

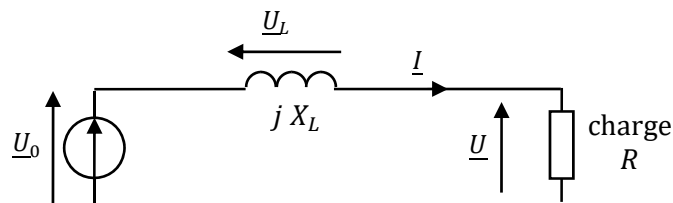
**Ecrit réparti n°2 : lundi 8 janvier 2018**

Durée : 2 h 00 – Sans document ni téléphone, avec calculatrice autorisée

*Le sujet comporte 3 exercices indépendants*

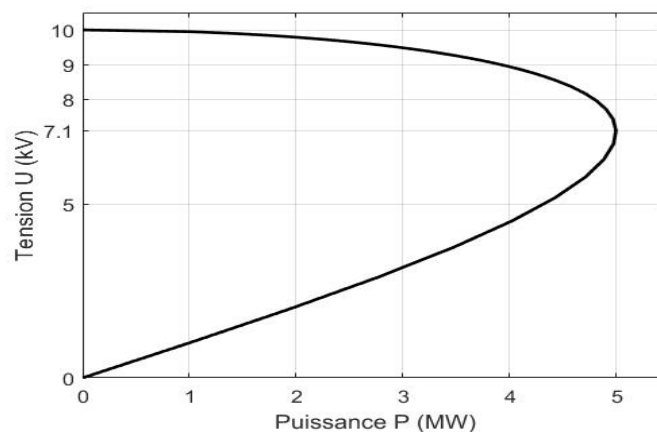
**Exercice 1 : Adaptation d'impédance d'une ligne de transport**

La Figure 1 schématise une ligne de transport monophasée 50 Hz qui alimente une charge purement résistive  $R$ . La ligne est caractérisée par son impédance inductive  $jX_L$  et est alimentée par une source de tension  $\underline{U}_0$ , avec  $|U_0| = 10 \text{ kV}$  et  $X_L = 10 \Omega$ .



*Figure 1 : Schéma de la ligne de transport et de la charge*

On note  $P$ , la puissance active transmise à la charge et  $\underline{U}$ , la tension aux bornes de la charge. La Figure 2 représente le graphe du module de la tension aux bornes de la charge en fonction de la puissance active  $P$  consommée par celle-ci. On constate que la puissance transmissible est limitée à 5 MW, et que la tension est alors de 7,1 kV.



*Figure 2 : Graphe Tension/Puissance au niveau de la charge*

- En pratique, les normes imposent une tension d'alimentation qui ne doit pas descendre en dessous de 95% de  $|U_0|$ . Relever sur le graphe la puissance maximale qui peut effectivement être délivrée à la charge dans ces conditions.

Afin d'améliorer le système, l'opérateur de la ligne place un condensateur de réglage de la tension en amont de la charge. Le schéma du système est représenté par la Figure 3. La capacité du condensateur est notée  $C$ , et son impédance  $jX_C$ .

