

# Compensation de puissance réactive sur un réseau de traction ferroviaire 25 kV

---

## Problématique abordée

Le réseau ferré français comprend 14 507 kilomètres de lignes électrifiées sur un réseau exploité de 28 918 kilomètres. Plus de 85 % du trafic fret et 90 % du trafic voyageur sont écoulés sur la partie du réseau équipée de lignes électrifiées.

Commencée en 1900, l'électrification du réseau s'est réellement étendue à partir de 1922 avec l'adoption du courant continu à moyenne tension 1500 V. L'adoption, dès les années 1950, du courant monophasé à 25 000 V 50 Hz permet l'adaptation du réseau aux progrès techniques et en particulier aux lignes à grande vitesse. En 2005, l'énergie électrique consommée sur le réseau ferré a été de 7800 GWh.

L'électrification en 25 000 V 50 Hz s'étend aujourd'hui sur 8 256 kilomètres, dont la totalité du réseau TGV. Les sous-stations transforment la tension fournie par le réseau HT (RTE) en tension compatible avec les engins de traction et alimentent des tronçons de ligne (appelés secteurs) de 80 km environ. Afin de réduire le coût de l'énergie électrique, certaines de ces sous stations comportent un équipement de compensation de puissance réactive.

Actuellement, la SNCF met à l'étude des solutions permettant de mieux répondre aux contraintes spécifiques de son réseau : fluctuation importante des puissances consommées en fonction du trafic et pollution harmonique. Cette problématique est l'objet de l'étude proposée qui s'appuie sur les données correspondantes à la sous station de Creil alimentant un secteur double voie sur la ligne classique Paris-Lille. Le schéma de principe de la sous-station de Creil est donné en annexe 1.

## **Organisation du questionnaire**

---

Le sujet est divisé en 5 parties : A, B, C, D et E.

Partie A (pages 4 à 6) :

**Bilan de puissance / Prédimensionnement du condensateur de compensation fixe de puissance réactive**

Partie B (pages 7 à 11) :

**Etude de la batterie de compensation fixe**

Partie C (pages 12 à 15) :

**Principe d'un système de compensation régulée, basé sur des onduleurs de tension MLI**

Partie D (pages 16 à 23) :

**Synthèse de la source de tension alternative réglable du compensateur actif de puissance réactive**

Partie E (pages 24 à 25) :

**Détermination des pertes et des températures de jonction des semi-conducteurs**

Chaque partie peut être traitée indépendamment des autres. Cependant, la problématique est abordée selon une approche descendante et pour l'appréhender globalement, il vaut mieux respecter la progression du questionnaire.

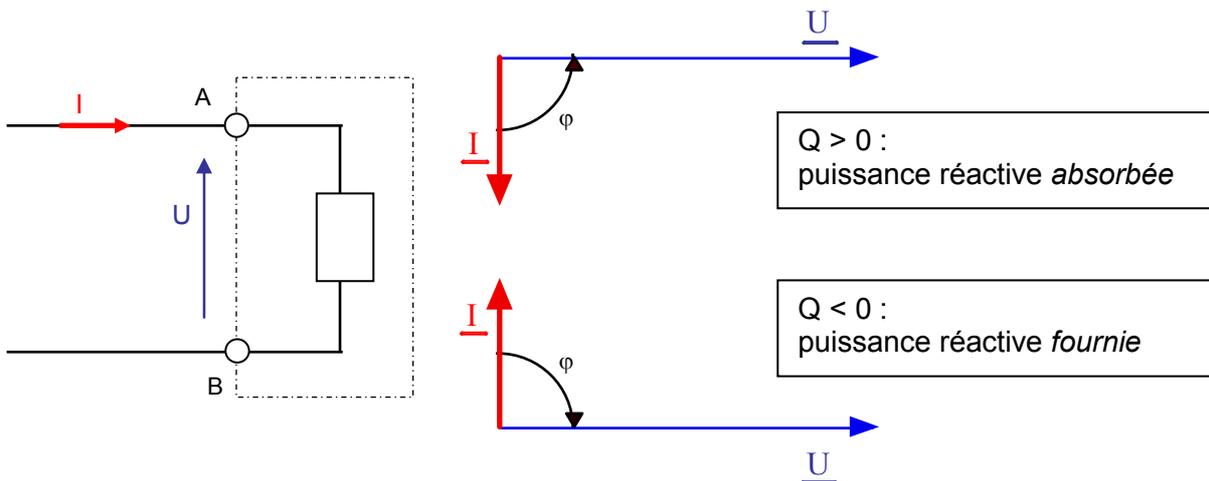
## Principales notations utilisées

grandeur instantanée :	$u, v, i$
grandeur complexe :	$\underline{U}, \underline{V}, \underline{I}$
valeur efficace :	$U, V, I$
amplitude :	$\hat{U}, \hat{I}$
composante fondamentale :	$U_f, I_f$
composante harmonique (rang n) :	$U_{hn}, I_{hn}$

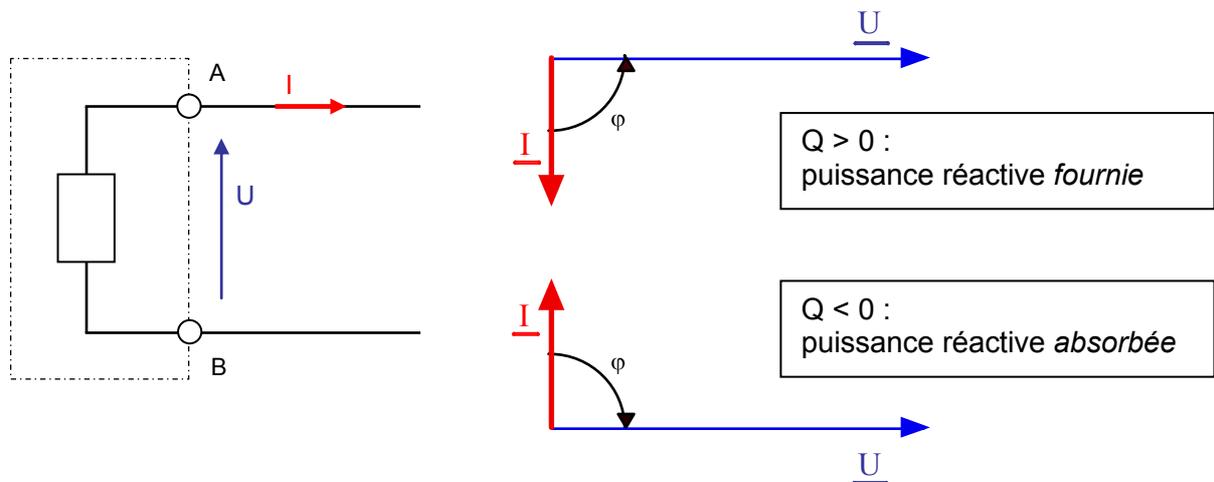
*Remarque* : quand il est demandé de calculer un courant ou une tension, sans autre indication, il s'agit de sa valeur efficace.

## Conventions sur la puissance réactive d'un dipôle

### • En convention récepteur



### • En convention générateur



## Partie A : Bilan de puissance / Prédimensionnement du condensateur de compensation fixe de puissance réactive

Le nombre de trains pouvant circuler simultanément sur le secteur alimenté par la sous station de Creil est variable de 1 à 4. Une analyse du trafic montre que la présence simultanée de 3 ou 4 trains est peu fréquente.

Dans cette 1<sup>ère</sup> partie, on va faire un bilan de puissance pour une situation typique, puis prédéterminer la batterie fixe de compensation de puissance réactive. La situation choisie pour l'étude correspond à la présence de 2 trains de voyageurs, tractés par des locomotives BB 26000, qui se croisent à 20 km de la sous station.

La locomotive BB 26000, de puissance nominale 5800 kW, est équipée de 2 bogies monomoteur de type synchrone triphasé. Elle fonctionne sur réseau 25 kV alternatif mais aussi sur réseau continu 1500 V.

### Données pour la partie A :

Dans cette partie, on s'intéresse aux puissances active et réactive transportées par le fondamental : les grandeurs tension et courant sont sinusoïdales, de fréquence 50 Hz.

- ◆ Puissances active et réactive absorbées par l'ensemble des 2 trains :

$$P = 11500 \text{ kW}, Q = 6500 \text{ kVAR}.$$

- ◆ Le schéma électrique équivalent de l'alimentation du circuit de traction est donné :

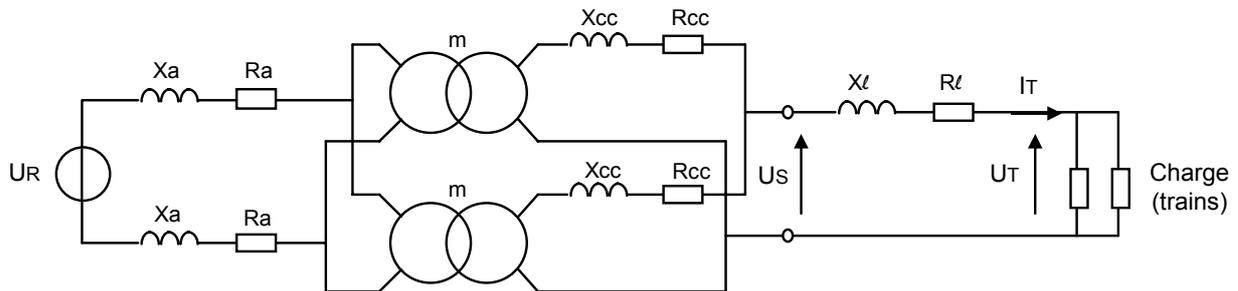


Figure A-1 : Schéma électrique équivalent de l'alimentation du circuit de traction

### Notations :

- Réseau HTB :

$U_R$  : tension entre phases du réseau HTB triphasé amont,

$R_a, X_a$  : résistance et réactance par phase du réseau HTB triphasé amont,

- Transformateur :

*Les pertes fer et le courant magnétisant sont négligés,*

$m$  : rapport de transformation d'un transformateur 63 kV/27,5 kV (identique pour les 2 transformateurs),

$R_{cc}, X_{cc}$  : résistance et réactance d'un transformateur ramenées au secondaire.

- Circuit de traction :

$R_l, X_l$  : résistance et réactance de la ligne double voie (caténares + rails),

$U_T$  : tension d'alimentation des locomotives,

$I_T$  : courant absorbé par l'ensemble des 2 trains.

♦ **Tableau A-2 : Caractéristiques électriques de l'alimentation du circuit de traction**

Elément	Caractéristiques	
Réseau HTB triphasé amont	Tension nominale : Puissance de court circuit : Cosφ en court circuit :	$U_p = 63 \text{ kV}$ $S_{cc} = 740 \text{ MVA}$ $\text{Cos}\varphi_{cc} = 0,18$
Transformateur monophasé (valeurs pour 1 transformateur)	Puissance nominale : Tension primaire nominale : Tension secondaire à vide : Tension de court circuit (1) : Pertes cuivre (1) :	$S_n = 16,5 \text{ MVA}$ $U_p = 63 \text{ kV}$ $U_{s0} = 27,5 \text{ kV}$ $U_{cc} (\%) = 12 \%$ $P_c = 344 \text{ kW}$
Ligne double voies en parallèle	Résistance linéique : Réactance linéique :	$R_l = 0,09 \Omega/\text{km}$ $X_l = 0,28 \Omega / \text{km}$

(1) : La tension de court circuit est exprimée en % de la tension nominale ;  $U_{cc} (\%)$  et  $P_c$  sont donnés pour le courant nominal du transformateur.

**QA-1 :** • Déterminer numériquement tous les éléments du schéma électrique Fig. A-1, en fonction des données du tableau A-2.

- rapport de transformation :  $m$  ;
- réactances :  $X_a, X_{cc}, X_l$  ;
- résistances :  $R_a, R_{cc}, R_l$ .

**QA-2 :** • A partir du schéma équivalent proposé, réaliser les simplifications suivantes :

- remplacer les 2 transformateurs par un seul transformateur équivalent ;
  - ramener  $X_a$  et  $R_a$  au secondaire du transformateur équivalent ;
  - représenter le circuit de traction (circuit en amont de  $U_T$ ) par un générateur alternatif de fem  $U_{s0}$ , de résistance série  $R_e$  et de réactance série  $X_e$ .
- Calculer les valeurs numériques de  $R_e$  et  $X_e$ .

**QA-3 :** La chute de tension totale est définie par :  $\Delta U = U_{s0} - U_T$  .

Pour une ligne correctement dimensionnée, on a :  $\Delta U \ll U_{s0}$  .

- Représenter le diagramme de Fresnel des tensions ( $\underline{U}_{s0}, \underline{U}_{Re}, \underline{U}_{Xe}, U_T$ ) et du courant  $\underline{I}_T$ , en prenant l'origine des phases sur  $U_T$ .

Une valeur approchée de la chute de tension s'exprime par la relation :

$$\Delta U = R_e I_T \cos\varphi + X_e I_T \sin\varphi ;$$

avec  $\varphi$  : déphasage de  $\underline{I}_T$  par rapport à  $U_T$ .

- A partir du diagramme de Fresnel, retrouver la relation ci-dessus, en précisant l'approximation effectuée.

**QA-4 :** • A partir des relations de QA-3, établir l'équation de  $U_T$  en fonction de  $U_{S0}$ ,  $R_e$ ,  $X_e$ ,  $P$  et  $Q$ . Résoudre l'équation et donner la valeur numérique de  $U_T$ .

- Calculer ensuite le courant  $I_T$ .
- Calculer la tension en charge  $U_S$ , au secondaire des transformateurs.

**QA-5 :** • Faire un bilan des puissances active et réactive, au niveau du comptage de l'énergie (au primaire des transformateurs).

La puissance réactive n'est pas facturée si, au niveau du comptage,  $\text{tg}\varphi \leq 0,4$ .

- Pour le contexte de l'étude (simultanéité de 2 trains se croisant à 20 km de la sous station), déterminer la valeur de la capacité ( $C$ ) de la batterie de compensation, placée au secondaire des transformateurs, nécessaire pour ne pas avoir de facturation de puissance réactive.

*Hypothèse pour le calcul de  $C$  :*

- la tension secondaire des transformateurs n'est pas modifiée par l'installation de  $C$ .

## Partie B : Etude de la batterie de compensation fixe

L'équipement de compensation fixe de puissance réactive, installé au secondaire des transformateurs 63 kV / 27,5 kV de la sous station, est constitué d'une batterie de condensateurs et d'une inductance en série.

Cette partie de l'étude doit permettre de justifier la solution technique mise en œuvre.

Le contexte de l'étude est le même que dans la partie A : circulation de 2 trains de voyageurs, tractés par des locomotives BB 26000, qui se croisent à 20 km de la sous station.

### Données pour la partie B

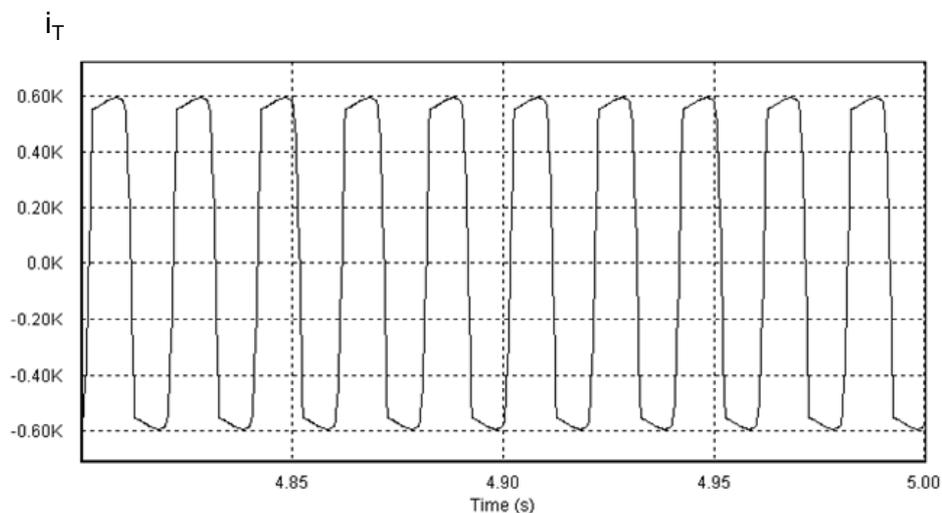
*Réseau d'alimentation des voies :*

- ◆ modèle de Thévenin équivalent à l'ensemble "réseau HTB + transformateurs" :
  - fem sinusoïdale :  $U_{s0} = 27,5 \text{ kV}$ , 50 Hz ;
  - inductance :  $L_r = 17 \text{ mH}$  ;
  - résistance : *négligée* .
- ◆ capacité de la batterie de condensateurs :  $C = 20 \text{ } \mu\text{F}$  ;
- ◆ Inductance placée en série avec C :  $L_b = 88 \text{ mH}$  ;
- ◆ modèle de la ligne double voie :
  - inductance :  $L_l = 18 \text{ mH}$  ;
  - résistance : *négligée* .

*Courant absorbé par les trains :*

Dans la locomotive BB 26000, la tension captée à la caténaire est abaissée par un transformateur, redressée par un pont mixte et filtrée. Les moteurs synchrones sont alimentés, à partir du bus continu (régulé à 1500 V), par un ensemble hacheur-onduleur de courant.

La présence des redresseurs commandés de type pont mixte confère à la charge équivalente à la locomotive un caractère non linéaire. La forme d'onde du courant absorbé par l'ensemble des 2 trains, au moment de leur croisement, est donnée ci-dessous.



**Figure B-1 : Forme d'onde du courant absorbé par les 2 trains**

Résultats de mesures effectués au niveau des locomotives :

- ♦ Fondamental et harmoniques de rang 3, 5 et 7 du courant absorbé par l'ensemble des 2 trains.

	Fondamental	Harmoniques		
	$I_{Tf}$	rang 3 : $I_{Th3}$	rang 5 : $I_{Th5}$	rang 7 : $I_{Th7}$
Fréquence (Hz)	50	150	250	350
Valeur efficace (A)	520	128	40	29

- ♦ Puissances active et réactive (transportées par le fondamental du courant), pour l'ensemble des 2 trains :

$$P = 11500 \text{ kW}, Q = 6500 \text{ kVAR}$$

Pour justifier le rôle de l'inductance  $L_b$ , placée en série avec le condensateur de compensation, on effectue une 1<sup>ère</sup> étude sans  $L_b$  (questions QB-1 à QB-3), puis on reprend l'étude avec  $L_b$  et  $C$  en série (questions QB-4 à QB-6).

### Etude de la compensation par condensateur :

L'équipement de compensation est constitué par une batterie de condensateurs de capacité globale  $C = 20 \mu\text{F}$ .

#### QB-1 : Composante fondamentale des courants

Pour la composante fondamentale du courant, la charge équivalente à l'ensemble des 2 trains est modélisée par un dipôle série  $R_t, L_t$ .

Le schéma électrique équivalent à l'ensemble "alimentation, condensateur de compensation, ligne, charge", est alors :

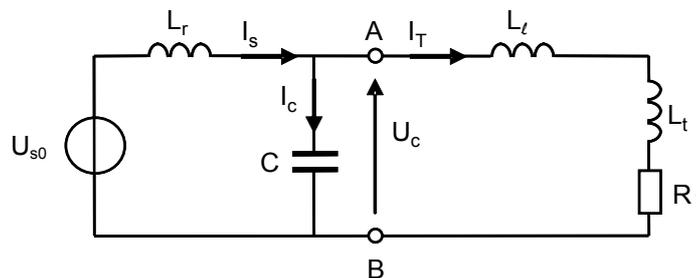


Figure B-2 : Schéma équivalent avec compensation par condensateur

- Déterminer les valeurs numériques de  $R_t$  et  $L_t$ , en fonction des résultats de mesure donnés ci-dessus.
- Calculer la tension à vide  $U_{c0}$  aux bornes de la batterie de compensation (aucun train circulant sur le tronçon alimenté par la sous station). Cette tension est-elle conforme à la norme EN 50-163 qui fixe à 29 kV la tension maximale du réseau d'alimentation des voies ?

- Etablir le modèle de Thévenin du générateur qui alimente la voie (dipôle à gauche des points A et B).
- Calculer :
  - la tension aux bornes de la batterie de compensation, en charge :  $U_{Cf}$  ;
  - la puissance réactive fournie par le condensateur de compensation :  $Q_C$  ;
  - la composante fondamentale du courant dans le condensateur :  $I_{Cf}$  ;
  - la composante fondamentale du courant au secondaire des transformateurs :  $I_{sf}$  .

### QB-2 : Composantes harmoniques des courants

Pour les composantes harmoniques de courant, la charge constituée par les 2 trains est modélisée par un générateur de courant.

- Proposer un schéma électrique équivalent à l'ensemble "alimentation, condensateur de compensation, ligne, charge", pour les composantes harmoniques de courant.
- Etablir :  $\underline{As}_{(\omega)} = \frac{\underline{Is}_{(\omega)}}{\underline{IT}_{(\omega)}}$  et  $\underline{Ac}_{(\omega)} = \frac{\underline{Ic}_{(\omega)}}{\underline{IT}_{(\omega)}}$ , en fonction de  $\omega$  et  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C}}$ .
- Tracer l'allure du diagramme de Bode de  $\underline{As}_{(\omega)}$  et de  $\underline{Ac}_{(\omega)}$  :
  - gains :  $G_s = 20 \log |\underline{As}_{(\omega)}|$  ;  $G_c = 20 \log |\underline{Ac}_{(\omega)}|$
  - arguments :  $\text{Arg } \underline{As}_{(\omega)}$  ;  $\text{Arg } \underline{Ac}_{(\omega)}$  .
- Calculer les composantes harmoniques de courant de rang 3, 5 et 7 au secondaire des transformateurs ( $I_{sh3}$ ,  $I_{sh5}$ ,  $I_{sh7}$ ) et dans le condensateur de compensation ( $I_{ch3}$ ,  $I_{ch5}$ ,  $I_{ch7}$ ).

### QB-3 : Synthèse de la compensation par condensateur

**Sur la feuille réponse DRQB :**

- Porter les valeurs du fondamental et des harmoniques des courants  $I_c$  et  $I_s$ .
- Calculer les valeurs efficaces de  $I_c$  et  $I_s$ , les harmoniques au delà du rang 7 étant négligés.

## Etude de la compensation par condensateur et inductance série :

L'équipement de compensation est constitué par une batterie de condensateurs de capacité globale  $C = 20 \mu\text{F}$  en série avec une inductance  $L_b = 88 \text{ mH}$ .

### QB-4 : Composante fondamentale des courants

Le schéma électrique équivalent est proposé ci-dessous

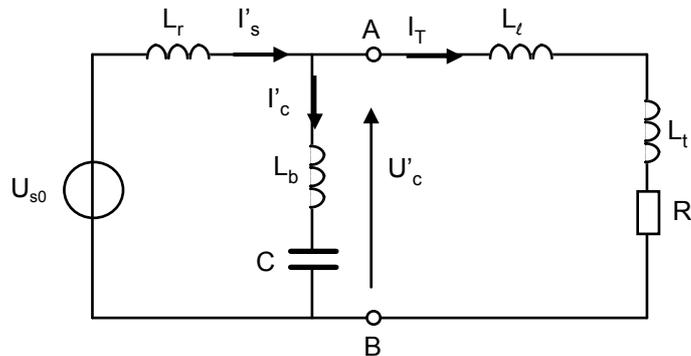


Figure B-3 : Schéma équivalent avec compensation par condensateur et inductance

En admettant que les éléments  $R_t$  et  $L_t$  modélisant la charge conservent la valeur déterminée en QB-1,

- Calculer la tension à vide  $U'_{c0}$  aux bornes du dipôle de compensation ( $C, L_b$ ). Cette tension est-elle conforme à la norme EN 50-163 qui fixe à 29 kV la tension maximale du réseau d'alimentation des voies ?
- Etablir le modèle de Thévenin du générateur qui alimente la voie.
- Calculer :
  - la tension aux bornes du dipôle de compensation, en charge :  $U'_{cf}$  ;
  - la puissance réactive fournie par le dipôle de compensation :  $Q'_{cf}$  ;
  - la composante fondamentale du courant dans le dipôle de compensation :  $I'_{cf}$  ;
  - la composante fondamentale du courant au secondaire des transformateurs :  $I'_{sf}$  .

### QB-5 : Composantes harmoniques des courants

- Etablir :  $\underline{A}'_{S(\omega)} = \frac{I'_S(\omega)}{I_T(\omega)}$  et  $\underline{A}'_{C(\omega)} = \frac{I'_C(\omega)}{I_T(\omega)}$ ,

en fonction de  $\omega$ ,  $\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{L_b \cdot C}}$  et  $\omega''_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_b) \cdot C}}$

- Tracer l'allure du diagramme de Bode de  $\underline{A}'_{S(\omega)}$  et de  $\underline{A}'_{C(\omega)}$  .
- Calculer les composantes harmoniques de courant de rang 3, 5 et 7 au secondaire des transformateurs ( $I'_{sh3}, I'_{sh5}, I'_{sh7}$ ) et dans le dipôle de compensation ( $I'_{ch3}, I'_{ch5}, I'_{ch7}$ ).

**QB-6 : Synthèse de la compensation par condensateur et inductance série**

*Sur la feuille réponse DRQB :*

- Porter les valeurs du fondamental et des harmoniques des courants  $I_C$  et  $I_S$ .
- Calculer les valeurs efficaces de  $I_C$  et  $I_S$ , les harmoniques au delà du rang 7 étant négligés.

**QB-7 :** • Conclure sur l'intérêt de réaliser la compensation de puissance réactive par un dipôle L - C, en précisant le critère de dimensionnement de L.

## **Partie C : Principe d'un système de compensation régulée, basé sur des onduleurs de tension MLI**

### **Analyse du relevé des consommations de puissances active et réactive**

#### ***Modalités de facturation de l'énergie réactive :***

Au point de livraison, le distributeur fournit gratuitement l'énergie réactive,

- sans limitation pendant les heures creuses d'hiver et pendant la totalité de l'été tarifaire (avril à octobre).
- jusqu'à concurrence de 40% de l'énergie active consommée ( $\text{tg}\varphi = 0,4$ ) pendant les heures de pointe fixe, de pointe mobile et les heures pleines d'hiver (de 6h à 22h), de novembre à mars.

Pendant les périodes soumises à limitation, l'énergie réactive consommée au-delà de  $\text{tan}\varphi = 0,4$  est facturée.

La sous station de Creil est équipée d'une batterie de compensation fixe qui fournit une puissance réactive de 5,5 MVAR, sous 26 kV. Pendant les périodes de fort trafic, cette puissance est insuffisante pour supprimer toute facturation d'énergie réactive. Pour mieux s'adapter au trafic, la SNCF envisage la mise en œuvre d'un compensateur régulé, installé en parallèle avec la compensation fixe. Cet équipement, actuellement à l'étude, peut être réalisé par des onduleurs de tension MLI.

*(Un compensateur de puissance réactive comprenant un convertisseur statique à commande MLI est appelé : compensateur actif de puissance réactive, dénomination utilisée dans la suite du texte).*

Au poste de comptage, une centrale de mesure d'énergie permet un relevé des puissances active et réactive, toutes les 10 minutes. La puissance du compensateur régulé a été fixée à 3 MVAR, en fonction des relevés de l'année 2005. On vous propose de justifier ce choix à partir des relevés du mercredi 16/02/05 entre 6h et 22h, correspondant à une journée de fort trafic. Pour limiter les calculs, on donne uniquement les valeurs moyennes de P et de Q consommées toutes les ½ heures (voir document réponse DRQC1).

