4 : Lors d'une commutation des interrupteurs au passage par zéro de la tension, établir l'expression du courant $i_{e1}(t)$. Tracer l'allure du courant dans les interrupteurs k1 et k4 au moment d'une commutation.

B-4-5 : A partir de l'expression de $i_{e1}(t)$, établir l'expression de l'angle électrique δ correspondant à la durée de la commutation.

B-4-6 : Tracer l'allure de la tension $U_1(t)$ sur une période réseau. Compte tenu de l'angle δ , établir l'expression de la valeur moyenne de $U_1(t)$ en fonction de V , L_{th} , ω et I . Effectuer l'application numérique.

B.5 AMELIORATION DU FACTEUR DE PUISSANCE.

Lors de la phase de démarrage de la locomotive, la tension aux bornes du moteur est réglée par action sur l'angle ψ_1 ; l'angle ψ_2 est lui maintenu à 180° . Dans cette phase de fonctionnement, le facteur de puissance à l'entrée du convertisseur CS1 n'est pas satisfaisant (cf partie B-1). Afin d'améliorer le facteur de puissance, des filtres passifs « shunt » peuvent être connectés à l'entrée du convertisseur CS1 conformément à la figure 10.

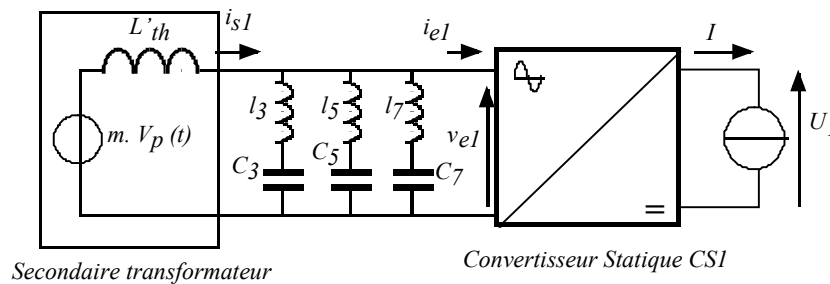


Figure 10 : Filtres passifs shunts associés au convertisseur CS1.

Les valeurs des éléments sont les suivantes :

$$L'_{th} = 220 \mu H$$

$$l_3 = 1 mH ; C_3 = 1 mF.$$

$$l_5 = 750 \mu H, C_5 = 550 \mu F$$

$$l_7 = 390 \mu H, C_7 = 550 \mu F$$

La tension à vide au secondaire du transformateur est telle que :

$$m.V_p(t) = V\sqrt{2}.\sin \omega.t \text{ avec } V = 950 \text{ V.}$$

B-5-1 : En considérant le circuit de la figure ci dessous, établir l'expression de l'impédance complexe \underline{Z}_f du filtre shunt. Tracer l'évolution de l'argument de \underline{Z}_f en fonction de ω .

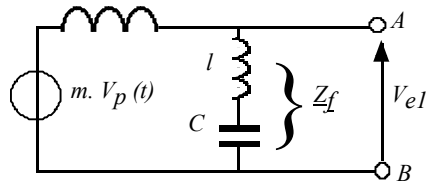


Figure 11 : Circuit avec un seul filtre passif

En supposant que $V_{e1}(t) \cong m.V_p(t)$, montrer que la puissance réactive au niveau du filtre shunt à $\omega = 314$ rd/s est telle que :

$$Q_f = -\frac{V^2 C \omega}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \text{ où } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\omega_0 > \omega).$$

B-5-2 : En considérant toujours le circuit de la figure 11, établir l'expression de l'impédance interne Z_i du modèle de Thévenin vu des bornes A et B.

Que vaut cette impédance lorsque $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ et $\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{(L+L'_{th}).C}}$?

Donner l'expression simplifiée de cette impédance lorsque $\omega \ll 0$, $\omega \gg \infty$.

Tracer l'allure de $|Z_i| = f(\omega)$ en précisant les asymptotes et les points particuliers.

B-5-3 : Expliquer le rôle des filtres shunt et indiquer quels sont les problèmes posés par leur mise en œuvre.

On considère maintenant, le point de fonctionnement à $I = 1\,900$ A et $\psi_1 = 50^\circ$. Les filtres passifs sont associés au convertisseur CS1 conformément à la figure 10. On suppose que $V_{e1}(t) \cong m.V_p(t)$ et que les filtres passifs éliminent les harmoniques de rang 3, 5 et 7.

B-5-4 : Calculer la puissance active et la puissance réactive consommées par le convertisseur CS1.

B-5-5 : Calculer la puissance réactive fournie par chaque filtre passif.

B-5-6 : Sachant que $\sum_{k=4}^{\infty} \frac{1}{(2.k+1)^2} = 62,2.10^{-3}$, calculer la puissance déformante D vue par le secondaire du transformateur.

B-5-7 : A partir du bilan des puissances active, réactive et déformante, calculer le facteur de puissance au niveau du secondaire du transformateur.

B.6 ETUDE DE L'ASSERVISSEMENT DU COURANT D'INDUIT DES MOTEURS DE TRACTION.

Pour étudier l'asservissement du courant d'induit des moteurs de traction, on considère le circuit électrique de la figure 12. (On s'intéresse aux évolutions de $\langle U_s \rangle$ en fonction du temps).

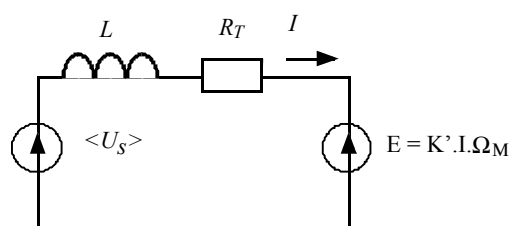


Figure 12 : Schéma électrique équivalent du circuit d'induit des moteurs de traction.

$\langle U_s \rangle$ représente la tension moyenne délivrée par les convertisseurs CS1 et CS2.

E est la FEM du moteur, supposée proportionnelle au courant I et à la vitesse de rotation Ω_M .
 $R_T = 37 \text{ m}\Omega$, $L = 7 \text{ mH}$ et $K' = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ V.s/A}$.

Le schéma bloc de l'asservissement de courant est le suivant :

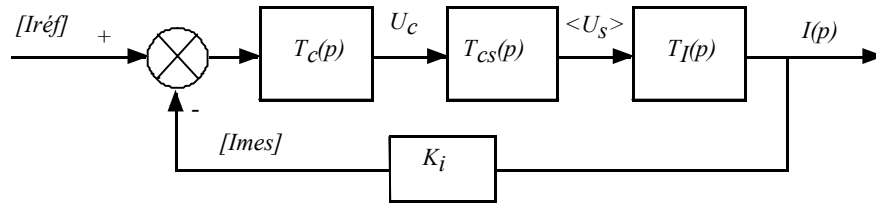


Figure 13 : Schéma bloc de l'asservissement du courant d'induit.

$[I_{ref}]$ est la grandeur consigne de courant.

K_i est le gain du capteur de courant : $I = 3000 \text{ A} \square [I_{mes}] = 10 \text{ V}$.

U_c est la tension de commande des convertisseurs CS1 et CS2.

La fonction de transfert des convertisseurs statiques est telle que : $T_{cs}(p) = K_0 \cdot e^{-\tau p}$
 avec $K_0 = 100$ et $\tau = 10 \text{ ms}$.

La fonction de transfert du correcteur est telle que : $T_c(p) = K_c \cdot \frac{1 + \tau_c p}{\tau_c p}$

La détermination de la fonction de transfert $T_I(p)$ s'effectue en supposant que la vitesse de rotation des moteurs Ω_M est constante.

B-6-1 : A partir du circuit de la figure 12, établir l'expression de la fonction de transfert $T_I(p)$.

B-6-2 : Pour déterminer le gain statique et la constante de temps du correcteur, on considère le point de fonctionnement à $\Omega_M = 0 \text{ rd/s}$ et la résistance du circuit d'induit R_T est négligée.

En précisant la méthode utilisée, déterminer une valeur de K_c et τ_c de sorte que la marge de phase du système en boucle ouverte soit de 60° . Tracer l'allure du diagramme de Bode (gain et phase) correspondant.

Quelle est alors la bande passante de la boucle de courant ? Est-ce suffisant ?

C TRAVAIL PEDAGOGIQUE

Vous avez à votre disposition un banc de machine 1,5 kW, équipé d'un moteur à courant continu à excitation indépendante, d'un volant d'inertie de 1 m²kg et d'un ventilateur qui impose un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse. La configuration très simplifiée de ce banc permet uniquement de simuler la résistance à l'avancement du train. Elle ne permet pas de prendre en compte l'évolution du profil de la voie et la problématique du contact roue/rail.

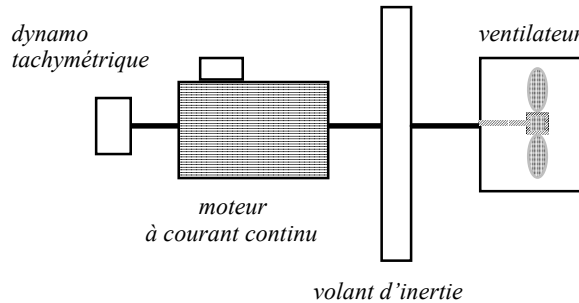


Figure 14 : Schéma structurel du banc de machines utilisé

Pour alimenter l'induit de la machine à courant continu, vous avez à votre disposition une bobine de lissage du courant, un pont monophasé tous thyristors ou un pont mixte diodes / thyristors. Chaque pont est muni d'une carte de commande qui peut être utilisée en boucle ouverte (contrôle direct de la tension de sortie) ou en boucle fermée (contrôle du courant de sortie). Un hacheur quatre quadrants permet de régler le courant de l'inducteur de la machine à courant continu.

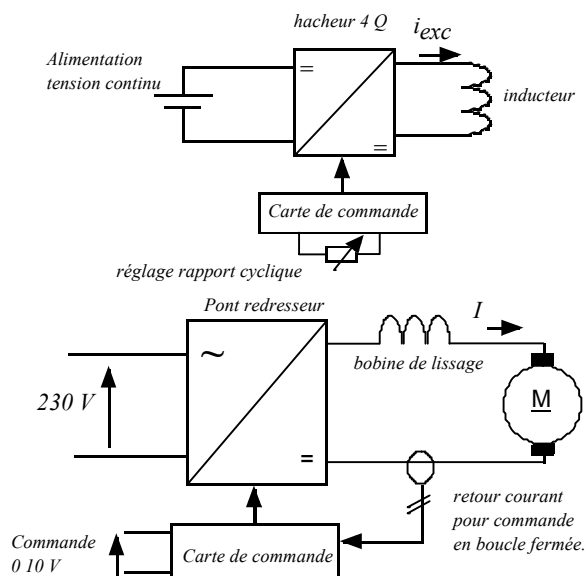


Figure 15 : Alimentation de la machine à courant continu.

Un circuit LC série accordé sur le 150 Hz est également à votre disposition.

C.1 QUESTIONS PRELIMINAIRES.

C-1-1 : Préciser quel doit être le mode de contrôle (boucle ouverte ou boucle fermée) du pont redresseur alimentant la machine. Justifiez votre réponse.

C-1-2 : L'inducteur de la machine étant alimenté par le hacheur, indiquer comment obtenir le freinage de la machine à courant continu lorsque l'induit est alimenté par le pont tout thyristors. Le freinage est-il possible si l'induit est alimenté par le pont mixte ?

C-1-3 : Préciser pour chaque quadrant de fonctionnement les signes de la tension d'induit, du courant d'induit et du courant d'excitation.

C.2 ELABORATION D'UN EXERCICE D'EVALUATION.

C-2-1 : On demande d'utiliser l'équipement décrit ci-dessus pour élaborer un exercice destiné à des étudiants de 2^{ème} année de BTS Électrotechnique et présentant les techniques de correction du facteur de puissance pour les équipements de forte puissance ($P \square 1 \text{ MW}$).

Établir un document qui précisera :

- Les objectifs de l'exercice.**
- Le texte d'évaluation accompagné des réponses attendues.**