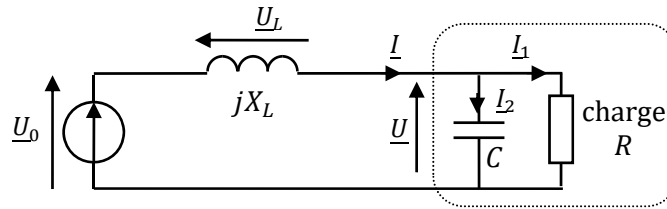


Figure 3 : Introduction d'un condensateur de réglage de la tension  $U$

- b. Donner la relation qui existe entre les grandeurs  $P$ ,  $|\underline{U}|$  et  $R$ .
- c. Déterminer  $\underline{Z}_{eq}$ , l'impédance équivalente de l'ensemble 'charge-condensateur' en fonction de  $R$  et  $X_C$ .
- d. Montrer que  $\underline{U} = \underline{U}_0 \frac{RX_C}{R(X_L + X_C) + jX_L X_C}$ .
- e. Montrer qu'il est possible d'ajuster la valeur de l'impédance de réglage  $X_C$  de façon à fournir une puissance active  $P = 10 \text{ MW}$  sous tension d'alimentation  $|\underline{U}| = |\underline{U}_0|$ . Pour cela, déterminer les valeurs de  $R$ , puis de  $X_C$  correspondant à cette situation.
- f. Tracer la diagramme de Fresnel correspondant à la situation précédente. Pour cela, prendre  $\underline{U}$  comme référence de phase, puis calculer et tracer  $\underline{I}_1$ ,  $\underline{I}_2$ ,  $\underline{I}$ ,  $\underline{U}_L$  et  $\underline{U}_0$ .

## Exercice 2 : Conversion DC/DC entre un panneau PV et une batterie

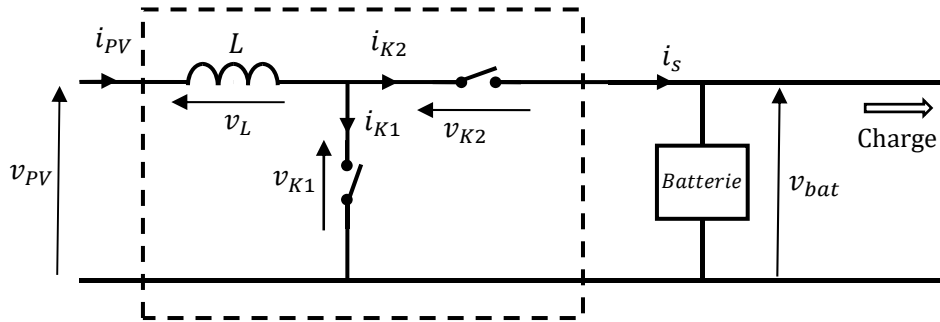


Figure 4 : Schéma d'un hacheur boost

La Figure 4 donne le schéma de principe d'un hacheur boost placé entre un panneau photovoltaïque et une batterie. Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  constituent une cellule de commutation dont la période de fonctionnement est  $T$ .  $K_1$  est fermé pendant l'intervalle  $[0, \alpha T]$  et ouvert pendant l'intervalle  $[\alpha T, T]$ .

Le panneau photovoltaïque produit une puissance  $P_{PV} = v_{PV} \cdot i_{PV}$ , où  $v_{PV}$  et  $i_{PV}$  représentent respectivement la tension aux bornes du panneau et le courant débité. Pour un éclaircissement donné, la tension  $v_{PV}$  est ajustée de façon à optimiser le rendement instantané du panneau. A titre d'exemple, la Figure 5 montre les données mesurées par une belle journée d'été, sur le plateau de Saclay.