*Exemple :*

1<sup>ère</sup> ligne du tableau : P = 15264 kW, Q = 7488 kVAR correspondent aux puissances moyennes entre 6h et 6h ½, au poste de comptage.

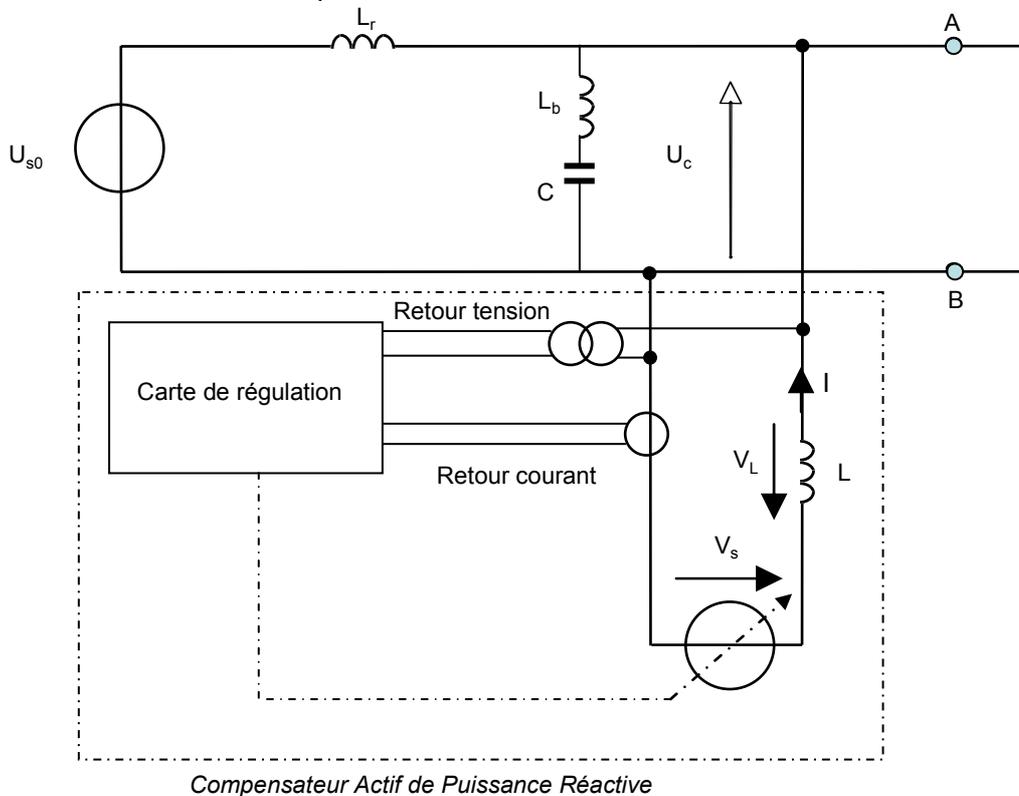
### **QC-1 :**

#### ***Sur le document réponse DRQC1,***

- Calculer l'énergie réactive facturée pour la journée du 16/02/05.
- Après installation d'un compensateur régulé pouvant fournir 3 MVAR, calculer l'énergie réactive qui serait facturée pendant la même période.
- Conclure sur la diminution de facturation d'énergie réactive apportée par l'installation du compensateur régulé de 3 MVAR.

## Etude du principe du compensateur actif de puissance réactive.

Conformément à la figure ci-dessous, le compensateur actif de puissance réactive est raccordé en parallèle au niveau de la sous station. Il est constitué d'une source de tension alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz, associée en série à une bobine d'inductance L.



**Figure C-1 : Principe du compensateur actif de puissance réactive**

La carte de régulation permet le contrôle du courant I en asservissant la source de tension alternative  $V_s$  en amplitude et en phase.

En pratique, la source de tension  $V_s$  est réalisée par l'association série d'onduleurs de tension MLI. L'étude de la structure réelle est proposée par la suite (Partie D).

### Conditions d'étude :

- L'origine des phases est donnée par la tension caténaire délivrée par la sous station :

$$u_c(t) = U_c \cdot \sqrt{2} \sin \omega t$$

- Le courant délivré par le compensateur, supposé alternatif sinusoïdal, est de la forme :

$$i(t) = \pm I \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

- La tension  $v_s(t)$ , de fréquence 50 Hz, s'exprime par :

$$v_s(t) = m_a \cdot E_T \sin \omega t \quad , \text{ avec}$$

-  $E_T$  : tension continue du convertisseur statique réalisé par la mise en série des onduleurs de tension,  $E_T = 43,2 \text{ kV}$  ;

-  $m_a$  : profondeur de modulation,  $0 < m_a < 1$ .

### QC-2 : Diagramme vectoriel

Pour  $i(t) = +I\sqrt{2}\cdot\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$ , puis pour  $i(t) = -I\sqrt{2}\cdot\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$  :

- Représenter le diagramme de Fresnel de  $\underline{U}_C$ ,  $\underline{I}$ ,  $\underline{V}_S$  et  $\underline{V}_L$ .
- Préciser, pour chaque mode de fonctionnement :
  - s'il y a échange de puissance active entre le compensateur et le réseau de traction ;
  - si le compensateur *fournit* ou *absorbe* de la puissance réactive.
- Quelle condition doit exister entre  $V_S$  et  $U_C$  pour que le compensateur *fournisse* de la puissance réactive ?

### QC-3 : Puissance réactive échangée entre le compensateur et le réseau de traction

- Etablir l'expression de la puissance réactive échangée entre le compensateur et le réseau de traction, en fonction de  $U_C$ ,  $E_T$ ,  $m_a$  et  $L\omega$ .

- Mettre  $Q$  sous la forme :

$$Q = Q_{cc} \cdot \left( \frac{m_a}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_T}{U_C} - 1 \right), \text{ en précisant l'expression de } Q_{cc}.$$

- Pour  $U_C = 27,5 \text{ kV}$ , et pour  $0,8 < m_a < 1$ , tracer l'allure du graphe d'évolution de  $\frac{Q}{Q_{cc}}$ .

- Dans quelle situation est-il intéressant que le compensateur puisse *absorber* de la puissance réactive ?

### Etude de la régulation du compensateur

Le schéma bloc de la régulation de courant est donné à la figure C-2. Il comporte un correcteur de type proportionnel intégral (PI) ainsi qu'une compensation de la perturbation introduite par la tension caténaire  $U_C$ .

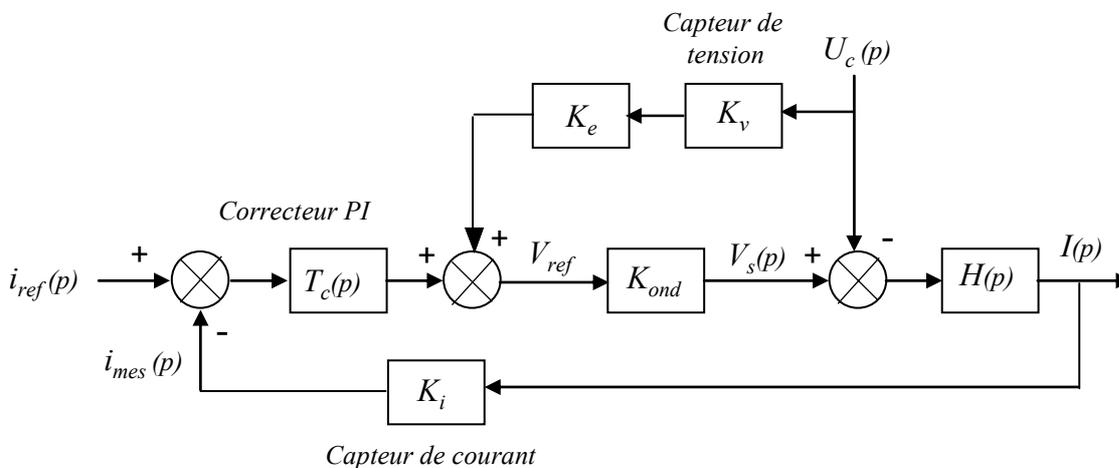


Figure C-2 : Schéma bloc de la régulation de courant du compensateur

- la référence de courant  $i_{réf}(t)$ , parfaitement sinusoïdale, est à la même fréquence que la tension caténaire mais est déphasée par rapport à celle-ci de  $\pm \frac{\pi}{2}$  selon le mode de fonctionnement du compensateur ;
- le convertisseur statique réalisé par la mise en série des onduleurs de tension est modélisé par un gain statique :  $K_{ond} = 8640 \text{ V/V}$  ;
- le capteur de courant est modélisé par un gain statique :  $K_i = 0,05 \text{ V/A}$  ;
- le capteur de tension est modélisé par un gain statique :  $K_v = 100 \cdot 10^{-6} \text{ V/V}$  ;
- l'inductance a une valeur :  $L = 6,25 \text{ mH}$  ;
- la fonction de transfert du correcteur Proportionnel Intégral est de la forme :

$$T_c(p) = K \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p}$$

#### QC4 : Calcul des paramètres du correcteur de la boucle de courant

- Ecrire la fonction de transfert  $H(p)$  .
- Pour  $U_c(p) = 0$ ,
  - établir la fonction de transfert en boucle ouverte  $T_{BO}(p) = \frac{I_{mes}(p)}{I_{réf}(p)}$  .
  - calculer les paramètres  $K$  et  $T_i$  du correcteur PI pour obtenir en boucle ouverte une bande passante de 200 Hz et une marge de phase de  $60^\circ$  .
- Calculer la valeur de  $K_e$  pour que la compensation de perturbation fonctionne correctement.

#### QC5 : Boucle externe de Régulation

L'amplitude de la référence de courant  $i_{réf}(t)$  est élaborée à partir d'une boucle de régulation externe qui évite les surtensions lorsque la caténaire est à vide et permet de lisser les pointes de consommation de puissance réactive.

- Proposer un schéma de principe pour cette régulation.

## Partie D : Synthèse de la source de tension alternative réglable du compensateur actif de puissance réactive.

Comme cela a été indiqué dans partie C, la source de tension  $V_S$  est réalisée par la mise en série de douze onduleurs de tension.

Dans cette partie, avant d'aborder l'étude de cette architecture haute tension, nous considérons d'abord le fonctionnement d'un seul onduleur.

Les interrupteurs statiques sont supposés idéaux : la tension à leurs bornes est nulle à l'état passant et le courant qui les traverse est nul à l'état bloqué.

### Synthèse d'un onduleur de tension MLI

Le circuit de la figure D-1 comporte une cellule de commutation constituée des interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$ . Il permet de contrôler l'énergie échangée entre la source de tension et la source de courant. Les interrupteurs commutent à une fréquence constante notée  $f_c$ . La période de commutation est notée  $T_c$  ( $T_c = 1/f_c$ ).

La tension d'entrée  $E$  et le courant de sortie sont des grandeurs continues ( $i(t) = I$ ).

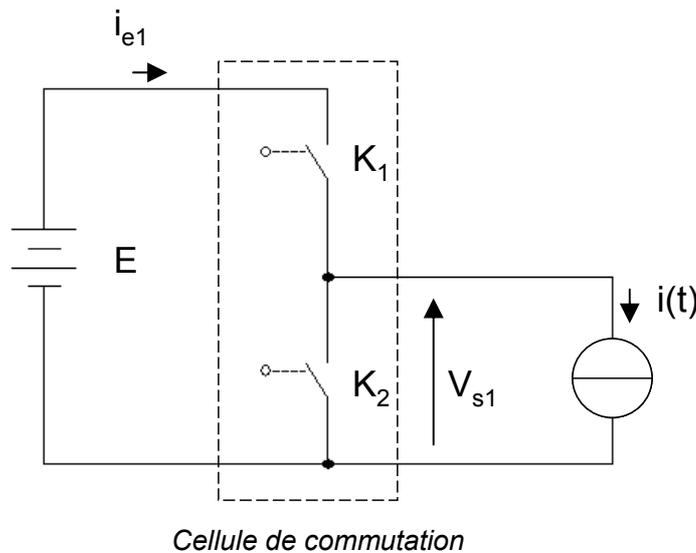


Figure D-1 : Convertisseur élémentaire à une cellule de commutation

La commande de la cellule de commutation est réalisée selon le principe de la figure D-2.

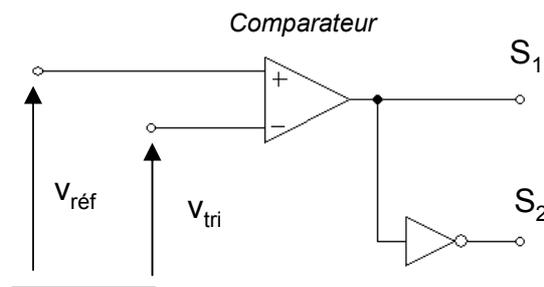


Figure D-2 : Modulateur de la cellule de commutation

$V_{tri}$  est un signal triangulaire symétrique d'amplitude crête  $\hat{V}_{tri}$ , il fixe la fréquence de commutation des interrupteurs  $f_c$ .  $V_{réf}$  est appelé signal modulant, son amplitude est telle que  $|V_{réf}| < \hat{V}_{tri}$ . Il permet de contrôler le rapport cyclique  $\alpha_1$  de la commande des interrupteurs.

Le modulateur associé à la cellule de commutation comprend un comparateur dont le signal de sortie permet de commander les interrupteurs de la cellule :

$V_{réf} > V_{tri}$  alors  $S_1 = 1$  et  $S_2 = 0$  : interrupteur  $K_1$  fermé et interrupteur  $K_2$  ouvert

$V_{réf} < V_{tri}$  alors  $S_1 = 0$  et  $S_2 = 1$  : interrupteur  $K_1$  ouvert et interrupteur  $K_2$  fermé

### QD1 : Etude des formes d'ondes pour une cellule de commutation

- Compléter le document réponse **DRQD1** en traçant l'allure de  $S_1(t)$ ,  $V_{s1}(t)$  et  $i_{e1}(t)$ .
- Quels sont la fréquence de découpage  $f_{dec}$  et le nombre de niveaux  $N_{niv}$  obtenus sur la tension de sortie  $V_{s1}(t)$  ?
- A partir des tracés précédant, établir en fonction du rapport cyclique  $\alpha_1$ , l'expression des valeurs moyennes de  $V_{s1}(t)$  et  $i_{e1}(t)$  respectivement notées  $V_{s1moy}$  et  $i_{e1moy}$ .
- Donner l'expression du rapport cyclique  $\alpha_1$  en fonction de  $V_{réf}$  et  $\hat{V}_{tri}$ .

### QD2 : Etude des formes d'ondes pour une association différentielle de cellules de commutation

La figure D-3 représente une association différentielle de deux cellules de commutation (cellule 1 :  $K_1$  et  $K_2$  ; cellule 2 :  $K_3$  et  $K_4$ ). La tension d'entrée  $E$  et le courant de sortie sont des grandeurs continues ( $i(t) = I$ ).

Le principe de commande des interrupteurs de la cellule 2 est identique à celui de la cellule 1 :

$S_3 = 1$  et  $S_4 = 0$  : interrupteur  $K_3$  fermé et interrupteur  $K_4$  ouvert.

$S_3 = 0$  et  $S_4 = 1$  : interrupteur  $K_3$  ouvert et interrupteur  $K_4$  fermé.

Grâce au modulateur présenté à la figure D-4, les deux cellules commutent à la même fréquence  $f_c$ , mais les rapports cycliques de leurs signaux de commande sont complémentaires :  $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ . Pour cela, le signal modulant de la cellule 2 est égal à  $-V_{réf}$ .

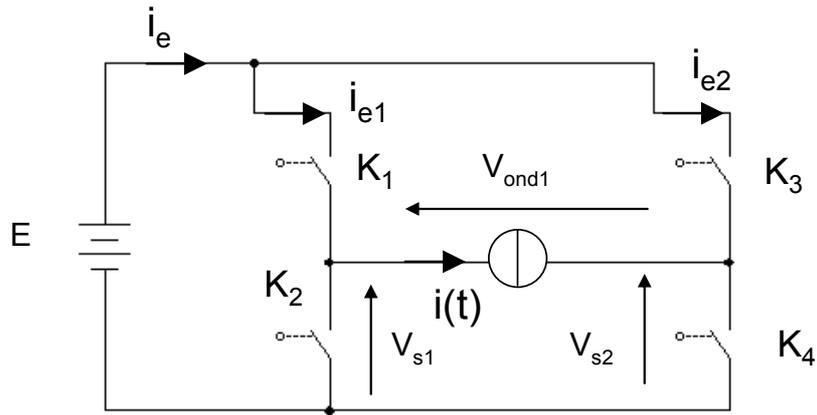


Figure D-3 : Association différentielle de deux cellules de commutation.

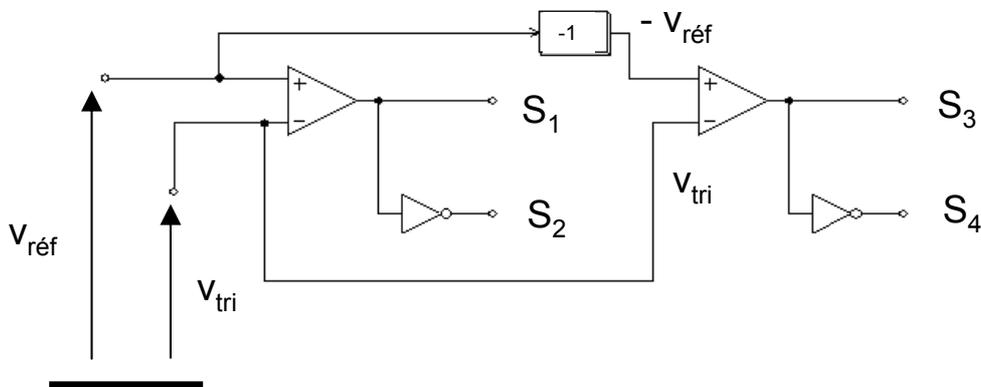


Figure D-4 : Modulateur utilisé pour l'association des deux cellules de commutation

- Compléter le document réponse **DRQD2** en traçant l'allure de  $V_{s1}(t)$ ,  $V_{s2}(t)$ ,  $V_{ond1}(t)$ ,  $i_{e1}(t)$ ,  $i_{e2}(t)$ ,  $i_e(t)$  pour  $V_{réf} > 0$  et  $V_{réf} < 0$ .
- Quels sont la fréquence de découpage  $f_{dec}$  et le nombre de niveaux  $N_{niv}$  obtenus sur la tension de sortie  $V_{ond1}(t)$  ?
- Par un bilan de puissance au niveau du convertisseur, montrer qu'il est possible de déduire directement l'allure du courant  $i_e(t)$  à partir du tracé de  $V_{ond1}(t)$  et  $i(t)$ .
- A partir des tracés du document réponse DRQD2 établir en fonction du rapport cyclique  $\alpha_1$ , l'expression des valeurs moyennes de  $V_{ond1}(t)$  et  $i_e(t)$  respectivement notées  $V_{ond1moy}$  et  $i_{emoy}$ .
- Etablir ensuite l'expression de  $V_{ond1moy}$  et  $i_{emoy}$  en fonction de  $V_{réf}$  et  $\hat{V}_{tri}$ .

### QD3 : Modèle moyen d'un onduleur de tension MLI

La structure et la commande d'un onduleur de tension sont identiques aux circuits présentés aux figure D-3 et D-4. Le signal modulant  $V_{réf}$  ainsi que la source de courant de sortie sont des grandeurs alternatives sinusoïdales de pulsation  $\omega$  telles que :

$$v_{réf}(t) = \hat{V}_{réf} \cdot \sin \omega.t \text{ et } i(t) = I\sqrt{2} \cdot \sin(\omega.t - \varphi)$$

On définit la profondeur de modulation comme étant le rapport entre l'amplitude crête du signal modulant sinusoïdal et l'amplitude crête du signal triangulaire :

$$m_a = \frac{\hat{V}_{réf}}{\hat{V}_{tri}}$$

On suppose que la fréquence du signal triangulaire est très grande devant la fréquence du signal modulant, ainsi à l'échelle d'une période  $T_c$ , le signal  $v_{réf}(t)$  peut être considéré comme constant.

- A partir des résultats de la question QD2, établir en fonction de  $E$  et  $m_a$  l'expression de la valeur moyenne instantanée de  $V_{ond1moy}$ .
- A partir des résultats de la question QD2, établir en fonction de  $I\sqrt{2}$  et  $m_a$  l'expression de la valeur moyenne instantanée de  $i_{emoy}$ . Montrer que celle-ci comprend une composante continue et une composante alternative de pulsation  $2\omega$ .
- Dans le cas particulier où  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , expliquer pourquoi la source de tension  $E$  peut être remplacée par un condensateur dont la valeur moyenne de la tension aux bornes est égale à  $E$ .
- Calculer la valeur  $C$  de la capacité de ce condensateur pour qu'à la pulsation  $2\omega$  l'ondulation de tension crête à crête à ses bornes soit égale à 5 % de  $E$  pour un courant efficace  $I = 120$  A,  $E = 3600$  V et  $m_a = 0,91$  ( $\omega = 314$  rd/s).

### QD4 : Tracé des formes d'ondes instantanées pour un onduleur de tension MLI

Le signal modulant est alternatif sinusoïdal de fréquence 50 Hz et le signal triangulaire a une fréquence  $f_c$  de 500 Hz. Le courant  $i(t)$  est parfaitement sinusoïdal et la profondeur de modulation est de 0,91.

- Compléter le document réponse **DRQD4** en traçant l'allure de  $V_{s1}(t)$ ,  $V_{s2}(t)$ ,  $V_{ond1}(t)$  et  $i_e(t)$ .

## QD5 : Synthèse des interrupteurs

Pour déterminer les caractéristiques statique et dynamique des interrupteurs permettant de synthétiser l'onduleur de tension MLI, nous considérons la cellule de commutation de la figure D-5.

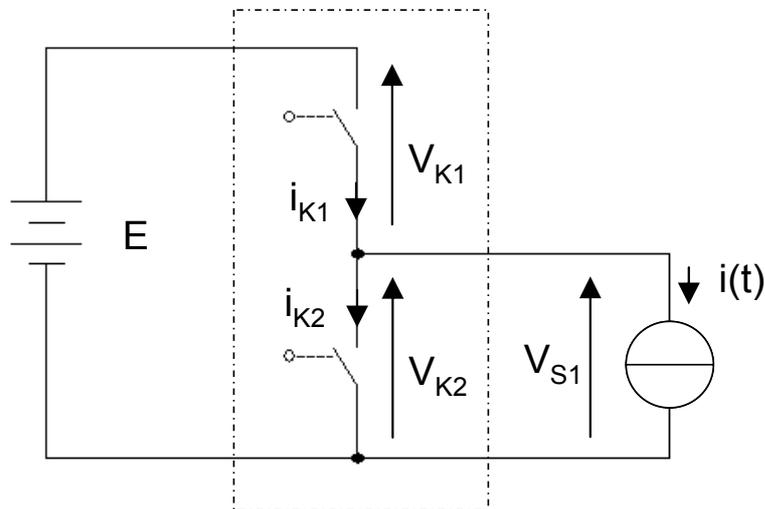


Figure D-5 : Cellule de commutation constituée des interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$ .

Lorsque cette cellule de commutation fonctionne dans un onduleur de tension MLI, la fréquence de commutation des interrupteurs est supérieure à la fréquence du courant  $i(t)$ . Ainsi, plusieurs commutations peuvent s'enchaîner sans que le courant  $i(t)$  change de signe.

Afin de déterminer les caractéristiques des interrupteurs à utiliser, nous supposons qu'à l'échelle d'une période de commutation, le courant  $i(t)$  reste constant et nous allons considérer deux cas :

- Courant positif :  $i(t) = I$
- Courant négatif :  $i(t) = -I$

La tension  $V_{S1}(t)$  et le courant  $i(t)$  sont donnés dans le document réponse **DRQD5**.

- Dessiner pour chaque interrupteur l'allure du courant et de la tension. Suivant le signe du courant  $i(t)$ , préciser dans le plan  $(I_k, V_k)$  la trajectoire du point de fonctionnement de chaque interrupteur (cf annexe 2).
- En vous référant à l'annexe 2, déterminer le type d'interrupteur à utiliser pour réaliser  $K_1$  et  $K_2$  dans le cas où le courant  $i$  est positif et dans le cas où le courant  $i$  est négatif.
- En déduire le schéma structurel de la cellule de commutation permettant le fonctionnement en onduleur de tension MLI.

## Etude de l'architecture haute tension

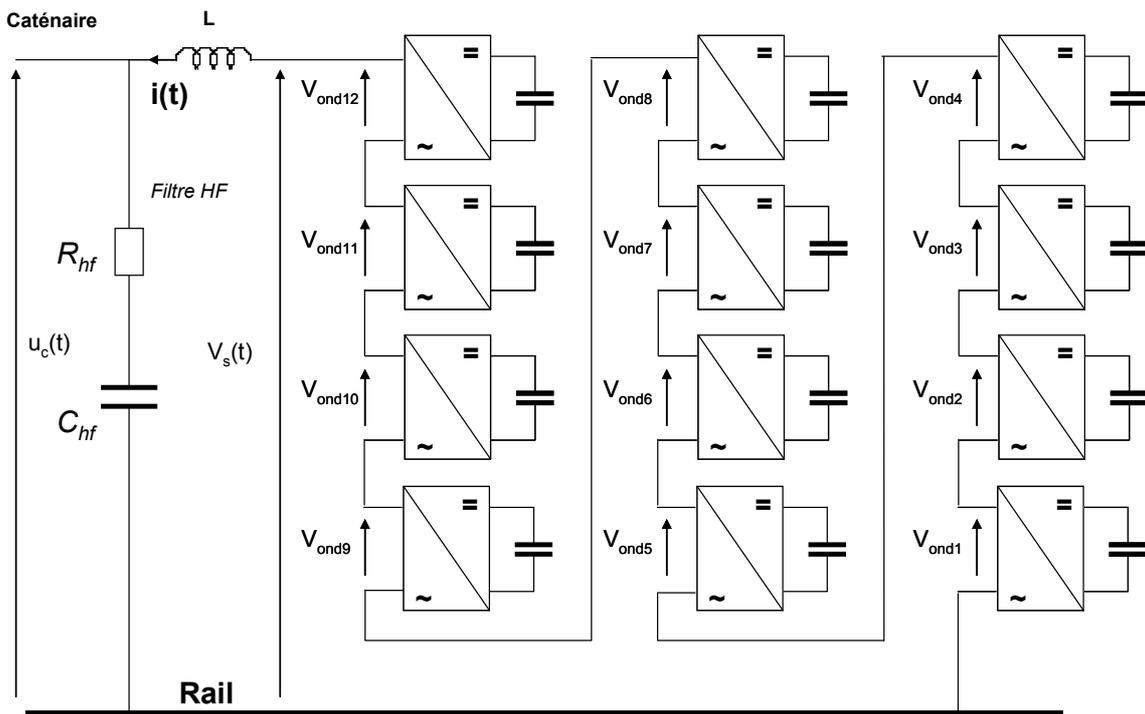


Figure D-6 : Architecture Haute Tension du compensateur de puissance réactive.

Le compensateur statique est constitué d'une association série de 12 onduleurs et d'une bobine de lissage du courant (Figure D-6). Chaque bloc onduleur fonctionne avec une tension de bus continu régulée à 3600 V. Chaque onduleur possède son propre modulateur (schéma de principe identique à celui de la figure D-4). Le signal modulant  $v_{réf}$  est appliqué à l'ensemble des modulateurs, les porteuses triangulaires ont même amplitude  $\hat{V}_{tri}$  et même fréquence  $f_c$ , mais sont déphasées de  $\pi/12$  les unes par rapport aux autres afin d'entrelacer les tensions délivrées par les onduleurs.