Locomotive BB 15000



Bogie équipé du moteur TAB 674



moteur TAB 674

Limites de fonctionnement sous 25 kV 50 Hz

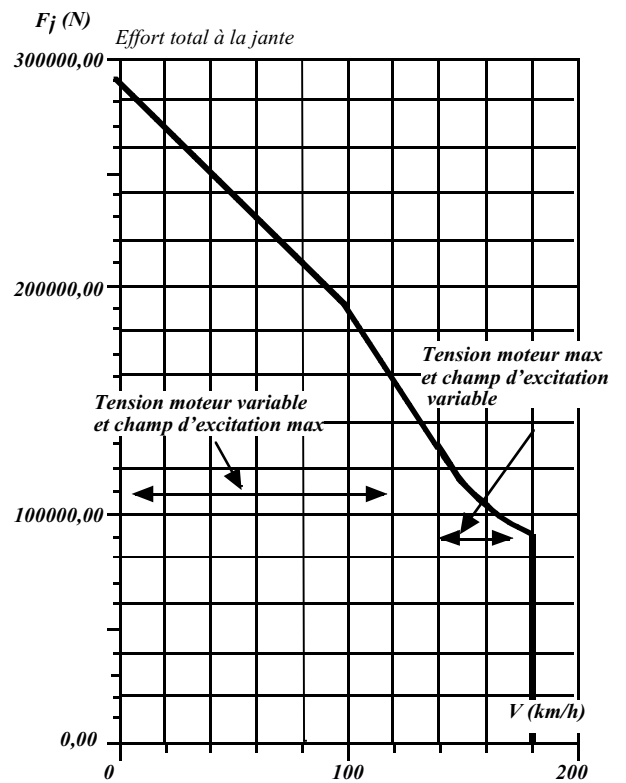


Schéma électrique simplifié en traction

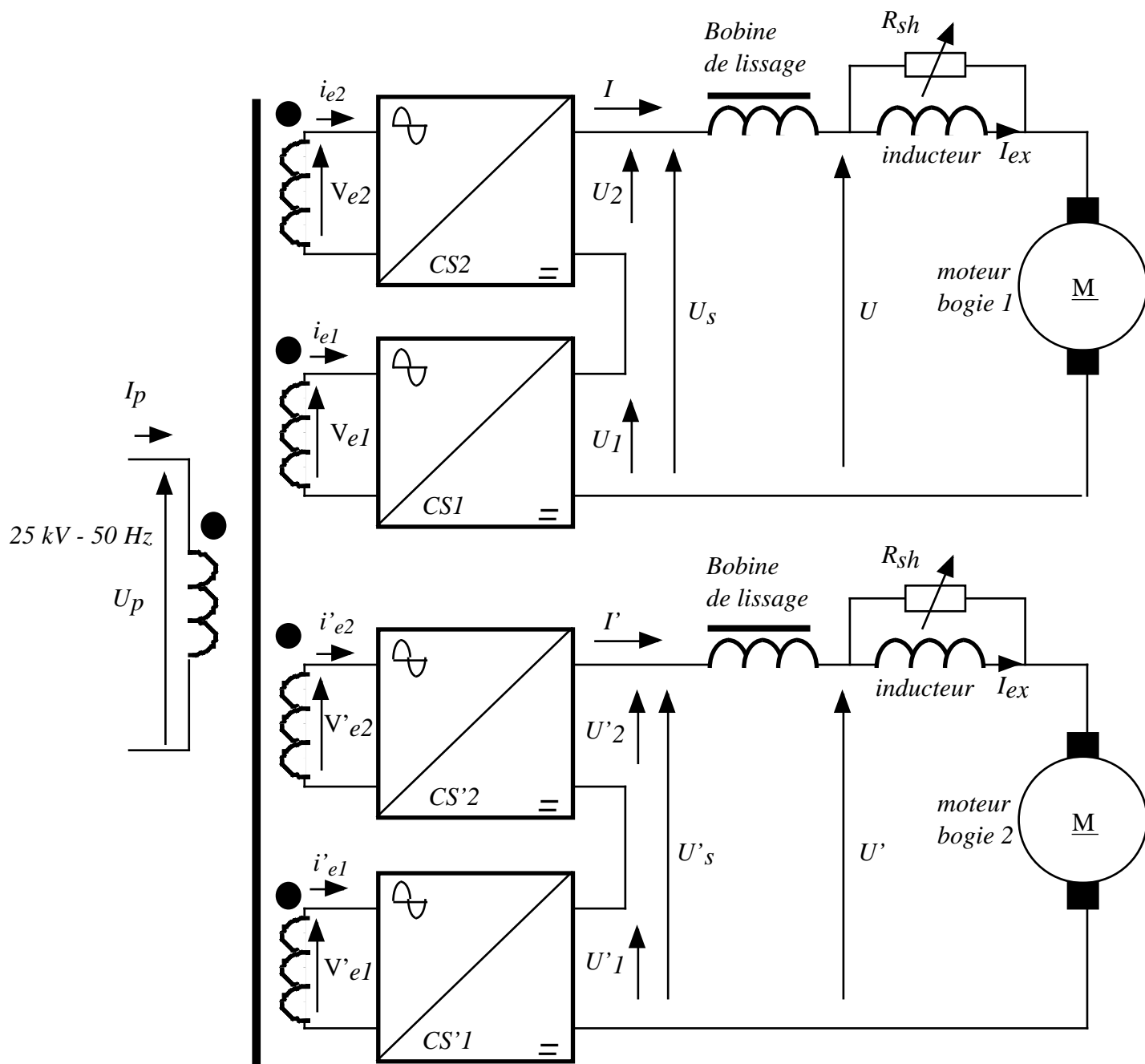


FIGURE A-2

Moteur ALSTHOM TAB 674 : essai en génératrice à vide

N=700 tr/mn

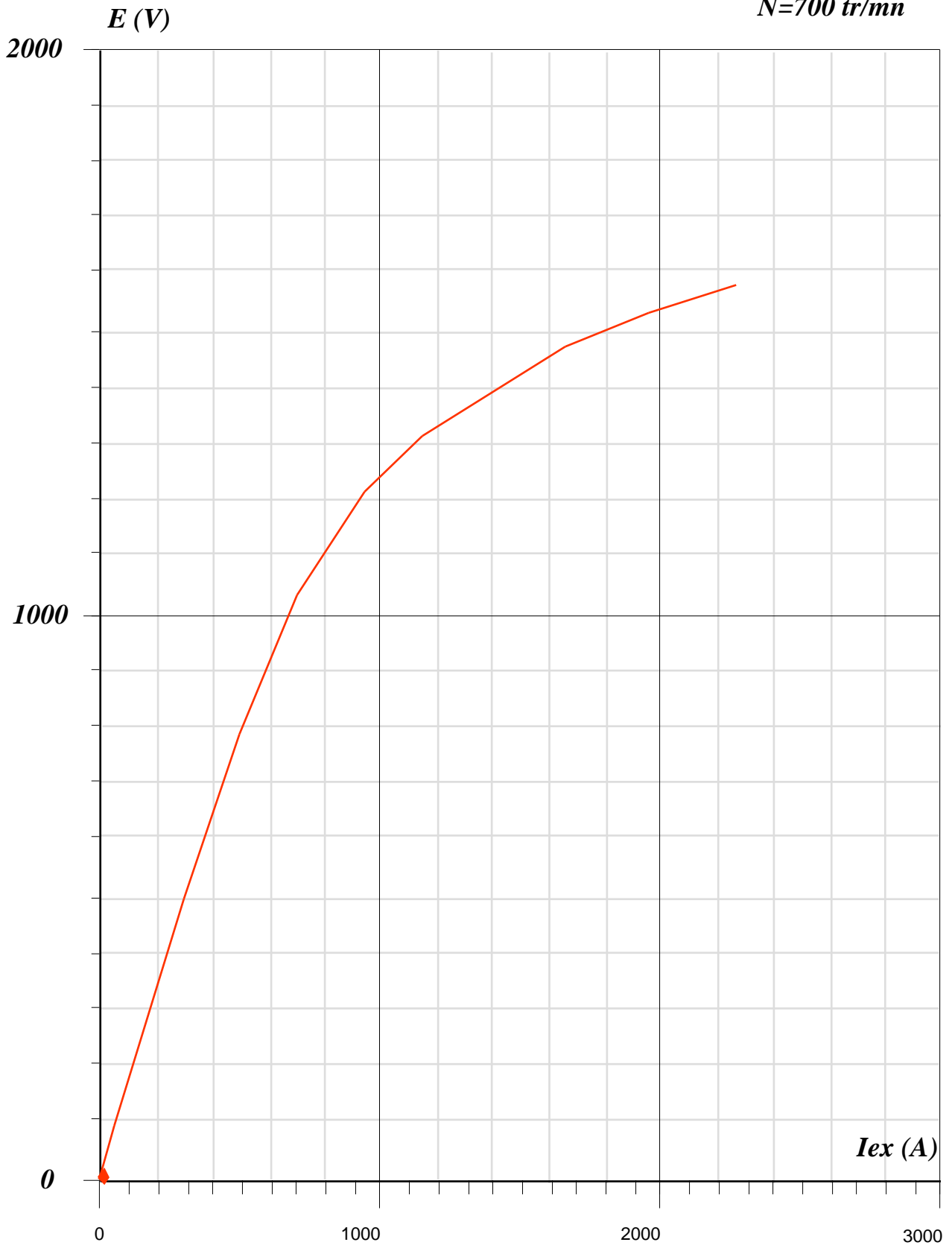


FIGURE A-3

Schéma électrique simplifié en freinage par récupération

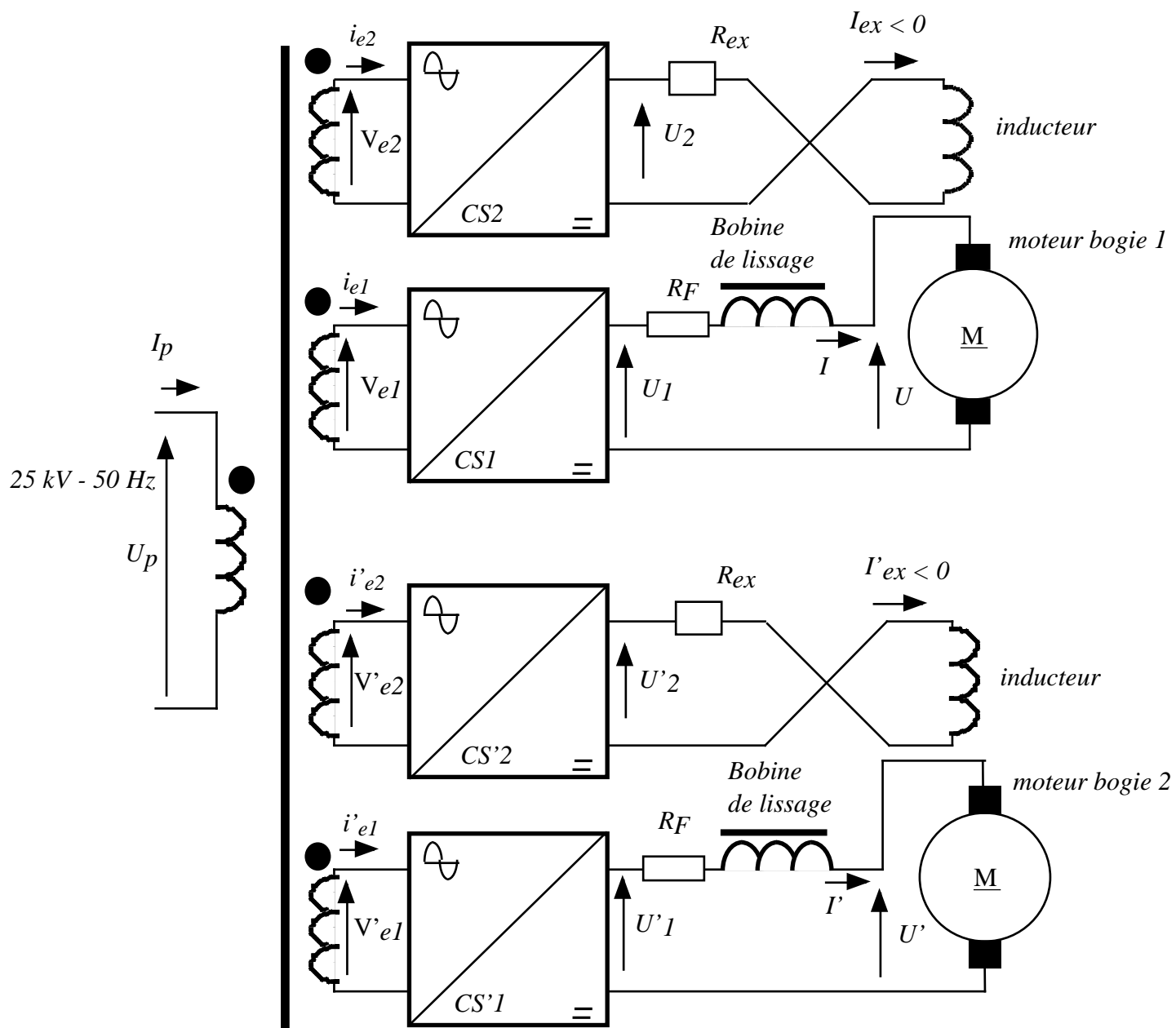


FIGURE A-4

Schéma électrique simplifié en freinage rhéostatique

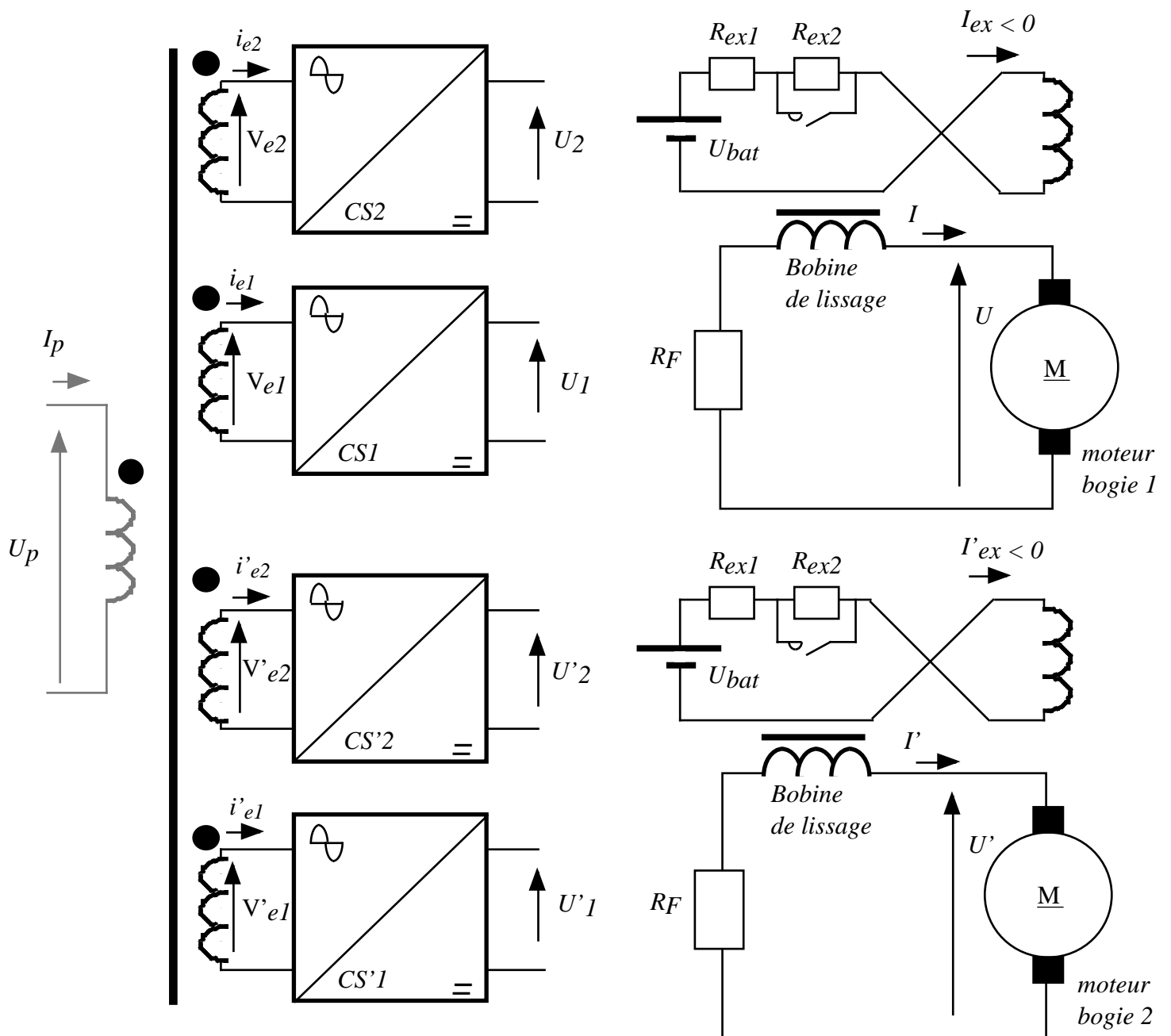


FIGURE A-5

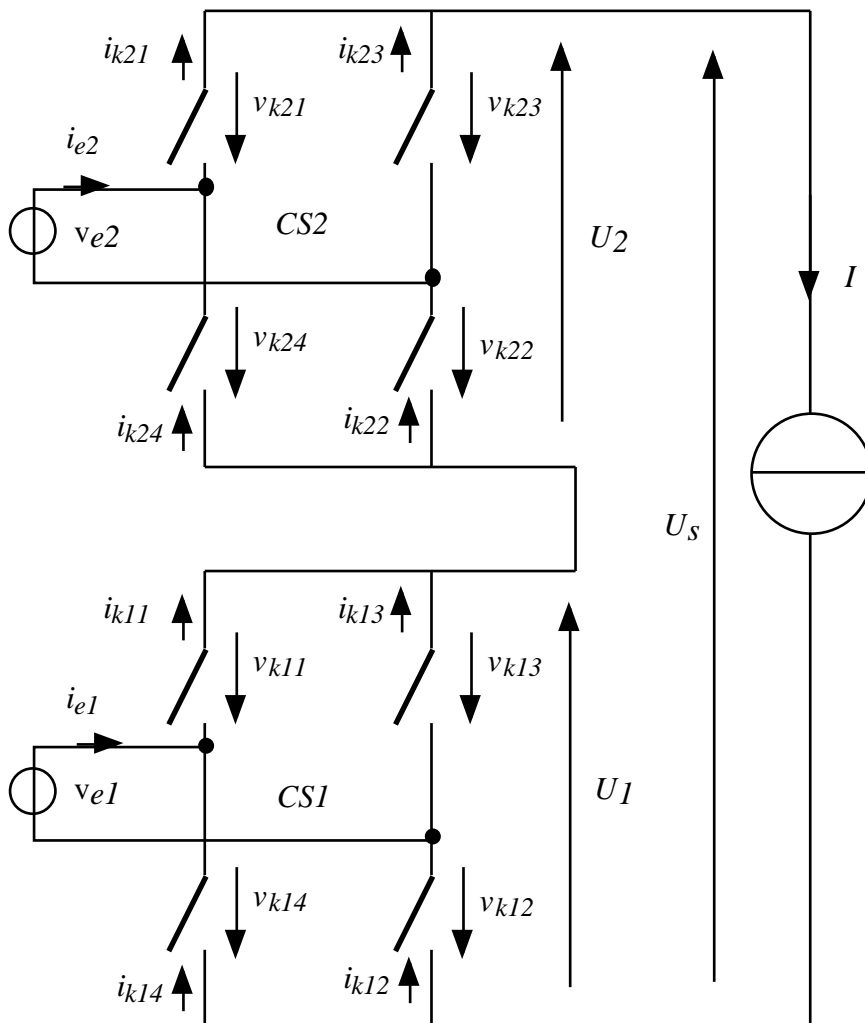
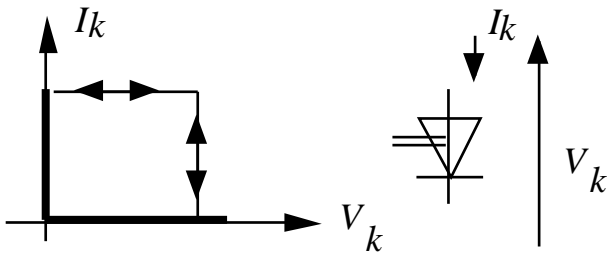


FIGURE B1 : STRUCTURE DE BASE DES CONVERTISSEURS CS1 ET CS2

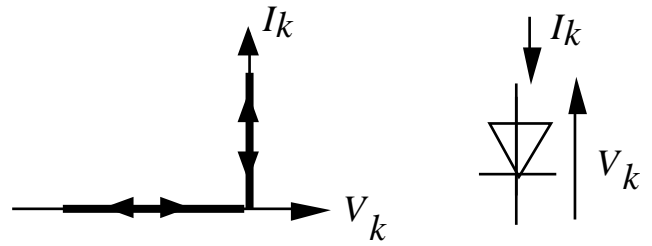
Interrupteurs à deux segments

Segments de mêmes signes, commande à l'amorçage et au blocage



Fonction Transistor

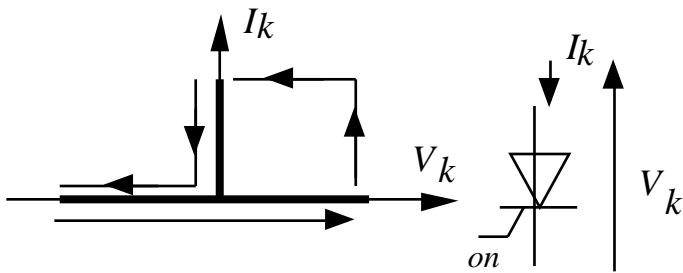
Segments de signes contraires amorçage spontané au zéro de tension et blocage spontané au zéro de courant



