Partie C - Le générateur électrique

I - Paramètres de l'alternateur

Q25) Le circuit électrique du rotor est parcouru par un courant continu, qui créé un champ magnétique permanent. La rotation du rotor entraîne une variation du flux du champ créé par le rotor à travers les bobinages statoriques, d'où une force électromotrice sinusoïdale et en circuit fermé des courants statoriques sinusoïdaux.

Le rotor et le stator sont deux cylindres coaxiaux séparés par un entrefer. Le circuit rotorique est bobiné sur le rotor sous forme de spires dont les parties utiles sont des paires de conducteurs (aller-retour) parallèles à l'axe commun au rotor et au stator. Deux circuits (phases) sont bobinés sur le stator, avec chacun une géométrie analogue à celle du bobinage rotorique. Les deux phases sont décalées d'une par rapport à l'autre d'un quart de tour.

Q26) Chacune des phases délivre une puissance moyenne $UI\cos\varphi$ où U, I et φ et $\cos\varphi$ sont la tension et l'intensité efficace traversant la phase, ϕ le déphasage entre courant et tension et $\cos\varphi$ le facteur de puissance.. Comme l'alternateur possède deux phases identiques, si celles-ci sont connectées à des charges identiques la puissance totale vaut

$$P = 2UI\cos\varphi$$

En fonctionnement nominal, $P_n = 240\,\text{MW}$, $I_n = 11{,}1\,\text{kA}$, $\cos\varphi_n = 0,85$, d'où

$$U_n = \frac{P_n}{2I_n\cos\varphi_n} = \frac{240\times 10^6}{2\times 11{,}1\times 10^3\times 0,85} = 12{,}7\,\text{kV}$$

Q27) Un matériau ferromagnétique idéal est caractérisé par une perméabilité magnétique infinie, de sorte que l'excitation magnétique soit nulle en tout point du matériau. Un circuit magnétique réalisé dans un ferromagnétique idéal canalise parfaitement les lignes de champ magnétique. À l'interface entre le matériau et un milieu non magnétique (air par exemple, dans le cas d'un entrefer) les lignes de champ côté matériau non magnétique sont orthogonales à l'interface.

La densité d'énergie magnétique dans un matériau ferromagnétique idéal est nulle, de même que l'énergie magnétique qu'il contient. Dans un circuit magnétique avec entrefer, l'énergie magnétique est localisée dans l'entrefer.

L'entrefer de l'alternateur est un cylindre délimité par le rotor et le stator, donc les lignes de champ dans l'entrefer sont radiales : $\vec{B}(M) = B(M)\vec{e}_r$ si M est un point de l'entrefer.

Dans une machine synchrone dipolaire, le champ magnétique rotorique, de période spatiale 2π tourne à la vitesse angulaire Ω, ce qui génère un flux de pulsation Ω, donc d'après la loi de Faraday une force électromotrice de même pulsation, dans chacun des bobinages du stator, d'où la condition de synchronisme $\Omega = \omega$ pour l'alternateur dipolaire diphasé.

$$\Omega_n = 2\pi f_n = 3{,}1\times 10^2\,\text{rads}^{-1} = 50\,\text{trs}^{-1} = 3000\,\text{trmin}^{-1}$$

Q28) En tenant compte des orientations données par le schéma ($\underline{E}$ en convention générateur, $\underline{U}$ en convention alternateur, associées au fonctionnement alternateur) la loi des mailles appliquée à une phase s'écrit

$$\underline{E} = (R+jX)\underline{I} + \underline{U} = \underline{U} + R\underline{I} + jX\underline{I}$$

Q29) L'équation électrique lors de l'essai à vide (circuit ouvert, $\underline{I} = 0$) se réduit à $\underline{E} = \underline{U}$. La courbe établie lors de l'essai à vide indique une relation linéaire : $\dfrac{U}{U_n} = A\dfrac{I_e}{I_{en}}$ où $A = 1,0$. soit la relation

$$E = U_{\text{vide}} = \frac{U_n}{I_{en}} I_e = kI_e$$

L'énoncé donne $I_{en} = 498\,\text{A}$, et $U_n = 12{,}7\,\text{kV}$ d'après Q26, d'où

$$E = kI_e \ ; \ k = \frac{U_n}{I_{en}} = \frac{12{,}7 \times 10^3}{498} = 25{,}5\,\Omega$$

En court-circuit, $\underline{U} = 0$, et l'équation électrique devient $(R+jX)\underline{I}_{cc} = \underline{E}$. On passe aux valeurs efficaces en écrivant la relation en termes de modules (les valeurs efficaces sont égales aux modules au facteur $\sqrt{2}$ près) :

$$\sqrt{R^2 + X^2} I_{cc} = E = kI_e$$

puis on exprime les rapports aux grandeurs nominales

$$\frac{I_{cc}}{I_n} = \frac{k}{\sqrt{R^2 + X^2}} \frac{I_{en}}{I_n} \frac{I_e}{I_{en}}$$

La courbe résultant de l'essai en court-circuit confirme une dépendance linéaire avec un facteur de proportionnalité déduit de la courbe égal à $0,5$. Par conséquent