Ainsi, la mise en série permet de fonctionner sans transformateur sous une tension de 27,5 kV. D'autre part grâce à l'entrelacement des tensions délivrées par les onduleurs, elle permet d'augmenter la fréquence apparente et le nombre de niveaux de la tension de sortie  $V_s(t)$  ce qui minimise la valeur de l'inductance de la bobine de lissage du courant.

Le courant  $i(t)$  comporte une composante haute fréquence à la fréquence apparente de découpage de  $V_s(t)$  et une composante fondamentale à la fréquence du réseau telle que

$$i_{BF}(t) = I\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \text{ avec } \varphi = \pm \frac{\pi}{2} \text{ selon le mode de fonctionnement du compensateur.}$$

$$\text{Ainsi } i(t) = i_{BF}(t) + i_{hf}(t)$$

Au point de fonctionnement nominal du compensateur, la composante fondamentale de  $i(t)$  a une valeur efficace de 120 A. Le filtre haute fréquence placé en sortie du compensateur et constitué des éléments  $R_{hf}$  et  $C_{hf}$  permet de filtrer la composante haute fréquence du courant  $i(t)$  et éviter qu'elle soit injectée sur la caténaire.

## QD6 : Etude de la mise en série de deux onduleurs de tension

Afin de mettre en évidence le principe de mise en série et d'entrelacement des commandes des onduleurs, nous nous limitons dans un premier temps à l'étude de la mise en série de deux onduleurs conformément à la figure D-7.

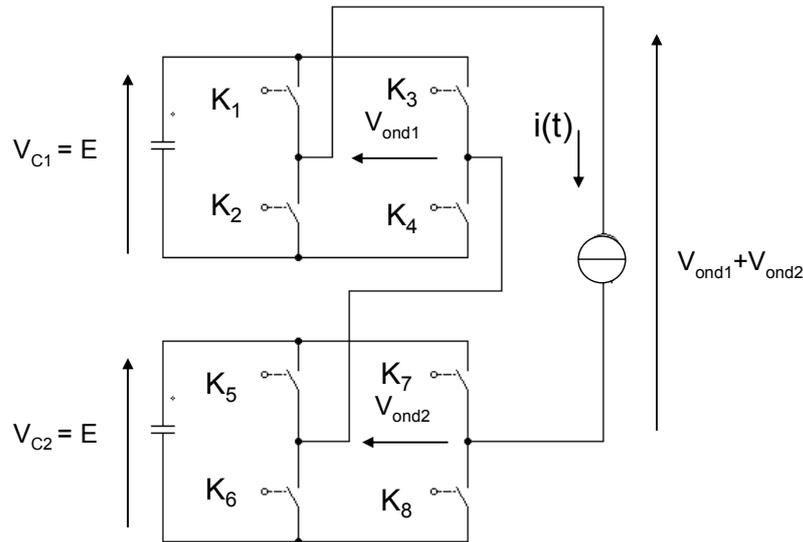


Figure D-7 : Mise en série de deux onduleurs de tension

Pour entrelacer les tensions délivrées par deux onduleurs, les porteuses triangulaires des modulateurs sont déphasées de  $\pi/2$  (un quart de période  $T_c$ ). Le document réponse DRQD6 présente les formes d'ondes des tensions  $V_{ond1}(t)$  et  $V_{ond2}(t)$  pour différentes valeurs de  $V_{réf}$ .

- Compléter le document réponse **DRQD6** en traçant l'allure de la tension totale délivrée par les deux onduleurs :  $V_{ond1}(t) + V_{ond2}(t)$  pour les différentes valeurs de  $V_{réf}$ .
- Dédire de ces formes d'ondes, la fréquence apparente de découpage pour la tension totale  $V_{ond1}(t) + V_{ond2}(t)$  ainsi que le nombre de niveaux de tension obtenus

## QD7 : Détermination de la fréquence apparente de découpage du compensateur actif de puissance réactive

On considère maintenant le compensateur constitué par les douze onduleurs de tension associés en série avec la bobine.

- En reprenant les résultats des questions QD1, QD2 et QD6, rappeler la fréquence apparente de découpage  $f_{dec}$  et le nombre de niveaux  $N_{niv}$  de l'onde de tension délivrée dans le cas :
  - d'une cellule de commutation
  - d'un onduleur de tension (deux cellules de commutation à commande entrelacées)
  - de l'association série de 2 onduleurs de tension (quatre cellules de commutation)

- A partir de ces résultats, en déduire pour une association de  $n$  cellules de commutation dont les commandes sont décalées de  $2.\pi/n$  :

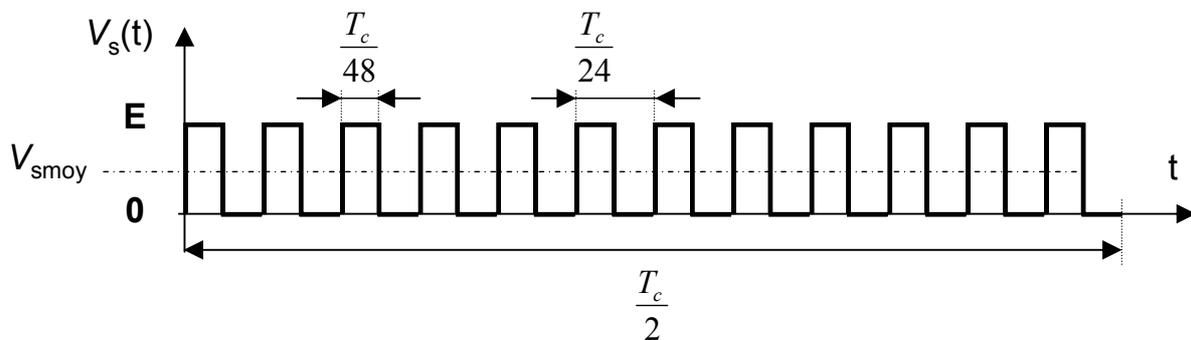
- L'expression de la fréquence apparente de découpage  $f_{dec}$  en fonction de la fréquence de commutation des interrupteurs,  $f_c$

- Le nombre de niveaux de tension obtenus  $N_{niv}$ .

- En déduire, pour les douze onduleurs en série, la fréquence apparente de découpage ainsi que le nombre de niveaux de tension obtenus sur la tension  $V_s(t)$ .

**QD8 : Calcul de l'inductance de la bobine de lissage du courant.**

La figure D-8 représente à l'échelle d'une demi-période de commutation la tension  $V_s(t)$  dans un cas où l'ondulation du courant  $i(t)$  à la fréquence apparente de découpage est maximale.



**Figure D-8 : Forme d'onde de  $V_s(t)$  pour  $V_{réf} = \frac{\hat{V}_{tri}}{24}$**

- En faisant l'hypothèse qu'à l'échelle d'une période de découpage ( $\frac{T_c}{24}$ ), la tension caténaire  $U_c$  est constante et égale à  $V_{smoy}$ , donner l'allure de  $i_{hf}(t)$ , composante haute fréquence du courant  $i(t)$ , et établir l'expression de son ondulation crête à crête  $\Delta i$ .

- Calculer la valeur de l'inductance  $L$  pour que  $\Delta i = 12$  A sachant que  $f_c = 500$  Hz et  $E = 3600$  V.

- Quelle sera alors la valeur de la chute de tension aux bornes de la bobine pour la composante fondamentale à 50 Hz lorsque le compensateur délivre son courant nominal ?

## Partie E : Détermination des pertes et des températures de jonction des semi-conducteurs.

Pour réaliser les interrupteurs d'un onduleur, on a choisi les modules IGBT EUPEC FZ 200 R 65 KF1 dont la documentation est fournie en annexe 3. Chaque module comprend un transistor IGBT et une diode connectés en antiparallèle. Il faut donc quatre modules pour réaliser un onduleur conformément à la figure E-1.

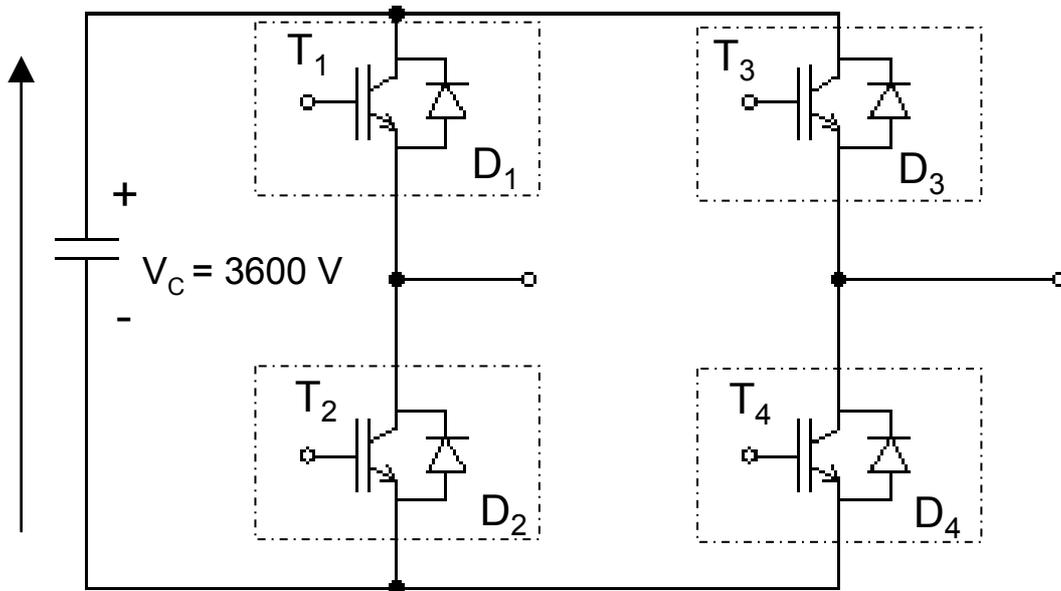


Figure E-1 : Réalisation d'un bloc onduleur avec des modules IGBT.

Le document réponse **DRQE1** présente les formes d'ondes des courants dans la diode  $D_1$  et le transistor  $T_1$  lorsque l'onduleur délivre son courant nominal. Pour ce point de fonctionnement, on a calculé pour les semi-conducteurs les grandeurs suivantes :

- Courant efficace dans le transistor :  $I_{T1\text{eff}} = 60 \text{ A}$
- Courant moyen dans le transistor :  $I_{T1\text{moy}} = 27 \text{ A}$
- Courant efficace dans la diode :  $I_{D1\text{eff}} = 60 \text{ A}$
- Courant moyen dans la diode :  $I_{D1\text{moy}} = 27 \text{ A}$

### QE1 : Calcul des pertes en conduction dans le transistor IGBT et dans la diode.

Pour effectuer le calcul des pertes en conduction, les caractéristiques à l'état passant du transistor IGBT et la diode sont linéarisées :

$$\text{Pour le transistor : } V_{CE} = V_{T0} + r_T \cdot I_C$$

$$\text{Pour la diode : } V_F = V_{D0} + r_D \cdot I_F$$

- Le document constructeur indique la caractéristique à l'état passant du transistor  $I_C = f(V_{CE})$  pour  $V_{GE} = 15 \text{ V}$ . En considérant que la caractéristique linéarisée passe par les points  $I_C = 25 \text{ A}$  et  $I_C = 150 \text{ A}$ , déterminer les valeurs de  $V_{T0}$  et  $r_T$  puis calculer les pertes en conduction dans le transistor IGBT :  $P_{\text{COND}_T}$ .

- Le document constructeur indique la caractéristique à l'état passant de la diode  $I_F = f(V_F)$ . En considérant que la caractéristique linéarisée passe par les points  $I_F = 50 \text{ A}$  et  $I_F = 200 \text{ A}$ , déterminer les valeurs de  $V_{D0}$  et  $r_D$  puis calculer les pertes en conduction dans la diode :  $P_{\text{COND\_D}}$ .

## **QE2 : Calcul des pertes en commutation dans le transistor IGBT et dans la diode.**

Le document constructeur donne sur le même graphique, pour la diode et le transistor, les énergies dissipées par commutation en fonction du courant commuté ( $I_F = I_C$ ).

Pour le transistor les énergies dissipées à l'amorçage et au blocage sont précisées ( $E_{\text{on}}$  et  $E_{\text{off}}$ ). Pour la diode, l'énergie dissipée à l'amorçage est négligeable, seule l'énergie dissipée au blocage lors du recouvrement est indiquée ( $E_{\text{REC}}$ ).

- A partir de ces courbes données dans le document constructeur, compléter les tableaux du document réponse DRQE1 puis calculer les pertes en commutation dans le transistor et la diode :

Pertes à l'amorçage dans l'IGBT :  $P_{\text{ON\_T}}$ .

Pertes au blocage dans l'IGBT :  $P_{\text{Off\_T}}$ .

Pertes au blocage dans la diode :  $P_{\text{Off\_D}}$ .

- Calculer les pertes totales dans le transistor et la diode, puis les pertes par module.

## **QE3 : Etude thermique en régime permanent**

Le document constructeur du module FZ 200 R 65 KF1 précise les résistances thermiques jonction-boîtier pour le transistor et la diode ainsi que la résistance thermique de contact semelle dissipateur.

- En supposant qu'à l'intérieur du module, les puces diode et transistor sont thermiquement découplées, proposer un modèle thermique nodal permettant de calculer approximativement en fonction des puissances dissipées et pour une température de refroidisseur donnée, la température de jonction de la diode et du transistor.
- Pour une température de dissipateur  $\theta_h$  de  $50 \text{ °C}$ , calculer les températures de jonction du transistor ( $\theta_{JT}$ ) et de la diode ( $\theta_{JD}$ ) lors du fonctionnement de l'onduleur à son courant nominal.

# **DOCUMENTS RÉPONSES**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQB**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQC1**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD1**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD2**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD4**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD5**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD6**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQE1**

**QB-3 : Batterie de compensation sans  $L_b$**

- Composantes fondamentale et harmoniques,
  - du courant dans la batterie de condensateurs ;
  - du courant au secondaire des transformateurs.

F(Hz)	50	150	250	350
$I_T$ (A)	520	128	40	29
$I_c$ (A)				
$I_s$ (A)				

- Valeur efficace de  $I_c$  :

- Valeur efficace de  $I_s$  :

**QB-6 : Batterie de compensation avec  $L_b$**

- Composantes fondamentale et harmoniques,
- du courant dans la batterie de condensateurs ;
  - du courant au secondaire des transformateurs.

F(Hz)	50	150	250	350
$I_T$ (A)	520	128	40	29
$I_c$ (A)				
$I_s$ (A)				

- Valeur efficace de  $I_c$  :

- Valeur efficace de  $I_s$  :

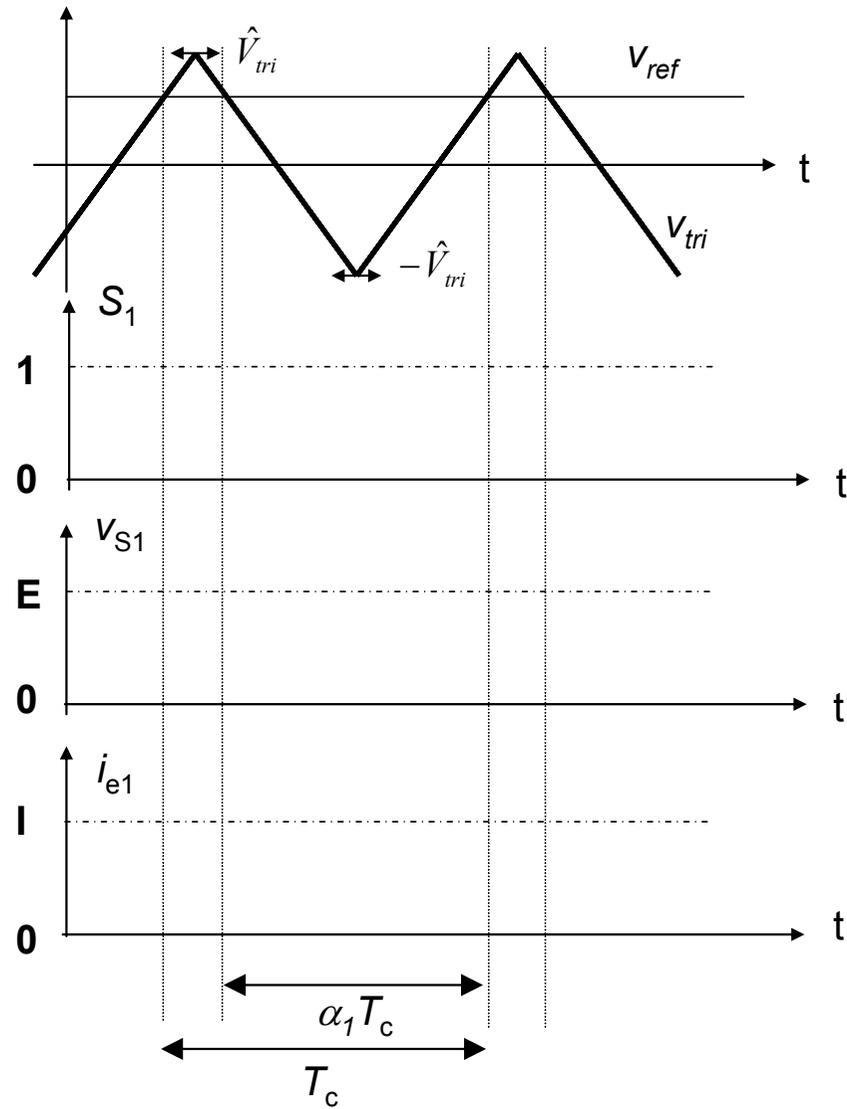
**DRQB : Calcul des valeurs efficaces des courants  $I_c$  et  $I_s$**

Date	heure	P (kW)	Q (kVAR)	Wr facturée (kVARh)	W'r facturée (kVARh)
mercredi 16/02/05	6:00	15264	7488		
mercredi 16/02/05	6:30	11496	6156		
mercredi 16/02/05	7:00	19344	12348		
mercredi 16/02/05	7:30	18936	11376		
mercredi 16/02/05	8:00	16632	9360		
mercredi 16/02/05	8:30	19440	13572		
mercredi 16/02/05	9:00	14544	7380		
mercredi 16/02/05	9:30	9456	3060		
mercredi 16/02/05	10:00	7464	1044		
mercredi 16/02/05	10:30	6240	396		
mercredi 16/02/05	11:00	9864	2520		
mercredi 16/02/05	11:30	7728	720		
mercredi 16/02/05	12:00	7944	756		
mercredi 16/02/05	12:30	10248	2736		
mercredi 16/02/05	13:00	11328	2916		
mercredi 16/02/05	13:30	11976	4068		
mercredi 16/02/05	14:00	7536	648		
mercredi 16/02/05	14:30	3360	72		
mercredi 16/02/05	15:00	4008	180		
mercredi 16/02/05	15:30	4296	324		
mercredi 16/02/05	16:00	6936	1224		
mercredi 16/02/05	16:30	10152	3456		
mercredi 16/02/05	17:00	11352	4608		
mercredi 16/02/05	17:30	8568	3528		
mercredi 16/02/05	18:00	15144	8172		
mercredi 16/02/05	18:30	15696	9396		
mercredi 16/02/05	19:00	15624	8640		
mercredi 16/02/05	19:30	13536	6840		
mercredi 16/02/05	20:00	16200	6804		
mercredi 16/02/05	20:30	13512	7236		
mercredi 16/02/05	21:00	19056	11844		
mercredi 16/02/05	21:30	14112	7128		
mercredi 16/02/05	22:00	11952	4104		
<b>Wr total facturée (kVARh)</b>					

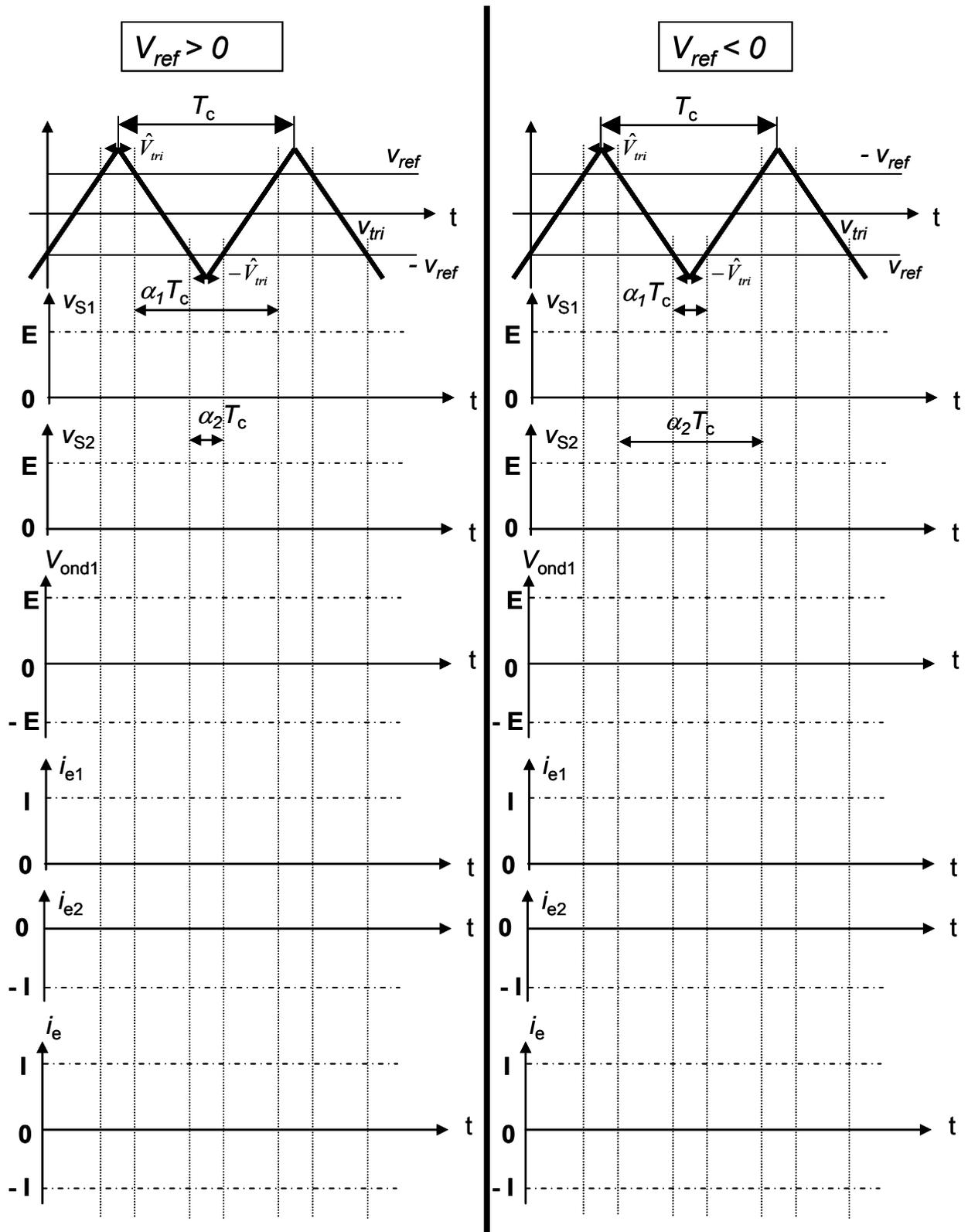
Wr : énergie réactive facturée avec compensateur fixe seul

W'r : énergie réactive facturée avec compensateur fixe + compensateur réglé

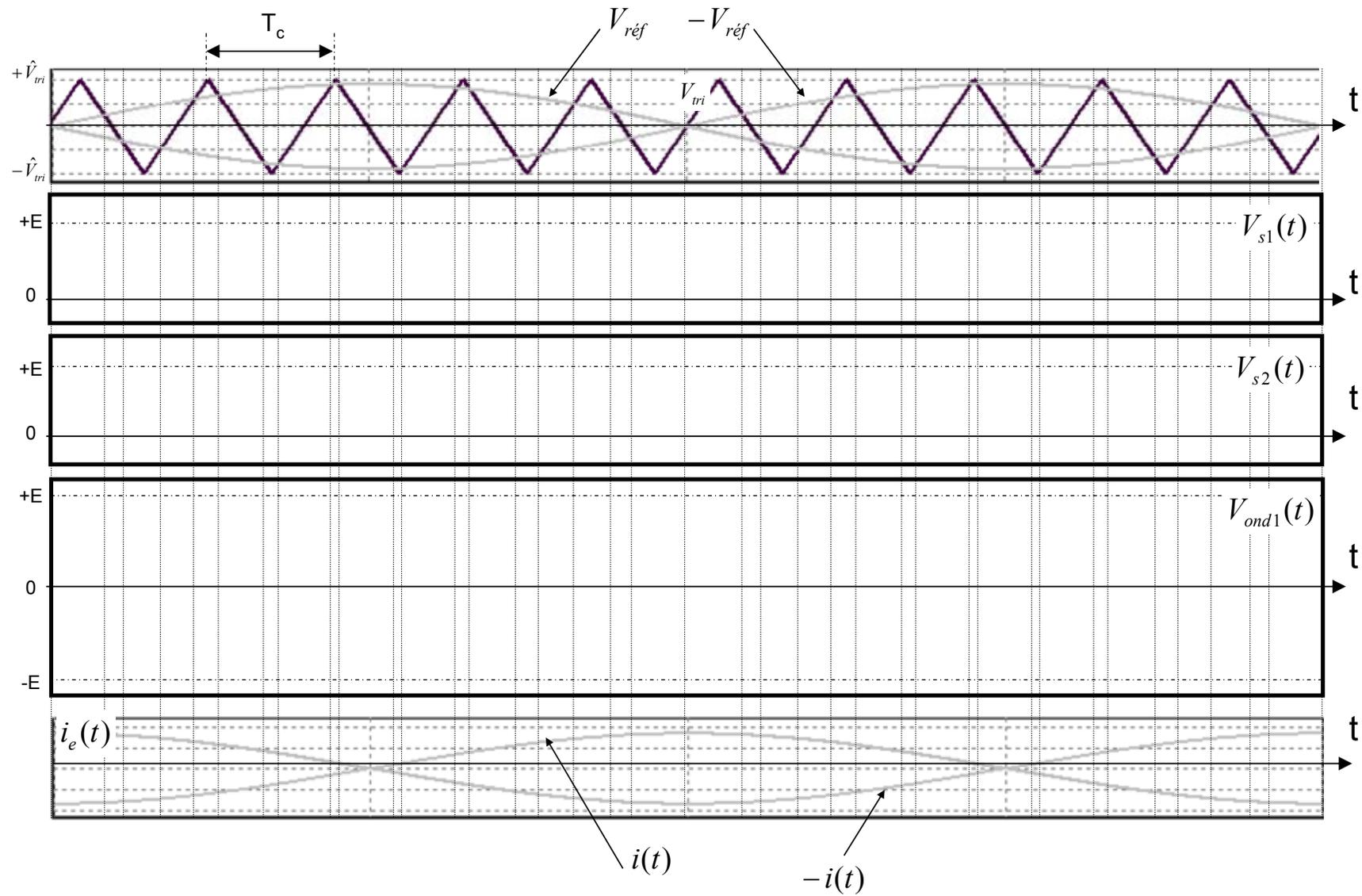
### DRQC1 : Calcul de l'énergie réactive facturée