Diode

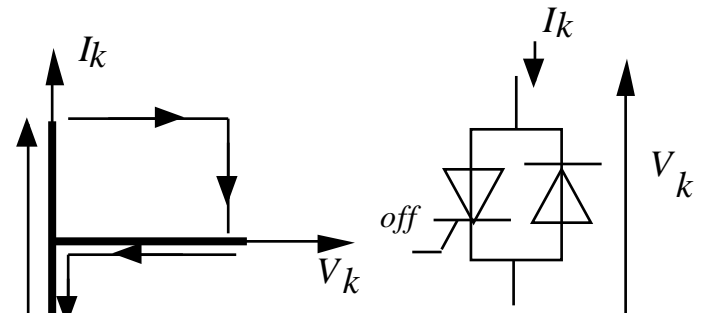
Interrupteurs à trois segments

Bidirectionnel en tension à amorçage commandé et blocage spontané au zéro de courant



Fonction Thyristor

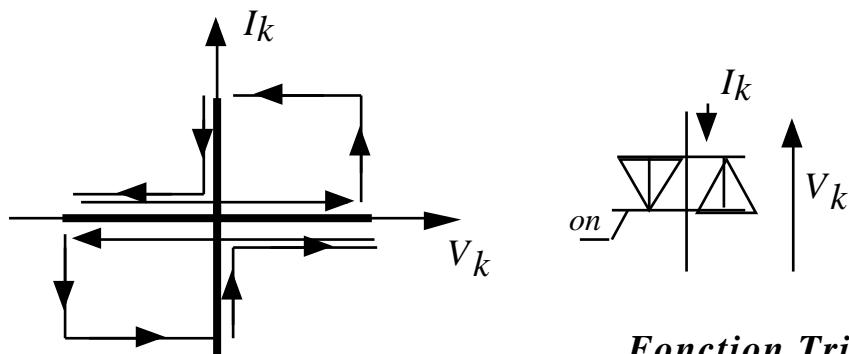
Bidirectionnel en courant à blocage commandé et amorçage spontané au zéro de tension



Fonction Thyristor-dual

Interrupteurs à quatre segments

Amorçage commandé et blocage spontané au zéro de courant



Fonction Triac

**FIGURE B-2 : INTERRUPTEURS STATIQUES ;
EXEMPLES DE CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES**

Moteur ALSTHOM TAB 674

<i>Nombre de pôles</i>	8
<i>Masse du stator</i>	4100 kg
<i>Masse de l'induit</i>	3000 kg
<i>Ventilation</i>	auto ventilé (138 m ³ /mn à 1300 tr/mn)
<i>Moment d'inertie du rotor</i>	370 m ² kg
<i>résistance du bobinage d'induit à 115°c</i>	0,0096
<i>résistance du bobinage des pôles auxiliaires à 115°c</i>	0,0086
<i>résistance totale induit + pôles auxiliaires à 115°c</i>	0,0182
<i>résistance du bobinage inducteur à 115°c</i>	0,0055

Caractéristiques nominales en service continu

<i>Champ maxi (86,5%)</i>	<i>Champ mini (34,4%)</i>
U = 1500 V	U = 1500 V
I = 1350 A	I = 1500 A
N = 790 tr/mn	N = 1300 tr/mn
Pu = 1925 kW	Pu = 2100 kW

Caractéristiques des diodes et des thyristors

Thyristor T 720 18 $t_{j\ max} = 125\ ^\circ\text{C}$

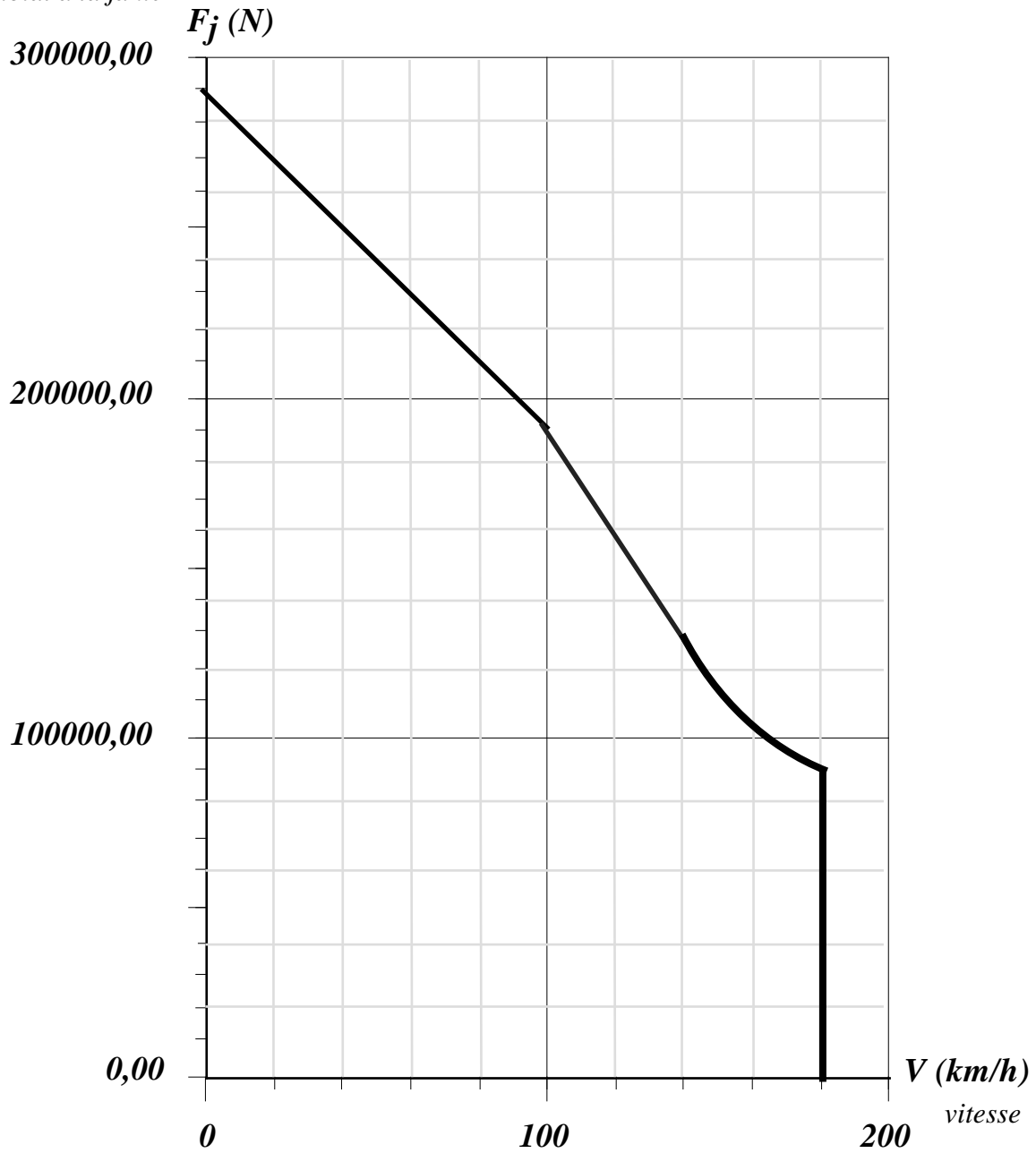
repetitive peak reverse voltage VRRM	1800 V
repetitive peak direct voltage VDRM	1800 V
mean forward current IT AVG (tcase = 70°C)	450 A
Surge Forward Current ITSM	4,6k A
threshold voltage VT0	0,9V
slope resistance Rt	750 μ
Résistance thermique jonction-air pour un refroidissement sur deux faces avec dissipateurs ventilés (Vf = 7,5 m/s) Rthja	0,13°C/w

Diode R 720 18 $t_{j\ max} = 150\ ^\circ\text{C}$

repetitive peak reverse voltage VRRM	1800 V
mean forward current IF AVG (tcase = 95°C)	600 A
Surge Forward Current ITSM	6,9 kA
threshold voltage VT0	0,8 V
slope resistance Rt	350 μ
Résistance thermique jonction-air pour un refroidissement sur deux faces avec dissipateurs ventilés (Vf = 7,5 m/s) Rthja	0,13°C/w

BB 15000 : Limites de fonctionnement en traction sous 25 kV 50 Hz

Effort total à la jante

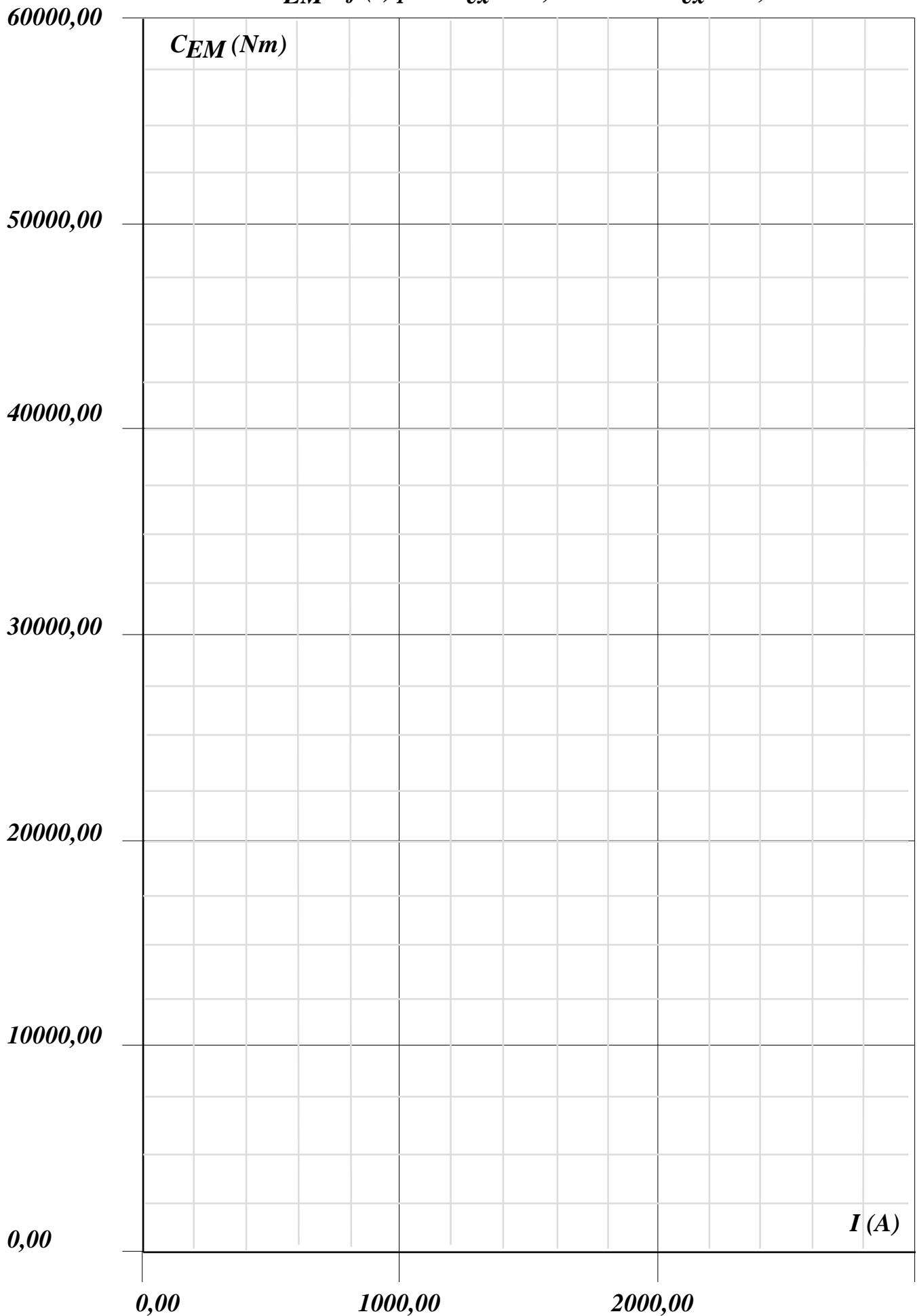


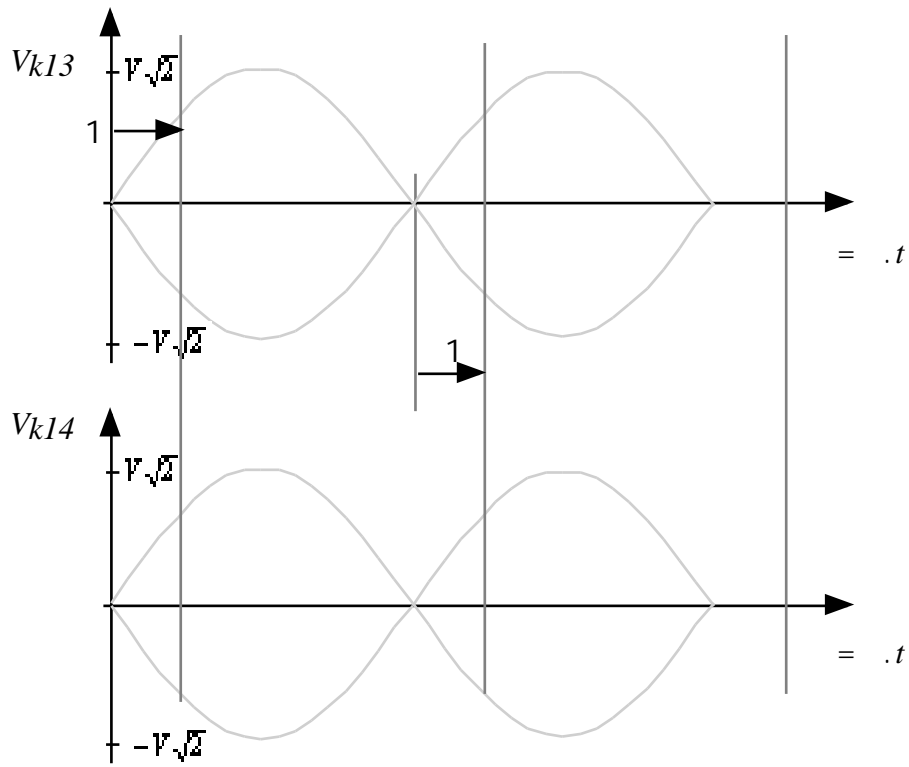
Modélisation du moteur TAB 674 : Couple électromagnétique en fonction du courant d'induit I

I _{ex} (A)	E(V)	(I _{ex}) (V.s/rd)		$I = \frac{I_{ex}}{86,5\%}$ (A)	CEM (Nm)		$I = \frac{I_{ex}}{34,4\%}$ (A)	CEM (Nm)
0	13,1							
50	101							
300	500							
500	790							
700	1040							
940	1215							
1144	1320							
1656	1480							
1948	1540							
2264	1580							

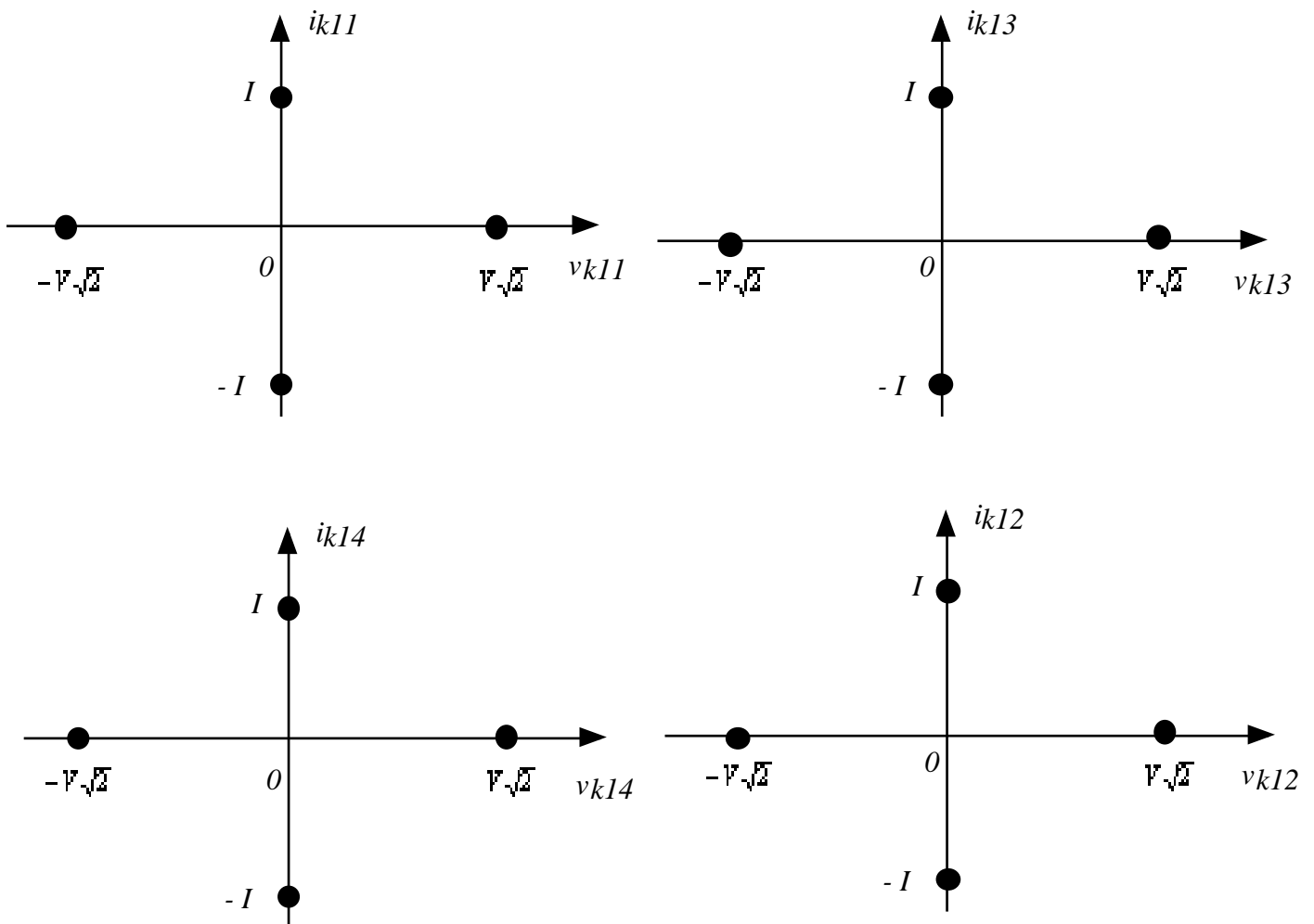
Modélisation du moteur TAB 674 :

