

Calculatrices autorisées

III-Alternateur pour éolienne

On étudie la production d'énergie électrique par l'éolienne au moyen d'un générateur utilisant des aimants permanents. Il est constitué d'un stator intérieur cylindrique de diamètre D_i et de longueur L_r selon \vec{e}_z . Le rotor a un diamètre intérieur noté $D_i + 2e$, avec $e \ll D_i$ l'entrefer du dispositif et est maintenu en rotation autour de l'axe \vec{e}_z par une liaison pivot, sa position angulaire étant notée θ_r .

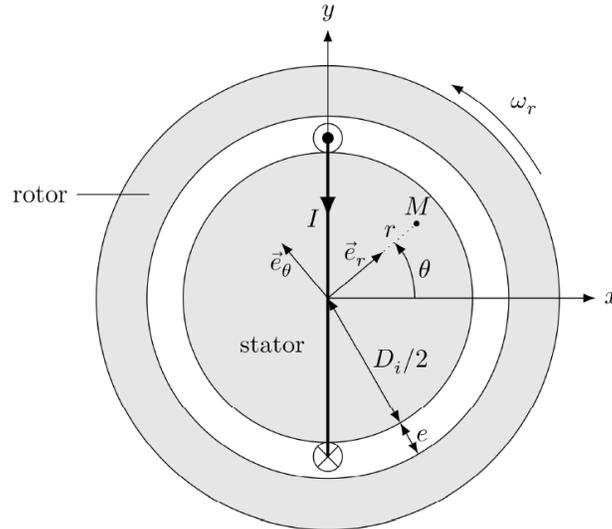


Figure 8 Rotor et stator du générateur (un courant d'intensité I parcourt l'enroulement autour du stator)

Le rotor et le stator sont constitués d'un matériau ferromagnétique doux de perméabilité magnétique relative μ_r supposée infinie.

III.A – On admet que la longueur axiale L_r est suffisamment grande pour que le champ magnétique dans l'entrefer soit indépendant de la coordonnée z . On admet également qu'il y est toujours radial, dirigé selon \vec{e}_r . On enroule autour du stator un câble parcouru par un courant électrique d'intensité $I > 0$ comme représenté sur la Figure 8. On se place dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires magnétiques. Comme l'entrefer est très fin, ($e \ll D_i$), on peut considérer que la norme du champ magnétique y est indépendante de r .

Q 17. Montrer que le champ magnétique dans l'entrefer a pour intensité :

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2e} \quad (\text{III.1})$$

et préciser son sens en fonction de l'angle θ .

Q 18. On enroule autour du stator une deuxième spire parcourue par le même courant I , dans un plan de vecteur normal orienté selon \vec{e}_y . Tracer la courbe représentative du champ magnétique total $B(\theta) = \vec{B} \cdot \vec{e}_r$ dans l'entrefer en fonction de θ .

On enroule maintenant un grand nombre de spires dans différents plans et on admet qu'une répartition adéquate permet d'obtenir un champ magnétique statorique dans l'entrefer qui varie sinusoidalement avec l'angle θ selon

$$\vec{B}_s(I) = B_0(I) \cos(\theta) \vec{e}_r \quad \text{avec} \quad B_0(I) = \frac{N \mu_0 I}{2e} \quad (\text{III.2})$$

où N est le nombre effectif de tours de l'enroulement.

Cette expression sera valable dans toute la suite.

Q 19. Dans cette question uniquement, l'enroulement statorique fournit une puissance électrique constante de 5,0 kW sous une tension de 230 V et on a $N = 21$. Calculer la valeur de l'intensité du courant I et en déduire l'intensité maximale du champ magnétique dans l'entrefer pour $e = 2$ mm.