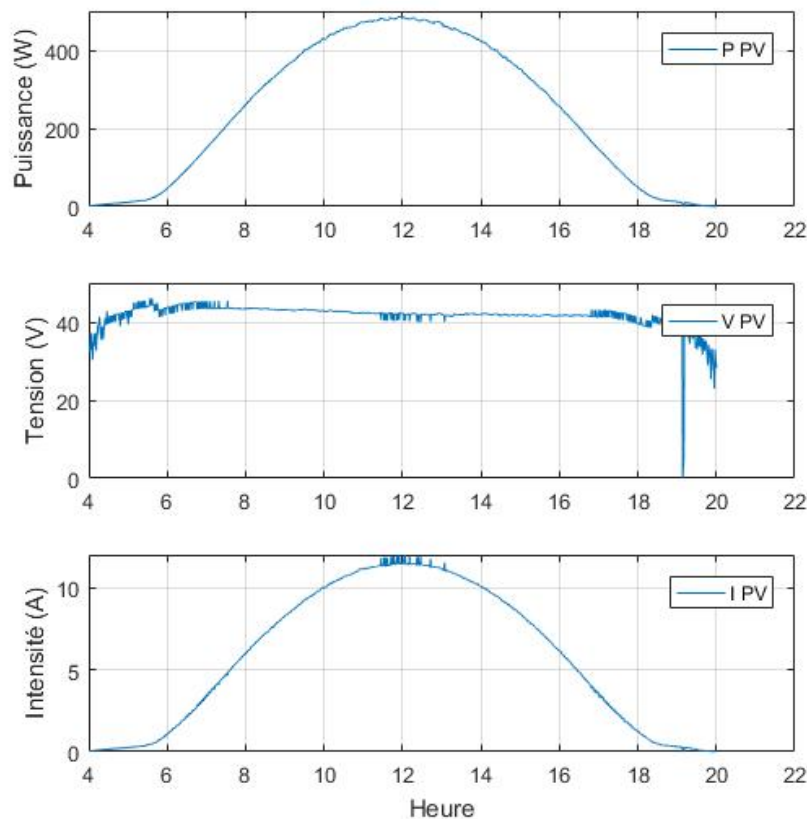


Figure 5 : Production d'un panneau solaire au cours d'une journée idéale – Données mesurées le 10 juillet 2015 : puissance électrique, tension  $v_{PV}$  et courant  $i_{PV}$

La batterie permet de gérer l'intermittence de la production solaire (stockage/restitution selon les besoins de la charge et les conditions météorologiques). En première approximation, la batterie se comporte comme une source de tension constante, avec  $v_{bat} = 100 \text{ V}$ .

La tension de sortie du panneau photovoltaïque  $v_{PV}$  est différente de celle de la batterie  $v_{bat}$ . De plus, elle fluctue légèrement au cours de la journée. Il est donc nécessaire d'interposer un convertisseur entre le panneau et la batterie. Le courant moyen en entrée du convertisseur est imposé par le panneau photovoltaïque et varie au cours de la journée : par exemple, à 8h  $\langle i_{PV} \rangle = 6 \text{ A}$ .

- a. Justifier le choix d'un hacheur boost comme convertisseur.
- b. Le schéma utilise un modèle d'inductance idéal. Sur quelle hypothèse ce choix repose-t-il ?

Dans la suite de l'exercice, pour simplifier les tracés et les applications numériques, on supposera que  $v_{PV} = 40 \text{ V}$ . On se placera à  $t = 10\text{h}$ , avec  $\langle i_{PV} \rangle = 10 \text{ A}$ , soit une puissance produite de  $400 \text{ W}$ .

On étudie le fonctionnement du convertisseur en régime permanent. La conduction est supposée continue et on note  $i_0$  la valeur du courant à l'instant  $t = 0$ .

- c. Tracer les chronogrammes de  $v_{K1}$ ,  $v_{K2}$  et  $v_L$ .
- d. Calculer  $\langle v_{K1} \rangle$  et  $\langle v_L \rangle$ . En déduire la relation entre le rapport de transformation  $\frac{v_{bat}}{v_{PV}}$  et le rapport cyclique  $\alpha$ . Calculer la valeur numérique de  $\alpha$ .
- e. Etablir l'expression du courant  $i_{PV}$  sur une période de fonctionnement. Tracer les chronogrammes des trois courants  $i_{PV}$ ,  $i_{K1}$  et  $i_s$ .
- f. Calculer l'amplitude de l'ondulation du courant d'entrée en fonction de  $V_{PV}$ ,  $\alpha$ ,  $L$  et  $T$ . Sachant que la fréquence de hachage est de  $10 \text{ kHz}$ , déterminer la valeur de  $L$  qui donne une ondulation de courant d'amplitude  $1 \text{ A}$ .
- g. Calculer la valeur moyenne du courant de sortie  $\langle i_s \rangle$  à partir du chronogramme de  $i_s$ . La puissance de sortie est-elle égale à la puissance d'entrée ?
- h. Tracer le lieu des points de fonctionnement "tension-courant" des interrupteurs K1 et K2. En déduire le type de composant qu'il faut choisir pour chaque interrupteur.
- i. Le courant  $i_{PV}$  varie fortement au cours de la journée. Pour quelle plage de valeurs de  $i_{PV}$  l'hypothèse de fonctionnement du hacheur en conduction continue est-elle vérifiée (ne pas prendre en compte les variations de  $v_{PV}$ ) ? En pratique, l'hypothèse de conduction continue est-elle justifiée ?

