

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

Etude d'une alimentation pour un tube à rayon X de scanner médical.

Eléments du cahier des charges :

Alimentation à partir du réseau EDF triphasé 400 V/50 Hz (tension efficace entre phases) ;

Caractéristique statique du tube à rayon X précisée à la figure 3 ;

Grandeurs de sortie au point nominal : $V_s = 140 \text{ kV}$; $I_s = 178 \text{ mA}$ ($P = 25 \text{ kW}$) ;

Ondulation de tension de sortie au point nominal : $\pm 70 \text{ V}$;

Tenue au court-circuit ($V_s = 0$, $I_{sc} = 200 \text{ mA}$) ;

Encombrement de volume réduit.

1 : Architecture

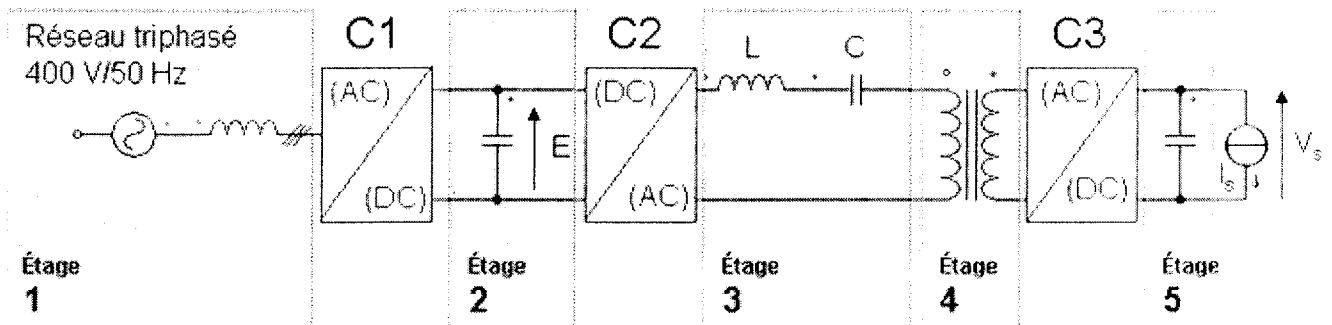


figure 1

Le schéma de principe de l'alimentation est donné à la figure 1. Le sens de transfert de l'énergie est unidirectionnel (du réseau vers le tube à rayon X).

- 1.1) Pour chacun des étages de cette chaîne de conversion, préciser la nature fondamentale, c'est-à-dire la grandeur imposée par cet étage aux éléments qui lui sont connectés.

- 1.2) Caractériser la conversion (tension-tension, tension-courant, ...) opérée par chacun des convertisseurs C1, C2 et C3. Préciser leur caractère élévateur ou abaisseur en tension et en courant en indiquant le sens de transfert considéré ; justifier la réponse. Quels éléments de la chaîne de conversion contribuent à la capacité de cette structure à supporter le court-circuit ?
- 1.3) Indiquer quels sont les lieux possibles dans la structure pour la mise en place de l'isolement galvanique ; préciser les raisons qui ont conduit au choix retenu en figure 1.
- 1.4) Comment peut on apprécier l'adéquation des caractéristiques de l'étage 5 et de la charge qui lui est connectée (figure 3) ? Préciser le domaine temporel qui définit cette appréciation.

On envisage ici la possibilité d'effectuer la conversion réalisée par le convertisseur C1 à l'aide d'un redresseur MLI. On considèrera que le neutre du réseau n'est pas accessible.

- 1.5) Donner le schéma de principe de la structure de ce convertisseur ; justifier les caractéristiques des semi-conducteurs utilisés. Quelle est la valeur minimale de la tension E compatible avec l'utilisation de cette solution. Préciser quels sont les degrés de liberté de cette structure.
- 1.6) On précise que l'on souhaite prélever l'énergie sur le réseau en contrôlant la forme d'onde des courants (sinusoïdaux à l'échelle du 50Hz), avec un $\cos \varphi = 1$. Expliquer comment les degrés de liberté définis au point 1.5. peuvent être exploités dans cet objectif.

2 : Etude du convertisseur à résonance.

Le schéma détaillé de la structure est donné à la figure 2.

