

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

3^{ème} Année – option TAAE

EXAMEN D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE 2006-2007
COURS DE P. LADOUX, F. RICHARDEAU, H. PIQUET

Durée 3 heures – 1 feuille « Aide Mémoire » A4 autorisée

Téléphones éteints et dans les sacoches

Convertisseur AC/DC à étage intermédiaire moyenne fréquence pour la traction ferroviaire

Introduction :

Dans les engins de traction actuels, les moteurs asynchrones de traction sont alimentés à tension et fréquence variable par des onduleurs de tension raccordés sur un bus continu (1.5 kV ou 3 kV). Pour élaborer cette tension continue à partir d'une caténaire haute tension, le prélèvement de l'énergie électrique s'effectue grâce à un transformateur abaisseur fonctionnant à la fréquence du réseau d'alimentation et associé à un redresseur. Dans cette architecture de conversion classique, le transformateur représente un volume et un poids important, ce qui est particulièrement pénalisant dans le cas des rames automotrices où il faut conserver un maximum d'espace pour les passagers.

Pour réduire à puissance égale le volume du transformateur d'entrée, il faut augmenter sa fréquence de fonctionnement. Pour cela, il faut créer dans la chaîne de conversion d'énergie électrique un étage intermédiaire alternatif fonctionnant en moyenne fréquence (quelques kHz). Ce principe nécessite qu'une partie de l'électronique de puissance fonctionne directement sur la caténaire haute tension où plusieurs convertisseurs sont associés en série.

Ces dernières années, des travaux de recherche ont concernées des architectures de conversion alternatif continu à étage moyenne fréquence destinées au prélèvement de l'énergie sur les caténaires 15 kV-16,7Hz (réseaux ferrées de l'Europe centrale) pour des rames automotrices. Compte tenu de la très basse fréquence du réseau d'alimentation, il est possible d'obtenir un gain significatif sur le volume et le poids du convertisseur AC/DC.

Le cahier de charges du convertisseur AC/DC est le suivant :

Puissance nominale : $P = 1,5 \text{ MW}$.

Caractéristique d'entrée :

- Alimentation à partir d'une caténaire $15 \text{ kV} - 16,7 \text{ Hz}$.
- Absorption sinusoïdale de courant en phase avec la tension caténaire

Caractéristique de sortie :

- Tension continue régulée $V_s = 1500 \text{ V}$

Le schéma de principe de la figure ci-dessous présente une des topologies permettant de répondre au cahier des charges.

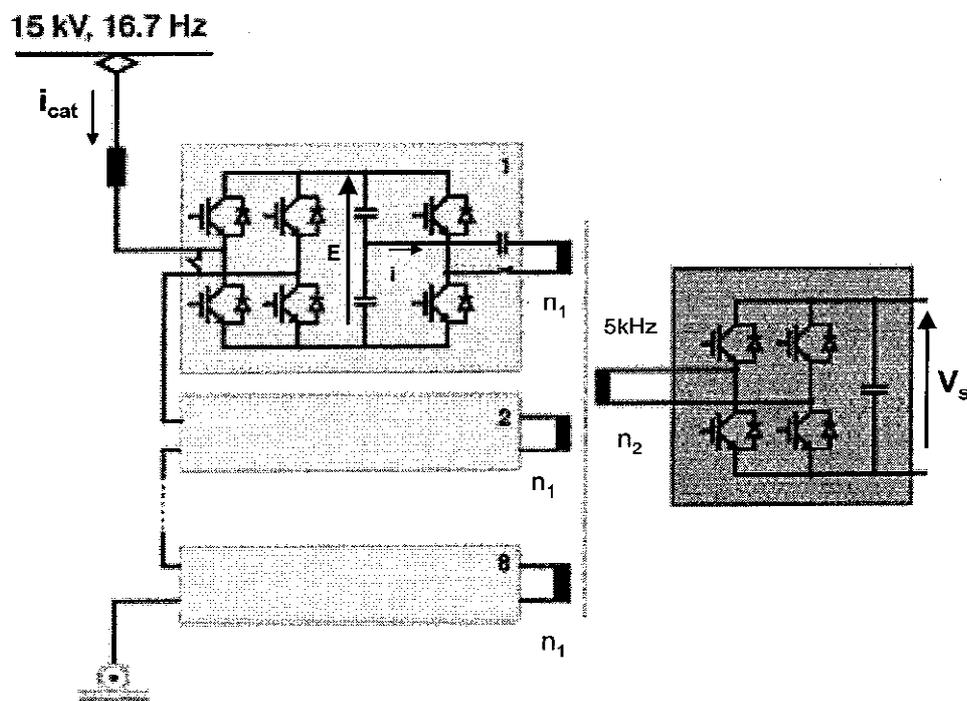


Figure 1 : Topologie du convertisseur AC/DC

Le convertisseur AC/DC comporte à l'entrée 8 blocs identiques associés en série. L'étage intermédiaire moyenne fréquence fonctionne à 5 kHz et comprend un seul transformateur à 8 bobinages de n_1 spires et un bobinage de n_2 spires.