### Exercice 3 : Redressement triphasé

La Figure 6 représente le schéma de principe d'un redresseur triphasé non commandé, alimenté par les tensions alternatives de pulsation  $\omega$  :

$$\begin{cases} v_1(\theta) = V_{max} \sin(\theta) \\ v_2(\theta) = V_{max} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_3(\theta) = V_{max} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{avec } \theta = \omega t$$

Ce convertisseur alimente une charge fortement inductive qui se comporte comme une source de courant  $I_s$ .

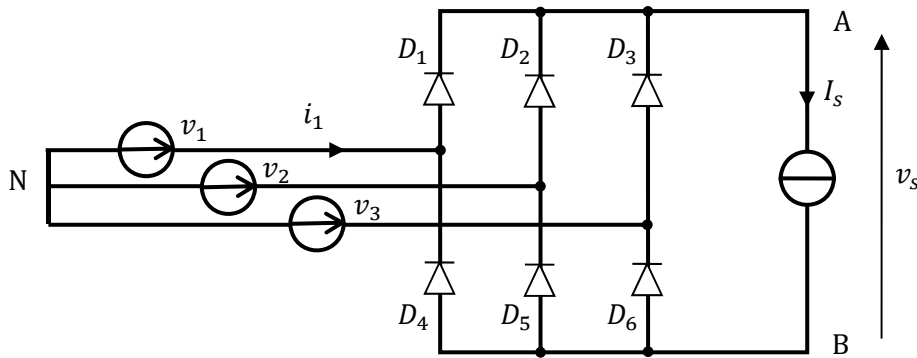


Figure 6 : Redresseur triphasé non commandé

- Combien de cellules de commutation ce redresseur comporte-t-il ?
- A quelle(s) condition(s) sur  $v_1, v_2$  et  $v_3$  chacune des diodes  $D_1, D_2$  et  $D_3$  est-elle passante ?
- A quelle(s) condition(s) sur  $v_1, v_2$  et  $v_3$  chacune des diodes  $D_4, D_5$  et  $D_6$  est-elle passante ?
- Tracer le chronogramme de  $v_A$  et  $v_B$ , les potentiels des points A et B par rapport au potentiel du neutre N (réponse sur l'annexe 1).
- On se place sur l'intervalle  $[-30^\circ, +30^\circ]$ . Donner les expressions de  $v_A$  et  $v_B$  sur cet intervalle. En déduire l'expression générale de  $v_s$ . Tracer  $v_s(\theta)$ , toujours sur l'intervalle  $[-30^\circ, +30^\circ]$ .  
Rappel :  $\sin(p) - \sin(q) = 2 \cos\left(\frac{p+q}{2}\right) \sin\left(\frac{p-q}{2}\right)$
- On se place sur l'intervalle  $[+30^\circ, +90^\circ]$ . Déterminer l'expression de  $v_s$  sur cet intervalle. Tracer  $v_s(\theta)$  sur cet intervalle.
- Compléter le chronogramme de  $v_s$  sur  $[-90^\circ, +360^\circ]$ . Préciser les intervalles de conduction des différentes diodes.
- Quelle est la période de  $v_s(\theta)$  ? Calculer  $\langle v_s \rangle$ , la valeur moyenne de  $v_s$ , puis calculer  $\tau_{v_s}$ , le taux d'ondulation défini par  $\tau_{v_s} = \frac{v_{s\max} - v_{s\min}}{\langle v_s \rangle}$ , où  $v_{s\min}$  et  $v_{s\max}$  sont respectivement la valeur minimale et la valeur maximale de  $v_s$ .
- Tracer le chronogramme de  $i_1$ , le courant dans la phase 1 (réponse sur l'annexe 1).

Annexe 1, à rendre

N° étudiant : .....

