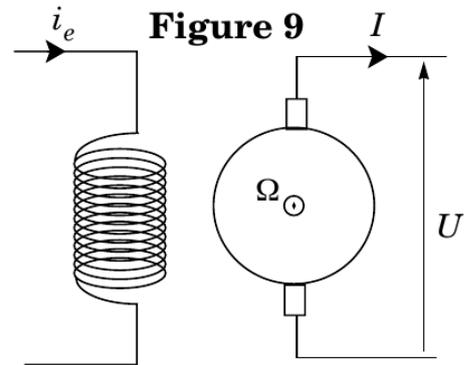


calculatrice autorisée

## ETUDE D'UN GENERATEUR ALIMENTE PAR UNE EOLIENNE

L'aéromoteur de la partie précédente entraîne maintenant une génératrice électrique destinée à alimenter une installation électrique. D'autre part, il est nécessaire de prévoir un stockage de l'énergie afin de pourvoir aux besoins de l'installation en cas de vent insuffisant. Pour les aéromoteurs de faible puissance dont la vitesse de rotation présente certaines fluctuations, on adopte le choix d'une génératrice à courant continu.



## II.A - Étude de la génératrice

La génératrice est constituée d'un stator inducteur dont l'excitation est indépendante, d'un rotor (induit) alimentant une installation (figure 9). On désigne par :

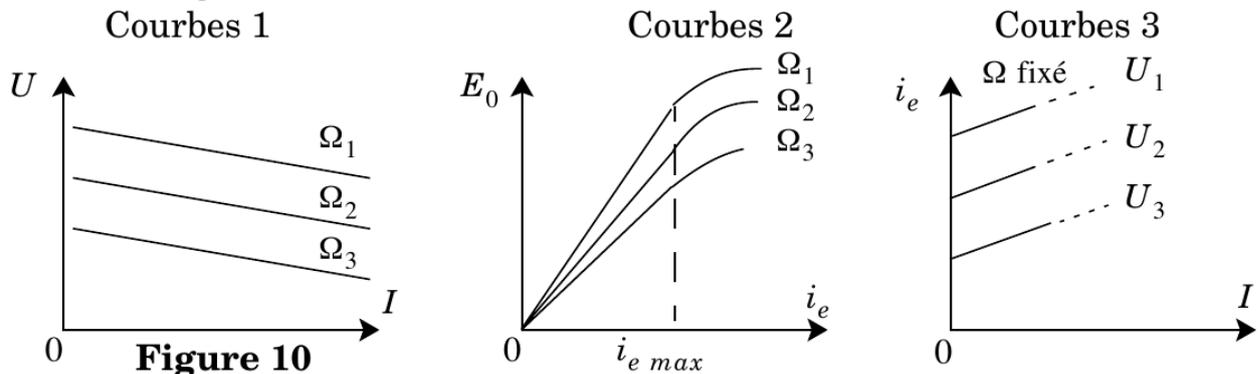
- $i_e$ , le courant d'excitation circulant dans le bobinage inducteur du stator ;
- $U$ , la tension aux bornes de l'induit ;

$I$ , le courant circulant dans l'induit ;

$\Omega$ , vitesse angulaire de rotation du rotor ;

$E_0$ , la tension à vide ( $I = 0$ ) aux bornes de l'induit.

Les caractéristiques de la machine en fonctionnement générateur sont regroupées sur la figure 10 :



- Caractéristiques 1 :  $U(I)$  à  $\Omega$  et  $i_e$  fixés (Courbes 1)
- Caractéristiques 2 :  $E_0(i_e)$  à  $\Omega$  fixé (Courbes 2)
- Caractéristiques 3 :  $i_e(I)$  à  $\Omega$  et  $U$  fixés (Courbes 3)

En outre, on rappelle que la force électromotrice à vide délivrée par l'induit s'écrit  $E_0 = \Phi\Omega$ , et si  $R$  désigne la résistance totale du bobinage induit, alors  $U = E_0 - RI$ .

II.A.1) Quelle est l'unité de  $\Phi$  ?