III.B – On utilise désormais deux enroulements statoriques similaires mais produisant chacun un maximum de leur champ magnétique dans une direction différente. Ces enroulements sont respectivement parcourus par des courants d'intensité I_1 et I_2 et créent des champs magnétiques respectifs \vec{B}_{s1} et \vec{B}_{s2} donnés par

$$\vec{B}_{s1}(I_1) = B_0(I_1) \cos(\theta) \vec{e}_r \quad \vec{B}_{s2}(I_2) = B_0(I_2) \cos(\theta - \pi/2) \vec{e}_r$$

où B_0 est défini dans l'expression (III.2). Les courants I_1 et I_2 ont même amplitude I_s et varient sinusoidalement à la pulsation ω_s : $I_1 = I_s \cos(\omega_s t)$, $I_2 = I_s \cos(\omega_s t - \phi_2)$.

Q 20. Comment peut-on réaliser l'enroulement créant le champ \vec{B}_{s2} si l'on connaît celui qui crée le champ \vec{B}_{s1} ?

Q 21. Déterminer la valeur de ϕ_2 permettant de réaliser un champ dit « tournant » tel que :

$$\vec{B}_s = B_t \cos(\theta - \omega_s t) \vec{e}_r$$

et préciser l'expression de B_t en fonction, entre autres, de I_s .

On note $\phi_s = \omega_s t$ la direction dans laquelle pointe le maximum du champ magnétique tournant.

III.C – Le rotor produit, au moyen d'aimants permanents, un champ magnétique dans l'entrefer qu'on considérera lui aussi radial, uniforme sur l'épaisseur de l'entrefer, variant sinusoidalement avec la position, et solidaire du rotor. On note \vec{B}_r son expression

$$\vec{B}_r = B_r \cos(\theta - \phi_r) \vec{e}_r,$$

avec B_r une constante positive et ϕ_r l'angle dont a tourné le rotor.

Le courant dans les enroulements statoriques est désormais induit par le mouvement du rotor. On rappelle que ϕ_r (resp. ϕ_s) désigne la direction dans laquelle la composante radiale du champ magnétique du rotor (resp. du champ magnétique tournant statorique) est maximale.

Q 22. Déterminer l'expression de l'énergie magnétique totale dans l'entrefer, notée \mathcal{E}_{mag} , en fonction, entre autres, de B_r , ϕ_s , ϕ_r et de I_s .

Q 23. En déduire l'expression du couple exercé sur le rotor, donné par $\Gamma = \frac{d\mathcal{E}_{\text{mag}}}{d\phi_r}$.

On suppose dans toute la suite qu'un régime sinusoïdal est établi dans lequel le rotor tourne à la pulsation ω_r constante et l'intensité du courant statorique oscille à la même pulsation $\omega_s = \omega_r$ avec une amplitude I_s . On note $\delta = \phi_r - \phi_s = \text{cste}$ qu'on suppose positif.

Q 24. Calculer la valeur maximale possible de la valeur absolue du couple pour $I_s = 22$ A et $B_r = 1,2$ T.

III.D – On peut modéliser chacun des enroulements statoriques par le même circuit électrique, représenté sur la figure 9. La résistance R et l'autoinductance L sont celles de l'enroulement statorique, la force électromotrice E est celle produite par le mouvement du rotor. La résistance R_u représente celle du dipôle alimenté par le générateur. On prendra $R = 1 \Omega$ et $L = 20$ mH.

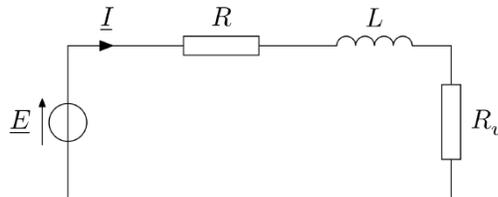


Figure 9 Schéma électrique d'un enroulement statorique

On donne les expressions des forces électromotrices instantanées des enroulements parcourus par les courants I_1 et I_2 définis au III.B, qu'on note respectivement E_1 et E_2 ,

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \omega_r \sin(\phi_r) \\ E_2 = -\frac{\pi N D_i L_r B_r}{4} \omega_r \cos(\phi_r) \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

- Q 25.** Justifier qualitativement les expressions précédentes.
- Q 26.** Déterminer, en notation complexe, les expressions des amplitudes complexes des intensités I_1 et I_2 .
- Q 27.** En déduire l'expression du champ magnétique statorique puis celle du couple exercé sur le rotor.
- Q 28.** Calculer la valeur du couple mécanique exercé par l'écoulement de l'air sur l'éolienne pour fournir une puissance moyenne de 5 kW à la charge de résistance R_u sous une tension efficace de 230 V à la fréquence de 50 Hz.