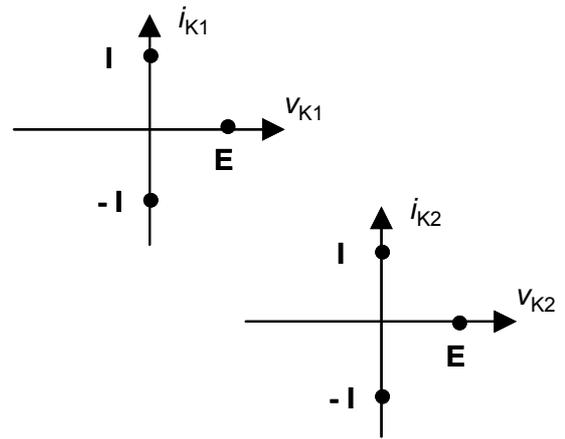
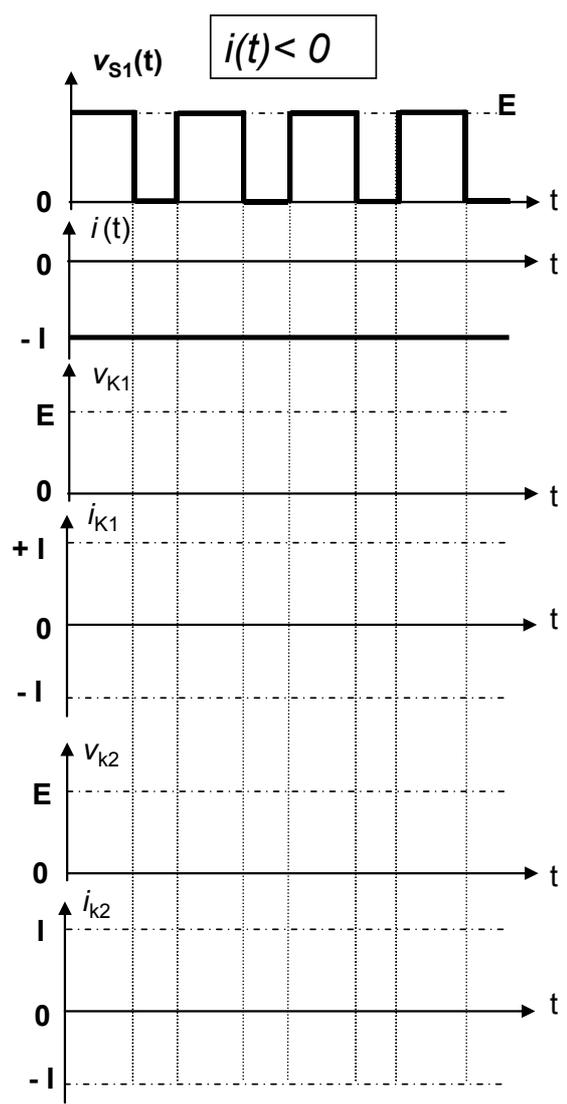
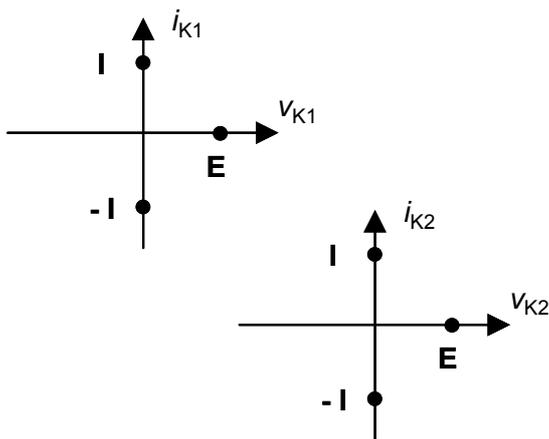
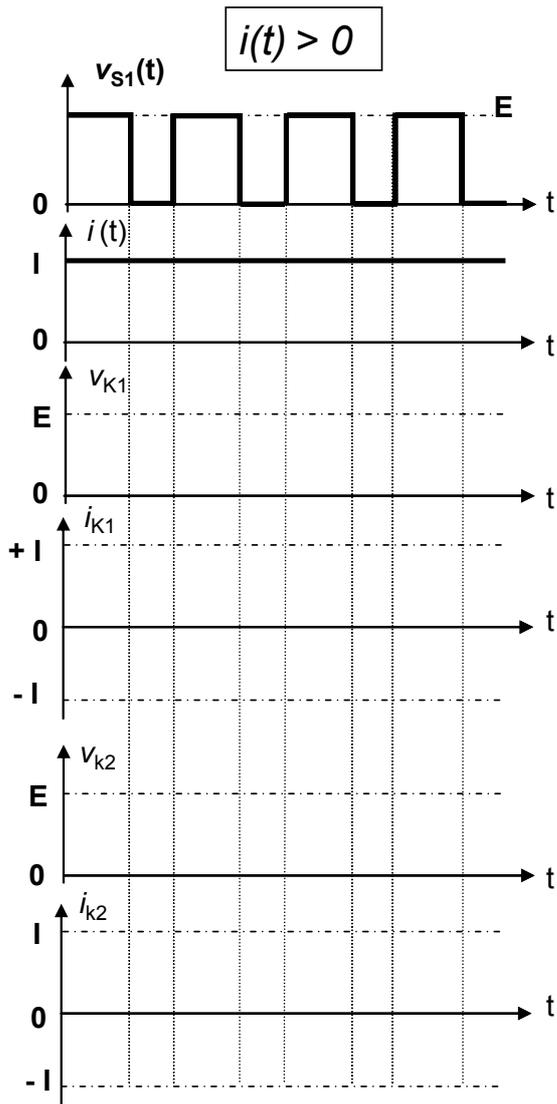
DRQD1 : Formes d'ondes pour une cellule de commutation



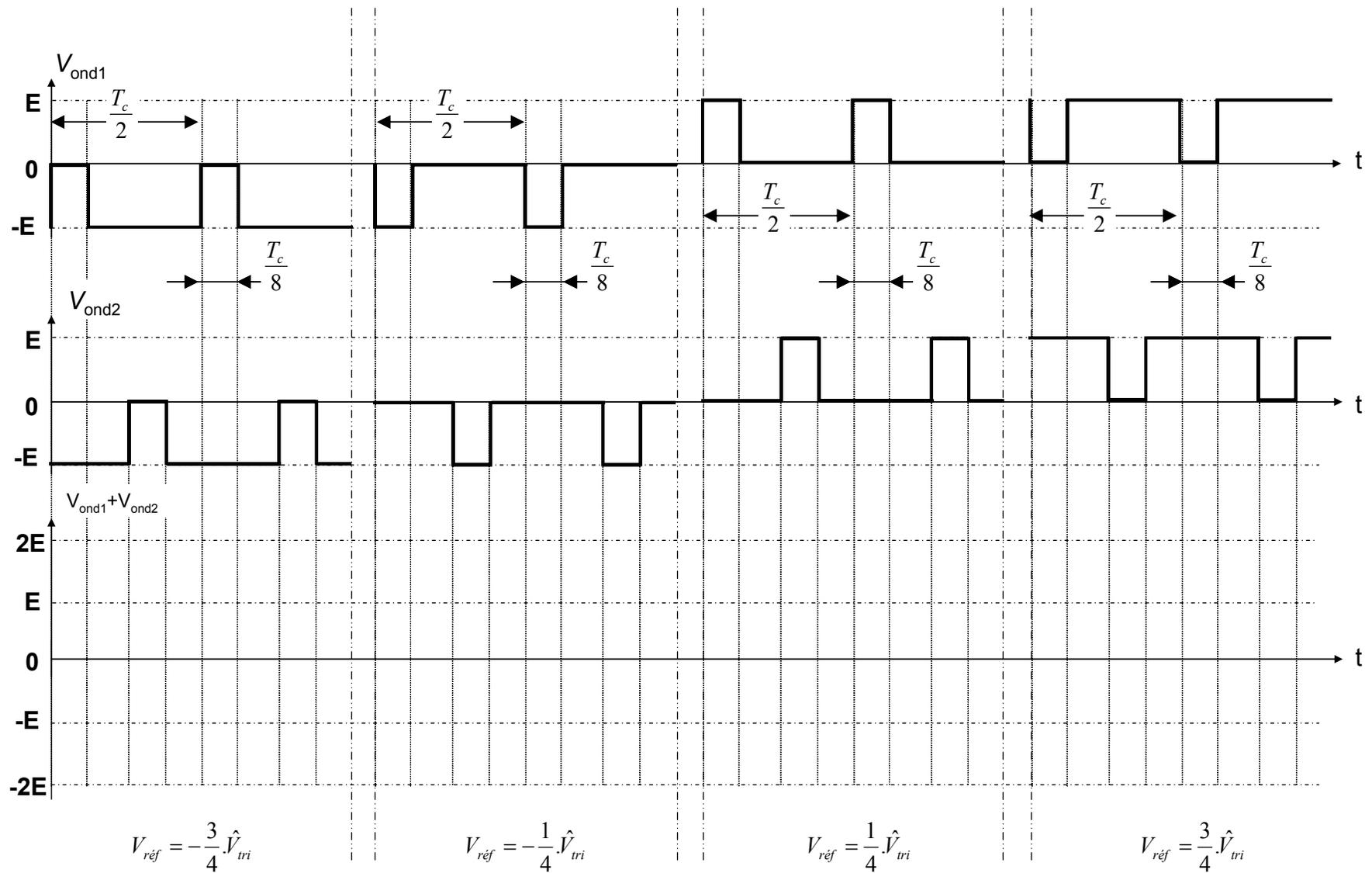
**DRQD2 : Formes d'ondes pour une association différentielle de deux cellules de commutation**



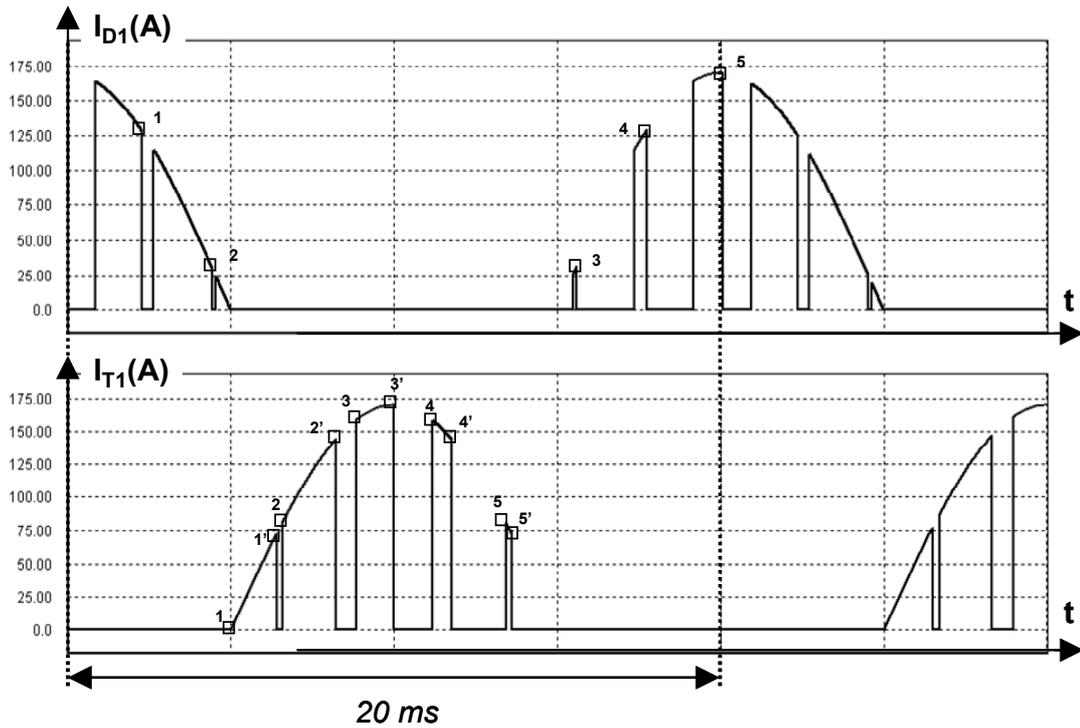
DRQD4 : Onduleur de tension MLI : Tracé des formes d'ondes



DRQD5 : Détermination des caractéristiques des interrupteurs



**DRQD6 : Mise en série de deux onduleurs de tension : Tracé des formes d'ondes**



### Transistor T1 : Energie dissipée en commutation

Amorçage

Numéro de Commutation	Courant Commuté (A)	Eon (J)
1		
2		
3		
4		
5		
Energie Totale dissipée sur 20 ms		

Blocage

Numéro de Commutation	Courant Commuté (A)	Eoff (J)
1'		
2'		
3'		
4'		
5'		
Energie Totale dissipée sur 20 ms		

### Diode D1 : Energie dissipée au blocage

Numéro de Commutation	Courant Commuté (A)	Erec (J)
1		
2		
3		
4		
5		
Energie Totale dissipée sur 20 ms		

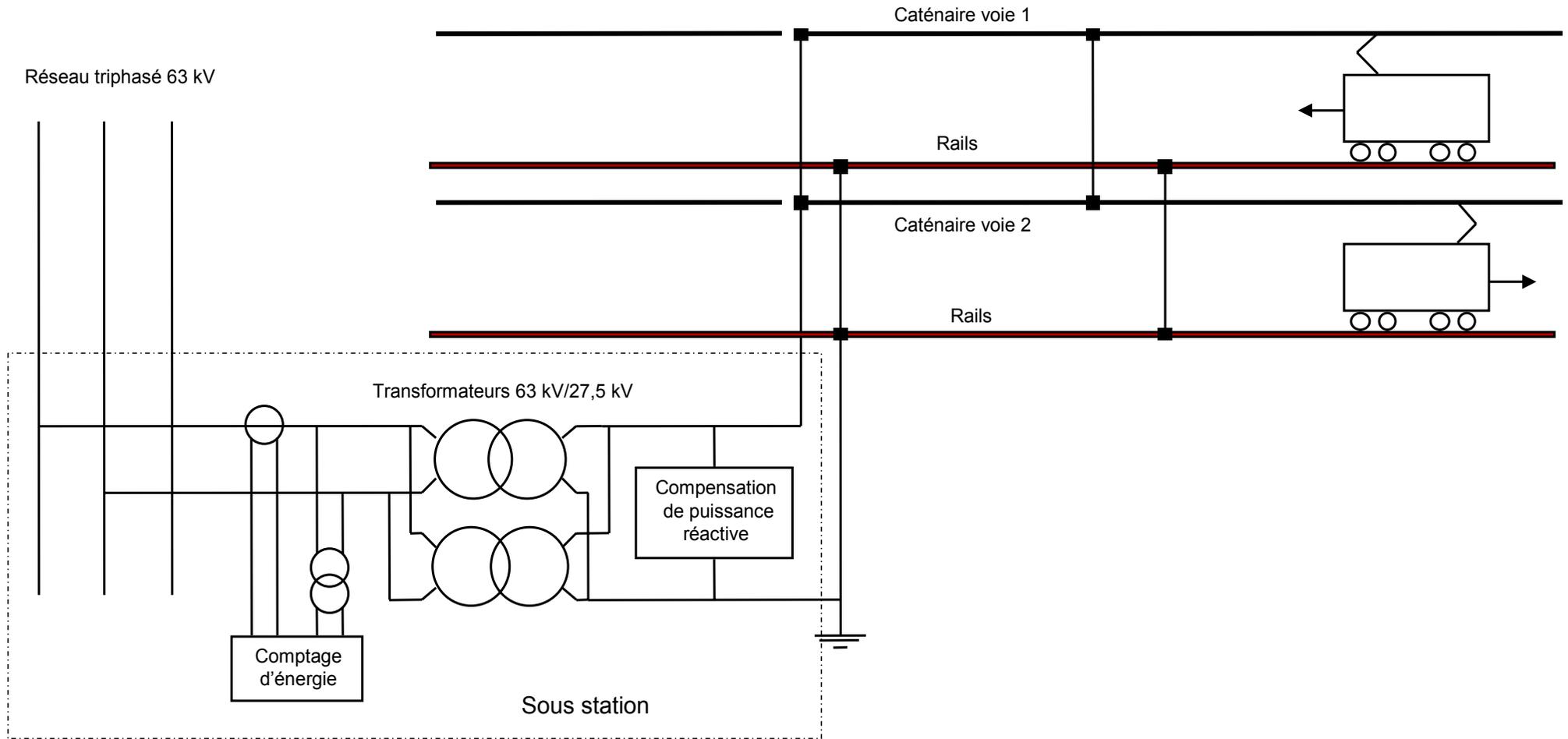
### DRQE1 : Détermination des énergies dissipées en commutation

# **ANNEXES**

**ANNEXE 1 : Schéma de principe du réseau de traction 25 kV double voie alimenté par la sous-station de Creil**

**ANNEXE 2 : Caractéristiques des interrupteurs à deux et trois segments**

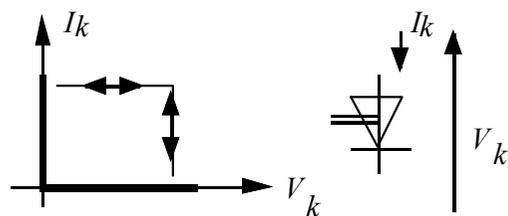
**ANNEXE 3 : Documentation constructeur module IGBT EUPEC FZ 200 R 65 KF1**



**ANNEXE 1 : Schéma de principe du réseau de traction 25 kV double voie alimenté par la sous-station de Creil**

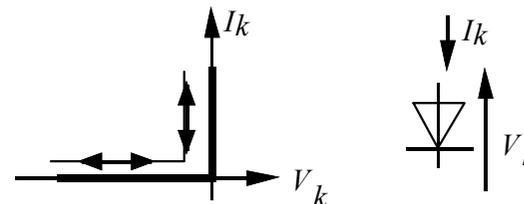
### Interrupteurs à deux segments

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



**Fonction Transistor**

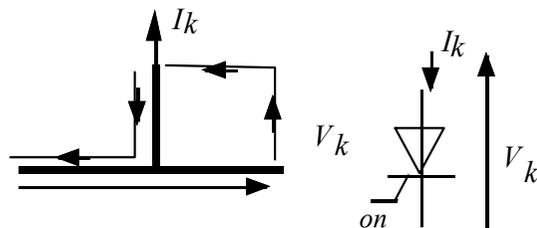
Segments de signes contraires amorçage spontané au zéro de tension et blocage spontané au zéro de courant



**Diode**

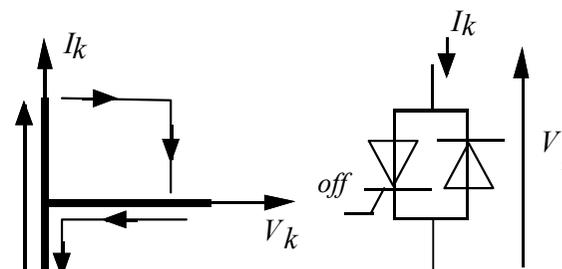
### Interrupteurs à trois segments

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**

## ANNEXE 2 : Caractéristiques des interrupteurs à deux et trois segments

**ANNEXE 3 : Documentation constructeur module IGBT  
EUPEC FZ 200 R 65 KF1**

# Technische Information / Technical Information

IGBT-Module  
IGBT-Modules

## FZ 200 R 65 KF1

**eupec**



### Höchstzulässige Werte / Maximum rated values

#### Elektrische Eigenschaften / Electrical properties

Kollektor-Emitter-Sperrspannung collector-emitter voltage	$T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj}=40^{\circ}\text{C}$	$V_{CES}$	6500 6300 5800	V
Kollektor-Dauergleichstrom DC-collector current	$T_C = 80^{\circ}\text{C}$ $T_C = 25^{\circ}\text{C}$	$I_{C,nom.}$ $I_C$	200 400	A A
Periodischer Kollektor Spitzenstrom repetitive peak collector current	$t_p = 1\text{ ms}, T_C = 80^{\circ}\text{C}$	$I_{CRM}$	400	A
Gesamt-Verlustleistung total power dissipation	$T_C=25^{\circ}\text{C}, \text{ Transistor}$	$P_{tot}$	3,8	kW
Gate-Emitter-Spitzenspannung gate-emitter peak voltage		$V_{GES}$	+/- 20V	V
Dauergleichstrom DC forward current		$I_F$	200	A
Periodischer Spitzenstrom repetitive peak forw. current	$t_p = 1\text{ ms}$	$I_{FRM}$	400	A
Grenzlastintegral der Diode $I^2t$ - value, Diode	$V_R = 0\text{V}, t_p = 10\text{ms}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	$I^2t$	26	$\text{k A}^2\text{s}$
Isolations-Prüfspannung insulation test voltage	RMS, $f = 50\text{ Hz}, t = 1\text{ min.}$	$V_{ISOL}$	10,2	kV
Teilentladungs Aussetzspannung partial discharge extinction voltage	RMS, $f = 50\text{ Hz}, Q_{PD} \text{ typ. } 10\text{pC (acc. To IEC 1287)}$	$V_{ISOL}$	5,1	kV

### Charakteristische Werte / Characteristic values

#### Transistor / Transistor

			min.	typ.	max.	
Kollektor-Emitter Sättigungsspannung collector-emitter saturation voltage	$I_C = 200\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	$V_{CE\text{ sat}}$	-	4,3	4,9	V
	$I_C = 200\text{A}, V_{GE} = 15\text{V}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		-	5,3	5,9	V
Gate-Schwellenspannung gate threshold voltage	$I_C = 35\text{mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	$V_{GE(th)}$	6,4	7,0	8,1	V
Gateladung gate charge	$V_{GE} = -15\text{V} \dots +15\text{V}$	$Q_G$	-	2,8	-	$\mu\text{C}$
Eingangskapazität input capacitance	$f = 1\text{MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{V}, V_{GE} = 0\text{V}$	$C_{ies}$	-	28	-	nF
Kollektor-Emitter Reststrom collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 6300\text{V}, V_{GE} = 0\text{V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	$I_{CES}$	-	0,2	-	mA
	$V_{CE} = 6500\text{V}, V_{GE} = 0\text{V}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$			20		
Gate-Emitter Reststrom gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0\text{V}, V_{GE} = 20\text{V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	$I_{GES}$	-	-	400	nA

prepared by: Dr. Oliver Schilling

date of publication: 2002-07-05

approved by: Dr. Schütze 2002-07-05

revision/Status: Series 1

# Technische Information / Technical Information

IGBT-Module  
IGBT-Modules

## FZ 200 R 65 KF1

eupec



### Charakteristische Werte / Characteristic values

#### Transistor / Transistor

			min.	typ.	max.	
Einschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn on delay time (inductive load)	$I_C = 200A, V_{CE} = 3600V$	$t_{d,on}$	-	0,75	-	$\mu s$
	$V_{GE} = \pm 15V, R_{Gon} = 13\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 25^\circ C,$ $V_{GE} = \pm 15V, R_{Gon} = 13\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 125^\circ C,$					
Anstiegszeit (induktive Last) rise time (inductive load)	$I_C = 200A, V_{CE} = 3600V$	$t_r$	-	0,37	-	$\mu s$
	$V_{GE} = \pm 15V, R_{Gon} = 13\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 25^\circ C,$ $V_{GE} = \pm 15V, R_{Gon} = 13\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 125^\circ C,$					
Abschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn off delay time (inductive load)	$I_C = 200A, V_{CE} = 3600V$	$t_{d,off}$	-	5,50	-	$\mu s$
	$V_{GE} = \pm 15V, R_{Goff} = 75\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 25^\circ C,$ $V_{GE} = \pm 15V, R_{Goff} = 75\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 125^\circ C,$					
Fallzeit (induktive Last) fall time (inductive load)	$I_C = 200A, V_{CE} = 3600V$	$t_f$	-	0,40	-	$\mu s$
	$V_{GE} = \pm 15V, R_{Goff} = 75\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 25^\circ C,$ $V_{GE} = \pm 15V, R_{Goff} = 75\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 125^\circ C,$					
Einschaltverlustenergie pro Puls turn-on energy loss per pulse	$I_C = 200A, V_{CE} = 3600V, V_{GE} = \pm 15V$ $R_{Gon} = 13\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 125^\circ C, L_G = 280nH$	$E_{on}$	-	1900	-	mJ
Abschaltverlustenergie pro Puls turn-off energy loss per pulse	$I_C = 200A, V_{CE} = 3600V, V_{GE} = \pm 15V$ $R_{Goff} = 75\Omega, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 125^\circ C, L_G = 280nH$	$E_{off}$	-	1200	-	mJ
Kurzschlußverhalten SC Data	$t_p \leq 10\mu sec, V_{GE} \leq 15V, acc\ to\ appl.note\ 2002/05$ $T_{vj} \leq 125^\circ C, V_{CC}=4400V, V_{CEmax}=V_{CES} - L_{oCE} \cdot di/dt$	$I_{SC}$	-	1000	-	A
Modulinduktivität stray inductance module		$L_{SCE}$	-	25	-	nH
Modulleitungswiderstand, Anschlüsse - Chip module lead resistance, terminals - chip		$R_{CC+EE}$	-	0,37	-	m $\Omega$

#### Diode / Diode

			min.	typ.	max.	
Durchlaßspannung forward voltage	$I_F = 200A, V_{GE} = 0V, T_{vj} = 25^\circ C$	$V_F$	3,0	3,8	4,6	V
	$I_F = 200A, V_{GE} = 0V, T_{vj} = 125^\circ C$					
Rückstromspitze peak reverse recovery current	$I_F = 200A, - di_F/dt = 700A/\mu s$	$I_{RM}$	-	270	-	A
	$V_R = 3600V, V_{GE} = -10V, T_{vj} = 25^\circ C$ $V_R = 3600V, V_{GE} = -10V, T_{vj} = 125^\circ C$					
Sperrverzögerungsladung recovered charge	$I_F = 200A, - di_F/dt = 700A/\mu s$	$Q_r$	-	180	-	$\mu C$
	$V_R = 3600V, V_{GE} = -10V, T_{vj} = 25^\circ C$ $V_R = 3600V, V_{GE} = -10V, T_{vj} = 125^\circ C$					
Abschaltenergie pro Puls reverse recovery energy	$I_F = 200A, - di_F/dt = 700A/\mu s$	$E_{rec}$	-	220	-	mJ
	$V_R = 3600V, V_{GE} = -10V, T_{vj} = 25^\circ C$ $V_R = 3600V, V_{GE} = -10V, T_{vj} = 125^\circ C$					

# Technische Information / Technical Information

IGBT-Module  
IGBT-Modules

## FZ 200 R 65 KF1

**eupec**



### Thermische Eigenschaften / Thermal properties

			min.	typ.	max.	
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	Transistor / transistor, DC	$R_{thJC}$	-	-	0,033	K/W
	Diode/Diode, DC		-	-	0,063	K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Modul / per Module $\lambda_{Paste} \leq 1 \text{ W/m}^2\text{K} / \lambda_{grease} \leq 1 \text{ W/m}^2\text{K}$	$R_{thCK}$	-	0,016	-	K/W
Höchstzulässige Sperrschichttemperatur maximum junction temperature		$T_{vj, max}$	-	-	150	°C
Betriebstemperatur Sperrschicht junction operation temperature	Schaltvorgänge IGBT(RBSOA);Diode(SOA) switching operation IGBT(RBSOA);Diode(SOA)	$T_{vj, op}$	-40	-	125	°C
Lagertemperatur storage temperature		$T_{stg}$	-40	-	125	°C

### Mechanische Eigenschaften / Mechanical properties

Gehäuse, siehe Anlage case, see appendix					
Innere Isolation internal insulation				AIN	
Kriechstrecke creepage distance				56	mm
Luftstrecke clearance				26	mm
CTI comperative tracking index				>600	
Anzugsdrehmoment f. mech. Befestigung mounting torque	Schraube /screw M6	M		5	Nm
Anzugsdrehmoment f. elektr. Anschlüsse terminal connection torque	Anschlüsse / terminals M8	M		8 - 10	Nm
Gewicht weight		G		500	g

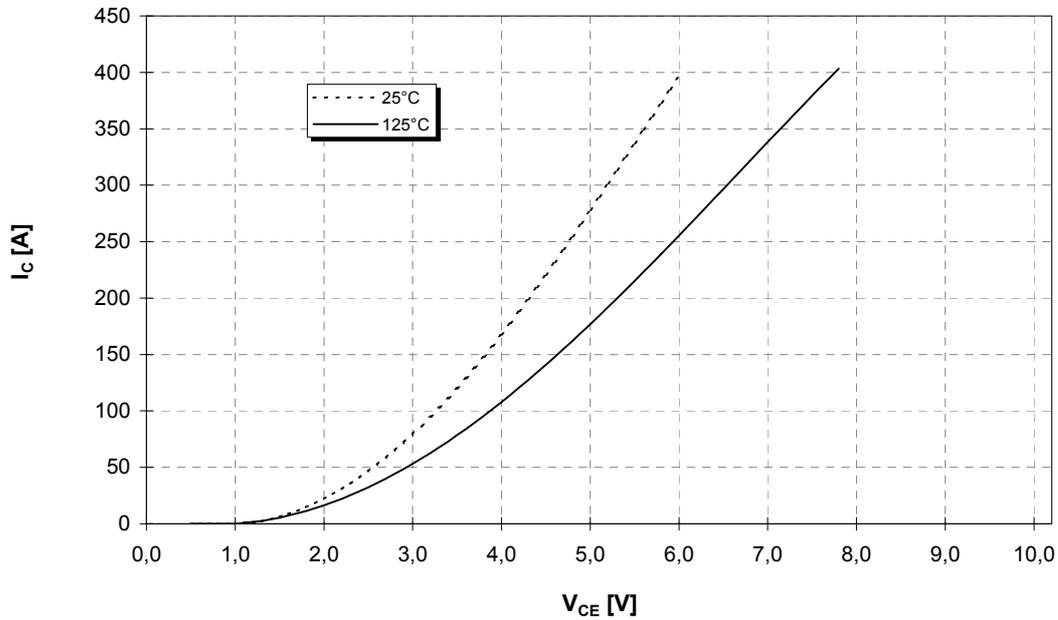
Mit dieser technischen Information werden Halbleiterbauelemente spezifiziert, jedoch keine Eigenschaften zugesichert. Sie gilt in Verbindung mit den zugehörigen Technischen Erläuterungen.