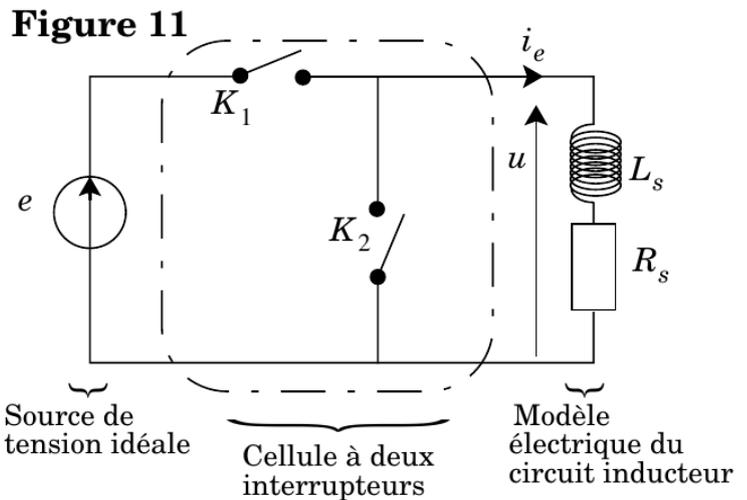
II.A.2) Tracer l'allure des variations de  $\Phi$  en fonction de  $i_e$ .

II.A.3) Quel phénomène observe-t-on lorsque  $i_e > i_{e \max}$  ?

Dans toute la suite, on se placera dans le cas où  $i_e < i_{e \max}$  et on posera  $\Phi = \beta i_e$ ,  $\beta$  étant une constante caractéristique de la machine que l'on ne cherchera pas à déterminer. Le générateur constitué par la génératrice à courant continu doit délivrer une tension  $U_0$ , constante, destinée à alimenter soit un ensemble d'accumulateurs au plomb, soit un onduleur de tension.

La tension  $U_0$  doit donc être stable.

Afin d'assurer la stabilité de la tension  $U$  lors d'une fluctuation de  $\Omega$ , on



agit sur le courant inducteur  $i_e$  par l'intermédiaire d'un montage de commande. Le bobinage du stator se présente sous la forme d'un dipôle  $R_s, L_s$ .

On insère entre la source d'alimentation et le bobinage, un convertisseur à deux interrupteurs représenté en figure 11. La source de tension idéale délivre une force électromotrice continue de valeur  $e$ .

II.A.4) Quel est le nom de ce convertisseur ?

II.A.5) Si  $T$  désigne la période de fonctionnement et  $\alpha$  le rapport cyclique ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ),  $K_1$  conduit pendant la durée  $\alpha T$  tandis que  $K_2$  est bloqué, et inversement pendant la durée  $(1-\alpha)T$ . Quelle est la nature de ces deux interrupteurs ?

II.A.6) En considérant que le régime périodique est atteint et que  $i_e$  reste strictement positive, déterminer pour  $t$  dans les intervalles  $[0, \alpha T]$  puis  $[\alpha T, T]$  les expressions de  $i_e(t)$ . En déduire les valeurs minimale  $i_m$ , maximale  $i_M$  et moyenne  $i_{moy}$  de  $i_e$  en fonction de  $e, R_s, T, \alpha$  et  $\tau = L_s/R_s$ . On effectuera ce calcul en linéarisant les solutions obtenues au premier ordre, soit en  $t/\tau$ , soit en  $(t - \alpha T)/\tau$ .

II.A.7) On définit le taux d'ondulation par le rapport  $(i_M - i_m)/i_{moy}$ .

Montrer que lorsque  $T/\tau$  est suffisamment petit devant 1, ce rapport s'écrit  $T(1-\alpha)/\tau$ .

II.A.8) Déterminer le domaine des valeurs de  $T$  assurant une ondulation inférieure à 1% pour un rapport cyclique de  $\alpha = 0,5$ .

*Application numérique* :  $\tau = 5$  ms. Justifier le choix de  $\alpha = 0,5$ .

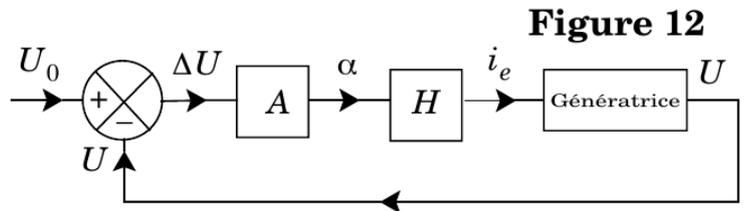
Dans toute la suite, cette condition sera réalisée, et de ce fait, l'intensité sera assimilée à sa valeur moyenne.

## II.B - Régulation de la tension de sortie de la génératrice

II.B.1) Montage régulateur à vide (la génératrice ne débite aucun courant ( $I = 0$ )).

Lorsque le rotor tourne à la vitesse  $\Omega_0$ , le courant d'excitation, égal à  $i_{e0}$ , est obtenu pour un rapport cyclique  $\alpha_0 = 0,5$ . La tension délivrée par la génératrice est alors ajustée à la valeur souhaitée  $U_0$ .