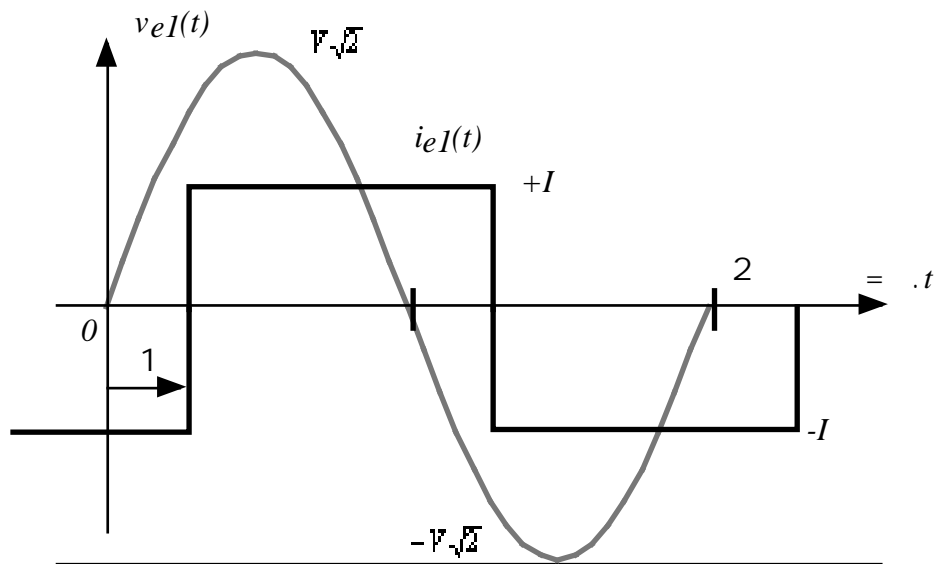
$C_{EM} = f(I)$ pour $I_{ex} = 86,5 \% \text{ de } I$ et $I_{ex} = 34,4 \% \text{ de } I$





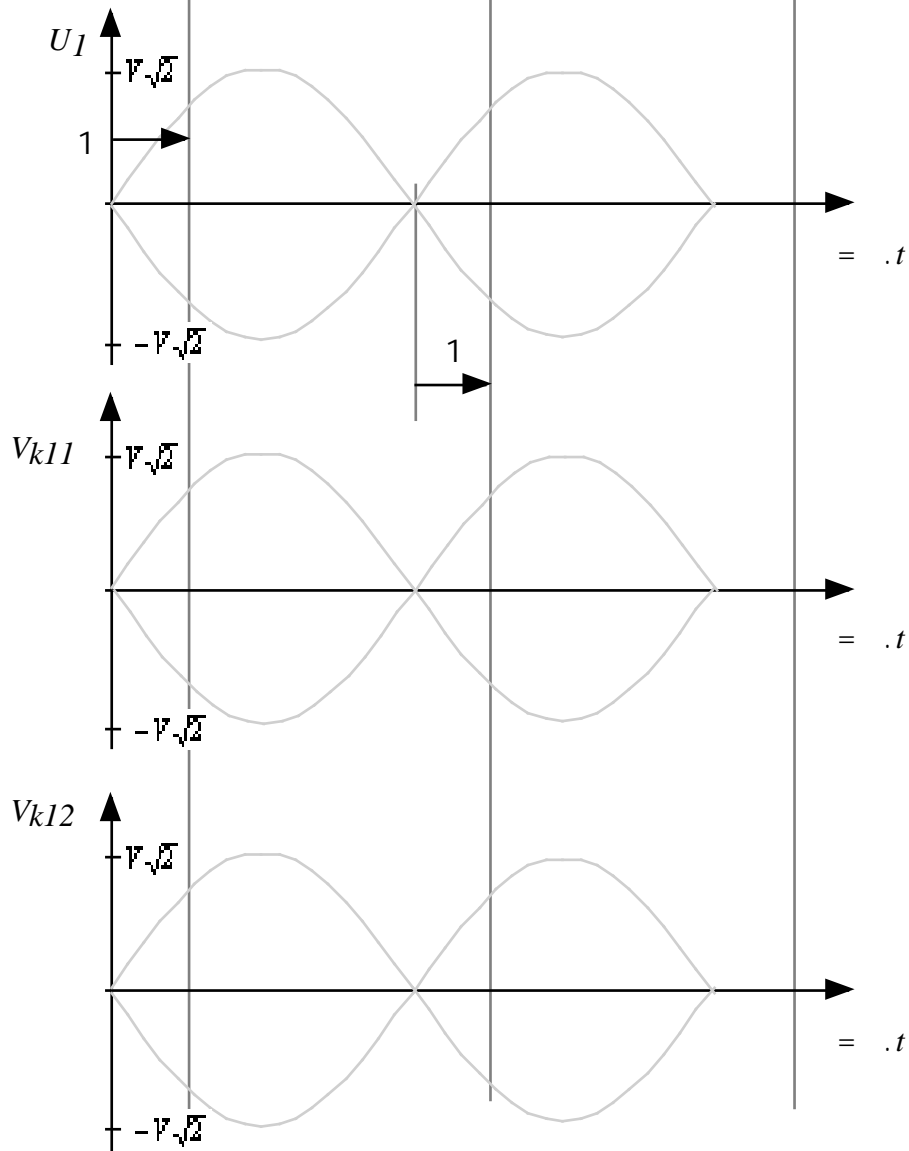
Cycle de fonctionnement des interrupteurs :

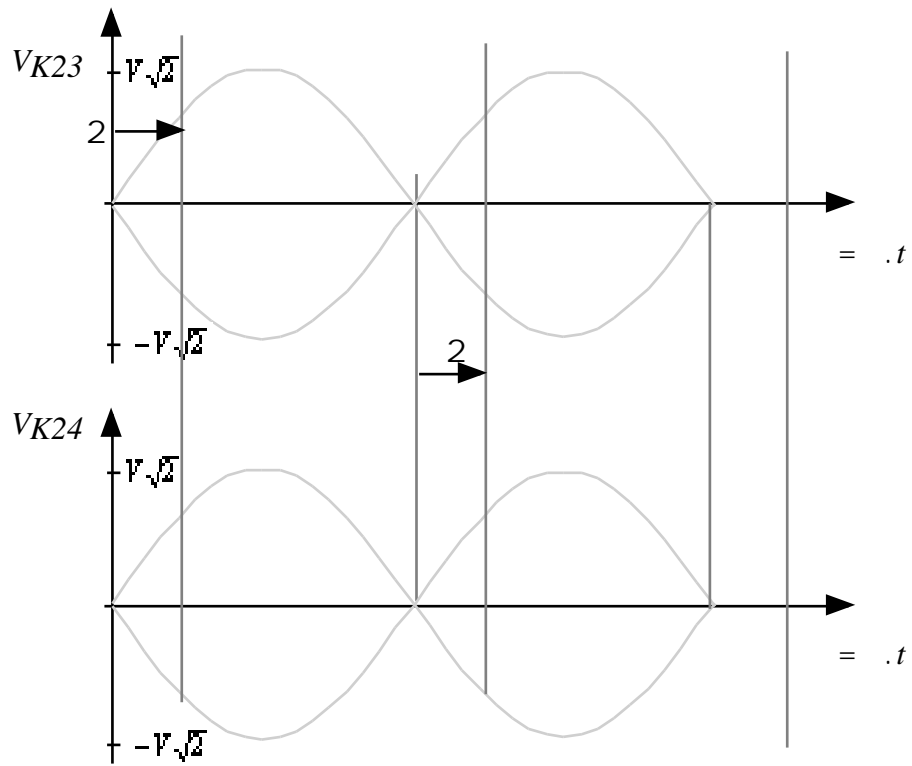




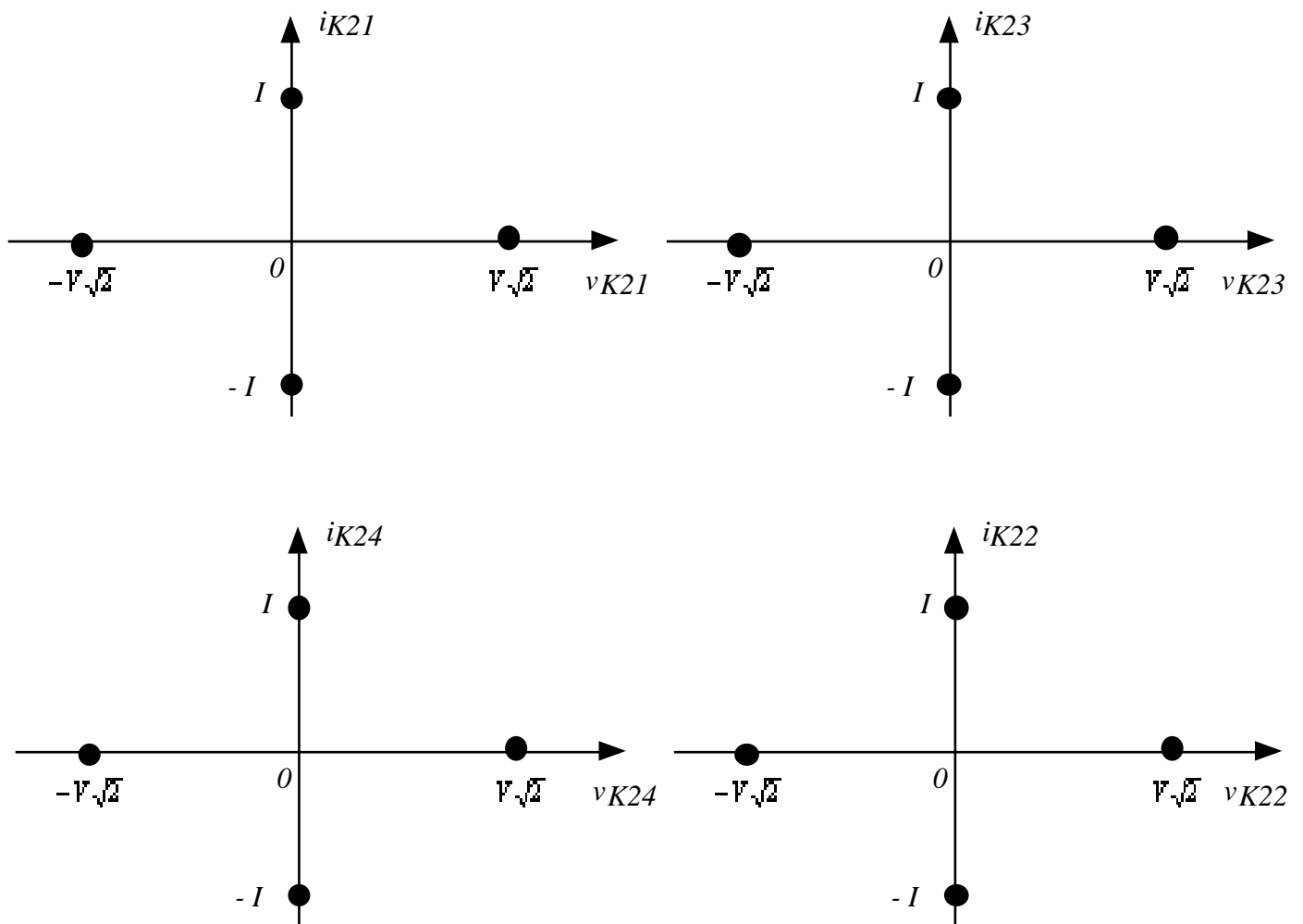
K_{11}			
K_{12}			
K_{13}			
K_{14}			

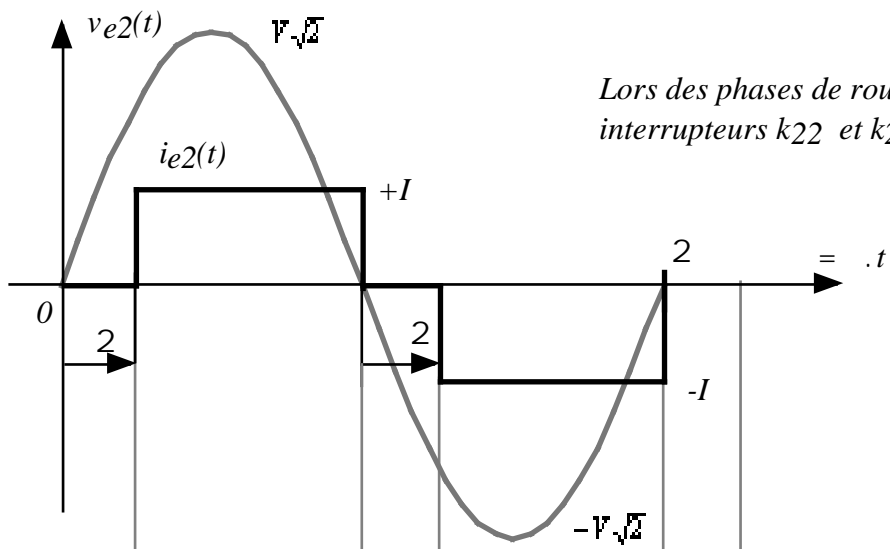
Séquences de fermeture des interrupteurs



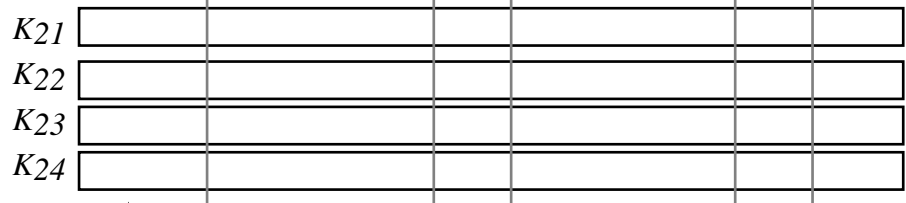


Cycle de fonctionnement des interrupteurs :