L'utilisation d'un grand nombre d'aimants régulièrement répartis sur le rotor crée désormais un champ magnétique

$$\vec{B}_r = B_r \cos(p\theta - \phi_r) \vec{e}_r.$$

- Q 29.** Déterminer la valeur de la pulsation ω_r de rotation du rotor pour laquelle la fréquence fondamentale du courant électrique produit en régime sinusoïdal établi est 50 Hz pour $p = 12$.

IV Aimants des rotors

Les aimants des rotors des éoliennes sont majoritairement des aimants au néodyme, c'est-à-dire des aimants permanents composés d'un alliage de néodyme, de fer et de bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$).

IV.A – Extraction du néodyme

Les terres rares, notamment le néodyme, ont des propriétés magnétiques exceptionnelles leur permettant, en alliage avec d'autres métaux, la miniaturisation d'aimants très performants, utilisés notamment dans les éoliennes, la téléphonie ou encore l'électroménager.

À l'état naturel, les terres rares ne sont jamais présentes sous forme métallique mais sous forme d'oxyde dans des composés minéraux.

Le néodyme est extrait d'un minerai appelé la monazite. Ce minerai contient des terres rares comme le lanthane (La), le cérium (Ce), le néodyme (Nd) ou le praséodyme (Pr) sous forme d'oxyde. La monazite extraite de la mine de Mount Weld en Australie contient entre 60 et 70 % (en masse) d'oxydes de terre rare. Le tableau 2 fournit la proportion de chaque oxyde parmi l'ensemble des oxydes de terre rare contenus dans ce minerai.

La_2O_3	CeO_3	Pr_6O_{11}	Nd_2O_3	Sm_2O_3	Eu_2O_3	Gd_2O_3	Tb_4O_7
26 %	51 %	4 %	15 %	1,8 %	0,4 %	1,0 %	0,1 %
Dy_2O_3	Ho_2O_3	Er_2O_3	Tm_2O_3	Yb_2O_3	Lu_2O_3	Y_2O_3	Total
0,2 %	0,1 %	0,2 %	< 0,1 %	0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %	60 – 70 %

Tableau 2 Composition massique des oxydes de terre rare contenus dans la monazite en provenance de la mine de Mount Weld (d'après *Techniques de l'ingénieur J6630v2*)

- Q 30.** Quelle masse de néodyme est contenue dans une tonne de monazite provenant de la mine australienne de Mount Weld ?

IV.B – Corrosion des aimants

La présence du fer dans les aimants au néodyme les rend sujet à la corrosion. La corrosion atmosphérique des métaux est similaire à la corrosion humide. Elle résulte de l'action du dioxygène de l'air, et éventuellement de l'eau (condensation de l'humidité, pluie, projections) sur les métaux. Dans le cas du fer, il peut y avoir formation d'oxydes de fer (rouille) ou encore de cations fer (II) ou fer (III).

Le diagramme potentiel-pH de la figure B du document réponse représente le diagramme du fer superposé à celui de l'eau.

L'étude suivante se place systématiquement en milieu aqueux acidifié, pour une concentration des espèces solubles $C = 1 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$; les pressions partielles des espèces gazeuses sont prises égales à $P^\circ = 1 \text{ bar}$. L'aimant est assimilé en première approximation à du fer solide.

Q 31. Donner le nombre d'oxydation du fer et de ses dérivées. Préciser sur la figure B du document réponse, les domaines de corrosion, de passivation et d'immunité à la corrosion du fer.

Q 32. Le fer solide est susceptible de réagir avec l'eau ou le dioxygène dissous dans l'eau. Écrire les équations bilan de ces deux réactions en milieu acide, en choisissant un coefficient stoechiométrique égal à 1 pour Fe(s). Calculer les constantes d'équilibre K° correspondantes et commenter.