Une fluctuation de vitesse modifie le fonctionnement précédent. On note alors les grandeurs précédentes  $\Omega$ ,  $i_e$ ,  $\alpha$  et  $U$ . On réalise le montage de régulation dont l'ensemble des schémas bloc est décrit en figure 12.



Le dispositif représenté par le bloc A, non détaillé ici, délivre le rapport cyclique suivant la relation  $\alpha = k\Delta U/U_0 + \alpha_0$ ,  $k$  étant une constante de réglage sans dimension.

Le hacheur, permettant d'ajuster  $i_e$  à partir de la commande  $\alpha$ , correspond au bloc H. Le but est d'asservir  $U$  à la grandeur de consigne  $U_0$ .

a) Rappeler la relation entre  $\alpha$ ,  $e$ ,  $R_s$  et  $i_e$  imposée par H ainsi que celle entre  $U$ ,  $\Omega$  et  $i_e$  imposée par la génératrice lors d'un fonctionnement à vide.

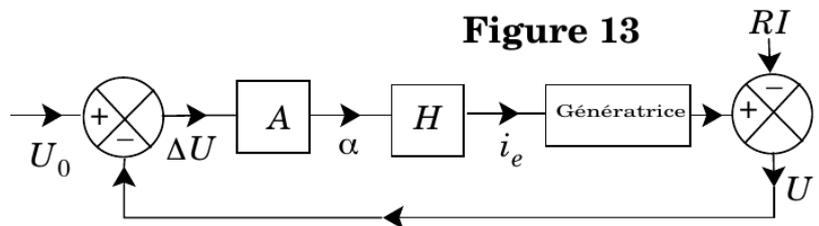
b) On suppose que  $k \gg \alpha$ . En posant  $\Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega$ , établir dans le cas où  $\Delta U/U_0 \ll 1$  la relation

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{\alpha_0}{k} \frac{\Delta\Omega}{\Omega_0}$$

c) Quelle valeur faut-il donner à  $k$  pour qu'une variation relative de 10 % en  $\Omega$  engendre une erreur relative de 0,1 % en  $U$ .

d) Proposer une modification du dispositif permettant d'annuler l'erreur.

II.B.2) Montage régulation en charge. La génératrice débite maintenant un courant  $I$  non nul et délivre une tension à ses bornes  $U = E_0 - RI$ . La chute de tension  $RI$ , envisagée comme une perturbation, modifie le schéma précédent de la façon suivante (figure 13) :



a) En conservant les notations précédentes, et en considérant que les ordres de grandeurs établis pour un fonctionnement à vide ne sont pas affectés, montrer que l'expression de  $\Delta U/U_0$  obtenue en II.B.1.b) devient

$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{\alpha_0}{k} \frac{\Delta\Omega}{\Omega_0} + \frac{\alpha_0}{k} I \frac{R}{E_0}$$

b) Soit  $I_{max}$  le courant maximal que peut débiter la machine en fonctionnement générateur. Montrer que la relation précédente peut s'écrire

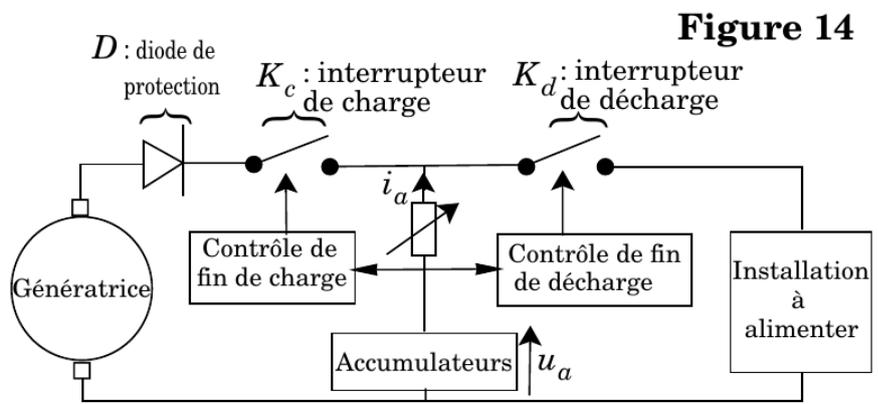
$$\frac{\Delta U}{U_0} \approx \frac{\alpha_0}{k} \frac{\Delta \Omega}{\Omega_0} + \frac{\alpha_0}{k} \frac{I}{I_{max}} .$$

*Application numérique* : pour la valeur de  $k$  trouvée à la question II.B.1c), calculer la contribution à l'erreur relative sur  $U$  du terme lié au courant  $I$  lorsque le courant atteint 80 % de sa valeur maximale. Conclure.