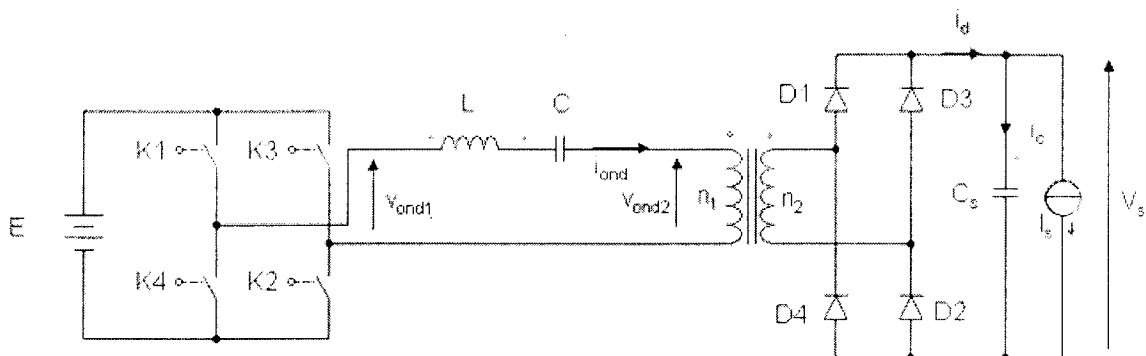


figure 2

Hypothèses :

- Tension du bus continu est constante, $E = 540 \text{ V}$ (pour le convertisseur C1, un simple redressement triphasé à diodes a été retenu);
- courant de sortie de l'onduleur parfaitement sinusoïdal, d'amplitude \hat{I} et en retard sur la tension (angle φ_{fond}) ;
- fréquence de commutation des interrupteurs au point nominal, $f = 10 \text{ kHz}$; Tension de sortie constante, $V_s = 140 \text{ kV}$.

- Le transformateur est supposé parfait : résistance des bobinages supposée négligeable et circuit magnétique de perméabilité infinie.
- Les interrupteurs sont supposés parfaits.

On respectera les notations de la figure 2. D'autre part, la fréquence de résonance du circuit LC sera notée f_0 (pulsation ω_0), l'impédance du circuit résonant sera notée Z et la puissance en sortie sera notée P .

- 2.1) Préciser le mode de fonctionnement du redresseur à diodes.
- 2.2) Compléter le document réponse n°1 en précisant les séquences de conduction des diodes, l'allure des tensions instantanées v_{ond1} , v_{ond2} et du courant i_d .
- 2.3) Calculer l'amplitude crête \hat{I}_d du courant i_d pour le point de fonctionnement nominal (justifier votre réponse).
- 2.4) On note respectivement, V_{ond1f} et V_{ond2f} , les valeurs efficaces complexes des composantes fondamentales des tensions $v_{ond1}(t)$ et $v_{ond2}(t)$. La valeur efficace complexe du courant $i_{ond}(t)$ sera notée I_{ond} . Tracer l'allure du diagramme de Fresnel (tensions et courant) correspondant au fonctionnement de l'étage intermédiaire haute fréquence.
- 2.5) Sachant qu'au point de fonctionnement nominal $P = 25 \text{ kW}$ et $\cos \varphi_{fond} = 0,86$, donner l'expression de \hat{I} en fonction de P et E . Calculer sa valeur. En déduire alors la valeur du rapport de transformation du transformateur haute fréquence ($m = \frac{n_2}{n_1}$).
- 2.6) A partir du diagramme de Fresnel établi à la question 2-4, calculer le module de l'impédance Z à $f = 10 \text{ kHz}$. Calculer la valeur de C pour que la tension maximale aux bornes du condensateur du circuit oscillant soit de 800 V . En déduire ensuite la valeur de l'inductance L . Calculer la fréquence de résonance f_0 .
- 2.7) Toujours à partir du diagramme de Fresnel établi à la question 2-4, montrer que la caractéristique de sortie $V_s(I_s)$ est de la forme : $V_s^2 + A I_s^2 + B = 0$. On précisera les expressions des coefficients A et B . Tracer l'allure de cette caractéristique en précisant les points particuliers. En fonctionnement normal, la caractéristique statique du tube à rayon X est donnée à la figure 3. L'adéquation source/charge vous paraît-elle correcte ? (Justifier cette réponse et la mettre en relation avec l'appréciation de la question 1.4).