La corrosion est particulièrement active dans les zones qui présentent une hétérogénéité de surface (rayure, contrainte, défaut), une hétérogénéité de composition (alliages, impuretés, soudures), ou encore une hétérogénéité de la concentration du milieu. Une quelconque de ces hétérogénéités provoque ce qu'on appelle une corrosion différentielle : l'oxydation et la réduction se produisent en deux zones différentes, le métal assurant la circulation des électrons.

La corrosion est étudiée au niveau d'une goutte d'eau oxygénée sur le métal (figure C du document réponse). Les couples mis en jeu dans la corrosion du fer sont : Fe^{2+}/Fe et O_2/OH^- (correspondant au couple $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ en milieu basique).

Q 33. Écrire les demi-équations électroniques correspondant à ces deux couples en considérant le dioxygène dissous en milieu aqueux. En déduire l'équation bilan liée au phénomène de corrosion du fer. Sur le schéma de la figure C, repérer la zone correspondant à la réduction et celle correspondant à l'oxydation. Identifier alors l'anode et la cathode et indiquer sur le schéma le déplacement des électrons dans le métal et le déplacement des ions dans l'eau.

L'association de l'anode et de la cathode constitue une micropile en court-circuit. Le déplacement des ions dans l'eau vient fermer le circuit électrique.

Données : pH de l'eau atmosphérique : 7,0. Surtension cathodique du dioxygène sur une électrode de fer : $\eta_C(\text{O}_2) = -0,5 \text{ V}$, $[\text{Fe}^{2+}] = 1 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Il n'y a pas de surtension pour le couple Fe^{2+}/Fe sur une électrode de fer.

Q 34. En supposant que l'allure des courbes est symétrique, proposer des courbes intensité-potential $i = f(E)$ permettant d'interpréter ce phénomène de corrosion. Estimer le potentiel mixte E_c , appelé potentiel de corrosion, de cette micro-pile.

Q 35. Sachant que plus la résistance interne du système électrochimique est grande et plus les pentes des courbes $i = f(E)$ sont faibles, comparer la cinétique de la corrosion des aimants d'une éolienne marine et d'une éolienne terrestre.

IV.C – Protection des aimants

Le dépôt industriel de nickel métallique sur les aimants par électrolyse est très utilisé industriellement. Ce procédé consiste à immerger l'aimant, constitué principalement de fer, dans une solution de sulfate de nickel, la pièce en fer étant placée à la cathode. Pour éviter le dépôt d'hydroxyde de nickel, la solution est acidifiée. L'anode est constituée d'un métal inerte.

On réalise le nickelage d'un aimant de rotor de surface totale S_r sous un courant I pour un potentiel de cathode E_C . L'opération a lieu pendant une durée Δt de façon à ce que le nickel recouvre uniformément l'aimant sur une épaisseur h . Le bain permet de maintenir une concentration en nickel à C_0 , à pH fixé.

Données : $E_C = -0,50 \text{ V}$, $S_r = 6,3 \text{ dm}^2$, $I = 4,0 \text{ A}$, $h = 50 \text{ }\mu\text{m}$, $C_0 = 1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH = 4,5.

Q 36. Quelle est la durée Δt de cette opération de nickelage ?

En réalité, tout le courant ne sert pas à produire du nickel solide.

La surtension η_{Ni} (en V) au niveau de la cathode est liée à la densité de courant j_{Ni} (en $\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}$) par la relation

$$\eta_{\text{Ni}} = -0,15 \log(|j_{\text{Ni}}|) - 0,30.$$

Q 37. Calculer l'épaisseur de nickel réellement déposée à la surface de l'aimant. Quelle autre demi-réaction a pu se produire en parallèle de la réduction de Ni^{2+} conduisant à la baisse du rendement ?

Q 38. Si la couche de nickel présentait une fissure, tel que le fer se retrouvait en contact avec l'eau, le fer serait-il encore protégé ? À l'aide de courbes $i = f(E)$, comparer avec la protection par une couche de zinc.