### II.C - Stockage électrique, accumulateurs au plomb

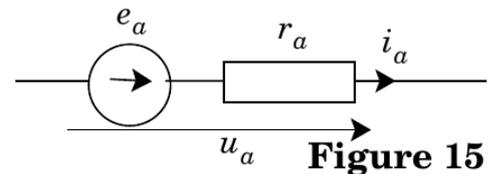
La batterie est constituée d'un ensemble de  $N$  accumulateurs au plomb mis en série.

La tension d'un élément chargé est de 2 V, et sa résistance interne de  $r = 0,05\Omega$ . La tension de chaque élément ne doit pas descendre en-dessous de 1,8 V et vaut 2 V lorsque la batterie est chargée. La charge est assurée par la génératrice à courant continu suivant le dispositif décrit en figure 14.



II.C.1) Quel est le rôle de la diode de protection ?

L'ensemble des accumulateurs a pour caractéristique de fonctionnement  $u_a = e_a - r_a i_a$  (figure 15), on remarquera qu'en phase de charge,  $i_a < 0$  et qu'en phase de décharge,  $i_a > 0$ .

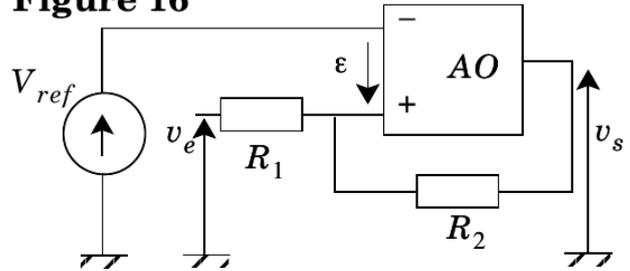


### II.D - Circuit de contrôle de fin de décharge

Lorsque l'interrupteur  $K_d$  est fermé (et donc  $K_c$  ouvert), la batterie se décharge et sa tension  $u_a$  diminue. De plus,  $u_a$  étant toujours astreinte à rester supérieure à une tension limite  $u_d$  (1,8 V par élément), le circuit de contrôle compare les deux grandeurs  $u_a$  et  $u_d$ , puis commande l'ouverture de  $K_d$  et la fermeture de  $K_c$  dès que  $u_a = u_d$ .

II.D.1) Montrer que si la batterie débite un courant de charge positif  $i_a$ , l'utilisation d'un comparateur simple engendrerait immédiatement après l'ouverture de  $K_d$  un changement de régime provoquant sa fermeture. Afin d'éviter cette oscillation de régime au voisinage du point de basculement, on utilise le comparateur à deux niveaux de la figure 16. « AO » désigne un amplificateur opérationnel dont les impédances d'entrée et de sortie sont respectivement infinie et nulle, et on désigne par  $V_{sat}$  sa tension de saturation. On prendra pour valeur numérique  $V_{sat} = 12 \text{ V}$ . On admettra que l'amplificateur opérationnel est instantanément saturé dès lors que  $\varepsilon \neq 0$  et que si  $\varepsilon > 0$  alors  $v_s = +V_{sat}$ , si  $\varepsilon < 0$  alors  $v_s = -V_{sat}$ .

Figure 16



II.D.2) Déterminer et tracer le cycle associé à la caractéristique de transfert,  $v_s$  en fonction de  $v_e$ , du montage de la figure 16 en faisant apparaître le sens de parcours.

II.D.3) On utilise ce montage pour commander l'interrupteur  $K_d$ . Le comparateur bascule de  $+V_{sat}$  à  $-V_{sat}$  lorsque  $v_e$  atteint  $u_0 = 2,3 \text{ V}$  par valeur supérieure. Quelle valeur faut-il donner au rapport  $R_1/R_2$  pour qu'après une ouverture, l'interrupteur  $K_d$  ne se referme que lorsque  $u_a$  atteint  $1,12 u_0$  par valeur inférieure ?

II.D.4) En déduire la valeur de  $V_{ref}$ .

II.D.5) La commande du circuit de charge pose-t-elle un problème analogue ? Justifier.

II.D.6) Proposer une caractéristique de transfert pour le circuit de commande de l'interrupteur  $K_c$ .