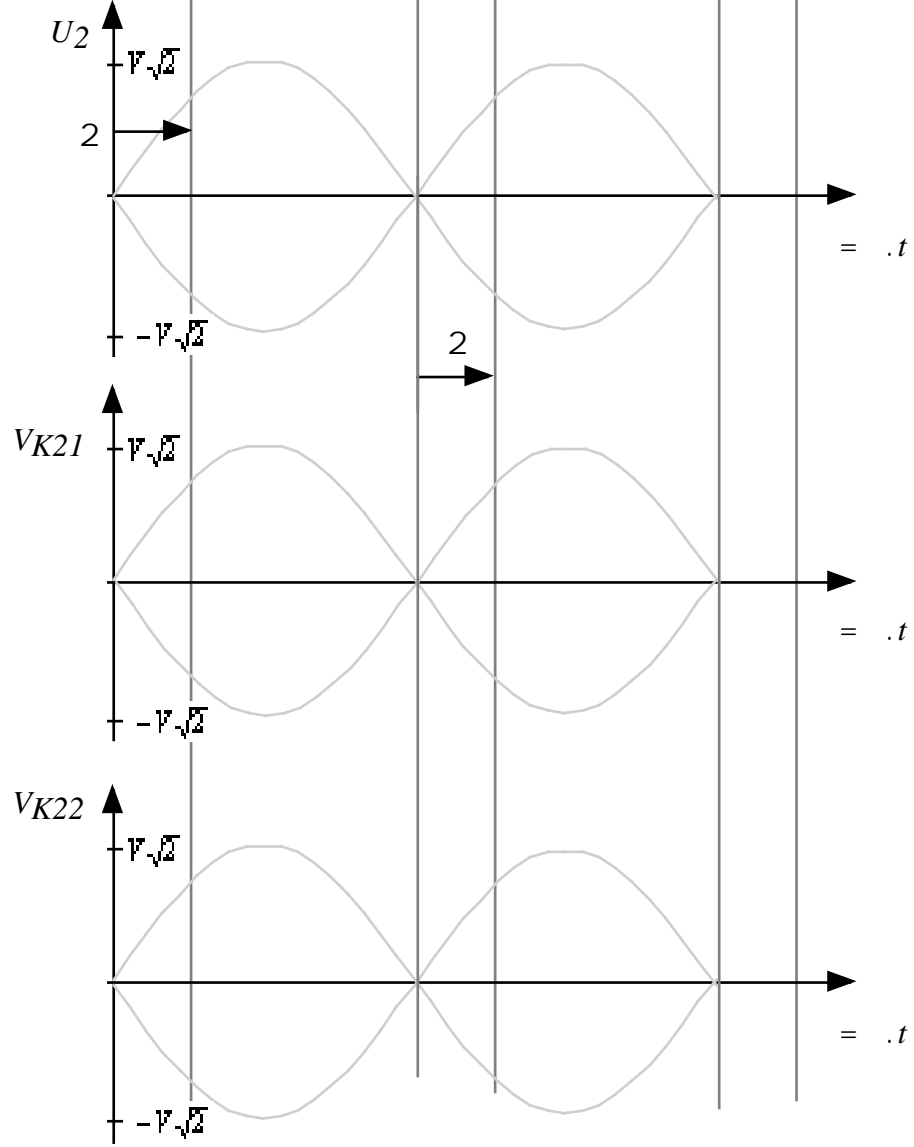


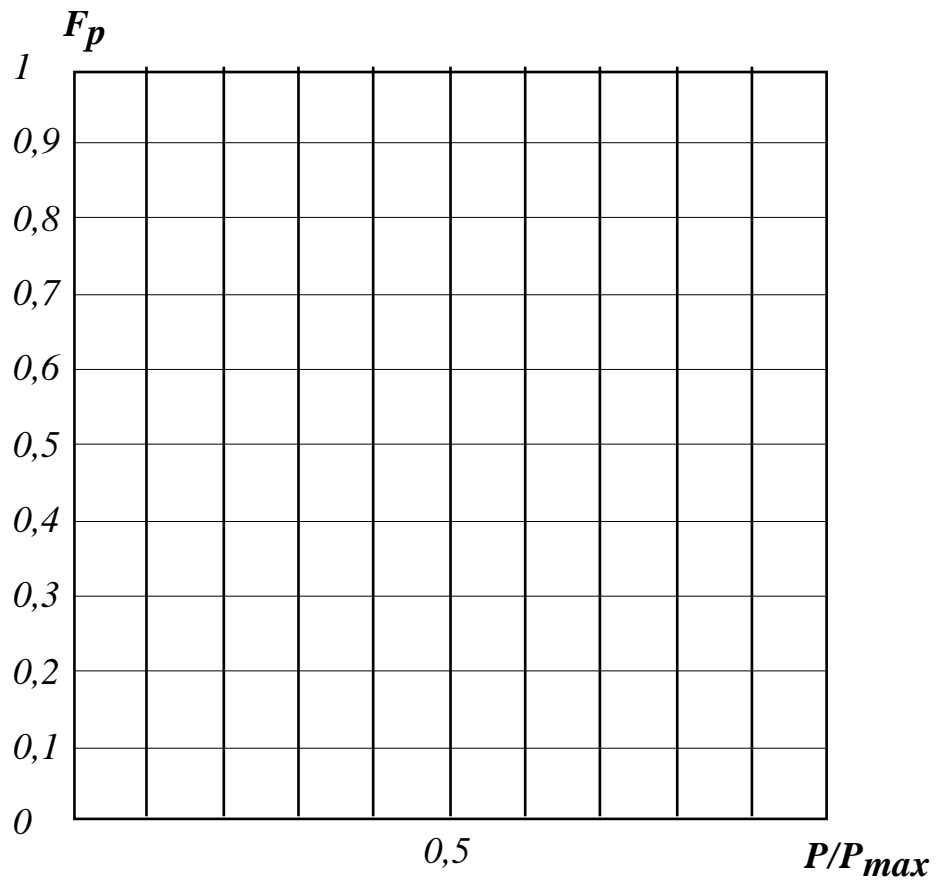
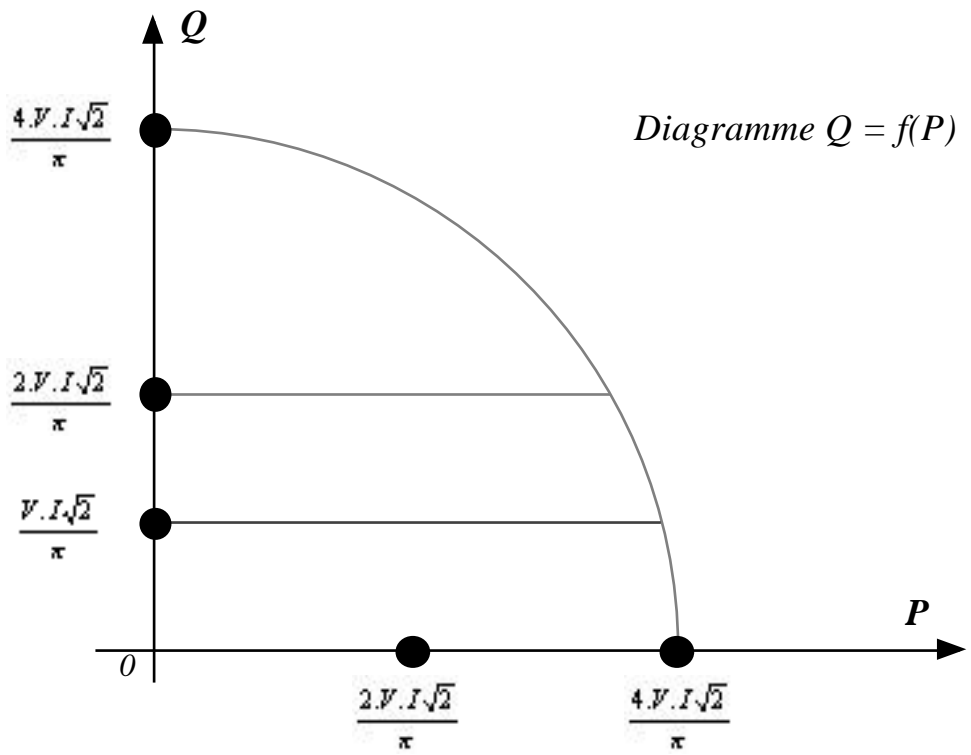


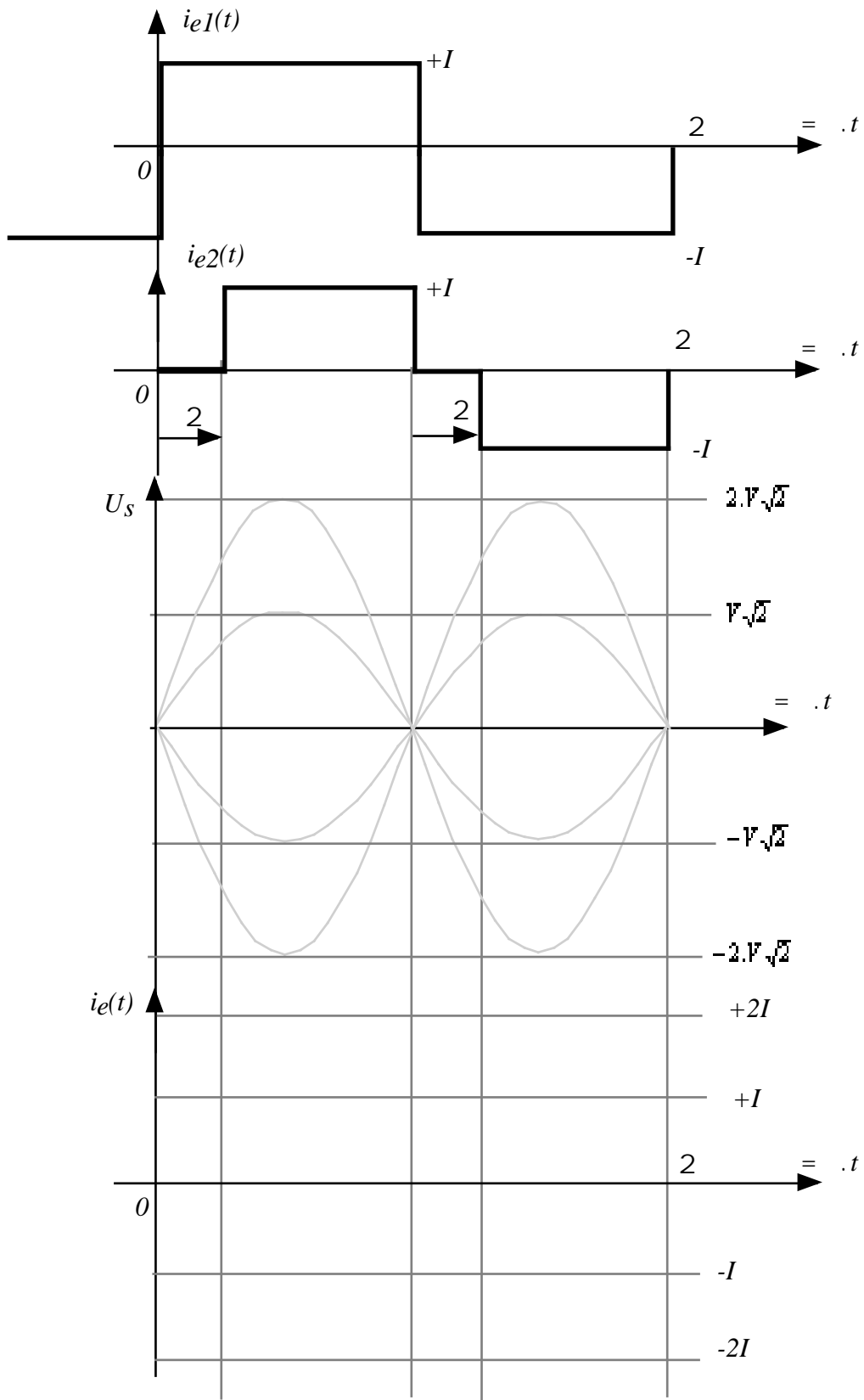
Lors des phases de roue libre, ce sont les interrupteurs k_{22} et k_{23} qui sont fermés



Séquences de fermeture des interrupteurs







AGRÉGATION INTERNE DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ELECTROTECHNIQUE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Étude d'un système industriel

MOTRICE BB 15000
Corrigé

Partie A Etude de la motorisation

A.1.1 :

Projection sur l'axe x. : $F_j = M.g.\sin\alpha + F_R$

A.1.2 : $\Omega_M = v.\frac{2\rho_r}{D_r}$

A.1.3 :

Puissance totale à la jante : $P_j = F_j.v$

Puissance utile pour un moteur : $P_u = \frac{F_j.v}{2\eta_r}$

A.1.4 : $F_{RL} = 12422N$ pour $V = 180$ km/h ; $F_{RL} = 5709N$ pour $V = 110$ km/h .

A-1-5 : $F_{RV} = 3756N$ pour $V = 180$ km/h ; $F_{RVT} = 45072N$ pour $V = 180$ km/h .

A-1-6 : $F_{RW} = 2136N$ pour $V = 110$ km/h ; $F_{RWT} = 29914N$ pour $V = 110$ km/h .

A-1-7 :

Train de voyageurs	Train de marchandises
$V = 180$ km/h ; $\sin\alpha = 0,3\%$	$V = 110$ km/h ; $\sin\alpha = 0,88\%$
$M = M_L + 12M_V = 733$ tonnes	$M = M_L + 14M_W = 985$ tonnes
$M.g.\sin\alpha = 22749N$	$M.g.\sin\alpha = 85033N$
$F_{RVT} = 45072N$	$F_{RWT} = 29914N$
$F_{RL} = 12422N$	$F_{RL} = 5709N$
$F_j = 80243N$	$F_j = 120656N$

A-1-8 :

$V = 180$ km/h ; $v = 50$ m/s	$V = 110$ km/h ; $v = 30,5$ m/s
$\Omega_M = 136,5$ rd/s	$\Omega_M = 83,4$ rd/s
$P_u = 2,068$ MW	$P_u = 1,9$ MW

Moteur TAB 674 :

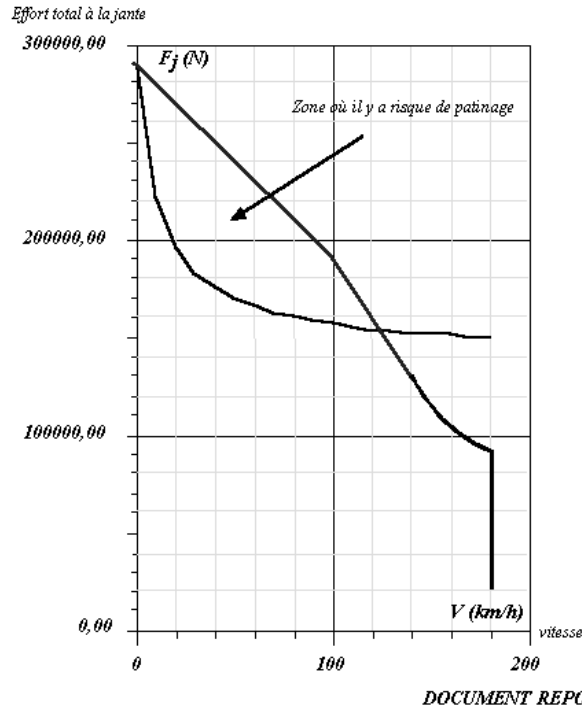
Champ maxi : $P_u = 1\,925$ kW ; $\Omega_M = 82,73$ rd/s

Champ mini : $P_u = 2\,100$ kW ; $\Omega_M = 136,13$ rd/s

Ce qui est quasi identique aux résultats du tableau ci-dessus.

A-2-1 :

BB 15000 : Limites de fonctionnement en traction sous 25 kV 50 Hz



Pour éviter le patinage, il faut diminuer l'effort de traction (action du conducteur ou dispositif automatique) « sabler » la voie.

A-2-2 :

$$\Omega_M = v \cdot \frac{2\rho_r}{D_r}$$

$$\frac{1}{2} M_L^* \cdot v^2 = \frac{1}{2} (M_L \cdot v^2 + 2 \cdot J_M \left(\frac{2\rho_r}{D_r}\right)^2 \cdot v^2)$$

D'où : $M_L^* = M_L + 2 \cdot J_M \left(\frac{2\rho_r}{D_r}\right)^2$

$M_L = 89000 \text{ kg}$

$M_L^* = 94518 \text{ kg}$ d'où : $\frac{M_L^*}{M_L} = 1,06$

A-2-3 :

$M = 985 \text{ tonnes}$

$$F_j - M \cdot g \cdot \sin \alpha - F_R = M^* \cdot a$$

$F_j = 155 \text{ kN}$; $M \cdot g \cdot \sin \alpha = 85033 \text{ N}$

$$F_j - M \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{ro} = M^* \cdot \frac{dv}{dt} + f_r \cdot v$$

Equation différentielle du premier ordre dont la constante de temps est : $\tau = \frac{M^*}{f_r} = 1093 \text{ s}$

Régime permanent : $v_f = \frac{F_j - M \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{ro}}{f_r} = 66,5 \text{ m/s}$

D'où : $v(t) = v_f (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

Pour atteindre 110 km/h, soit 30,55 m/s : $t = -\tau \ln(1 - \frac{v}{v_f}) = 672 \text{ s}$; soit 11 mn et 12 s.