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. It is valid in combination with the belonging technical notes.



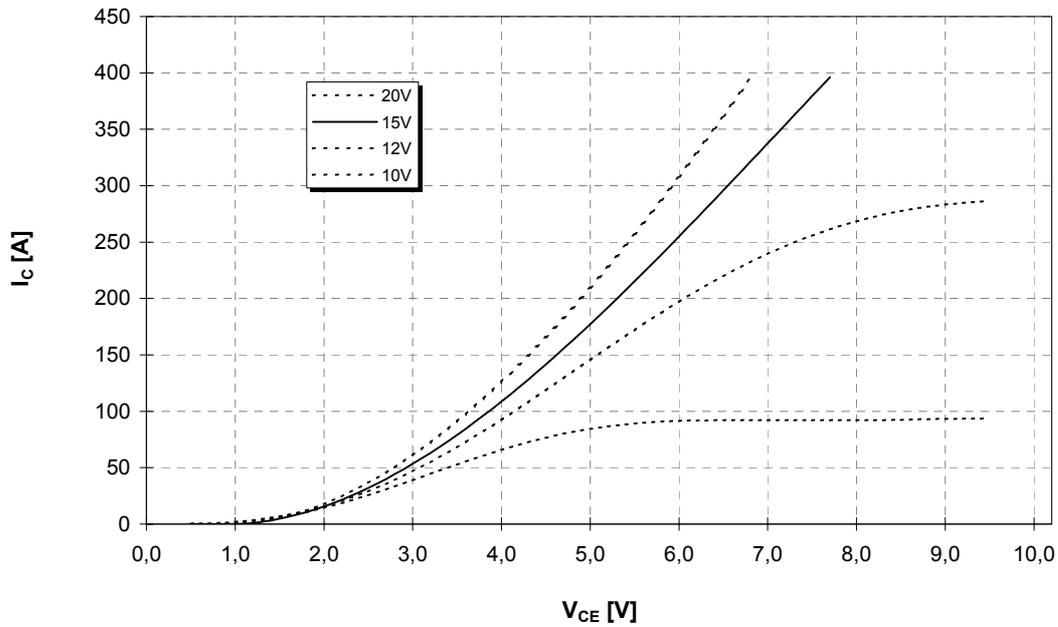
**Ausgangskennlinie (typisch)**  
**Output characteristic (typical)**

$I_c = f(V_{CE})$   
 $V_{GE} = 15V$



**Ausgangskennlinienfeld (typisch)**  
**Output characteristic (typical)**

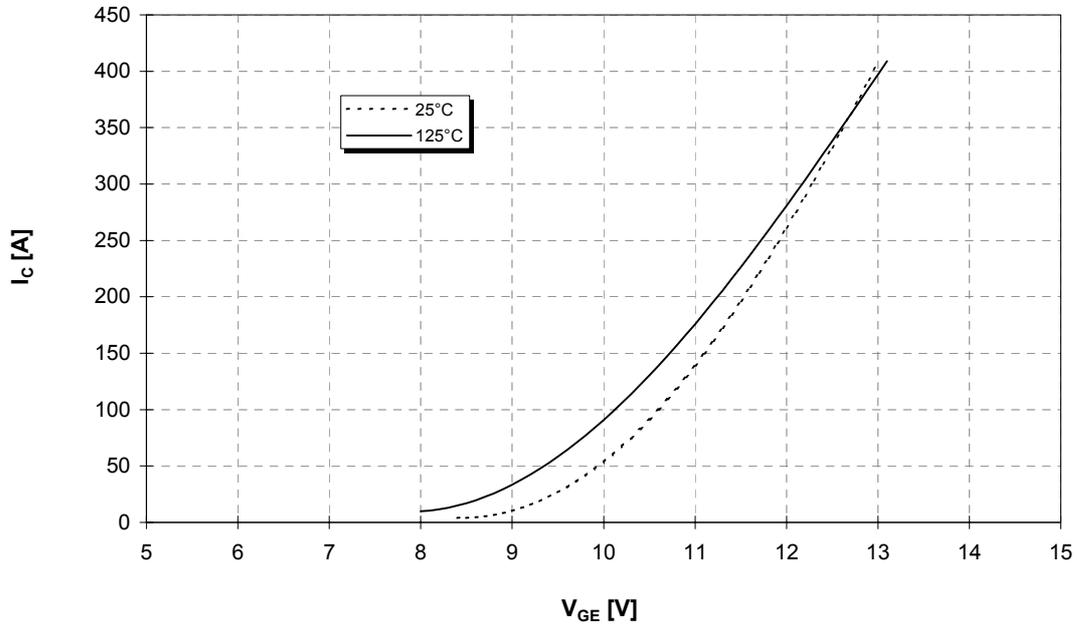
$I_c = f(V_{CE}), V_{GE} = < \text{see inset} >$   
 $T_{vj} = 125^\circ C$





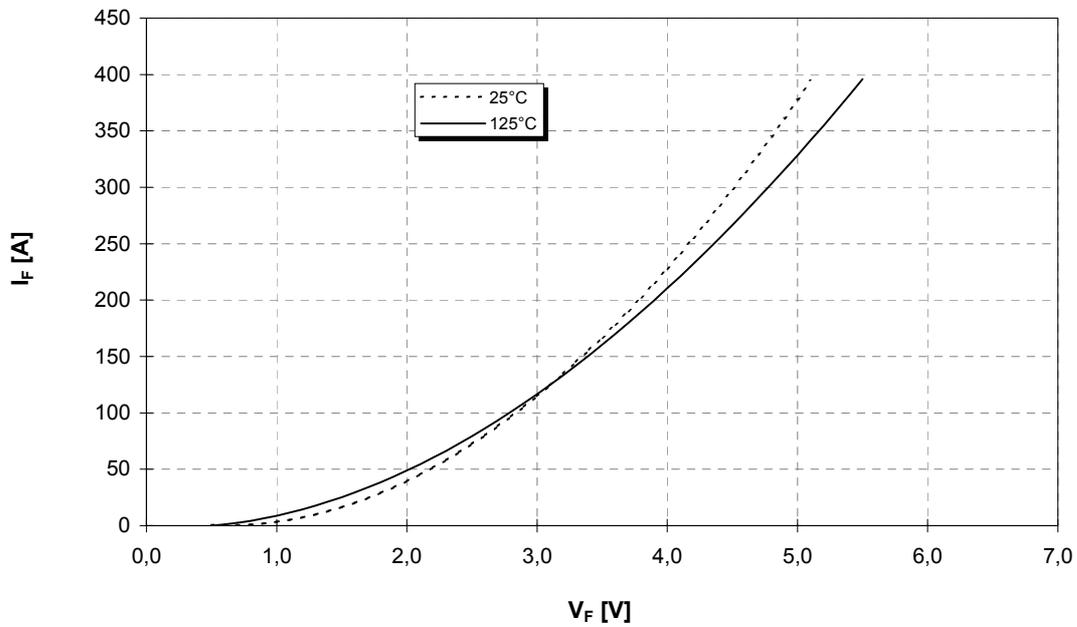
Übertragungscharakteristik (typisch)  
Transfer characteristic (typical)

$I_c = f(V_{GE})$   
 $V_{CE} = 10V$



Durchlaßkennlinie der Inversdiode (typisch)  
Forward characteristic of inverse diode (typical)

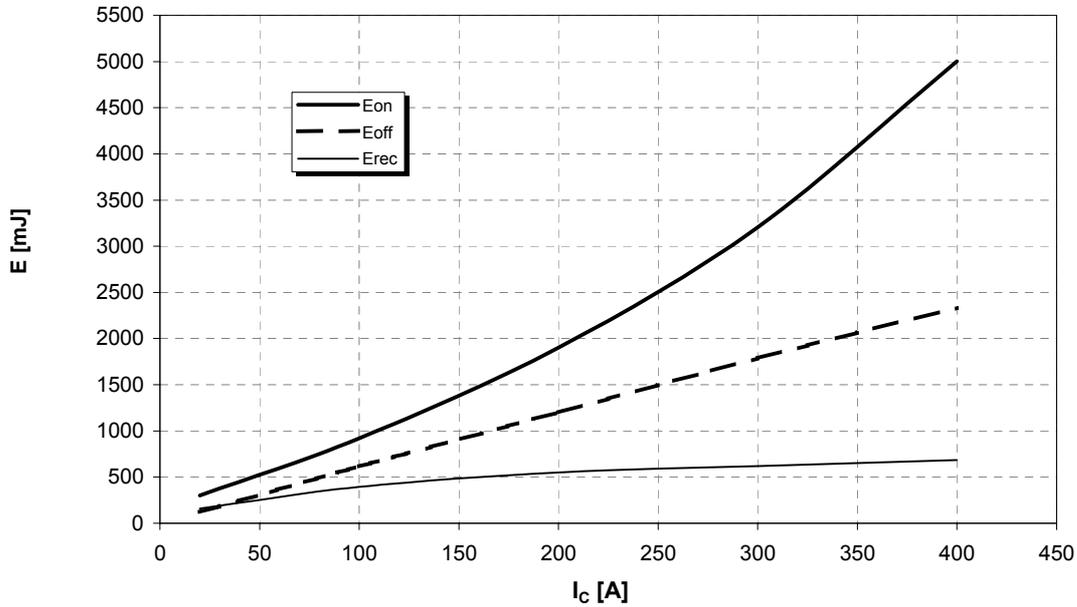
$I_F = f(V_F)$





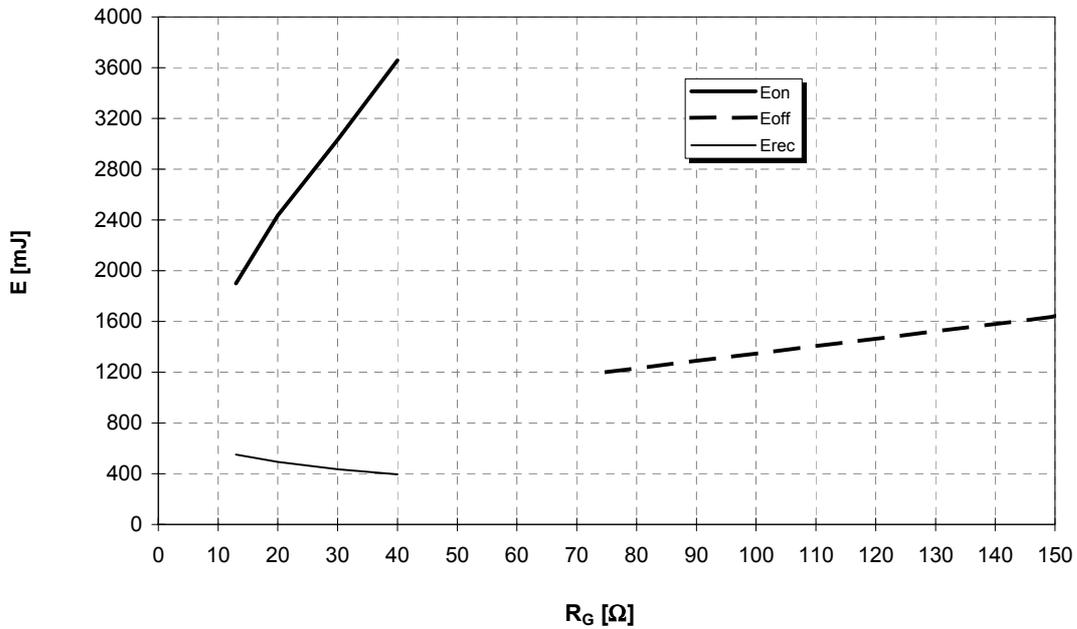
Schaltverluste (typisch)  $E_{on} = f(I_C), E_{off} = f(I_C), E_{rec} = f(I_C)$

Switching losses (typical)  $R_{Gon}=13\Omega, R_{Goff}=75\Omega, C_{GE} = 22nF, V_{GE}=\pm 15V, V_{CE} = 3600V, T_{vj} = 125^\circ C,$



Schaltverluste (typisch)  $E_{on} = f(R_G), E_{off} = f(R_G), E_{rec} = f(R_G)$

Switching losses (typical)  $I_C = 200A, V_{CE} = 3600V, V_{GE}=\pm 15V, C_{GE}=22nF, T_{vj} = 125^\circ C$

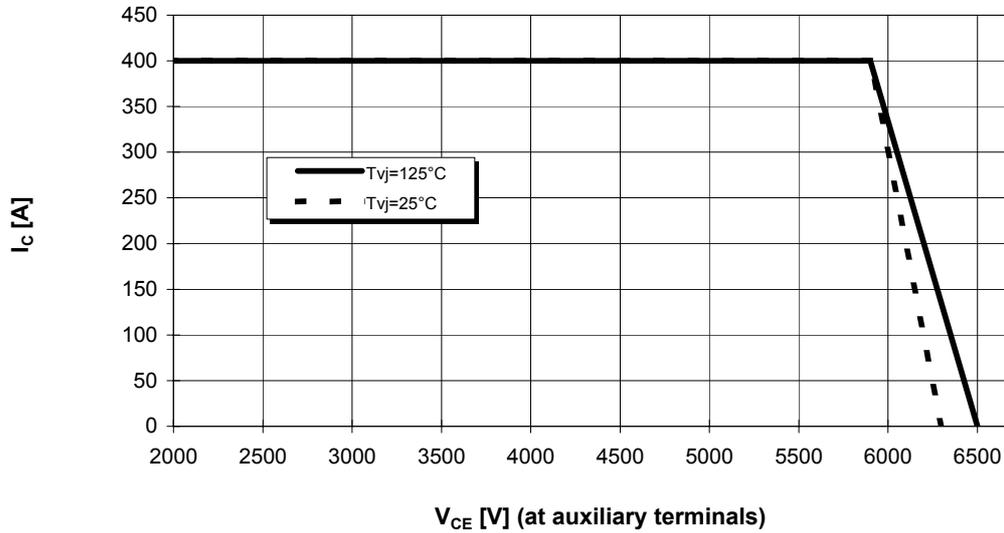




**Sicherer Arbeitsbereich (RBSOA)**

**Reverse bias safe operation area (RBSOA)**

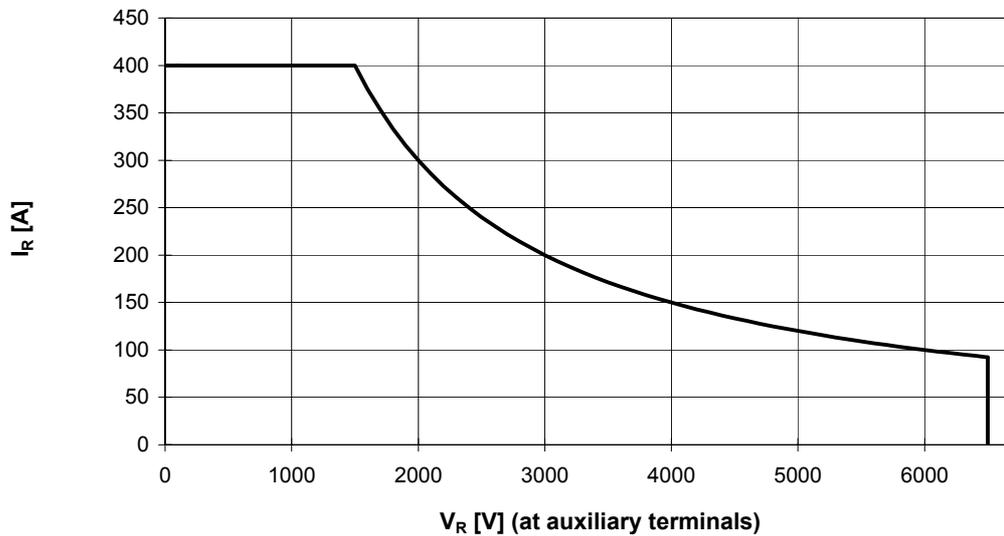
$R_{G,off} = 75\Omega$ ,  $C_{GE} = 22nF$ ,  $V_{GE} = \pm 15V$ ,  $T_{vj} = <see inset>$ ,  $V_{CC} \leq 4400V$



**Sicherer Arbeitsbereich Diode (SOA)**

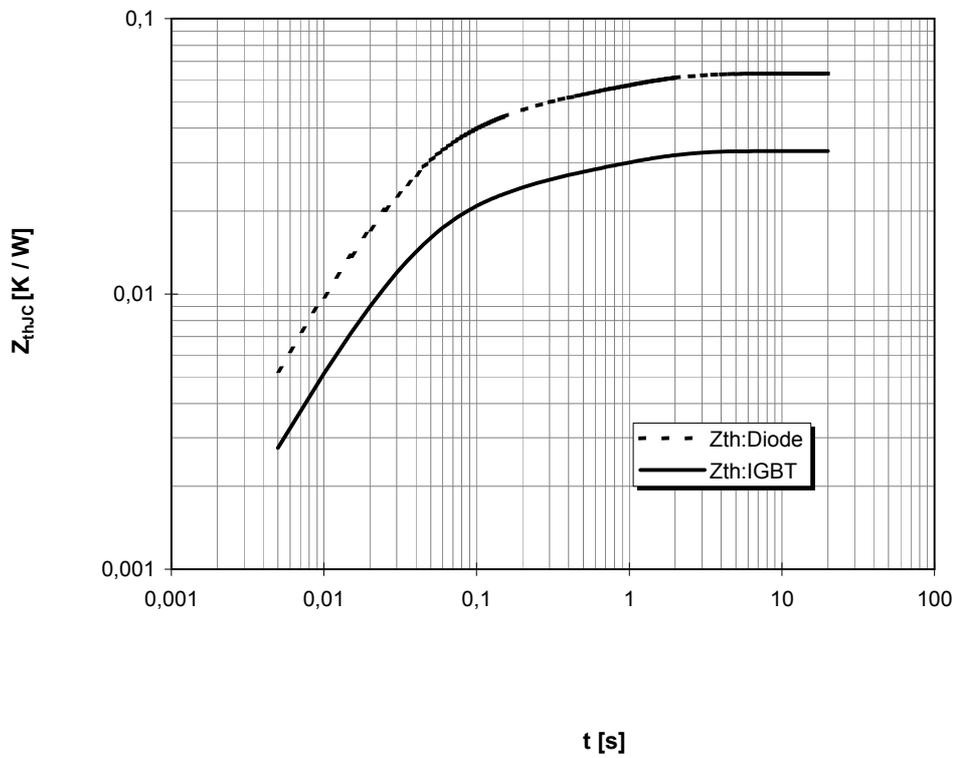
**safe operation area Diode (SOA)**

$P_{max} = 600kW$  ;  $T_{vj} = 125^\circ C$





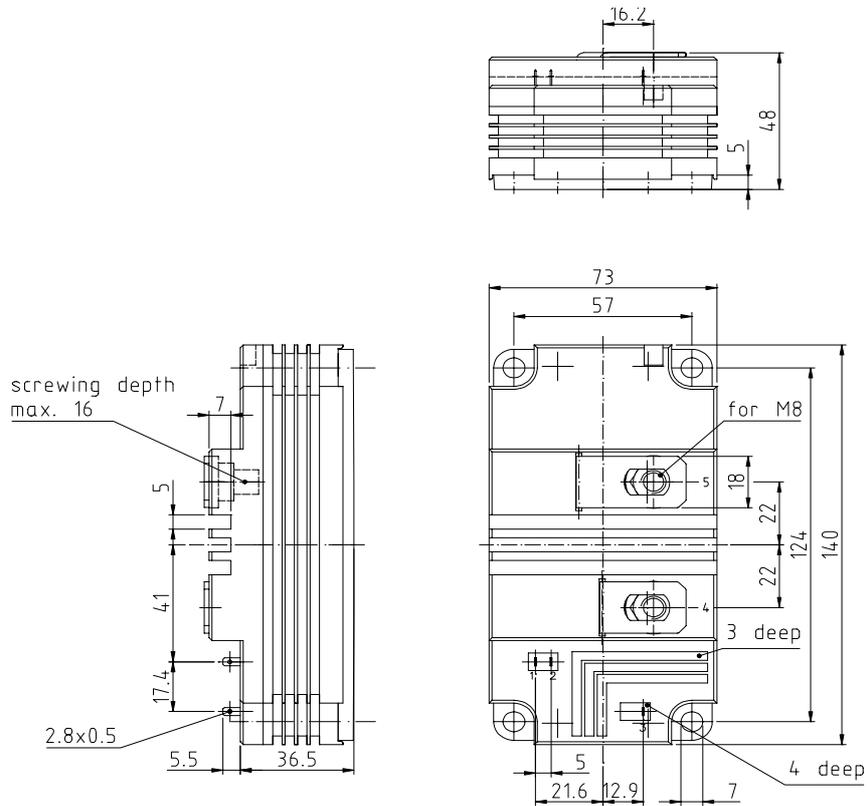
Transienter Wärmewiderstand  $Z_{thJC} = f(t)$   
Transient thermal impedance



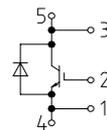
i		1	2	3	4
$r_i$ [K/kW]	: IGBT	14,85	8,25	1,98	7,92
$\tau_i$ [s]	: IGBT	0,030	0,10	0,30	1,0
$r_i$ [K/kW]	: Diode	28,35	15,75	3,78	15,12
$\tau_i$ [s]	: Diode	0,030	0,10	0,30	1,0



Äußere Abmessungen /  
external dimensions



FZ...



Anschlüsse / Terminals	1	Hilfsemitter / auxiliary emitter
	2	Gate / gate
	3	Hilfskolektor / auxiliary collector
	4	Emitter / emitter
	5	Kollektor / collector

## **Nutzungsbedingungen**

Die in diesem Produktdatenblatt enthaltenen Daten sind ausschließlich für technisch geschultes Fachpersonal bestimmt. Die Beurteilung der Geeignetheit dieses Produktes für die von Ihnen anvisierte Anwendung sowie die Beurteilung der Vollständigkeit der bereitgestellten Produktdaten für diese Anwendung obliegt Ihnen bzw. Ihren technischen Abteilungen.

In diesem Produktdatenblatt werden diejenigen Merkmale beschrieben, für die wir eine liefervertragliche Gewährleistung übernehmen. Eine solche Gewährleistung richtet sich ausschließlich nach Maßgabe der im jeweiligen Liefervertrag enthaltenen Bestimmungen. Garantien jeglicher Art werden für das Produkt und dessen Eigenschaften keinesfalls übernommen.

Sollten Sie von uns Produktinformationen benötigen, die über den Inhalt dieses Produktdatenblatts hinausgehen und insbesondere eine spezifische Verwendung und den Einsatz dieses Produktes betreffen, setzen Sie sich bitte mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung (siehe [www.eupec.com](http://www.eupec.com), Vertrieb&Kontakt). Für Interessenten halten wir Application Notes bereit.

Aufgrund der technischen Anforderungen könnte unser Produkt gesundheitsgefährdende Substanzen enthalten. Bei Rückfragen zu den in diesem Produkt jeweils enthaltenen Substanzen setzen Sie sich bitte ebenfalls mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung.

Sollten Sie beabsichtigen, das Produkt in Anwendungen der Luftfahrt, in gesundheits- oder lebensgefährdenden oder lebenserhaltenden Anwendungsbereichen einzusetzen, bitten wir um Mitteilung. Wir weisen darauf hin, dass wir für diese Fälle

- die gemeinsame Durchführung eines Risiko- und Qualitätsassessments;
- den Abschluss von speziellen Qualitätssicherungsvereinbarungen;
- die gemeinsame Einführung von Maßnahmen zu einer laufenden Produktbeobachtung dringend empfehlen und gegebenenfalls die Belieferung von der Umsetzung solcher Maßnahmen abhängig machen.

Soweit erforderlich, bitten wir Sie, entsprechende Hinweise an Ihre Kunden zu geben.

Inhaltliche Änderungen dieses Produktdatenblatts bleiben vorbehalten.

## **Terms & Conditions of usage**

The data contained in this product data sheet is exclusively intended for technically trained staff. You and your technical departments will have to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product data with respect to such application.

This product data sheet is describing the characteristics of this product for which a warranty is granted. Any such warranty is granted exclusively pursuant the terms and conditions of the supply agreement. There will be no guarantee of any kind for the product and its characteristics.

Should you require product information in excess of the data given in this product data sheet or which concerns the specific application of our product, please contact the sales office, which is responsible for you (see [www.eupec.com](http://www.eupec.com), sales&contact). For those that are specifically interested we may provide application notes.

Due to technical requirements our product may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact the sales office, which is responsible for you.

Should you intend to use the Product in aviation applications, in health or life endangering or life support applications, please notify.

Please note, that for any such applications we urgently recommend

- to perform joint Risk and Quality Assessments;
- the conclusion of Quality Agreements;
- to establish joint measures of an ongoing product survey, and that we may make delivery depended on the realization of any such measures.