1^{ère} Partie : Etude des propriétés des constituants de la structure de conversion AC/DC

La figure suivante présente le schéma de principe d'une partie de la chaîne de conversion électrique

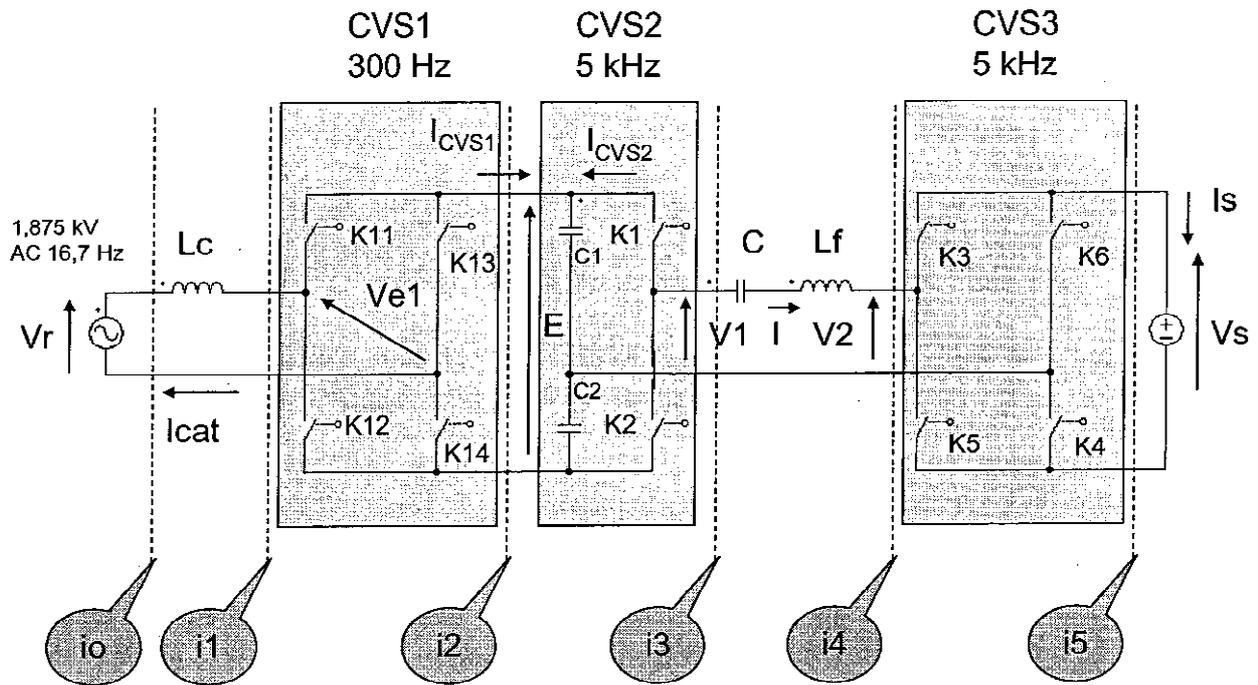


Figure 2

Cette chaîne est destinée à contrôler le prélèvement d'énergie sur la caténaire (représentée par une source de tension alternative V_r , $f=16,7\text{Hz}$) et à transmettre cette énergie à l'étage de sortie en tension continue V_s .

1-1) Définir les cellules de commutation des convertisseurs CVS1, CVS2, CVS3.