A-3-1 :

$$C_{EM} = K \cdot K_{SH} \cdot I^2$$

$$U = (R_I + \frac{R_{sh} \cdot R_i}{R_{sh} + R_i}) \cdot I + E$$

$$K_{sh} = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_i}$$

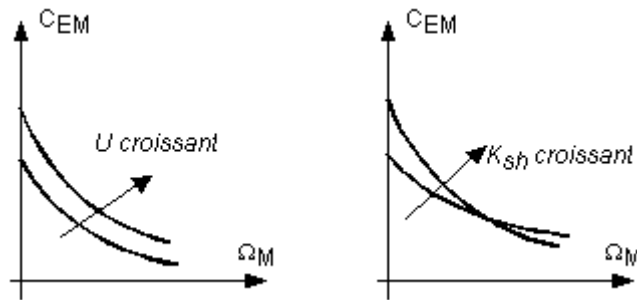
$$U = (R_I + K_{sh} \cdot R_i) \cdot I + E$$

$$U = R \cdot I + E$$

$$I = \frac{U}{R + K \cdot K_{sh} \cdot \Omega_M}$$

$$C_{EM} = \frac{K \cdot K_{sh} \cdot U^2}{(R + K \cdot K_{sh} \cdot \Omega_M)^2}$$

D'où l'allure des courbes :

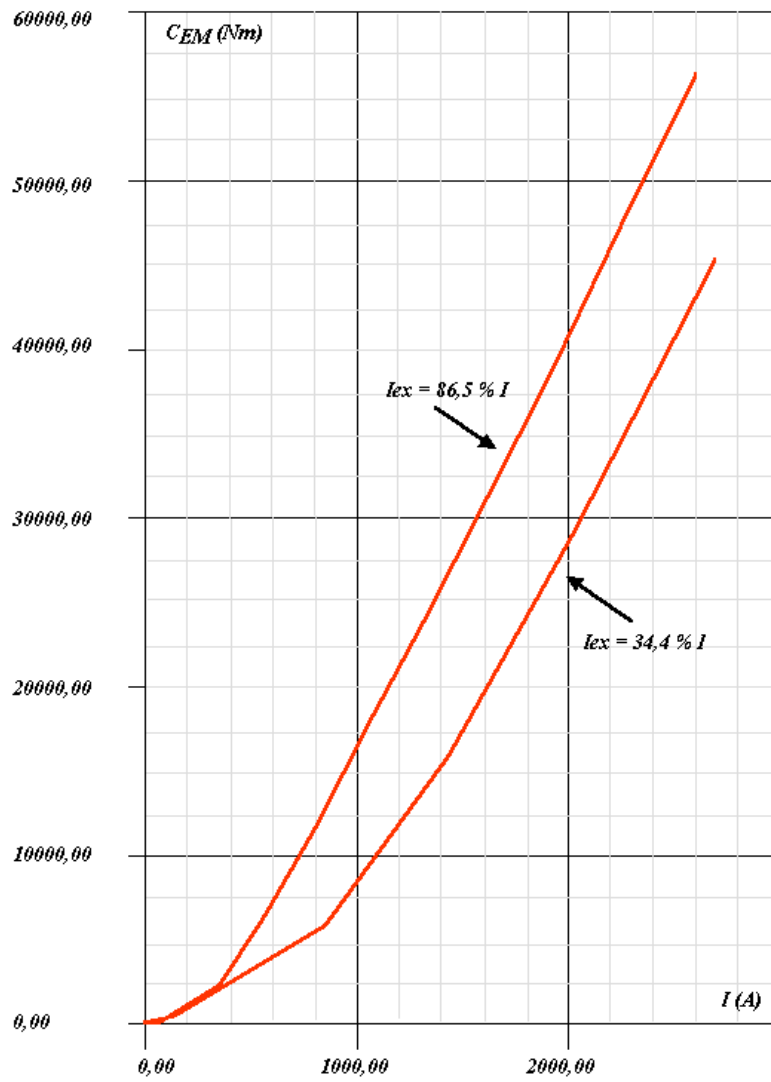


A-3-2 :

Modélisation du moteur TAB 674 : Couple électromagnétique en fonction du courant d'induit I

I _{ex} (A)	E(V)	Φ(I _{ex}) (V.s/rd)	I - $\frac{I_{ex}}{86,5\%}$ (A)	C _{EM} (Nm)	I - $\frac{I_{ex}}{34,4\%}$ (A)	C _{EM} (Nm)
0	13,1	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
50	101	1,38	57,80	79,64	145,35	200,27
300	500	6,82	346,82	2365,64	872,09	5948,48
500	790	10,78	578,03	6229,52	1453,49	15664,34
700	1040	14,19	809,25	11481,24	2034,88	28869,97
940	1215	16,57	1086,71	18011,98	2732,56	45291,74
1144	1320	18,01	1322,54	23815,36		
1656	1480	20,19	1914,45	38652,65		
1948	1540	21,01	2252,02	47311,52		
2264	1580	21,55	2617,34	56414,50		

Modélisation du moteur TAB 674 :
 $C_{EM} = f(I)$ pour $I_{ex} = 86,5\% \text{ de } I$ et $I_{ex} = 34,4\% \text{ de } I$



DOCUMENT REPONSE A-3

A-3-3 :

$$N_M = 1\,270 \text{ tr/mn} ; \Omega_M = 133 \text{ rd/s}$$

$$P_0 = K_{fv} \cdot \Omega_M^2, \text{ d'où } K_{fv} = 2,63 \text{ Nm/rd/s}$$

A-3-4 :

$$N_M = 796 \text{ tr/mn} ; \Omega_M = 83,35 \text{ rd/s}$$

$$P_u = 1,9 \text{ MW}, I_{ex} = 86,5\%I$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_M} = 22793 \text{ Nm} ; C_{EM} = C_u + C_{fv} = 23\,012 \text{ Nm}$$

Courant absorbé par le moteur (d'après la courbe du document réponse A-3) : $I = 1\,250 \text{ A}$

$$R = R_l + R_i \cdot K_{sh} = 22,95 \text{ m}\Omega$$

$$U = E + R \cdot I ; I = 1\,250 \text{ A}$$

$$I_{ex} = 1081 \text{ A} ; E_{700} = 1\,300 \text{ V} ; E_{796} = 1\,478 \text{ V}$$

$U = 1\,506 \text{ V}$ (On est donc proche du point de fonctionnement nominal du moteur)

A-3-5 :

$N_M = 1\ 300\ \text{tr/mn} ; \Omega_M = 136\ \text{rd/s}$

$P_u = 2,07\ \text{MW}, \text{ d'où } C_u = 15\ 220\ \text{Nm}$

$N_M = 1\ 270\ \text{tr/mn} ; \Omega_M = 133\ \text{rd/s}$

$C_{fv} = 357\ \text{Nm}$

$C_{EM} = 15\ 577\ \text{Nm}$

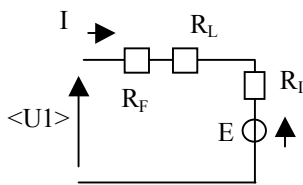
D'après la courbe du document réponse A-3 ($I_{ex} = 34,4\% I$) : $I = 1\ 400\ \text{A}$

$I_{ex} = 482\ \text{A} ; E_{700} = 800\ \text{V} ; E_{1300} = 1485\ \text{V}$

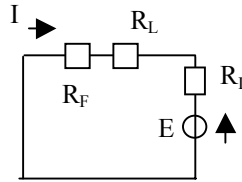
D'où $U = 1497\ \text{V}$ (On est à nouveau proche du point nominal donné par le constructeur)

A-4 Fonctionnement en freinage électrique (excitation indépendante ; circuit magnétique non saturé)

A-4-1 : Circuit d'induit du moteur (le courant d'excitation est inversé : $E < 0$ pour $\Omega_M > 0$)



Freinage par récupération



Freinage rhéostatique ($\langle U_1 \rangle = 0$)

A-4-2 :

$\langle U_1 \rangle = E + R'.I$

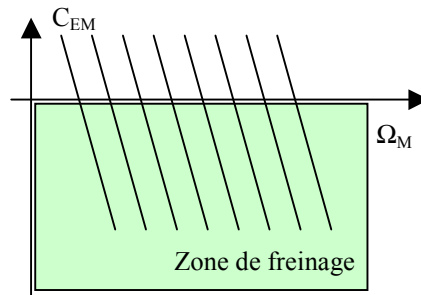
$C_{EM} = K.I_{ex}.I, (I_{ex} < 0)$

$E = K.I_{ex} \Omega_M$

$I = \frac{\langle U_1 \rangle - E}{R'}$

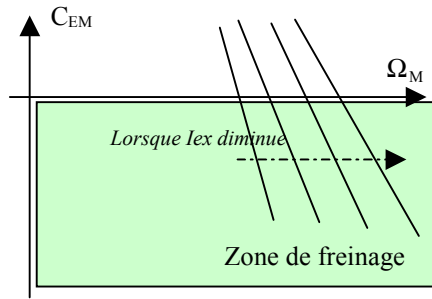
$C_{EM} = \frac{\langle U_1 \rangle . K.I_{ex}}{R'} - \frac{K^2 . I_{ex}^2}{R'} . \Omega_M$

A-4-3 :



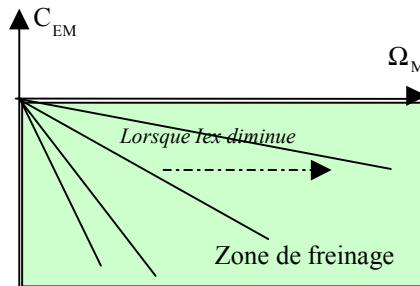
Caractéristiques en freinage par récupération

A-4-4 :



Caractéristiques en freinage par récupération ‘défluxage’

A-4-5 : C’est un cas particulier de la question A-4-4 où $\langle U_1 \rangle = 0$.



Caractéristiques en freinage rhéostatique

A-4-6 :

$$F_R = 35623N$$

$$M.g.\sin\alpha = -96268N$$

$$F_j = M.g.\sin\alpha + F_R = -61005N$$

A-4-7 :

$$V = 110 \text{ km/h} ; \Omega_M = 83,4 \text{ rd/s} ; v = 30,5 \text{ m/s}$$

$$P_u = \eta_t \cdot \frac{F_j \cdot v}{2} = -904 \text{ kW}$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_M} = -10838N$$

$$C_{EM} = C_u + C_{fv} = -10\ 619 \text{ Nm}$$

A-4-8 :

$$C_{EM} = K \cdot I_{ex} \cdot I, (I_{ex} = -810 \text{ A}, K = 20,3 \cdot 10^{-3})$$

$$D'où I = 645,8 \text{ A et } E = K \cdot I_{ex} \cdot \Omega_M = -1\ 371 \text{ V}$$

$$\langle U_1 \rangle = E + R \cdot I \quad (R = 375,2 \text{ m}\Omega)$$

$$\langle U_1 \rangle = -1\ 128 \text{ V}$$

Puissance restituée : 729 kW

Puissance dans la résistance R_F : 143 kW

A-4-9 :

$$\text{Freinage rhéostatique : } C_{EM} = -\frac{K^2 I_{ex}^2}{R'} \cdot \Omega_M$$

$$I_{ex} = -810 \text{ A}, K = 20,3 \cdot 10^{-3}; \Omega_M = 83,4 \text{ rd/s}$$

$$C_{EM} = -6\,927 \text{ Nm}$$

$$C_u = C_{EM} - C_{fv} = -7\,146 \text{ Nm}$$

$$P_u = -569 \text{ kW}; F_{j.v} = \frac{2 \cdot P_u}{\eta_t} = -1220 \text{ kW}$$

$$F_j = -39\,934 \text{ N}$$

$$\text{d'où } F_{pneumatique} = -21\,071 \text{ N}$$

Partie B

B-1-1 : Décomposition en série de sinus de rang impair ($n = 2k + 1$)

$$b_{2k+1} = \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\beta}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sin(2k+1)\theta d\theta = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2k+1} \left[-\cos(2k+1)\theta \right]_{\frac{\beta}{2}}^{\frac{\pi}{2}}$$

$$b_{2k+1} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2k+1} \cos(2k+1) \frac{\beta}{2}$$

B-1-2 : (Voir document réponse B-1) Les interrupteurs à utiliser sont des thyristors.

B-1-3 :

$$\langle u_1 \rangle = \frac{1}{\pi} \int_{\psi_1}^{\psi_1+\pi} V\sqrt{2} \sin\theta d\theta = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \left[-\cos\theta \right]_{\psi_1}^{\pi+\psi_1}$$

$$\langle u_1 \rangle = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi} \cos\psi_1$$

B-1-4 :

$$b_1 = \frac{4}{\pi} \cos \frac{\beta}{2} \text{ avec } \beta = 0 \text{ d'où } b_1 = \frac{4}{\pi}$$

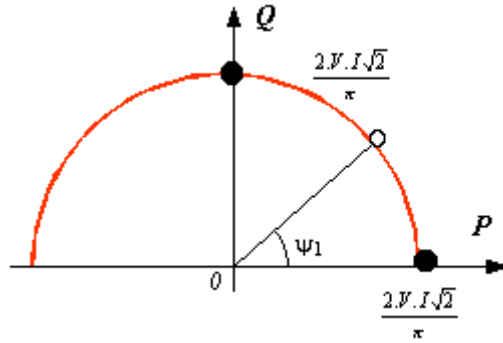
Le fondamental de i_{e1} est décalé de ψ_1 par rapport à v_{e1} :

$$\text{D'où } i_{e1f} = \frac{4}{\pi} I \sin(\omega t - \psi_1)$$

$$P_1 = VI_{e1f} \cos\varphi \text{ avec } I_{e1f} = \frac{4I}{\pi\sqrt{2}}$$

$$\text{D'où } P_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \cos\psi_1$$

$$\text{De même : } Q_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \sin\psi_1$$



$$S_1 = VI_{e1eff} = VI \quad \text{et} \quad F_{P1} = \frac{P_1}{S_1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \psi_1$$

Le convertisseur est réversible en puissance pour : $\psi_1 > \frac{\pi}{2} \Rightarrow P_1 < 0$

B-1-5 : (Voir document réponse B-2)

K_{21} et K_{24} sont des thyristors ; K_{23} et K_{22} sont des diodes

B-1-6 :

$$\langle u_2 \rangle = \frac{1}{\pi} \int_{\psi_2}^{\pi} V\sqrt{2} \sin \theta d\theta = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \psi_2)$$

B-1-7 :

$$\text{Ici } \beta = \psi_2 \quad \text{d'où} \quad b_1 = \frac{4}{\pi} \cos \frac{\psi_2}{2}$$

Le fondamental de I_{e2} est décalé de $\frac{\psi_2}{2}$ par rapport à v_{e2} .

$$\text{D'où } i_{e2f}(t) = \frac{4}{\pi} I \cos \frac{\psi_2}{2} \sin(\omega t - \frac{\psi_2}{2})$$

Puissance active :

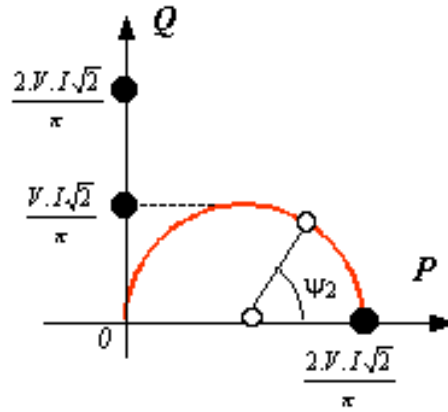
$$P_2 = VI_{e2f} \cos \frac{\psi_2}{2}$$

$$P_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \cos^2 \frac{\psi_2}{2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \frac{1 + \cos \psi_2}{2}$$

Puissance réactive :

$$Q_2 = VI_{e1f} \sin \frac{\psi_2}{2}$$

$$Q_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \cos \frac{\psi_2}{2} \sin \frac{\psi_2}{2} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} VI \sin \frac{\psi_2}{2}$$



Puissance apparente :

$$S_2 = VI_{e2eff} \quad \text{avec} \quad I_{e2eff} = I\sqrt{1 - \frac{\psi_2}{\pi}}$$

$$F_{P2} = \frac{P_2}{S_2} = \frac{\sqrt{2} \frac{1 + \cos \psi_2}{2}}{\sqrt{1 - \frac{\psi_2}{\pi}}}$$

B-1-8 : Voir document réponse B-3

B-1-9 :

$$I_{Eff}^2 = \frac{1}{\pi} [I^2 \psi_2 + 4I^2 [\pi - \psi_2]]$$

$$I_{Eff}^2 = \frac{I^2}{\pi} [4\pi - 3\psi_2]$$

$$I_{Eff} = I\sqrt{4 - \frac{3\psi_2}{\pi}}$$

B-1-10 :

Pour la zone à ψ_1 variable ($\psi_2 = 180^\circ$) : $F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \psi_1$

Pour la zone à $\psi_1 = 0$ et ψ_2 variable : $F_p = \frac{P_1 + P_2}{VI\sqrt{4 - 3\frac{\psi_2}{\pi}}} = \frac{2\frac{\sqrt{2}}{\pi}VI + 2\frac{\sqrt{2}}{\pi}VI\frac{1 + \cos \psi_2}{2}}{VI\sqrt{4 - \frac{3\psi_2}{\pi}}}$

Soit : $F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{1 + \frac{1 + \cos \psi_2}{2}}{\sqrt{4 - \frac{3\psi_2}{\pi}}}$

$\psi_2 = 0 \Rightarrow F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9 \Rightarrow P = P_{MAX}$

$\psi_2 = 180^\circ \Rightarrow F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9 \Rightarrow P = \frac{P_{MAX}}{2}$

$$\psi_2 = 30^\circ \Rightarrow F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1 + \frac{1,866}{2}}{\sqrt{4 - \frac{1}{2}}} = \frac{1,933 \times 0,9}{1,87} = 0,93$$

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \times 1,933 \Rightarrow \frac{P}{P_{MAX}} = 0,966$$

$$\psi_2 = 140^\circ \Rightarrow F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1 + 0,117}{\sqrt{1,666}} = 0,9 \times 0,865 = 0,778$$

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \times 1,117 \Rightarrow \frac{P}{P_{MAX}} = 0,558$$

Lorsque ψ_1 varie et que $\psi_2 = 180^\circ$, on a : $P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI \cos\psi_1$ et $F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos\psi_1$

$$\text{Ainsi : } \frac{P}{P_{MAX}} = \frac{1}{2} \cos\psi_1$$

D'où : $F_p = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{2P}{P_{MAX}}$ pour $0 < P < \frac{P_{MAX}}{2}$ C'est une droite (voir tracé document réponse B-3).