Données numériques

Masse volumique de l'air	$\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Viscosité dynamique de l'air	$\eta = 1,8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Masse volumique du nickel	$\rho_{\text{Ni}} = 8,9 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Constante de Faraday	$\mathcal{F} = 9,65 \times 10^4 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$
Produit ionique de l'eau à 298 K	$K_e = 10^{-14}$
Constante de Nernst à 298 K	$\frac{RT}{\mathcal{F}} \ln(10) = 0,06 \text{ V}$
1 tonne équivalent pétrole	1 tep = 42 GJ
Surface de la France métropolitaine	$S_F = 550\,000 \text{ km}^2$
Préfixe du système international d'unité	T (téra) = 10^{12}

Caractéristiques de l'éolienne Darrieus H

Rayon	$R = 4,0 \text{ m}$
Corde	$\ell = 0,45 \text{ m}$
Hauteur des pales	$L = 8,0 \text{ m}$
Nombre de pales	$N = 3$

Caractéristiques du générateur

Diamètre	$D_i = 530 \text{ mm}$
Entrefer	$e = 2 \text{ mm}$
Longueur axiale	$L_r = 300 \text{ mm}$

Potentiers standard à 298 K

	Zn^{2+}/Zn	Fe^{2+}/Fe	Ni^{2+}/Ni	H^+/H_2	$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	$\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$
$E^\circ \text{ (V)}$	-0,76	-0,44	-0,25	0,00	0,77	1,23

Extrait du tableau périodique des éléments

Numéro atomique	1	6	8	28	60
Symbole	H	C	O	Ni	Nd
Masse molaire atomique ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	1,01	12,0	16,0	58,7	144,2

Formules trigonométriques

$$\begin{aligned} \cos a + \cos b &= 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) & \cos a - \cos b &= -2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \\ \sin a + \sin b &= 2 \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) & \sin a - \sin b &= 2 \cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \sin\left(\frac{a-b}{2}\right) \end{aligned}$$

Document réponse, à rendre avec votre copie

Nom :

Prénom :

Question 31

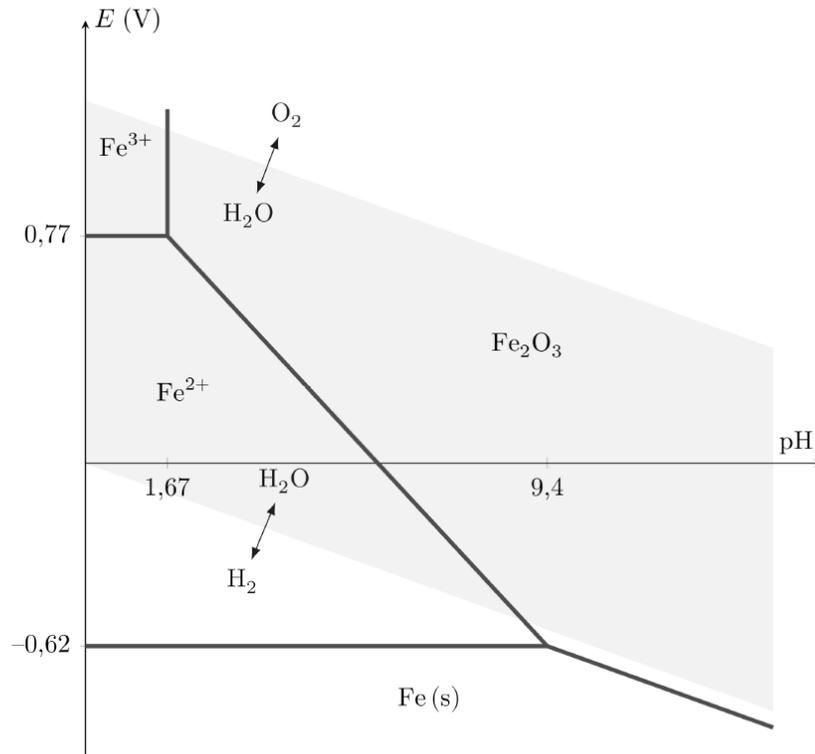


Figure B Diagramme E-pH du fer à la concentration $C = 1 \times 10^{-6} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$

Question 33 **Figure C**