1-2) « Qui fait quoi ? » – propriétés de causalité dans la structure :

- 1-2-1) Au niveau de l'interface « i0 », préciser quelle partie de la structure impose et quelle partie subit les grandeurs : V_r , I_{cat} ; préciser le domaine fréquentiel de validité de cette propriété, en vous référant aux diverses fréquences mise en jeu dans la chaîne de conversion.
- 1-1-2) Idem pour l'interface « i1 », concernant les grandeurs : V_{e1} , I_{cat} ;
- 1-1-3) Idem pour l'interface « i2 », concernant les grandeurs : E , I_{CVS1} ;
- 1-1-4) Idem pour l'interface « i3 », concernant les grandeurs : V_1 , i ;
- 1-1-5) Idem pour l'interface « i4 », concernant les grandeurs : V_2 , i ;
- 1-1-6) Idem pour l'interface « i5 », concernant les grandeurs : I_s , V_s ;

1-3) Pour le convertisseur CVS1, depuis l'interface « i1 » vers l'interface « i2 », préciser la nature de la conversion opérée (courant-courant, tension-courant, tension-tension, courant-tension) ; déduire de cette propriété structurelle le caractère élévateur ou abaisseur en tension du convertisseur. Utilisez votre conclusion pour justifier le choix de la valeur de la tension E (3 kV DC). A quel endroit de la chaîne de conversion un court-circuit peut-il intervenir, dont CVS1 peut limiter les conséquences ?

1-4) Le courant I_{cat} est bidirectionnel ; en déduire les caractéristiques statiques et dynamiques des interrupteurs de CVS1 (on rappelle que la fréquence de V_r est 16.7 Hz ; la fréquence de découpage de CVS1 est de 300 Hz). Expliquer pourquoi ces caractéristiques autorisent un transfert de la puissance bidirectionnel.

1-5) On choisit de considérer le cas où la tension V_r et le courant I_{cat} sont placés en phase (grandeurs sinusoïdales). Quelles sont les composantes harmoniques de la puissance absorbée sur la caténaire ? En déduire les composantes harmoniques de I_{CVS1} (on négligera les ondulations éventuelles de E).

1-6) On fait fonctionner CVS2 à rapport cyclique $\frac{1}{2}$ ($f_a = 5\text{kHz}$) ; en supposant que i est sinusoïdal, déterminer les fréquences des deux premières raies du spectre de I_{CVS2} ; à quelle fréquence le dimensionnement de C_1 et C_2 sera-t-il effectué ?

1-7) Le courant i dans le circuit résonant (L_f , C) est bidirectionnel. En déduire les caractéristiques statiques des interrupteurs de CVS2. Montrer que ceux-ci confèrent à CVS2 une réversibilité en puissance.

1-8) Montrer que les réversibilités en puissance de CVS1 et CVS2 sont compatibles entre elles et procurent à la chaîne de conversion une réversibilité en puissance entre les interfaces « i0 » et « i3 ».

1-9) CVS1 doit permettre le réglage du courant I_{cat} ; à l'aide d'un diagramme de Fresnel ($f = 16.7\text{ Hz}$), représenter le fondamental de la tension V_{e1} que doit produire CVS1, dans le cas où l'on choisit de placer V_r et I_{cat} en phase. Comment piloter les cellules de CVS1 pour fournir cette tension (composante BF), en imposant aux bornes de L_c la fréquence la plus élevée possible (afin de minimiser son dimensionnement).

2^{ème} Partie : Etude du convertisseur DC-DC à résonance.

Le circuit considéré est le suivant :

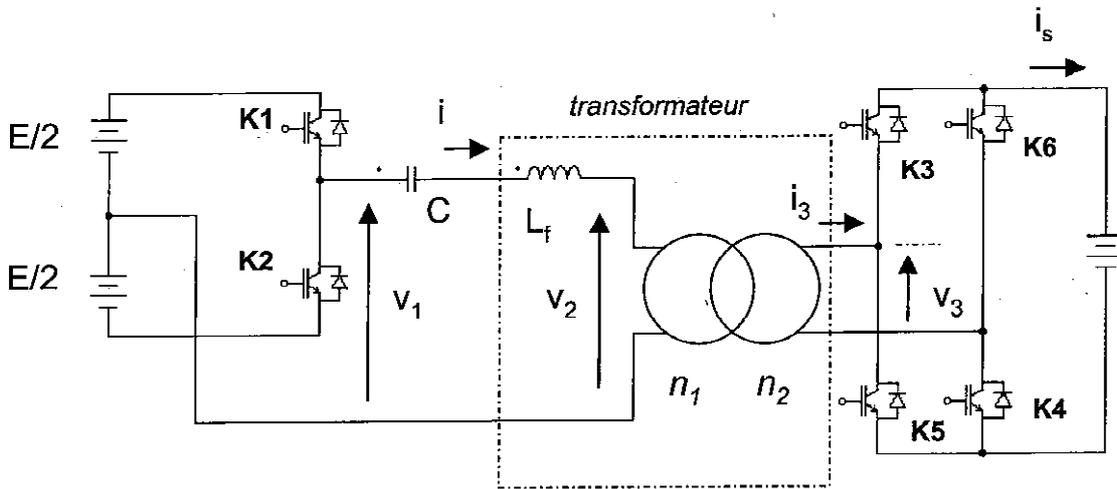


Figure 3 : schéma de principe du convertisseur DC/DC

Hypothèses :