B-2 Justification du choix des semi conducteurs

B-2-1 :

Tension aux secondaires : $V = 950 \text{ V}$

Tension maximale vue par les thyristors en direct ou en inverse : $V\sqrt{2} = 1343 \text{ V}$

Tension vue par les diodes en inverse : 1343 V

Il y a deux diodes et deux thyristors en série, chacun voit théoriquement une tension de $671,5 \text{ V}$

On a donc un coefficient de sécurité de 2,68 pour la tenue en tension (classiquement on prend 2).

$$\text{Courant moyen par interrupteur : } \langle I_k \rangle = \frac{I}{2} = 1300 \text{ A}$$

Il y a 4 branches de thyristors en parallèle pour un interrupteur, soit un courant moyen de 325 A par branche. On a donc un coefficient de sécurité de 1,38 sur le courant, ce qui est une valeur couramment admise.

De même, il y a 5 branches de diodes en parallèle :

Les diodes conduisent pendant 360° et le courant moyen par interrupteur est $\langle I_k \rangle = 2600 \text{ A}$; soit un courant de 520 A par branche.

On a donc un coefficient de sécurité de 1,15 (valeur un peu faible, mais la température de jonction limite est à 150°C).

B-2-2 :

Les semi-conducteurs fonctionnent à une fréquence de 50 Hz . Les pertes par commutation sont donc négligeables, seules les pertes en conduction sont à prendre en compte.

Pour chaque semi-conducteur, (diode ou thyristor) :

$$P_{COND} = V_{TD} \times \langle I_k \rangle + r_t I_{KEFF}^2$$

Pour les diodes : $\langle I_D \rangle = I_{DEFF} = 520 \text{ A}$

$$P_{COND-D} = 510 \text{ W}$$

Pour les thyristors : $\langle I_T \rangle = 325 \text{ A}$; $I_{TEFF} = 459,7 \text{ A}$

$$P_{COND-T} = 451 \text{ W}$$

B-2-3 :

$$\theta_j - \theta_a = R_{thja} P$$

$$\text{Pour les thyristors : } R_{thja} \leq \frac{\theta_j - \theta_a}{P_{COND-T}}$$

$$R_{thja} \leq \frac{125 - 40}{451}$$

$$R_{thja} \leq 0,18^\circ\text{C/W}$$

$$\text{Pour les diodes : } R_{thja} \leq \frac{125 - 40}{510}$$

$$R_{thja} \leq 0,21^\circ\text{C/W}$$

Le dimensionnement des refroidisseurs est donc correct, le refroidissement des diodes est meilleur que celui des thyristors.

B-2-4 :

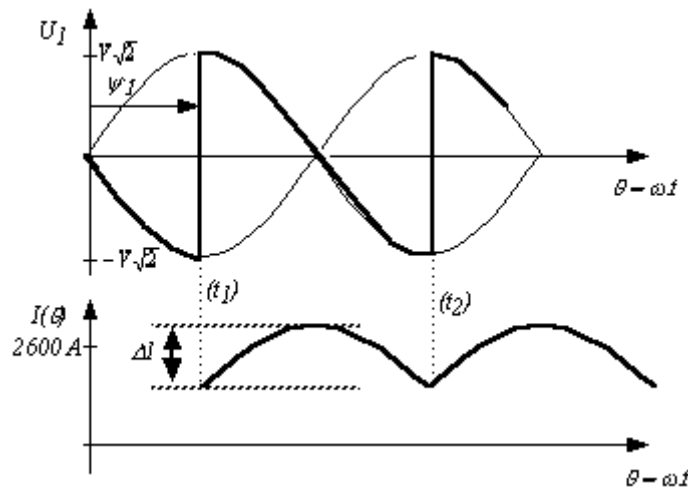
Les circuits RC aux bornes des composants sont indispensables pour limiter la surtension au blocage. Dans le cas des thyristors, ils limitent aussi les dV/dt à l'état bloqué.

Pour protéger des semi conducteurs de type diode thyristor on utilise des fusibles ultra rapides (UR). Ces fusibles sont choisis en fonction de la tension et du courant nominal. Ils doivent présenter une contrainte thermique i^2t totale supérieure à celle des semi conducteurs (on prend généralement un facteur de 1,2).

Il n'est pas nécessaire d'ajouter des inductances en série avec les thyristors. Les inductances de fuite du transformateur sont généralement suffisantes.

B-3

B-3-1 :



Formes d'ondes au démarrage.

Comme $E = 0$, on a $u_s = L \frac{dI}{dt}$

$$\text{Ainsi } \Delta I = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} u_s(t) dt$$

$$\text{Soit en posant } \theta = \omega t \quad : \quad \Delta I = \frac{1}{L\omega} \int_{\psi_1}^{\pi} u_s(\theta) d\theta \quad \text{avec } (\psi_1 = \frac{\pi}{2})$$

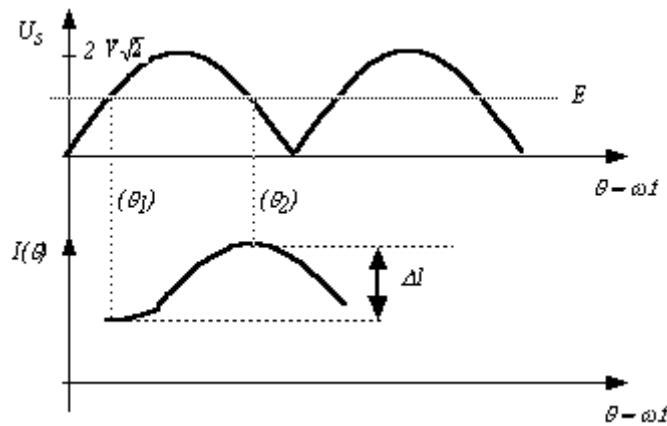
$$\text{Avec } u_s(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$$

$$\Delta I = \frac{V\sqrt{2}}{L\omega} [-\cos \theta]_{\psi_1}^{\pi} = \frac{V\sqrt{2}}{L\omega} = 611 \text{ A}$$

B-3-2 :

$$\psi_1 = \psi_2 = 0$$

$$E = \langle u_s \rangle$$



Fonctionnement à tension maximale : Formes d'ondes.

On a : $u_s - E = L \frac{dI}{dt}$ avec $E = \frac{4V\sqrt{2}}{\pi}$

D'où : $\Delta I = \frac{1}{L\omega} \int_{\psi_1}^{\psi_2} (u_s(\theta) - E) d\theta$

$$\Delta I = \frac{2\sqrt{2}}{L\omega} \left\{ [-\cos\theta]_{\theta_1}^{\theta_2} - \frac{2}{\pi} [\theta]_{\theta_1}^{\theta_2} \right\}$$

Avec $\theta_1 = \arcsin \frac{2}{\theta} = 39,5^\circ$; $\theta_2 = 180^\circ - \theta_1 = 140^\circ$

Ainsi : $\Delta I = \frac{2\sqrt{2}V}{L\omega} [1,53 - 1,11] = 513 \text{ A}$

B-4-1 :

Essai en court-circuit avec deux secondaires en série :

$$I_{e1cc} = I_{e2cc} = \frac{2mV_{1cc}}{2(R_2 + jL_2\omega)} = \frac{mV_{1cc}}{R_2 + jL_2\omega}$$

$$U_{pcc} = V_{1cc} + (R_1 + jL_1\omega)I_{pcc} \quad ; \quad I_{pcc} = 2mI_{e1cc}$$

d'où

$$U_{pcc} = \frac{I_{pcc}}{2m^2} (R_2 + jL_2\omega) + I_{pcc} (R_1 + jL_1\omega)$$

$$U_{pcc} = I_{pcc} \left[\frac{R_2}{2m^2} + R_1 + j(L_1 + \frac{L_2}{2m^2})\omega \right]$$

Essai en court-circuit avec un seul secondaire :

$$I_{ecc} = m \cdot \frac{V_{1cc}}{R_2 + jL_2\omega}$$

$$U_{pcc} = V_{1cc} + (R_1 + jL_1\omega)I_{pcc} \quad ; \quad I_{pcc} = mI_{ecc}$$

$$U_{pcc} = \frac{I_{pcc}}{m^2} (R_2 + jL_2\omega) + (R_1 + jL_1\omega)I_{pcc}$$

$$\underline{U}_{pcc} = \underline{I}_{pcc} \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{m^2} \right) + j \left(L_1 + \frac{L_2}{m^2} \right) \omega \right]$$

B-4-2 :

D'après l'essai en court-circuit avec deux secondaires :

$$\frac{U_{pcc}}{I_{pcc}} = 23,87 \Omega$$

$$\frac{R_2}{m^2} = 3,46 \Omega ; \frac{R_2}{2.m^2} + R_1 = 2,48 \Omega , \frac{L_2}{2.m^2} + L_1 = 75,6 mH$$

D'après l'essai en court circuit avec un secondaire :

$$\frac{U_{pcc}}{I_{pcc}} = 30,76 \Omega$$

$$\frac{R_2}{m^2} + R_1 = 4,21 \Omega , \frac{L_2}{m^2} + L_1 = 97 mH$$

d'où : $L_2 = 62 \mu H$ et $L_1 = 54.2 mH$

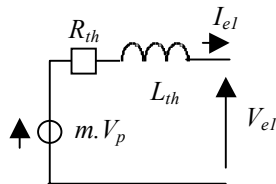
B-4-3 :

$$\underline{I}_{e1} = \underline{I}_{e2} = \underline{I}'_{e1} = \underline{I}'_{e2}$$

$$\underline{V}_1 = \underline{U}_p - (R_1 + jL_1\omega) 4.m.I_{e1}$$

$$d'où : \underline{V}_{e1} = m.\underline{U}_p - \underline{I}_{e1} [(4R_1.m^2 + R_2) + j(L_2 + 4.L_1.m^2)] \omega$$

Le modèle de Thévenin est donc :



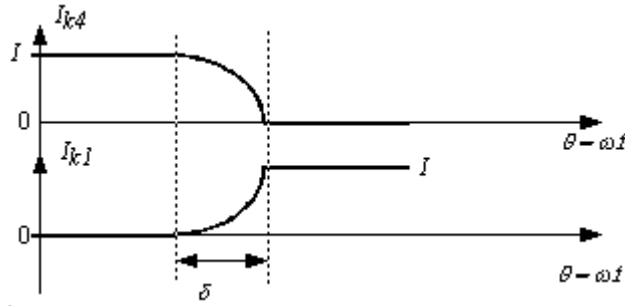
avec $R_{th} = 9,3 m\Omega$ et $L_{th} = 375 \mu H$

B-4-4 :

Etude de la commutation (les deux cellules commutent simultanément) :

$$m.V_p = L_{th} \frac{di_{e1}}{dt} ; i_{e1}(t) = \frac{V.\sqrt{2}}{L_{th}} \int_0^t \sin \omega.t.dt + i_{e1}(0)$$

$$d'où : i_{e1}(t) = \frac{V.\sqrt{2}}{L_{th}\omega} (1 - \cos \omega.t) - I \text{ (à } t = 0 \text{ 'début de la commutation'; } i_{e1} = -I)$$



Amorçage spontané de k1, puis blocage de k4.

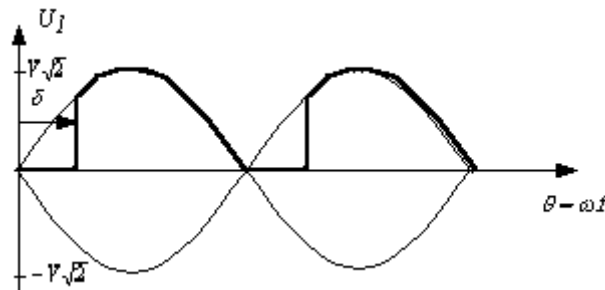
$$i_{k1}(t) = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2L_{th}\omega} (1 - \cos \omega t)$$

à $\omega t = \delta$ (fin de la commutation), $i_{k1} = I$ d'où : $\cos \delta = 1 - \frac{2L_{th} \cdot \omega \cdot I}{V \cdot \sqrt{2}}$

Soit : $\delta = \arccos\left(1 - \frac{2L_{th} \cdot \omega \cdot I}{V \cdot \sqrt{2}}\right) = 41^\circ$

B-4-6 :

Pendant la commutation $U_1 = 0$



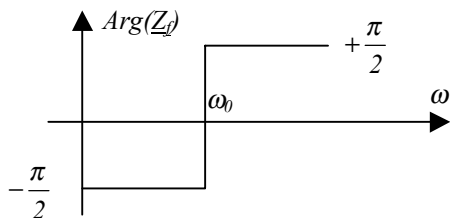
Allure de la tension redressée compte tenu de la commutation.

$$\langle U_1 \rangle = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \delta) = \frac{2V \cdot \sqrt{2}}{\pi} - \frac{2L_{th}\omega}{\pi} \cdot I$$

Application numérique : $\langle U_1 \rangle = 750 \text{ V}$

B-5 : Amélioration du facteur de puissance.

B-5-1 : $Z_f = j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$



Pour $\omega < \omega_0$

$$I_F = \frac{V}{\frac{1}{C\omega} - L\omega} = \frac{V \cdot C \cdot \omega}{1 - L \cdot C \omega^2} = \frac{V \cdot C \cdot \omega}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

D'où l'expression de la puissance réactive (capacitive) :

$$Q_F = -\frac{V^2 \cdot C \cdot \omega}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

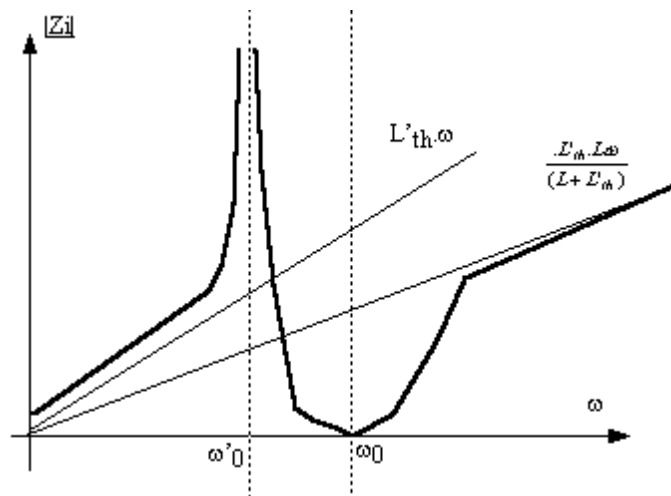
B-5-2 :

$$Z_i = \frac{j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) \cdot jL'_{th} \omega}{j\left((L + L'_{th})\omega - \frac{1}{C\omega}\right)}$$

Pour $\omega = \omega_0$: $Z_i = 0$; $\omega = \omega_0$: $Z_i \rightarrow \infty$

Lorsque $\omega \rightarrow 0$: $Z_i = jL'_{th} \cdot \omega$

Lorsque $\omega \rightarrow \infty$: $Z_i = \frac{jL'_{th} \cdot L\omega}{j(L + L'_{th})}$



B-5-3 : Le filtre shunt permet de « piéger » les harmoniques de courant générés par la charge. Il présente une impédance nulle à la pulsation ω_0 qui doit être accordée sur un des rangs caractéristiques du courant.

La pulsation d'anti-résonance ω'_0 peut être dangereuse si jamais elle correspond à la pulsation d'un des harmoniques (surtension). De plus, celle-ci dépend de l'impédance amont (L'_{th}) qui n'est pas constante.