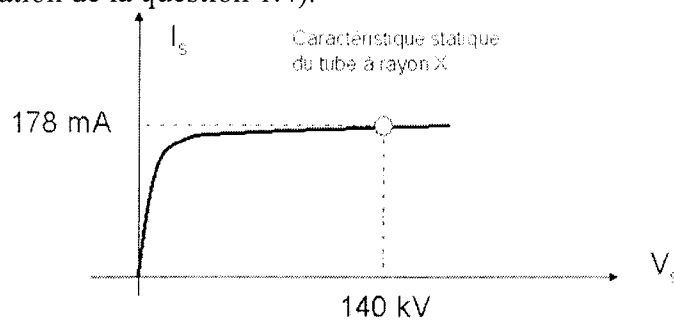
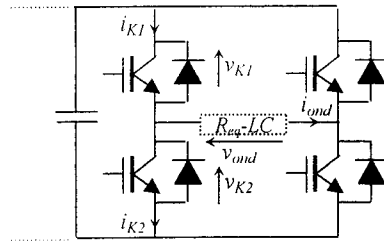


figure 3

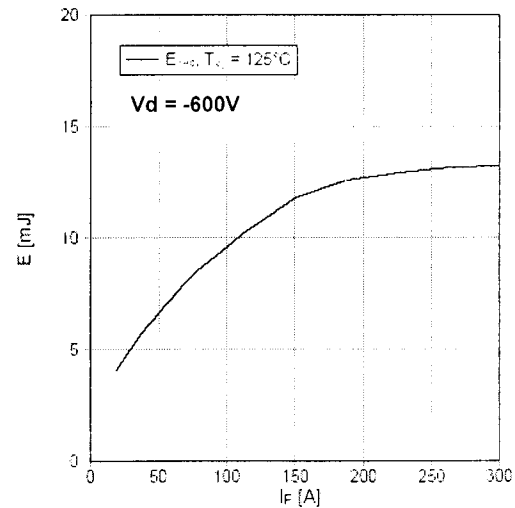
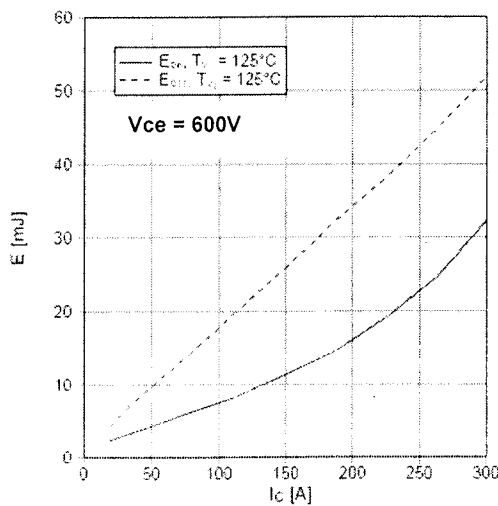
3 : Caractérisation des interrupteurs de puissance



- 3.1) Tracer les formes d'ondes $v_{ond}(t)$, $i_{ond}(t)$, $i_{K1}(t)$, $v_{K1}(t)$, $i_{K2}(t)$, $v_{K2}(t)$, pour $\varphi_{fond} = 30^\circ AR$ et $\varphi_{fond} = 30^\circ AV$.
- 3.2) En déduire (avec soin !) le tracé du point de fonctionnement des interrupteurs $K1$ et de $K2$ dans le plan $i_K(v_K)$. Identifier le type d'interrupteur à utiliser dans les deux cas.
- 3.3) Rappeler les avantages conférés par le mode $\varphi_{fond} AR$.
- 3.4) Donner le schéma synoptique de la commande rapprochée d'un tel interrupteur.

Caractérisation des pertes et aspects technologiques

On choisit d'utiliser deux modules de puissance intégrant chacun un bras de l'onduleur. On reproduit ci-dessous un extrait de la *data sheet* donnant les courbes d'énergie de commutation des IGBT et des diodes.



- 3.5) Pour le mode $\varphi_{fond} = 30^\circ AR$ et $\varphi_{fond} = 30^\circ AV$ calculer les pertes par commutation que doit dissiper un module pour une fréquence de découpage de $10kHz$.
- 3.6) Pour $\varphi_{fond} = 30^\circ AR$, déterminer la valeur du condensateur à placer en parallèle avec les IGBT pour limiter le dv/dt à $400V/\mu s$. Tracer les formes d'ondes $i_{K1}(t)$, $v_{K1}(t)$ dans ce cas.