- Tension du bus continu d'entrée E constante ;
- Courant dans le circuit résonant parfaitement sinusoïdal, de valeur efficace I et en retard sur la tension v_1 (angle φ) ;
- Tension du bus continu de sortie V_s constante.
- Tous les interrupteurs fonctionnent à la même fréquence et la commande des interrupteurs permet de décaler d'un angle θ les tensions v_1 et v_2 .
- Pour le transformateur : résistances des bobinages, courant magnétisant et pertes fer négligeables ; inductance de fuite notée L_f .
- La fréquence de fonctionnement des interrupteurs f_d est supérieure à la fréquence de résonance f_0 du circuit $L_f C$.
- A la fréquence f_d , l'impédance du circuit résonant $L_f C$ est notée $\underline{Z} = j X$

Analyse du fonctionnement du convertisseur à résonance :

2-1) Compléter le document réponse n°1 en précisant l'allure des tensions instantanées v_1 , v_2 et du courant i_s .

2-4) On note respectivement, \underline{V}_{1f} et \underline{V}_{2f} , les valeurs efficaces complexes des composantes fondamentales des tensions v_1 et v_2 . La valeur efficace complexe du courant i est notée \underline{I} et la valeur efficace complexe de la tension aux bornes du circuit résonant est notée $j \underline{X} \underline{I}$. Tracer l'allure du diagramme de Fresnel (tensions et courant) correspondant au fonctionnement de l'étage intermédiaire haute fréquence en faisant apparaître les angles θ et φ .

2-5) A partir du diagramme de Fresnel, établir en fonction de \underline{V}_{2f} , I , θ et φ , l'expression de la puissance transmise dans l'étage moyenne fréquence. Déterminer ensuite en fonction de n_1 , n_2 , I , θ et φ , l'expression du courant moyen délivré en sortie $\langle I_s \rangle$. (On rappelle que la valeur efficace de l'onde fondamentale d'un signal carré d'amplitude ± 1 est égale à $\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$).

2-6) Toujours à partir du diagramme de Fresnel établi à la question 2-4, déterminer en fonction de V_{1f} , V_{2f} , X , θ et φ , l'expression de I .

2-7) A partir des résultats des questions 2-5 et 2-6, montrer que : $\langle I_s \rangle = \frac{4.E}{X.\pi^2} \frac{n_1}{n_2} \sin \theta$.

2-8) Comme à la question 2-4, tracer qualitativement le diagramme de Fresnel (tensions et courant) correspondant au fonctionnement de l'étage intermédiaire moyenne fréquence pour $\theta = 240^\circ$. Quel est alors le sens de transfert de l'énergie entre les sources d'entrée et de sortie ? A quel mode de fonctionnement de l'engin de traction cela correspond-t-il ?

2-9) Compléter le document réponse n°2 en précisant l'allure des tensions instantanées v_1 , v_2 et du courant i_s .

2-10) En cas de défaut sur les onduleurs de traction, la tension V_s peut être court-circuitée ($V_s = 0$). Déterminer alors l'expression de la valeur efficace du courant i ?

Eléments de dimensionnement du convertisseur à résonance :

Au point de fonctionnement nominal :

$P = 200 \text{ kW}$; $E = 3 \text{ kV}$; $V_s = 1,5 \text{ kV}$, $\varphi_n = 45^\circ$, $\theta_n = 90^\circ$

2-11) Calculer la valeur efficace du courant I .

2-12) A partir du diagramme de Fresnel établi à la question 2-4, déterminer la valeur efficace du fondamental de la tension v_2 et en déduire la valeur du rapport n_1/n_2 .

2-13) Calculer la valeur de la réactance X du circuit résonant. Sachant que l'inductance de fuite du transformateur $L_f = 300 \mu\text{H}$, calculer alors la capacité du condensateur C .