B-5-4 :

$I = 1\,900\text{ A}$; $\psi_1 = 50^\circ$; $P = 1\text{ MW}$, $Q = 1,2\text{ MVAR}$

B-5-5 :

$Q_3 = -319\text{ kVAR}$; $Q_5 = -162\text{ kVAR}$, $Q_7 = -159\text{ kVAR}$

B-5-6 :

$$D^2 = V^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$$

les filtres shunt permettent d'éliminer les harmoniques de rang 3,5 et 7. Au secondaire du transformateur, le premier

harmonique de rang supérieur à 1 sera donc de rang 9. Ainsi : $D_s^2 = V^2 \sum_{k=4}^{\infty} I_{2k+1}^2$

$$\text{Soit : } D_s^2 = V^2 \left(\frac{4I}{\pi\sqrt{2}}\right)^2 \sum_{k=4}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)^2} = 405\text{ kVA}$$

B-5-7 :

Puissance active au secondaire du transformateur : $P_s = P = 1\text{MW}$

Puissance réactive au secondaire du transformateur : $Q_s = Q + Q_3 + Q_5 + Q_7 = 0,6\text{MVAR}$

Puissance apparente au secondaire du transformateur : $S_s = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2 + D_s^2} = 1,2\text{MVA}$

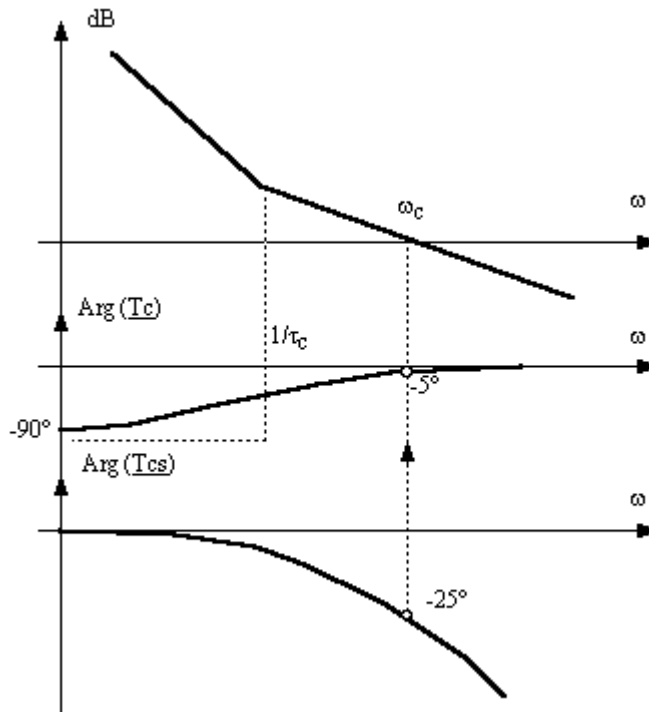
D'où le facteur de puissance : $F_{ps} = \frac{P_s}{S_s} = 0,866$

B-6-1 :

$$T_I(p) = \frac{1}{R_T + K'\Omega_M + L.p}$$

B-6-2 :

$$T_I(p) \cong \frac{1}{L.p}$$



ω_c est déterminé de sorte que $\text{Arg}(T_{cs})$ soit de -25° , soit $\omega_c = 45\text{rd/s}$.

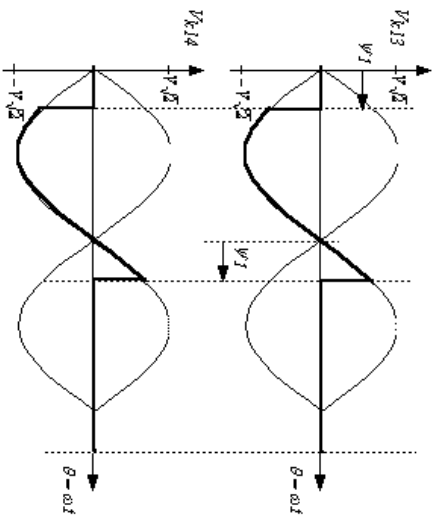
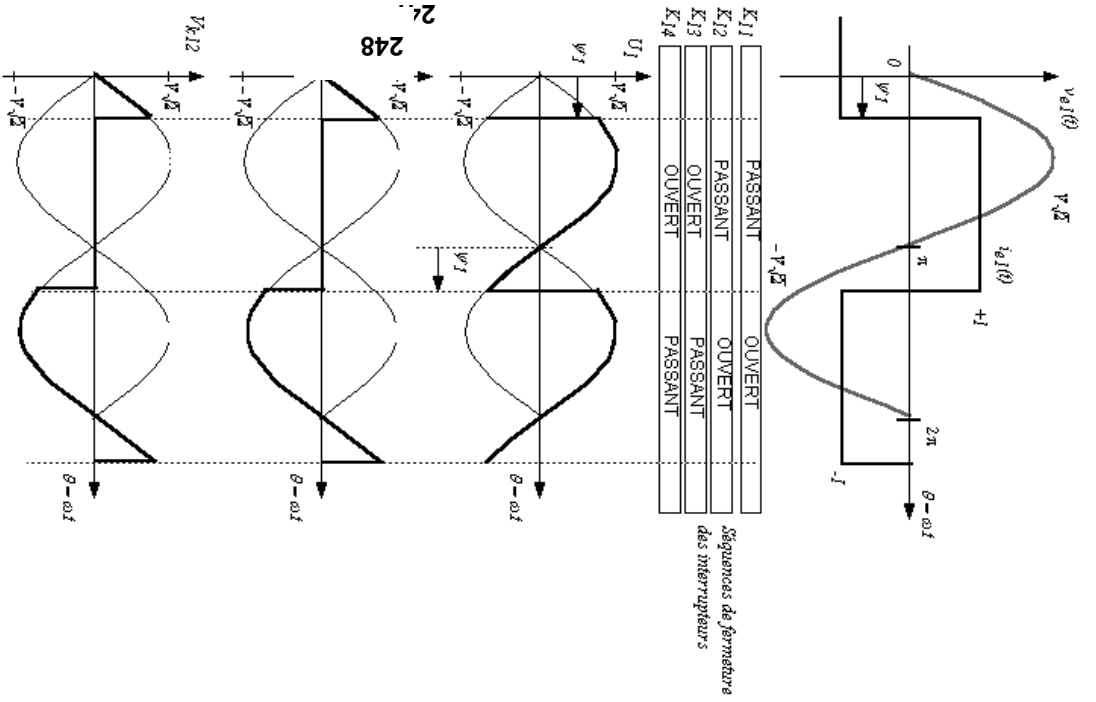
La constante de temps du correcteur PI est ensuite fixée pour que le déphasage introduit à la pulsation ω_c soit de 5° . Ainsi $\text{arctg} \tau_c \cdot \omega_c = 85^\circ$, soit $\tau_c = 248\text{ms}$

Pour la fonction de transfert en boucle ouverte, la marge de phase sera donc de 60° puisque T_I introduit un déphasage de 90° .

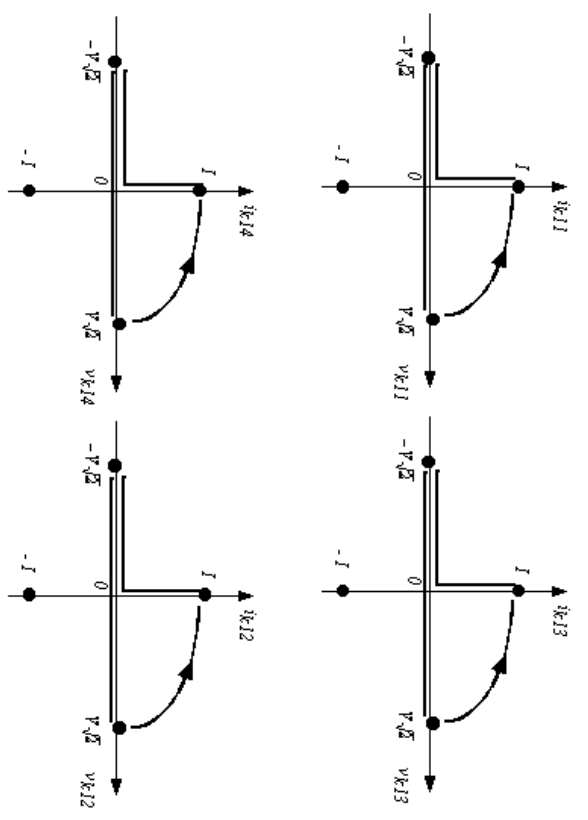
Le gain du correcteur PI est ensuite fixé pour obtenir un gain unitaire de la fonction de transfert en boucle ouverte à $\omega = \omega_c$.

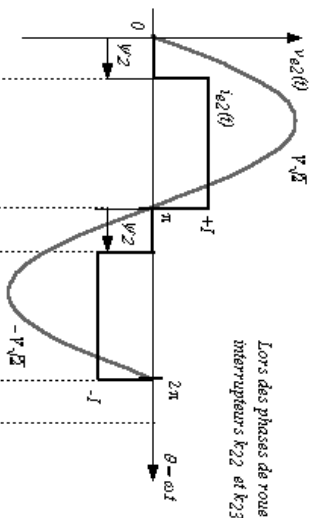
En supposant que pour $\omega = \omega_c$; $|T_c| = K_c$: $K_c = \frac{L \cdot \omega_c}{K_0 \cdot K_i} = 0,916$

La boucle de courant a une bande passante de 7 Hz, ce qui est largement suffisant compte tenu de l'inertie de la charge mécanique (la constante de temps mécanique du train est de plusieurs minutes).



Cycle de fonctionnement des interrupteurs :

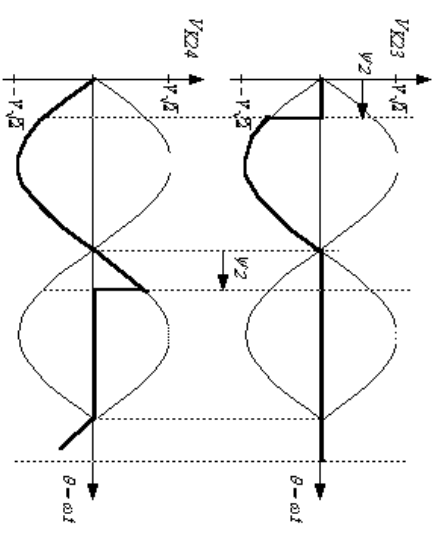
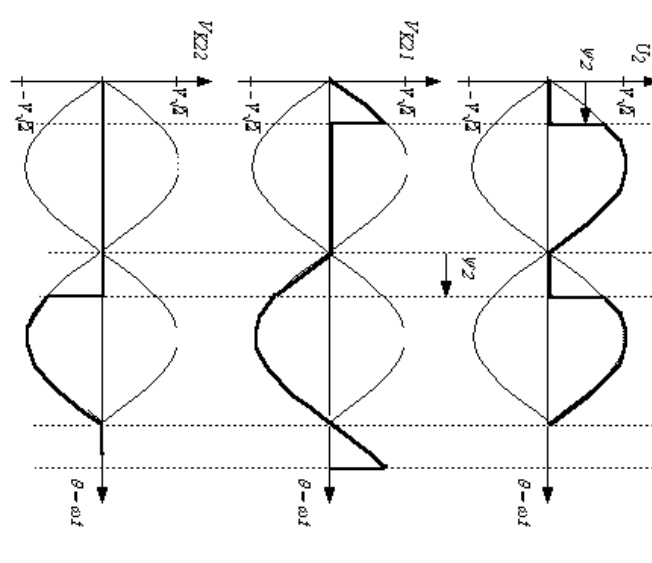




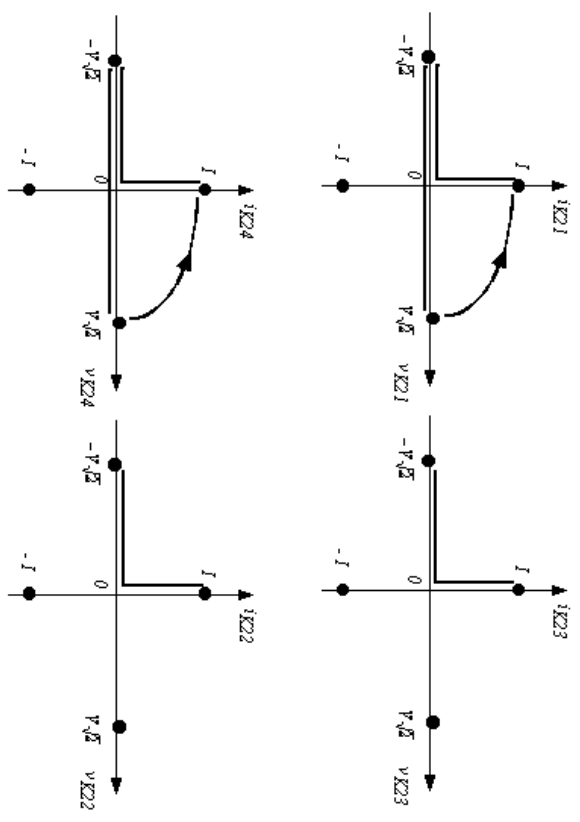
Lors des phases de roue libre, c'est les interrupteurs k_{22} et k_{23} qui sont fermés

k_{21}	0	PASSANT	0	OUVERT	0	0	0
k_{22}	P		P		P	P	P
k_{23}	P		O		P	P	P
k_{24}	0		0		0	0	0

Séquences de fermeture des interrupteurs



Cycle de fonctionnement des interrupteurs :



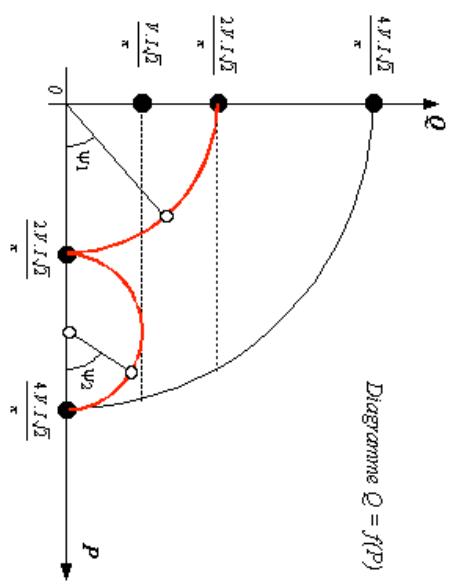
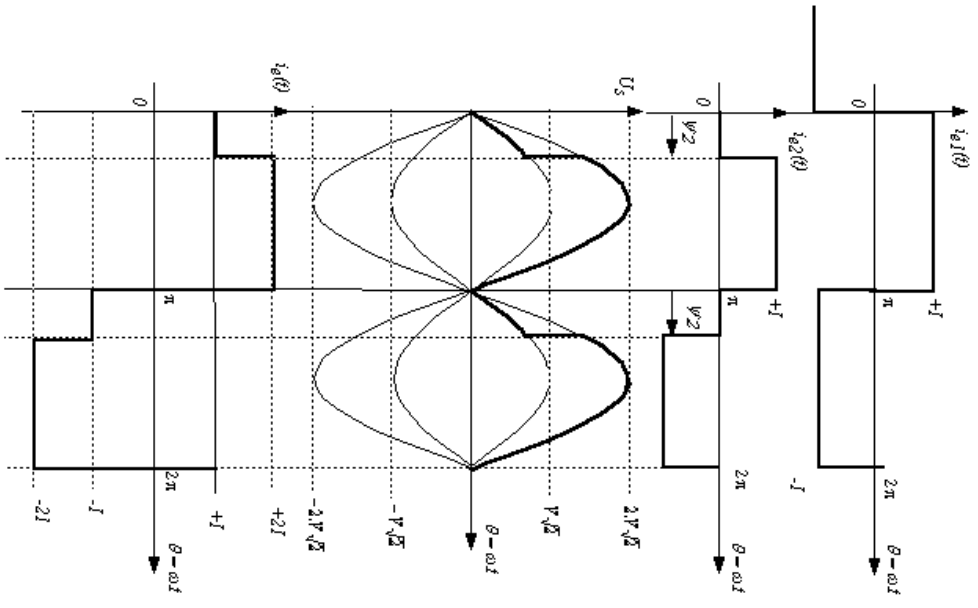
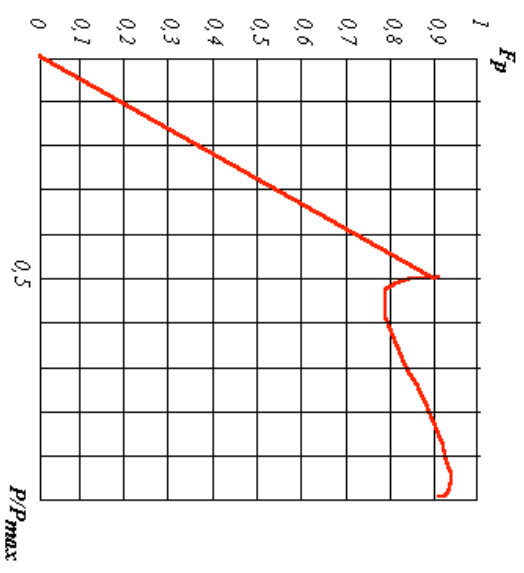


Diagramme $Q = f(P)$



DOCUMENT REPONSE B-3