**II.E - Alimentation d'une installation électrique**

La génératrice ou bien la batterie fournit une tension  $U_0$  continue. L'installation électrique fonctionne avec une tension sinusoïdale de fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$  et de valeur efficace de 220 volts. La conversion se fait à l'aide d'un onduleur dont le schéma de principe est décrit en figure 17.

Le circuit récepteur, représentant l'installation, est de type inductif et sera modélisé dans ce qui suit par un dipôle de charge ( $R_c, L_c$ ) en série.

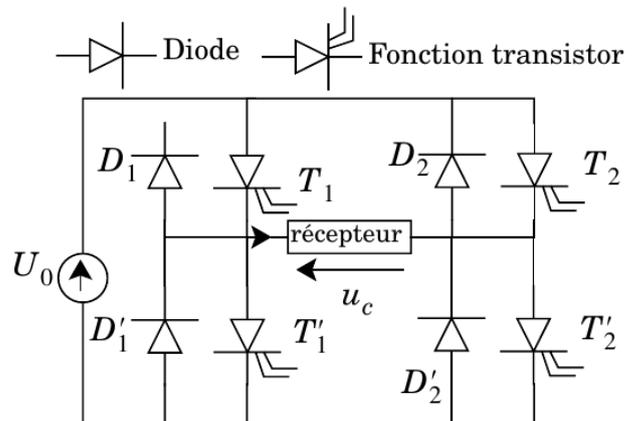
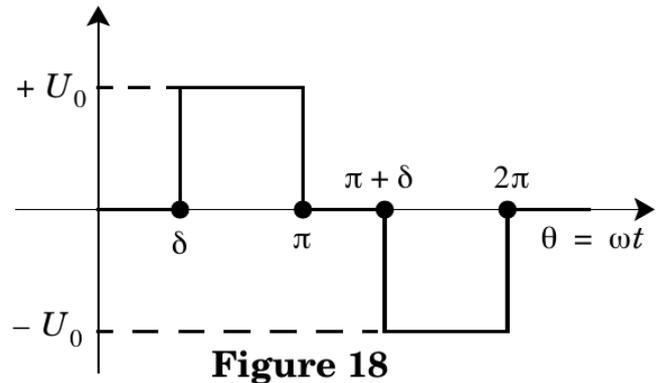


Figure 17

II.E.1) Déterminer en régime sinusoïdal à la pulsation  $\omega$ , la fonction de transfert  $i_c/u_c$  en fonction de  $R_c$ ,  $L_c$  et  $\omega$ . Quelle est la nature du filtre obtenu ?

La commande des interrupteurs est périodique, de période  $T = 2\pi/\omega$ .

La tension  $u_c$ , obtenue aux bornes du récepteur, est représentée sur la figure 18. L'angle  $\delta$  est lié à la commande des interrupteurs.



II.E.2) Définir la fonction transistor.

II.E.3) On pose  $\theta = \omega t$ . En adoptant une origine des temps adéquate, calculer les coefficients  $a_n$  du développement en série de Fourier de la tension  $u_c(\theta)$  tels que :

$$u_c(\theta) = \sum_n a_n \cos n\theta.$$

On donne

$$a_n = \int_0^{2\pi} u_c(\theta) \cos n\theta d\theta.$$

Les coefficients seront exprimés en fonction de  $U_0$ ,  $n$  et  $\delta$ .

II.E.4) On souhaite que le courant dans la charge soit sinusoïdal de fréquence  $f = 1/T = 50$  Hz.

Montrer en vous appuyant sur l'étude faite à la question II.E.1 qu'il suffit d'annuler l'harmonique de rang trois pour y parvenir avec une très bonne approximation.

II.E.5) Déterminer la valeur de  $\delta$  pour lequel  $a_3$  est nul.

II.E.6) On définit la valeur efficace de  $u_c$  suivant l'expression

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_c^2(\theta) d\theta}.$$

Calculer cette valeur.

Quelle erreur commet-on sur la valeur efficace si on utilise pour expression de  $u_c$  celle obtenue à partir de son fondamental ? Conclure.

II.E.7) Déterminer la valeur de  $U_0$  afin d'obtenir une valeur efficace de 220 V. En déduire le nombre d'accumulateurs nécessaires. On assimile pour cette question la tension à son fondamental.

II.E.8) Calculer la puissance active consommée par l'installation lorsque celle-ci est composée de dix lampes de 100 W et d'un moteur dont le facteur de puissance est égal à  $\cos\varphi_m = 0,8$  et consommant une puissance nominale de  $P_m = 3$  kW, le tout branché en parallèle. Déterminer les valeurs  $R_c$  et  $L_c$  de l'impédance équivalente de la charge.