If and to the extent necessary, please forward equivalent notices to your customers.

Changes of this product data sheet are reserved.

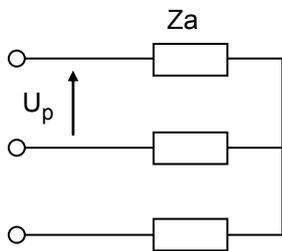
**Agrégation Externe de Génie Electrique**  
**Corrigé de l'épreuve d'Electrotechnique**

**Partie A : Bilan de puissance / Prédimensionnement du condensateur de compensation fixe de puissance réactive**

**QA-1 :** • Déterminer numériquement tous les éléments du schéma électrique Fig. A-1, en fonction des données du tableau A-2.

• Rapport de transformation :  $m = \frac{U_{s0}}{U_p} = \frac{27,5 \cdot 10^3}{63 \cdot 10^3} = \mathbf{0,4365}$

• Réseau HTB :



•  $S_{cc} = 3 \cdot \frac{V_p^2}{Z_a} = \frac{U_p^2}{Z_a} \Rightarrow Z_a = \frac{U_p^2}{S_{cc}}$

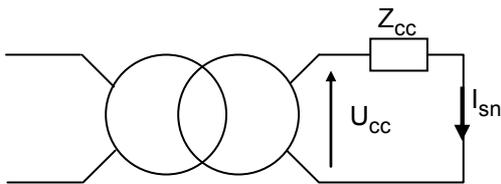
$\left. \begin{array}{l} U_p = 63 \cdot 10^3 \text{ V} \\ S_{cc} = 740 \cdot 10^6 \text{ VA} \end{array} \right\} \Rightarrow Z_a = \mathbf{5,3635 \Omega}$

•  $R_a = Z_a \cdot \cos \varphi_{cc}$

$\cos \varphi_{cc} = 0,18 \Rightarrow R_a = \mathbf{0,965 \Omega}$

•  $X_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2} \Rightarrow X_a = \mathbf{5,276 \Omega}$

• Transformateur :



•  $U_{cc} = Z_{cc} \cdot I_{sn} = Z_{cc} \cdot \frac{S_n}{U_{s0}} \Rightarrow Z_{cc} = \frac{U_{cc\%} \cdot U_{s0}^2}{100 \cdot S_n}$

$\left. \begin{array}{l} U_{cc\%} = 12 \\ U_{s0} = 27,5 \cdot 10^3 \text{ V} \\ S_n = 16,5 \cdot 10^6 \text{ VA} \end{array} \right\} \Rightarrow Z_{cc} = \mathbf{5,5 \Omega}$

•  $P_c = R_{cc} \cdot I_{sn}^2 \Rightarrow R_{cc} = \frac{P_c}{I_{sn}^2} = \frac{P_c \cdot U_{s0}^2}{S_n^2}$

$\left. \begin{array}{l} P_c = 344 \cdot 10^3 \text{ W} \\ U_{s0} = 27,5 \cdot 10^3 \text{ V} \\ S_n = 16,5 \cdot 10^6 \text{ VA} \end{array} \right\} \Rightarrow R_{cc} = \mathbf{0,955 \Omega}$

•  $X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \Rightarrow X_{cc} = \mathbf{5,416 \Omega}$

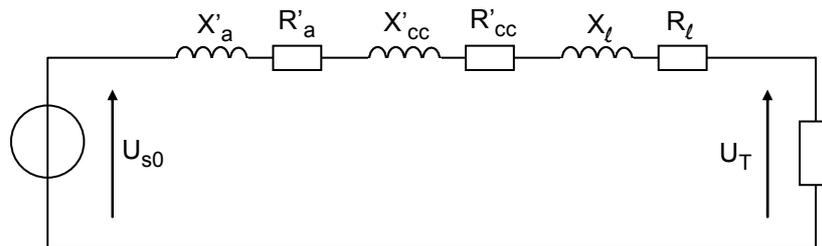
• Caténaire + voies :

$$\bullet R_l = 20 \cdot R_i = 20 \cdot 0,09 = \mathbf{1,8 \Omega}$$

$$\bullet X_l = 20 \cdot X_i = 20 \cdot 0,28 = \mathbf{5,6 \Omega}$$

**QA-2 :** • Représenter le circuit de traction (circuit en amont de  $U_T$ ) par un générateur alternatif de fem  $U_{s0}$ , de résistance série  $R_e$  et de réactance série  $X_e$ . Calculer les valeurs numériques de  $R_e$  et  $X_e$ .

• Schéma équivalent du circuit de traction :



-  $R'_a, X'_a$  : résistance et réactance du réseau HTB diphasé, ramenées au secondaire des transformateurs

$$R'_a = 2 \cdot m^2 \cdot R_a \quad ; \quad X'_a = 2 \cdot m^2 \cdot X_a$$

$$\left. \begin{array}{l} R_a = 0,965 \Omega \\ X_a = 5,276 \Omega \\ m = 0,4365 \end{array} \right\} \Rightarrow R'_a = \mathbf{0,368 \Omega} ; X'_a = \mathbf{2,01 \Omega}$$

-  $R'_{cc}, X'_{cc}$  : résistance et réactance des 2 transformateurs en parallèle

$$R'_{cc} = \frac{R_{cc}}{2} \quad ; \quad X'_{cc} = \frac{X_{cc}}{2}$$

$$\left. \begin{array}{l} R_{cc} = 0,955 \Omega \\ X_{cc} = 5,416 \Omega \end{array} \right\} \Rightarrow R'_{cc} = \mathbf{0,477 \Omega} ; X'_{cc} = \mathbf{2,71 \Omega}$$

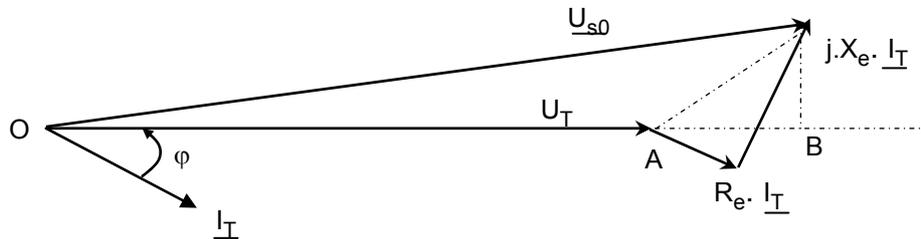
• Valeurs numériques de  $R_e$  et  $X_e$  :

$$R_e = R'_a + R'_{cc} + R_l \Rightarrow R_e = \mathbf{2,645 \Omega}$$

$$X_e = X'_a + X'_{cc} + X_l \Rightarrow X_e = \mathbf{10,32 \Omega}$$

- QA-3 :** • Représenter le diagramme de Fresnel des tensions ( $\underline{U}_{s0}$ ,  $\underline{U}_{Re}$ ,  $\underline{U}_{Xe}$ ,  $U_T$ ) et du courant  $\underline{I}_T$ , en prenant l'origine des phases sur  $U_T$ .  
 • Retrouver la relation :  $\Delta U = R_e I_T \cos \varphi + X_e I_T \sin \varphi$ .

- Diagramme de Fresnel :



On peut approximer  $\Delta U = U_{s0} - U_T$  par le segment AB.

On en déduit :  $\Delta U = R_e \cdot I_T \cdot \cos \varphi + X_e \cdot I_T \cdot \sin \varphi$

- QA-4 :** • A partir des relations de QA-3, établir l'équation de  $U_T$  en fonction de  $U_{s0}$ ,  $R_e$ ,  $X_e$ ,  $P$  et  $Q$ . Résoudre l'équation et donner la valeur numérique de  $U_T$ .  
 • Calculer ensuite le courant  $I_T$ .  
 • Calculer la tension en charge  $U_s$ , au secondaire des transformateurs.

$$U_{s0} - U_T = R_e \cdot I_T \cdot \cos \varphi + X_e \cdot I_T \cdot \sin \varphi$$

$$\left. \begin{array}{l} I_T \cdot \cos \varphi = \frac{P}{U_T} \\ I_T \cdot \sin \varphi = \frac{Q}{U_T} \end{array} \right\} \Rightarrow U_{s0} - U_T = R_e \cdot \frac{P}{U_T} + X_e \cdot \frac{Q}{U_T}$$

On en déduit l'équation du 2ème degré :

$$U_T^2 - U_{s0} \cdot U_T + R_e \cdot P + X_e \cdot Q = 0 \Rightarrow U_T^2 - 27,5 \cdot 10^3 \cdot U_T + 97,5 \cdot 10^6 = 0$$

Déterminant :  $\Delta = b^2 - 4ac = 366,25 \cdot 10^6$

- On retient la solution :  $U_T = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2a} = 23,3 \cdot 10^3 \text{ V}$

- On calcule le courant par la relation :  $I_T = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U_T}$

$$\left. \begin{array}{l} P = 11500 \cdot 10^3 \text{ W} \\ Q = 6500 \cdot 10^3 \text{ VAR} \\ U_T = 23,3 \cdot 10^3 \text{ V} \end{array} \right\} \Rightarrow I_T = 567 \text{ A}$$

- Tension en charge au secondaire des transformateurs :

$$U_s = U_T + (R_\ell \cdot \cos \varphi + X_\ell \cdot \sin \varphi) \cdot I_T$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = 0,87 \Rightarrow U_s = 25,75 \cdot 10^3 \text{ V}$$

**QA-5 :** • Faire un bilan des puissances active et réactive, au niveau du comptage de l'énergie (au primaire des transformateurs). Déterminer la valeur de la capacité (C) de la batterie de compensation, placée au secondaire des transformateurs, nécessaire pour ne pas avoir de facturation de puissance réactive.

• Bilan des puissances :

Elément	P (kW)		Q (kVAR)	
	Charge		11500	
Ligne	$R_{\ell} \cdot I_T^2$	577	$X_{\ell} \cdot I_T^2$	1800
Transformateurs	$R_{cc} \cdot I_T^2$	153	$X_{cc} \cdot I_T^2$	871
$\Sigma$		<b>12230</b>		<b>9171</b>

• Facteur de déphasage, sans compensation :

$$\cos \varphi' = \frac{\Sigma P}{\sqrt{\Sigma P^2 + \Sigma Q^2}} = 0,8 \Rightarrow \operatorname{tg} \varphi' = 0,75$$

• Energie réactive que doit fournir le condensateur de compensation :

$$Q_c = \Sigma P \cdot (\tan \varphi' - \tan \varphi) \Rightarrow Q_c = \mathbf{4280 \text{ kVAR}}$$

• On détermine la valeur de C par la relation :

$$C = \frac{Q_c}{U_s^2 \cdot \omega} \Rightarrow C = \mathbf{20,5 \cdot 10^{-6} \text{ F}}$$

## Partie B : Etude de la batterie de compensation fixe

### • Etude de la compensation par condensateur seul :

#### QB-1 : Composante fondamentale des courants

- Déterminer les valeurs numériques de  $R_t$  et  $L_t$ .

$$R_t = \frac{P}{I_{Tf}^2} \quad ; \quad L_t = \frac{Q}{I_{Tf}^2 \cdot \omega}$$

$$\left. \begin{array}{l} P = 11500 \cdot 10^3 \text{ W} \\ Q = 6500 \cdot 10^3 \text{ VAR} \\ I_{Tf} = 520 \text{ A} \\ \omega = 100 \cdot \pi \text{ rd.s}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow R_t = 42,5 \Omega ; L_t = 76,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

- Calculer la tension à vide  $U_{c0}$  aux bornes de la batterie de compensation. Cette tension est-elle conforme à la norme EN 50-163 qui fixe à 29 kV la tension maximale du réseau d'alimentation des voies ?

$$\text{On peut écrire : } \frac{U_{c0}}{U_{s0}} = \frac{1}{jC\omega} \times \frac{1}{j(L_r\omega - \frac{1}{C\omega})} = \frac{1}{1 - L_r C \omega^2}$$

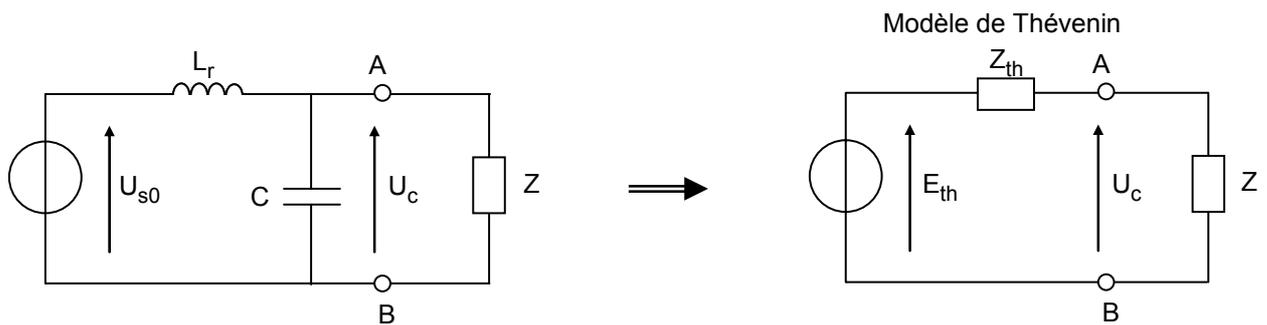
En posant :  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C}}$ , pulsation propre du circuit  $L_r$ - $C$ , on écrit :

$$U_{c0} = U_{s0} \cdot \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2}$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{s0} = 27,5 \cdot 10^3 \text{ V} \\ \omega = 100 \cdot \pi \text{ rd.s}^{-1} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{17 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-6}}} = 1715 \text{ rd.s}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow U_{c0} = 28,45 \cdot 10^3 \text{ V}$$

La tension à vide du réseau d'alimentation des voies est inférieure à la valeur maximale fixée à 29 kV par la norme EN 50-163.

- Etablir le modèle de Thévenin du générateur qui alimente la voie.



- $E_{th} =$  tension entre A et B en circuit ouvert  $\Rightarrow E_{th} = U_{c0} = U_{s0} \cdot \frac{1}{1 - (\omega / \omega_0)^2}$

**A.N. :**  $E_{th} = U_{c0} = 28,45 \cdot 10^3 \text{ V}$

- $Z_{th}$  = impédance formée par  $L_r$  et  $C$  en parallèle

$$\Rightarrow \underline{Y}_{th} = \frac{1}{jL_r\omega} + jC\omega = \frac{1 - L_r C \omega^2}{jL_r\omega}$$

$$\Rightarrow \underline{Z}_{th} = \frac{jL_r\omega}{1 - L_r C \omega^2} = \frac{jL_r\omega}{1 - (\omega / \omega_0)^2}$$

**A.N. :**  $\underline{Z}_{th} = jL'_r\omega$  avec  $L'_r = \frac{L_r}{1 - (\omega / \omega_0)^2} \Rightarrow L'_r = 17,6 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

- Calculer :

- la tension aux bornes de la batterie de compensation, en charge :  $U_{cf}$  :

$$U_{cf} = U_{c0} \times \left| \frac{\underline{Z}}{\underline{Z} + \underline{Z}_{th}} \right| = U_{c0} \times \left| \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'} \right|$$

$$\left. \begin{array}{l} \underline{Z} = R_t + j(X_t + X_l) \omega = 42,5 + j 29,7 \\ \underline{Z}' = R_t + j(X_t + X_l + X'_r) \omega = 42,5 + j 35,2 \end{array} \right\} \Rightarrow U_{cf} = 26,73 \cdot 10^3 \text{ V}$$

- la puissance réactive fournie par le condensateur de compensation :  $Q_c$  :

$$Q_c = U_{cf}^2 \cdot C \cdot \omega \Rightarrow Q_c = 4490 \cdot 10^3 \text{ VAR}$$

- la composante fondamentale du courant dans le condensateur :  $I_{cf}$  :

$$I_{cf} = C \cdot \omega \cdot U_{cf} \Rightarrow I_{cf} = 168 \text{ A}$$

- la composante fondamentale du courant au secondaire des transformateurs :  $I_{sf}$  :

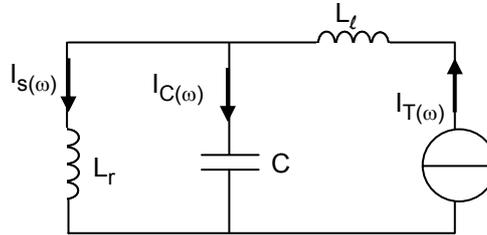
On effectue un bilan de puissances au secondaire des transformateurs :

$$P = 11500 \text{ W} ; \Sigma Q = Q_T + X_l \cdot I_{Tf}^2 - Q_c \Rightarrow \Sigma Q = 3540 \cdot 10^3 \text{ VAR.}$$

On en déduit le courant :  $I_{sf} = \frac{\sqrt{P^2 + \Sigma Q^2}}{U_{cf}} \Rightarrow I_{sf} = 450 \text{ A}$

## QB-2 : Composantes harmoniques des courants

- Proposer un schéma électrique équivalent à l'ensemble "alimentation, condensateur de compensation, ligne, charge", pour les composantes harmoniques de courant.



- Etablir :  $\underline{A_S(\omega)} = \frac{I_S(\omega)}{I_T(\omega)}$  et  $\underline{A_C(\omega)} = \frac{I_C(\omega)}{I_T(\omega)}$ , en fonction de  $\omega$  et  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C}}$ .

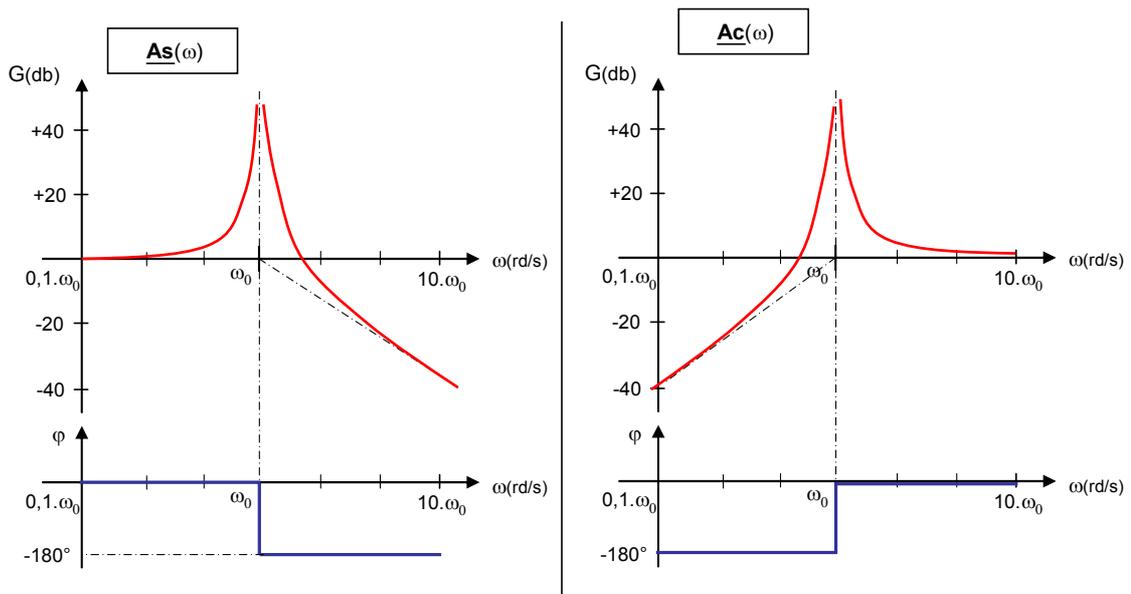
$$\underline{I_S(\omega)} = \underline{I_T(\omega)} \times \frac{\underline{Z_C}}{\underline{Z_C} + \underline{Z_{L_r}}} = \underline{I_T(\omega)} \times \frac{1}{1 + \underline{Y_C} \cdot \underline{Z_{L_r}}}$$

$$\text{d'où : } \underline{I_S(\omega)} = \underline{I_T(\omega)} \times \frac{1}{1 - (\omega / \omega_0)^2} \Rightarrow \underline{A_S(\omega)} = \frac{\underline{I_S(\omega)}}{\underline{I_T(\omega)}} = \frac{1}{1 - (\omega / \omega_0)^2}$$

$$\underline{I_C(\omega)} = \underline{I_T(\omega)} \times \frac{\underline{Z_{L_r}}}{\underline{Z_{L_r}} + \underline{Z_C}} = \underline{I_T(\omega)} \times \frac{1}{1 + \underline{Y_{L_r}} \cdot \underline{Z_C}}$$

$$\text{d'où : } \underline{I_C(\omega)} = \underline{I_T(\omega)} \times \frac{1}{1 - (\omega_0 / \omega)^2} \Rightarrow \underline{A_C(\omega)} = \frac{\underline{I_C(\omega)}}{\underline{I_T(\omega)}} = \frac{1}{1 - (\omega_0 / \omega)^2}$$

- Tracer l'allure du diagramme de Bode de  $\underline{A_S(\omega)}$  et de  $\underline{A_C(\omega)}$  :



- Calculer les composantes harmoniques de courant de rang 3, 5 et 7 ;  
- au secondaire des transformateurs :

$$I_{sh3} = I_{Th3} \cdot \left| \frac{1}{1 - (3.100.\pi / \omega_0)^2} \right|$$

$$\left. \begin{array}{l} I_{Th3} = 128 \text{ A} \\ \omega_0 = 1715 \text{ rd.s}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow I_{sh3} = \mathbf{183 \text{ A}}$$

$$I_{Th5} = 40 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{sh5} = \mathbf{248 \text{ A}}$$

$$I_{Th7} = 29 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{sh7} = \mathbf{45 \text{ A}}$$

- dans le condensateur de compensation :

$$I_{Ch3} = I_{Th3} \cdot \left| \frac{1}{1 - (\omega_0 / 3.100.\pi)^2} \right|$$

$$\left. \begin{array}{l} I_{Th3} = 128 \text{ A} \\ \omega_0 = 1715 \text{ rd.s}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow I_{Ch3} = \mathbf{55,4 \text{ A}}$$

$$I_{Th5} = 40 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{Ch5} = \mathbf{208 \text{ A}}$$

$$I_{Th7} = 29 \text{ A} \quad \Rightarrow \quad I_{Ch7} = \mathbf{74 \text{ A}}$$

### QB-3 : Synthèse de la compensation par condensateur

**Voir feuille réponse DRQB**

• Etude de la compensation par condensateur et inductance série :

QB-4 : Composante fondamentale des courants

- Calculer la tension à vide  $U'_{c0}$  aux bornes du dipôle de compensation ( $C, L_b$ ).

On peut écrire :

$$\frac{U'_{c0}}{U_{s0}} = \frac{j(L_b \omega - \frac{1}{C\omega})}{j((L_r + L_b)\omega - \frac{1}{C\omega})} = \frac{1 - (\omega / \omega'_0)^2}{1 - (\omega / \omega''_0)^2} \quad \text{avec:} \quad \omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{L_b \cdot C}} \quad \text{et} \quad \omega''_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_b) \cdot C}}$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{s0} = 27,5 \cdot 10^3 \text{ V} \\ \omega'_0 = 754 \text{ rd.s}^{-1} \\ \omega''_0 = 690 \text{ rd.s}^{-1} \end{array} \right\} \Rightarrow U'_{c0} = 28,67 \cdot 10^3 \text{ V}$$

La tension à vide du réseau d'alimentation des voies est inférieure à la valeur maximale fixée à 29 kV par la norme EN 50-163.

- Etablir le modèle de Thévenin du générateur qui alimente la voie.

- $E'_{th} = U'_{c0} = 28,67 \cdot 10^3 \text{ V}$

- $Z'_{th}$  = impédance formée par  $L_r$  et  $C+L_b$  en parallèle

$$Z'_{th} = j \cdot L_r \omega \times \frac{1 - (\omega / \omega'_0)^2}{1 - (\omega / \omega''_0)^2} = j \cdot L'_r \omega$$

$$L'_r = L_r \times \frac{1 - (\omega / \omega'_0)^2}{1 - (\omega / \omega''_0)^2} \Rightarrow L'_r = 17,7 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

- Calculer :

- la tension aux bornes du dipôle de compensation, en charge :  $U'_{cf}$  :

$$U'_{cf} = U_{c0} \times \left| \frac{\underline{Z}}{\underline{Z} + \underline{Z}'_{th}} \right| = U_{c0} \times \left| \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}''} \right|$$

$$\left. \begin{array}{l} \underline{Z} = R_t + j(X_t + X_l) \omega = 42,5 + j 29,7 \\ \underline{Z}'' = R_t + j(X_t + X_l + X'_r) \omega = 42,5 + j 35,3 \end{array} \right\} \Rightarrow U'_{cf} = 26,9 \cdot 10^3 \text{ V}$$

- la puissance réactive fournie par le dipôle de compensation :  $Q'_c$  :

$$Q'_c = U'^2_{cf} \times \frac{C \cdot \omega}{1 - (\omega / \omega'_0)^2} \Rightarrow Q'_c = 5500 \cdot 10^3 \text{ VAR}$$

- la composante fondamentale du courant dans le dipôle de compensation :  $I'_{cf}$  :

$$I'_{cf} = \frac{U'_{cf} \cdot C \cdot \omega}{1 - (\omega / \omega'_0)^2} \Rightarrow I'_c = 205 \text{ A}$$

- la composante fondamentale du courant au secondaire des transformateurs :  $I'_{sf}$  :

On effectue le bilan des puissances au secondaire des transformateurs :

$$P = 11500 \text{ kW} ; \Sigma Q = Q_T + X_\ell \cdot I_{Tf}^2 - Q'_c \Rightarrow \Sigma Q = 2530 \cdot 10^3 \text{ VAR}$$

$$\Rightarrow I'_{sf} = \frac{\sqrt{P^2 + \Sigma Q^2}}{U'_{cf}} \Rightarrow I'_{sf} = 438 \text{ A}$$

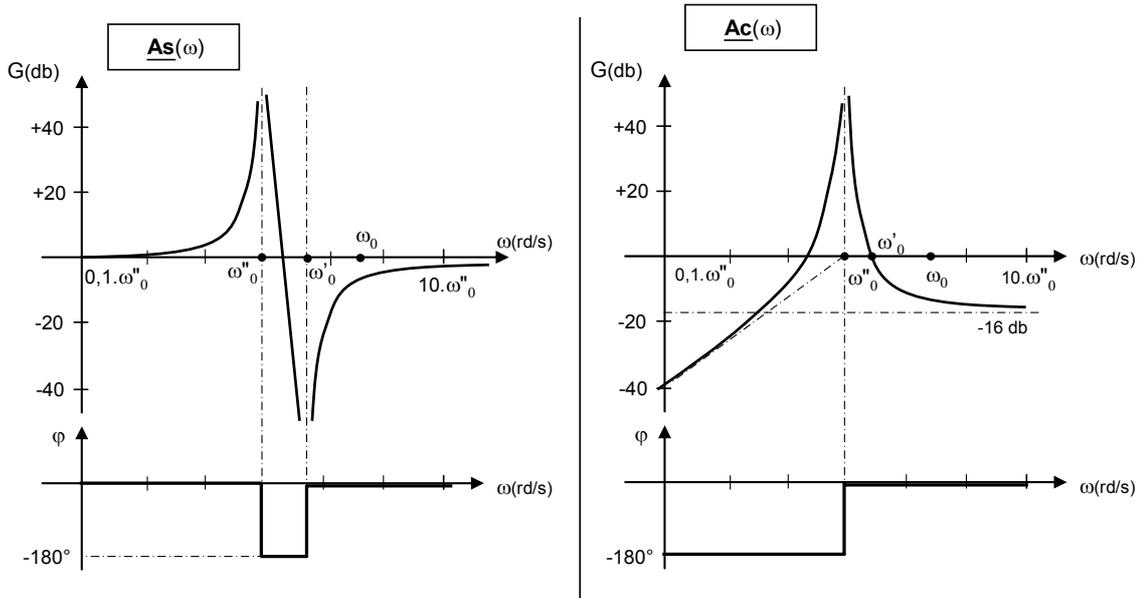
### QB-5 : Composantes harmoniques des courants

- Etablir :  $A'_{S(\omega)} = \frac{I'_{S(\omega)}}{I_T(\omega)}$  et  $A'_{C(\omega)} = \frac{I'_{C(\omega)}}{I_T(\omega)}$

$$I'_{S(\omega)} = I_T(\omega) \times \frac{Z_{C,Lb}}{Z_{C,Lb} + Z_{Lr}} = I_T(\omega) \times \frac{(\omega/\omega'_0)^2 - 1}{(\omega/\omega''_0)^2 - 1} \text{ d'où : } A'_{S(\omega)} = \frac{(\omega/\omega'_0)^2 - 1}{(\omega/\omega''_0)^2 - 1}$$

$$I'_{C(\omega)} = I_T(\omega) \times \frac{Z_{Lr}}{Z_{C,Lb} + Z_{Lr}} = I_T(\omega) \times \frac{(\omega/\omega_0)^2}{(\omega/\omega''_0)^2 - 1} \text{ d'où : } A'_{C(\omega)} = \frac{(\omega/\omega_0)^2}{(\omega/\omega''_0)^2 - 1}$$

- Tracer l'allure du diagramme de Bode de  $A'_{S(\omega)}$  et de  $A'_{C(\omega)}$ .



- Calculer les composantes harmoniques de courant de rang 3, 5 et 7,

- au secondaire des transformateurs :

$$I'_{sh3} = 128 \cdot \left| \frac{(300 \cdot \pi / 754)^2 - 1}{(300 \cdot \pi / 690)^2 - 1} \right| \Rightarrow I'_{sh3} = \mathbf{83 \text{ A}}$$

$$I'_{sh5} = 40 \cdot \left| \frac{(500 \cdot \pi / 754)^2 - 1}{(500 \cdot \pi / 690)^2 - 1} \right| \Rightarrow I'_{sh5} = \mathbf{32 \text{ A}}$$

$$I'_{sh7} = 29 \cdot \left| \frac{(700 \cdot \pi / 754)^2 - 1}{(700 \cdot \pi / 690)^2 - 1} \right| \Rightarrow I'_{sh7} = \mathbf{24 \text{ A}}$$

- dans le dipôle de compensation :

$$I'_{Ch3} = 128 \cdot \left| \frac{(300 \cdot \pi / 1715)^2}{(300 \cdot \pi / 690)^2 - 1} \right| \Rightarrow I'_{Ch3} = \mathbf{45 \text{ A}}$$

$$I'_{Ch5} = 40 \cdot \left| \frac{(500 \cdot \pi / 1715)^2}{(500 \cdot \pi / 690)^2 - 1} \right| \Rightarrow I'_{Ch5} = \mathbf{8 \text{ A}}$$

$$I'_{Ch7} = 29 \cdot \left| \frac{(700 \cdot \pi / 1715)^2}{(700 \cdot \pi / 690)^2 - 1} \right| \Rightarrow I'_{Ch7} = \mathbf{5,2 \text{ A}}$$

### QB-6 : Synthèse de la compensation par condensateur et inductance série

**Voir feuille réponse DRQB**

### QB-7 :

- Conclure sur l'intérêt de réaliser la compensation de puissance réactive par un dipôle L - C, en précisant le critère de dimensionnement de L.

- les composantes harmoniques de courant dans la batterie de compensation et dans la source sont très sensiblement atténuées ;
- la valeur efficace du courant dans la batterie de compensation et dans la source est atténuée ;
- la puissance réactive fournie par la batterie de compensation est augmentée ;
- par contre, la tension du réseau d'alimentation des voies est légèrement augmentée.

La fréquence propre du circuit L<sub>b</sub>-C doit être légèrement inférieure à celle du premier harmonique présent (en monophasé : rang 3).

## Partie C : Principe d'un système de compensation régulée, basé sur des onduleurs de tension MLI

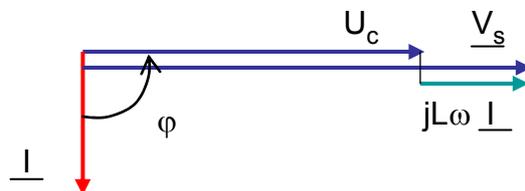
QC-1 :

Voir document réponse DRQC1

QC-2 : Diagramme vectoriel

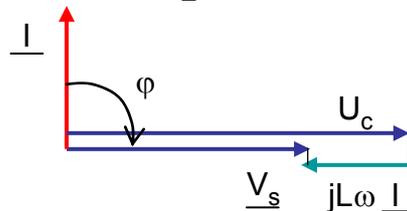
• Diagramme de Fresnel :  $\underline{V}_s = \underline{U}_c + \underline{V}_L = \underline{U}_c + jL\omega \cdot \underline{I}$

- Pour  $i(t) = +I\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$



- pas d'échange de puissance active puisque  $\underline{I}$  est en retard de  $\pi/2$  par rapport à  $\underline{U}_c$ ,
- le compensateur fournit de la puissance réactive.

- Pour  $i(t) = -I\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$



- pas d'échange de puissance active puisque  $\underline{I}$  est en avance de  $\pi/2$  par rapport à  $\underline{U}_c$ ,
- le compensateur absorbe de la puissance réactive.

• Quelle condition doit exister entre  $\underline{V}_s$  et  $\underline{U}_c$  pour que le compensateur fournisse de la puissance réactive ?

Le compensateur fournit de la puissance réactive si :  $\underline{V}_s > \underline{U}_c$

### QC-3 : Puissance réactive échangée entre le compensateur et le réseau de traction

- Etablir l'expression de la puissance réactive échangée entre le compensateur et le réseau de traction, en fonction de  $U_c$ ,  $E_T$ ,  $m_a$  et  $L\omega$ .

Puissance réactive fournie :

$$Q = U_c \cdot I = U_c \times \frac{V_L}{L\omega}$$

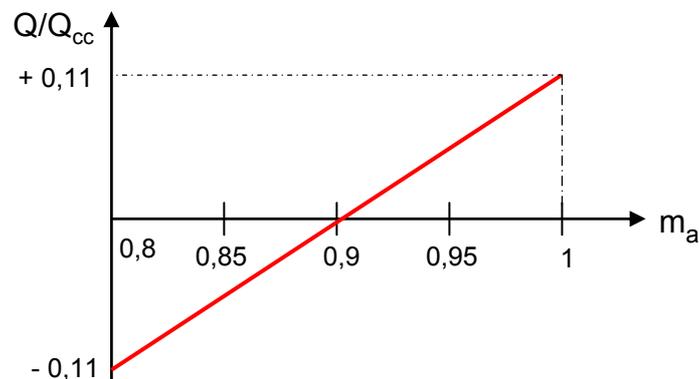
$$V_L = V_s - U_c = \frac{m_a \cdot E_T}{\sqrt{2}} - U_c$$

$$\text{On en déduit : } Q = \frac{m_a \cdot E_T \cdot U_c}{\sqrt{2} \cdot L\omega} - \frac{U_c^2}{L\omega}$$

- Q peut se mettre sous la forme :  $Q = \frac{U_c^2}{L\omega} \cdot \left( \frac{m_a \cdot E_T}{\sqrt{2} \cdot U_c} - 1 \right) = Q_{cc} \cdot \left( \frac{m_a \cdot E_T}{\sqrt{2} \cdot U_c} - 1 \right)$

- Graphe  $Q/Q_{cc}$  en fonction de  $m_a$  (pour  $0,8 < m_a < 1$ ) :

$$\frac{Q}{Q_{cc}} = 1,111 \cdot m_a - 1$$



- Quand il n'y a pas de train sur le secteur, il est intéressant que le compensateur actif puisse absorber de la puissance réactive pour éviter une surcompensation et donc une surtension sur la caténaire.

### QC4 : Calcul des paramètres du correcteur de la boucle de courant

- Ecrire la fonction de transfert  $H(p)$

$$H(p) = \frac{I(p)}{V_s(p) - U_c(p)} = \frac{I(p)}{V_L(p)} = \frac{1}{p \cdot L}$$

- Fonction de transfert en B.O.

$$T_{bo}(p) = \frac{I_{mes}(p)}{I_{ref}(p)} = \frac{K \cdot K_{ond} \cdot K_i}{L} \times \frac{1 + T_i \cdot p}{T_i \cdot p^2}$$

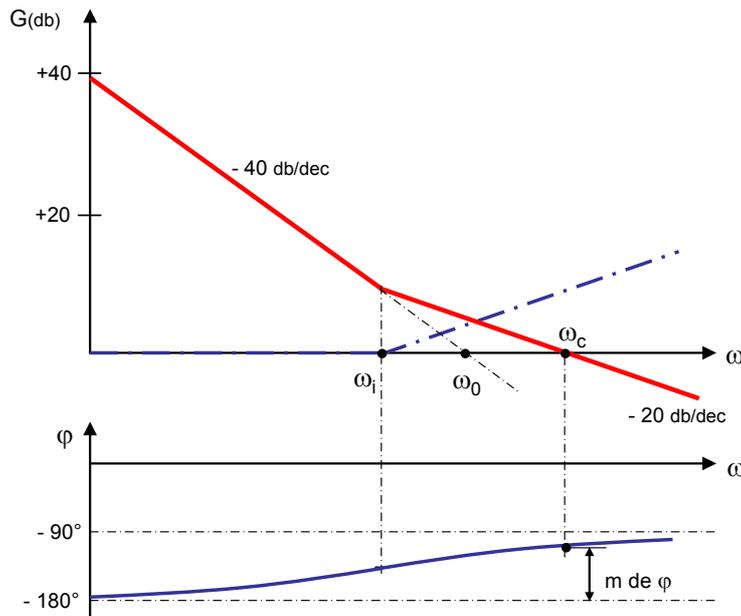
• Paramètres du correcteur PI :

En régime harmonique, la fonction de transfert en B.O. s'écrit :

$$T_{BO(j\omega)} = -\frac{1+j\omega/\omega_i}{(\omega/\omega_0)^2} \quad \text{avec:} \quad \omega_i = \frac{1}{T_i} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{K \cdot K_{ond} \cdot K_i}{L \cdot T_i}} \Rightarrow K = \frac{L}{K_{ond} \cdot K_i} \times \frac{\omega_0^2}{\omega_i}$$

Pour une marge de phase de  $60^\circ$ , la courbe de gain doit couper l'axe 0 db avec une pente de  $-20$  db/dec.

**Courbes de gain et de phase**



Pour  $\omega = \omega_c$  :

$$m \text{ de } \varphi = \text{Arc tg } \frac{\omega_c}{\omega_i} ; \quad m \text{ de } \varphi = 60^\circ \Rightarrow \omega_i = \frac{\omega_c}{\sqrt{3}}$$

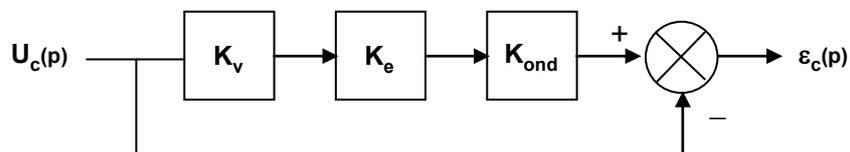
$$|T_{BO(j\omega)}| = \frac{\sqrt{1 + (\omega_c/\omega_i)^2}}{(\omega_c/\omega_0)^2} = 1 \quad \Rightarrow \quad \omega_0 = \frac{\omega_c}{\sqrt{2}}$$

**A.N. :**

$$\left. \begin{array}{l} L = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ H} \\ K_{ond} = 8640 \text{ V/V} \\ K_i = 0,05 \text{ V/A} \\ \omega_c = 2 \cdot \pi \cdot 200 = 1257 \text{ rd/s} \end{array} \right\} \Rightarrow T_i = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ s} ; K = 15,7 \cdot 10^{-3}$$

- Calculer la valeur de  $K_e$

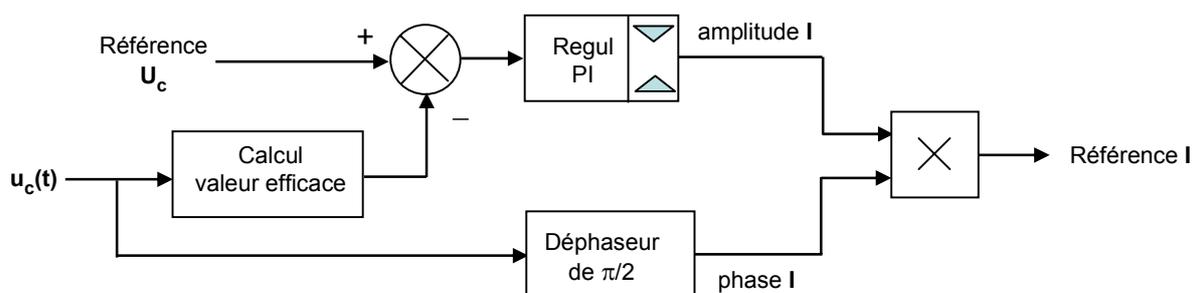
On peut représenter par le schéma-bloc ci-dessous la perturbation introduite par la tension caténaire  $u_c$ .



$$\varepsilon_c(p) = U_c(p) \cdot (K_v \cdot K_e \cdot K_{ond} - 1) \quad ; \quad \varepsilon_c(p) = 0 \Rightarrow K_e = \frac{1}{K_v \cdot K_{ond}} = 1,157$$

### QC5 : Boucle externe de régulation

La boucle externe doit permettre de réaliser la régulation de la valeur efficace  $U_c$  de la tension caténaire et doit générer la consigne courant (amplitude + phase). La référence phase du courant est obtenue en déphasant de  $\pi/2$  la tension  $u_c$ .



## Partie D : Synthèse de la source de tension alternative réglable du compensateur actif de puissance réactive.

### QD1 : Etude des formes d'ondes pour une cellule de commutation

- Voir document réponse **DRQD1**
- D'après le tracé, on voit que  $f_{dec} = f_c$  et que  $N_{niv} = 2$  (0, + E).
- $V_{s1moy} = \alpha_1 \cdot E$  et  $I_{e1moy} = \alpha_1 \cdot I$
- $\alpha_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_{réf}}{\hat{V}_{tri}} \right)$

### QD2 : Etude des formes d'ondes pour une association différentielle de cellule de commutation

- Voir document réponse **DRQD2**
- D'après le tracé, on voit que  $f_{dec} = 2 \cdot f_c$  et que  $N_{niv} = 3$  (-E, 0, +E).
- Puissance instantanée :  $p = E \cdot i_e(t)$  ;  $p = V_{ond1}(t) \cdot I(t)$  d'où  $i_e(t) = \frac{V_{ond1}(t)}{E} \cdot i(t)$

Ainsi, suivant la valeur de  $V_{ond1}(t)$ , -E, 0 ou +E ;  $i_e(t) = -i(t)$ , 0 ou  $+i(t)$ .

- $V_{s1moy} = \alpha_1 \cdot E$  et  $I_{e1moy} = \alpha_1 \cdot I$  ;  $V_{s2moy} = (1 - \alpha_1) E$  et  $I_{e2moy} = - (1 - \alpha_1) \cdot I$

$$V_{ond1moy} = V_{s1moy} - V_{s2moy} = (2\alpha_1 - 1) E ; I_{emoy} = I_{e1moy} + I_{e2moy} = (2\alpha_1 - 1) I$$

- Comme  $\alpha_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_{réf}}{\hat{V}_{tri}} \right)$ , on en déduit que  $V_{ond1moy} = E \cdot \frac{V_{réf}}{\hat{V}_{tri}}$  et  $i_{emoy} = I \cdot \frac{V_{réf}}{\hat{V}_{tri}}$

### QD3 : Modèle moyen d'un onduleur de tension MLI

- $V_{ond1moy} = E \cdot \frac{\hat{V}_{réf} \cdot \sin \omega t}{\hat{V}_{tri}} = m_a \cdot E \cdot \sin \omega t$

•

$$i_{emoy} = I \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \cdot \frac{\hat{V}_{réf} \cdot \sin \omega t}{\hat{V}_{tri}} = m_a \cdot I \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \cdot \sin \omega t = \frac{m_a \cdot I \sqrt{2}}{2} [\cos \varphi - \cos(2 \cdot \omega t - \varphi)]$$

- Dans le cas où  $\varphi = 90^\circ$ , la composante continue de  $i_{emoy}$  est nulle. Si la source de tension est remplacée par un condensateur, celui-ci conservera une tension égale à E en valeur moyenne à l'échelle de la période de  $i_{emoy}(t)$ .
- D'après l'expression de  $i_{emoy}$  pour  $\varphi = 90^\circ$ ,

$$v_c(t) = E - \frac{1}{C} \int i_{emoy}(t) \cdot dt = E + \frac{m_a \cdot I \sqrt{2}}{2} \frac{1}{2 \cdot C \cdot \omega} \cdot \sin(2 \cdot \omega t - \varphi) \cdot$$

D'où l'ondulation crête à crête :  $\Delta V_c = \frac{m_a I \sqrt{2}}{2.C.\omega}$ . Pour  $\Delta V_c = 180 \text{ V}$  ;  $I = 120 \text{ A}$  ;  $C = 1,36 \text{ mF}$ .

#### QD4 : Tracé des formes d'ondes instantanées pour un onduleur de tension MLI

- Voir document réponse **DRQD4**

#### QD5 : Synthèse des interrupteurs

- Voir document réponse **DRQD5**

•

Dans le cas où le courant est positif :

K1 utilise deux segments perpendiculaires de même signe, les deux commutations (amorçage et blocage) sont commandées. C'est donc un interrupteur de type transistor.

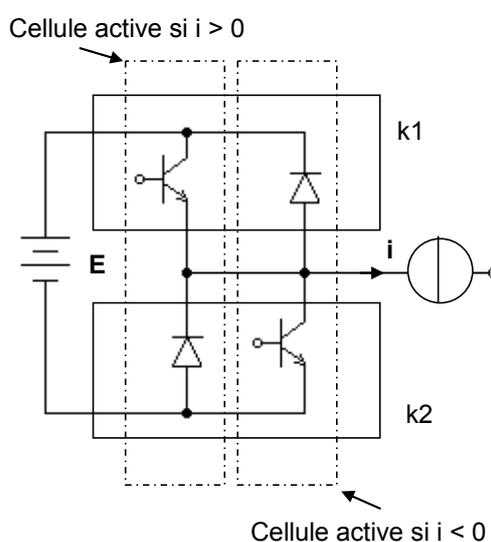
K2 utilise deux segments perpendiculaires de signes contraires, les deux commutations sont spontanées (amorçage et blocage). C'est donc une diode.

Dans le cas où le courant est négatif :

K1 utilise deux segments perpendiculaires de signes contraires, les deux commutations sont spontanées (amorçage et blocage). C'est donc une diode.

K2 utilise deux segments perpendiculaires de même signe, les deux commutations (amorçage et blocage) sont commandées. C'est donc un interrupteur de type transistor.

- Pour fonctionner en onduleur de tension MLI, il faut que les interrupteurs K1 et K2 combinent les propriétés ci-dessus : Du point de vue de la caractéristique statique, ils sont donc bidirectionnels en courant, et unidirectionnels en tension, mais fonctionnent comme des interrupteurs 2 segments (T ou D) selon le signe du courant de sortie de la cellule. Ils sont commandés à l'amorçage et au blocage de manière complémentaire.



**QD6 : Etude de la mise en série de deux onduleurs de tension**

- Voir document réponse **DRQD6**

- Le tracé des formes d'ondes montre que  $f_{\text{dec}} = 4 \cdot f_c$  et  $N_{\text{niv}} = 5$  (-2.E, - E, 0 , E, 2.E)

**QD7 : Détermination de la fréquence apparente de découpage du compensateur actif de puissance réactive**

- 

1 Cellule :  $f_{\text{dec}} = f_c$  et  $N_{\text{niv}} = 2$  (0 , E).

2 Cellules (onduleur de tension) :  $f_{\text{dec}} = 2 \cdot f_c$  et  $N_{\text{niv}} = 3$  (-E, 0 , E).

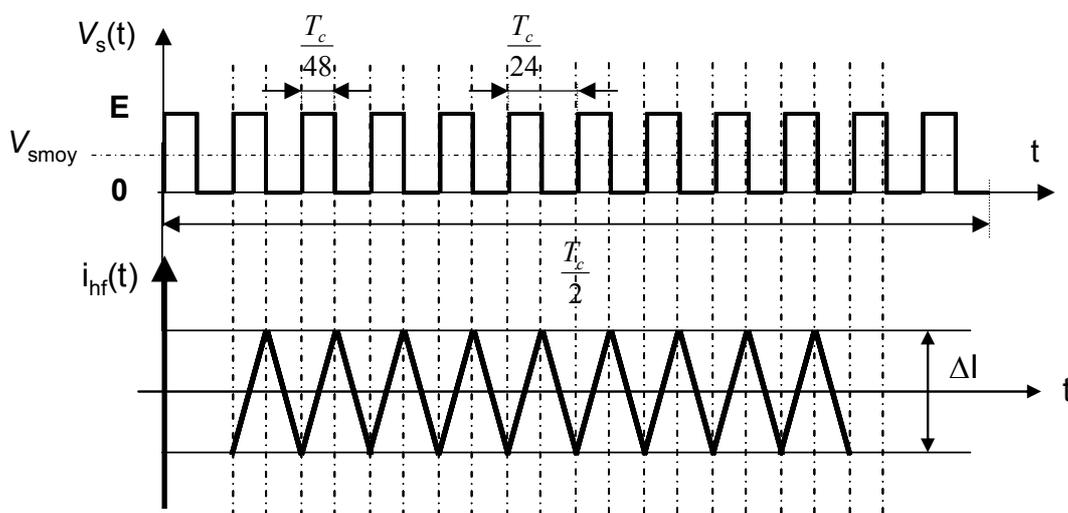
4 Cellules (2 Onduleurs en série) :  $f_{\text{dec}} = 4 \cdot f_c$  et  $N_{\text{niv}} = 5$  (-2.E, - E, 0 , E, 2.E)

- Des résultats qui précèdent, on en déduit que pour n Cellules de commutation :  $f_{\text{dec}} = n \cdot f_c$  et  $N_{\text{niv}} = n+1$ .

Ainsi pour les douze onduleurs, on a  $n = 24$ . Ce qui donne  $f_{\text{dec}} = 24 \cdot f_c$  et  $N_{\text{niv}} = 25$ .

**QD8 : Calcul de l'inductance de la bobine de lissage du courant.**

- 



- Lorsque  $V_s(t) = E$ , on a :  $L \frac{\Delta I}{\Delta T} = E - V_{s\text{ moy}}$  avec  $\Delta T = \frac{T_c}{48}$  et  $V_{s\text{ moy}} = \frac{E}{2}$

Ainsi :  $\Delta I = \frac{E}{96 \cdot L \cdot f_c}$ , d'où  $L = 6,25 \text{ mH}$  pour  $\Delta I = 12 \text{ A}$ ,  $E = 3600 \text{ V}$  et  $f_c = 500 \text{ Hz}$ .

- à  $f = 50 \text{ Hz}$ , on a :  $L \cdot \omega \cdot I = 235,5 \text{ V}$

## Partie E : Détermination des pertes et des températures de jonction des semi-conducteurs.

### QE1 : Calcul des pertes en conduction dans le transistor IGBT et dans la diode.

- (On prend la caractéristique pour  $T_j = 125^\circ\text{C}$ ).

Pour le transistor :  $I_C = 25\text{ A} \rightarrow V_{CE} = 3\text{ V}$  ;  $I_C = 150\text{ A} \rightarrow V_{CE} = 4,6\text{ V}$

$$r_T = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = 12,8\text{ m}\Omega ; V_{T0} = V_{CE} - r_T \cdot I_C = 2,68\text{ V}$$

Pertes en conduction dans le transistor :  $P_{COND\_T} = V_{T0} \cdot I_{T1\text{moy}} - r_T \cdot I_{T1\text{eff}}^2 = 118\text{ W}$

- (On prend la caractéristique pour  $T_j = 125^\circ\text{C}$ ).

Pour la diode :  $I_F = 50\text{ A} \rightarrow V_D = 2\text{ V}$  ;  $I_F = 200\text{ A} \rightarrow V_D = 3,9\text{ V}$

$$r_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_F} = 12,6\text{ m}\Omega ; V_{D0} = V_D - r_D \cdot I_F = 1,38\text{ V}$$

Pertes en conduction dans la diode :  $P_{COND\_D} = V_{D0} \cdot I_{D1\text{moy}} - r_D \cdot I_{D1\text{eff}}^2 = 83\text{ W}$

### QE2 : Calcul des pertes en commutation dans le transistor IGBT et dans la diode.

- Voir document réponse DRQE1

$$P_{ON\_T} = f \cdot E_{on\_T} = 50 \cdot 4,6 = \mathbf{230\text{ W}}$$

$$P_{OFF\_T} = f \cdot E_{off\_T} = 50 \cdot 3,6 = \mathbf{180\text{ W}}$$

$$P_{OFF\_D} = f \cdot E_{rec\_D} = 50 \cdot 1,8 = \mathbf{90\text{ W}}$$

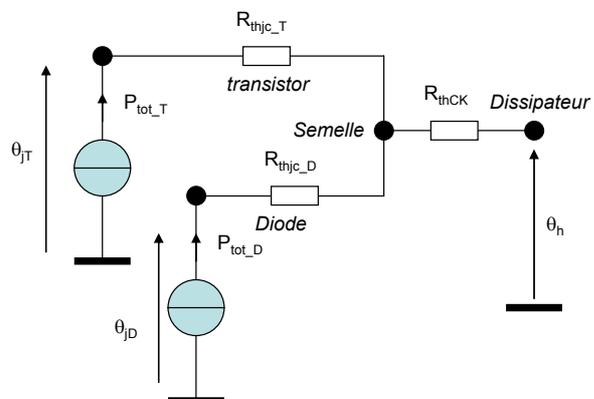
•

$$P_{tot\_T} = 118 + 230 + 180 = \mathbf{528\text{ W}} ; P_{tot\_D} = 82,6 + 90 = \mathbf{173\text{ W}} ;$$

$$P_{module} = 528 + 173 = \mathbf{701\text{ W}}$$

### QE3 : Etude thermique en régime permanent

- Modèle thermique nodal simplifié



- 

$$\theta_{jT} = \theta_h + R_{thjc\_T} \cdot P_{tot\_T} + R_{thCK} (P_{tot\_T} + P_{tot\_D}) = 78,6^\circ C$$

$$\theta_{jD} = \theta_h + R_{thjc\_D} \cdot P_{tot\_D} + R_{thCK} (P_{tot\_T} + P_{tot\_D}) = 72,1^\circ C$$

# **DOCUMENTS RÉPONSES**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQB**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQC1**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD1**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD2**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD4**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD5**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQD6**

**DOCUMENT RÉPONSE DRQE1**

## Corrigé QB3 - QB6

### QB-3 : Batterie de compensation sans $L_b$

- Composantes fondamentale et harmoniques,
  - du courant dans la batterie de condensateurs ;
  - du courant au secondaire des transformateurs.

F(Hz)	50	150	250	350
$I_T$ (A)	520	128	40	29
$I_c$ (A)	<b>168</b>	<b>55</b>	<b>208</b>	<b>74</b>
$I_s$ (A)	<b>450</b>	<b>183</b>	<b>248</b>	<b>45</b>

- Valeur efficace de  $I_c$  :

**283 A**

- Valeur efficace de  $I_s$  :

**547 A**

### QB-6 : Batterie de compensation avec $L_b$

- Composantes fondamentale et harmoniques,
  - du courant dans la batterie de condensateurs ;
  - du courant au secondaire des transformateurs.

F(Hz)	50	150	250	350
$I_T$ (A)	520	128	40	29
$I_c$ (A)	<b>205</b>	<b>45</b>	<b>8</b>	<b>5</b>
$I_s$ (A)	<b>438</b>	<b>83</b>	<b>32</b>	<b>24</b>

- Valeur efficace de  $I_c$  :

**210 A**

- Valeur efficace de  $I_s$  :

**448 A**

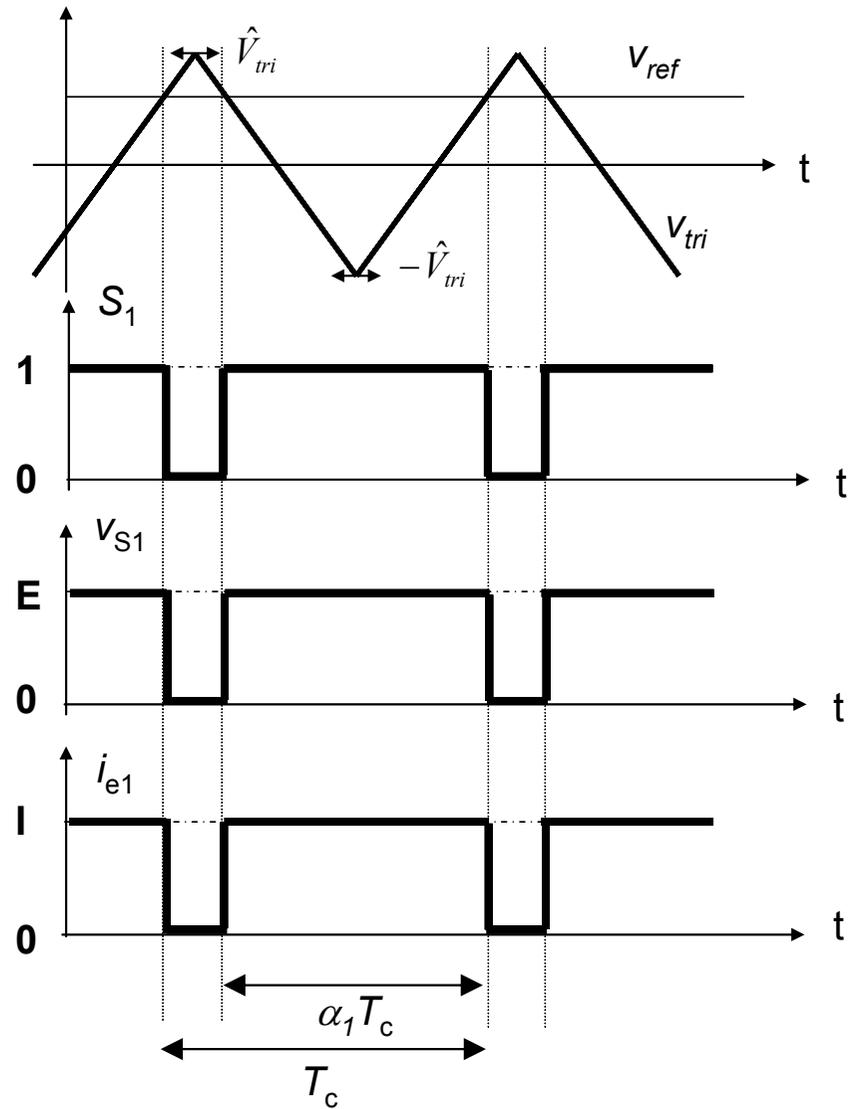
### DRQB : Calcul des valeurs efficaces des courants $I_c$ et $I_s$

## Corrigé QC-1

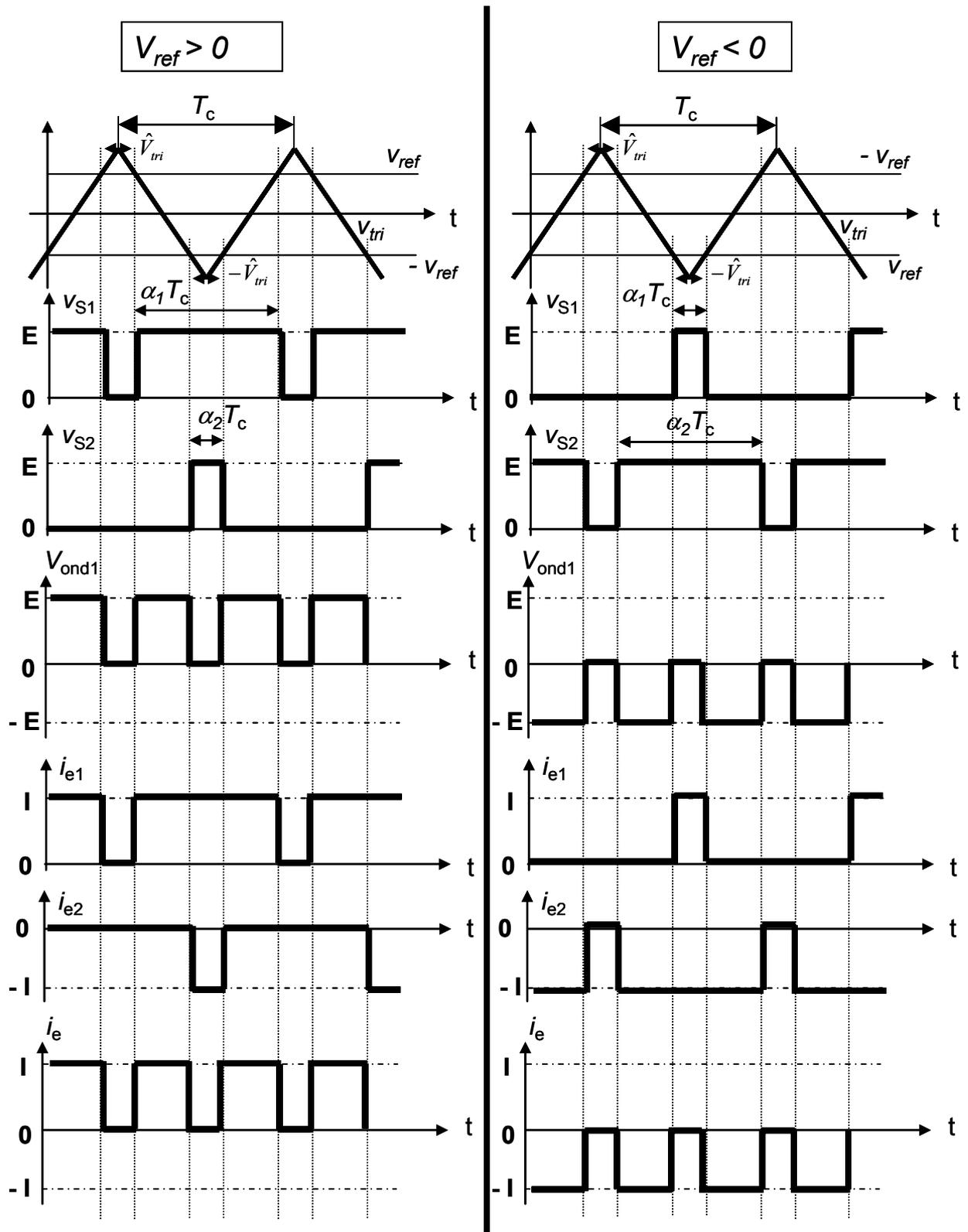
Date	heure	P (kW)	Q (kVAR)	Wr facturé (kVARh)	W'r facturé (kVARh)
mercredi 16/02/05	6:00	15264	7488	691	0
mercredi 16/02/05	6:30	11496	6156	779	0
mercredi 16/02/05	7:00	19344	12348	2305	805,2
mercredi 16/02/05	7:30	18936	11376	1901	400,8
mercredi 16/02/05	8:00	16632	9360	1354	0
mercredi 16/02/05	8:30	19440	13572	2898	1398
mercredi 16/02/05	9:00	14544	7380	781	0
mercredi 16/02/05	9:30	9456	3060	0	0
mercredi 16/02/05	10:00	7464	1044	0	0
mercredi 16/02/05	10:30	6240	396	0	0
mercredi 16/02/05	11:00	9864	2520	0	0
mercredi 16/02/05	11:30	7728	720	0	0
mercredi 16/02/05	12:00	7944	756	0	0
mercredi 16/02/05	12:30	10248	2736	0	0
mercredi 16/02/05	13:00	11328	2916	0	0
mercredi 16/02/05	13:30	11976	4068	0	0
mercredi 16/02/05	14:00	7536	648	0	0
mercredi 16/02/05	14:30	3360	72	0	0
mercredi 16/02/05	15:00	4008	180	0	0
mercredi 16/02/05	15:30	4296	324	0	0
mercredi 16/02/05	16:00	6936	1224	0	0
mercredi 16/02/05	16:30	10152	3456	0	0
mercredi 16/02/05	17:00	11352	4608	34	0
mercredi 16/02/05	17:30	8568	3528	50	0
mercredi 16/02/05	18:00	15144	8172	1057	0
mercredi 16/02/05	18:30	15696	9396	1559	58,8
mercredi 16/02/05	19:00	15624	8640	1195	0
mercredi 16/02/05	19:30	13536	6840	713	0
mercredi 16/02/05	20:00	16200	6804	162	0
mercredi 16/02/05	20:30	13512	7236	916	0
mercredi 16/02/05	21:00	19056	11844	2111	610,8
mercredi 16/02/05	21:30	14112	7128	742	0
mercredi 16/02/05	22:00	11952	4104	0	0
<b>Wr total facturé (kVARh)</b>				<b>19247</b>	<b>3274</b>

$$(W'r - Wr) / Wr = 82 \%$$

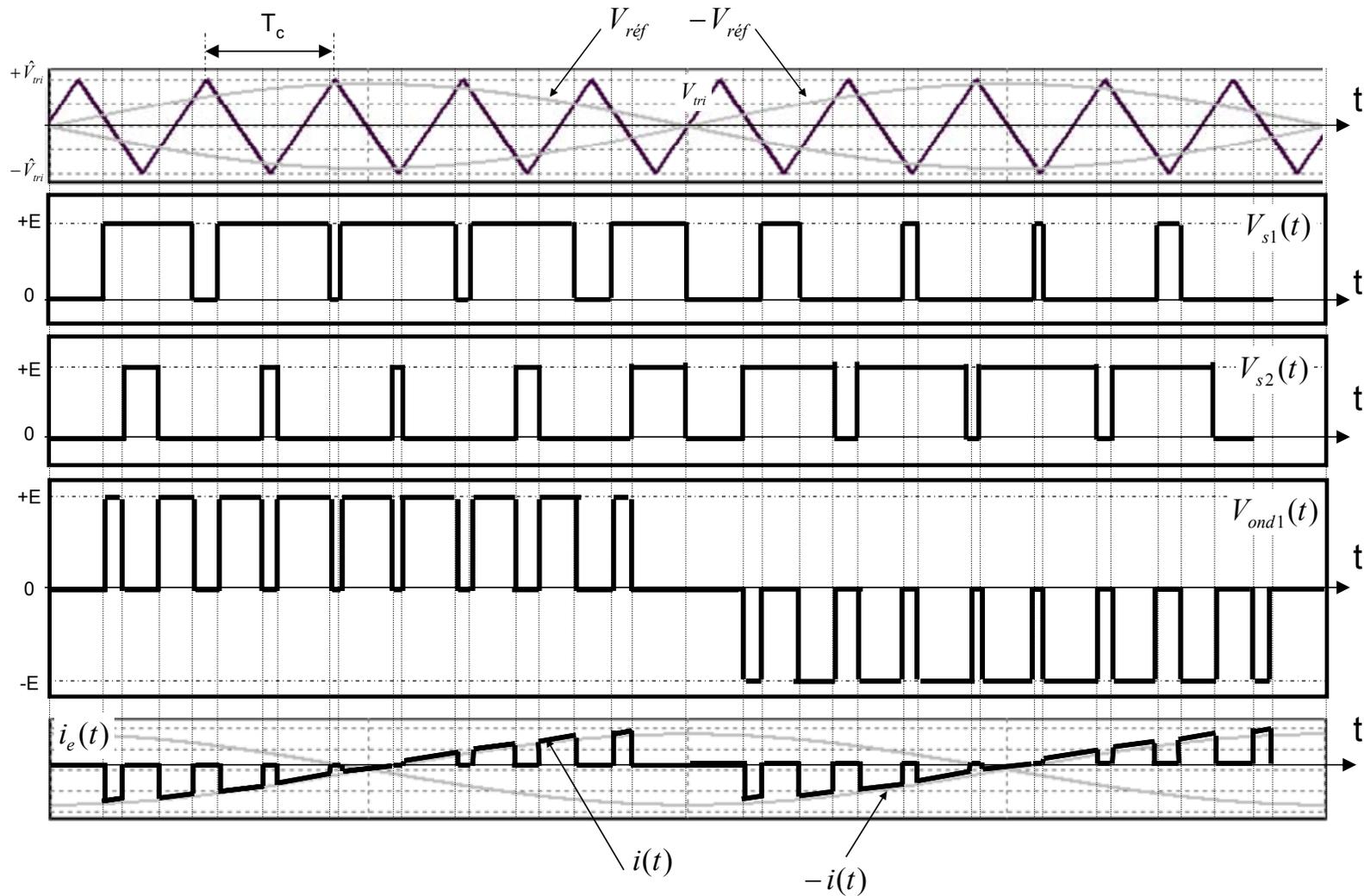
**DRQC1 : Calcul de l'énergie réactive facturée**



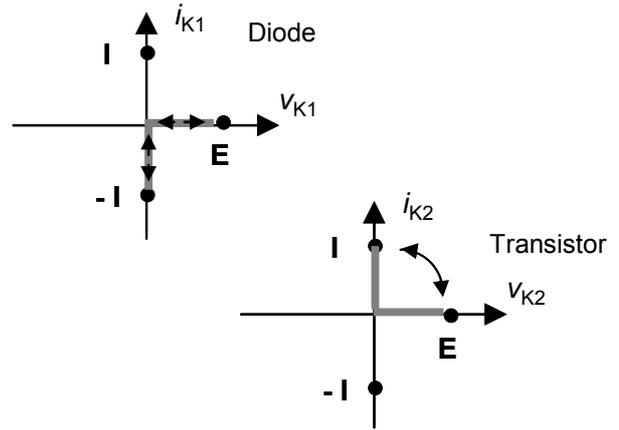
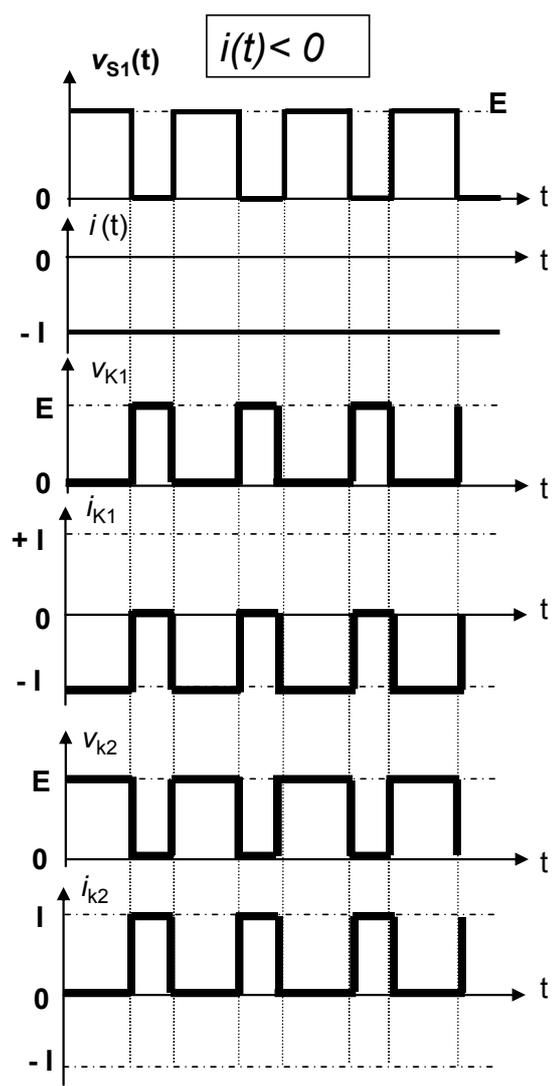
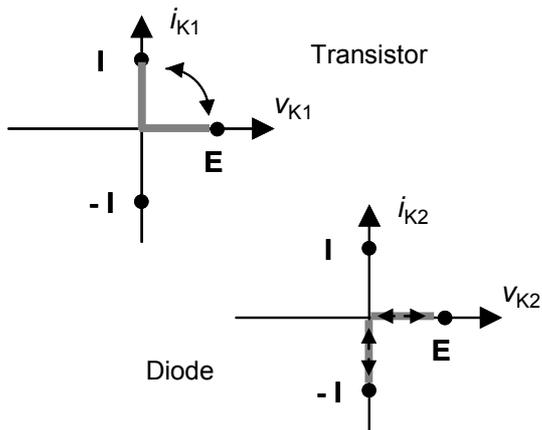
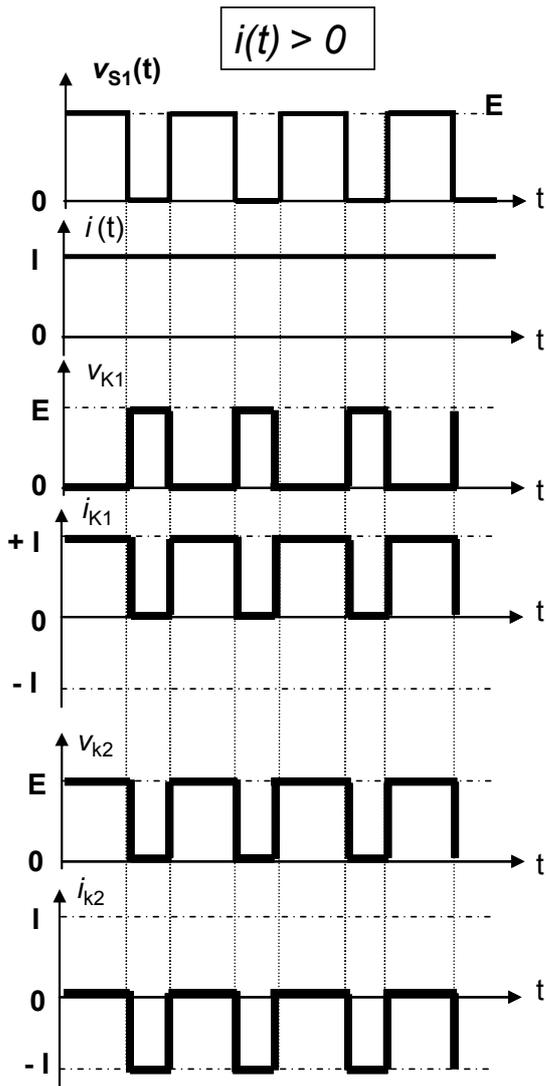
**DRQD1 : Formes d'ondes pour une cellule de commutation**



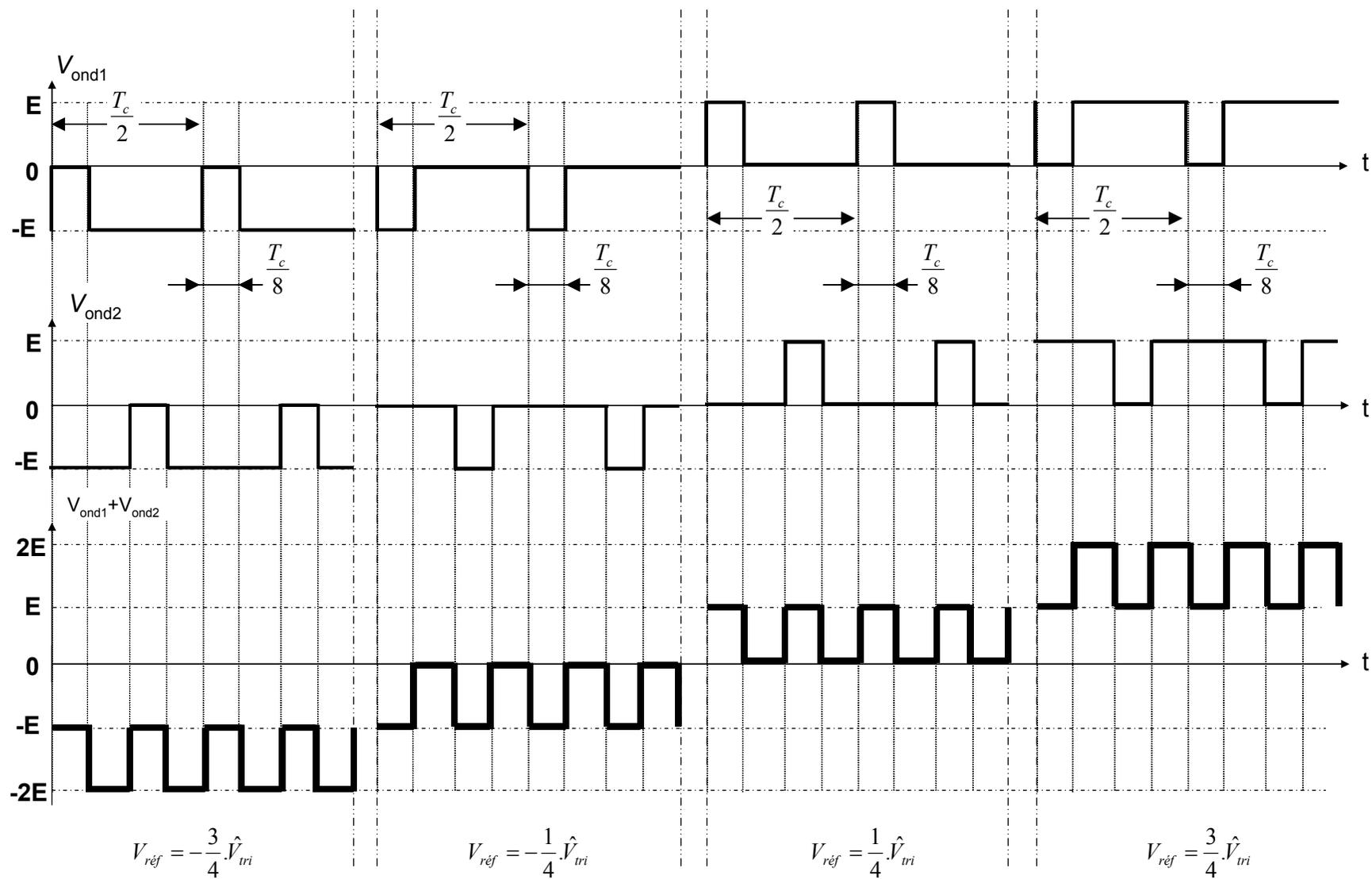
DRQD2 : Formes d'ondes pour une association différentielle de deux cellules de commutation



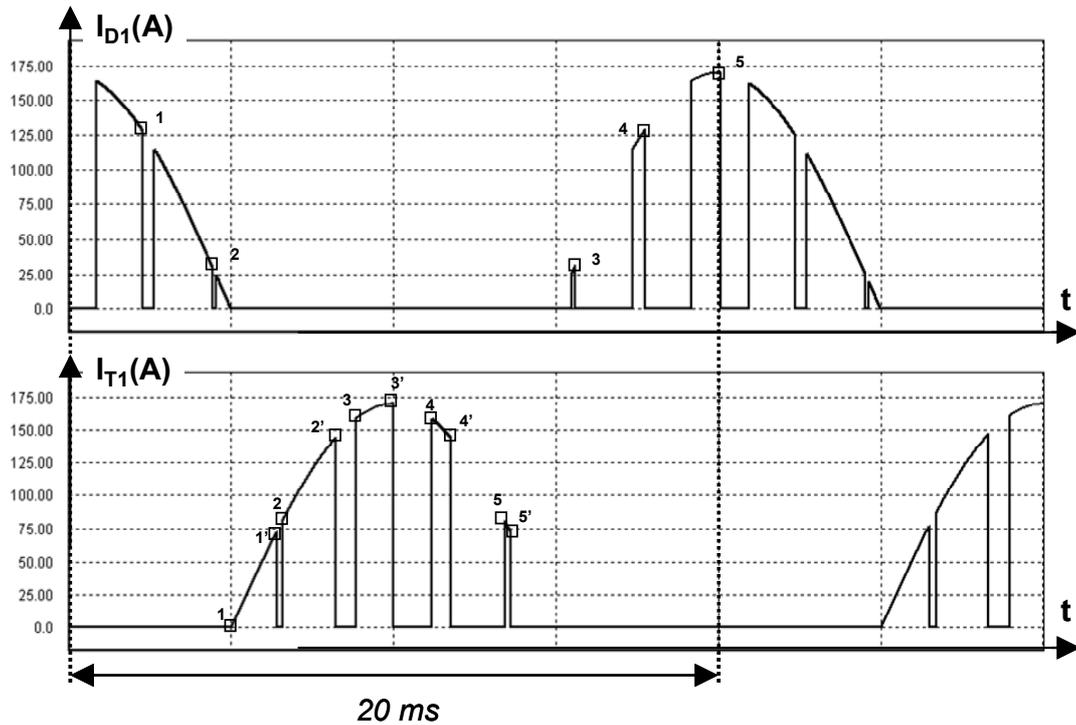
DRQD4 : Onduleur de tension MLI : Tracé des formes d'ondes



**DRQD5 : Détermination des caractéristiques des interrupteurs**



**DRQD6 : Mise en série de deux onduleurs de tension : Tracé des formes d'ondes**



### Transistor T1 : Energie dissipée en commutation

#### Amorçage

Numéro de Commutation	Courant Commuté (A)	Eon (J)
1	<b>0</b>	<b>0</b>
2	<b>80</b>	<b>0,8</b>
3	<b>159</b>	<b>1,5</b>
4	<b>159</b>	<b>1,5</b>
5	<b>80</b>	<b>0,8</b>
Energie Totale dissipée sur 20 ms		<b>4,6</b>

#### Blocage

Numéro de Commutation	Courant Commuté (A)	Eoff (J)
1'	<b>72</b>	<b>0,5</b>
2'	<b>143</b>	<b>0,8</b>
3'	<b>170</b>	<b>1,0</b>
4'	<b>143</b>	<b>0,8</b>
5'	<b>72</b>	<b>0,5</b>
Energie Totale dissipée sur 20 ms		<b>3,6</b>

### Diode D1 : Energie dissipée au blocage

Numéro de Commutation	Courant Commuté (A)	Erec (J)
1	<b>129</b>	<b>0,4</b>
2	<b>30</b>	<b>0,25</b>
3	<b>30</b>	<b>0,25</b>
4	<b>129</b>	<b>0,4</b>
5	<b>170</b>	<b>0,5</b>
Energie Totale dissipée sur 20 ms		<b>1,8</b>

### DRQE1 : Détermination des énergies dissipées en commutation