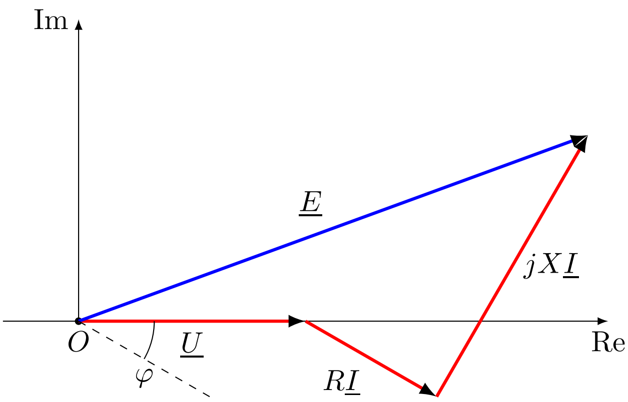
$$\frac{k}{\sqrt{R^2 + X^2}} \frac{I_{en}}{I_n} = \frac{1}{2,0} \ ; \ X = \sqrt{\left(2,0k\frac{I_{en}}{I_n}\right)^2 - R^2}$$

$k = 25{,}5\,\Omega$, $I_{en} = 498\,\text{A}$, $I_n = 11{,}1\,\text{kA}$, $R = 0{,}9\,\Omega$, d'où

$$X = \sqrt{\left(\frac{2 \times 25,5 \times 498}{11{,}1 \times 10^4}\right)^2 - 0,9^2} = 2{,}1\,\Omega$$

Les valeurs de X et R sont comparables : il n'est a priori pas possible de négliger l'une devant l'autre.

Q30) On reprend la loi des mailles $\underline{E} = R\underline{I} + jX\underline{I} + \underline{U}$, qui conduit au diagramme de Fresnel suivant si le courant est en retard sur $\underline{U}$



Par projection sur les axes réel et imaginaire ($-\pi/2 < \varphi < 0$) :

$$Re(\underline{E}) = U + RI\cos\varphi - XI\sin\varphi \ ; \ Im(\underline{E}) = RI\sin\varphi + XI\cos\varphi$$

d'où

$$E^2 = (U_n + RI_n\cos\varphi - XI_n\sin\varphi)^2 + (RI_n\sin\varphi + XI_n\cos\varphi)^2$$

et

$$E = \sqrt{(U_n + RI_n\cos\varphi_n - XI_n\sin\varphi_n)^2 + (RI_n\sin\varphi_n + XI_n\cos\varphi_n)^2}$$

Pour le facteur de puissance nominal $\cos\varphi_n = 0,85$, avec $-\pi < \varphi_n < 0$ (courant en retard), $\sin\varphi_n = -\sqrt{1-\cos^2\varphi_n} = -0,53$. $U_n = 12{,}7\,\mathrm{kV}$, $I_n = 11{,}1\,\mathrm{kA}$, $R = 0{,}9\,\Omega$, $X = 2{,}1\,\Omega$, d'où

$$E = 36{,}6\,\mathrm{kV} \ ; \ I_e = \frac{E}{k} = 1{,}43\,\mathrm{kA}$$

En fonctionnement nominal, l'alternateur débite une intensité I_n non nulle, donc il existe une chute de tension associée à la résistance et à l'inductance propre du bobinage statorique : $E > U_n$.

II - Raccordement au réseau - compensateur synchrone

Q31) La tension U_n et la fréquence f sont imposées par le réseau. La puissance mécanique $\Gamma\Omega$ est constante car $\Omega = 2\pi f$ imposé par la condition de synchronisme est constant en fonctionnement stationnaire et le couple fourni par les turbine est supposé constant, donc en négligeant les pertes, la puissance électrique est imposée par la puissance mécanique et reste constante.

La puissance mécanique vaut $U_n I\cos\varphi$. La longueur du segment $O'A$ du diagramme de Fresnel vaut

$$O'A = X|\underline{I}|\cos\varphi = \sqrt{2}XI\cos\varphi = \frac{\sqrt{2}X}{U_n}U_n I\cos\varphi = \frac{\sqrt{2}X}{U_n}\frac{P}{2} = \frac{X}{\sqrt{2}U_n}P$$

Comme U_n est imposé par le réseau et X est fixé, $O'A$ est proportionnel à P, avec une constante de proportionnalité égale à

$$\frac{X}{\sqrt{2}U_n}$$

Puisque la puissance électrique est constante, le segment $O'A$ est fixé indépendamment de la charge. Comme A est la projection orthogonale de M sur l'axe vertical passant par O', les points de fonctionnement M sont situés sur la droite horizontale passant par A.

Le déplacement du point de fonctionnement correspond à une modification de la force électromotrice $E = kI_e$, donc on peut déplacer le point de fonctionnement en modifiant le courant d'excitation I_e.

Q32) Le point M' symétrique de M par rapport à la verticale passant par O' est caractérisé par une même puissance et une même intensité statorique.

Par construction $\varphi' = -\varphi$

La relation de la question Q30 reste valide avec $R = 0$, et en tenant compte du changement d'orientation de ϕ qui désigne le retard du courant sur la tension :

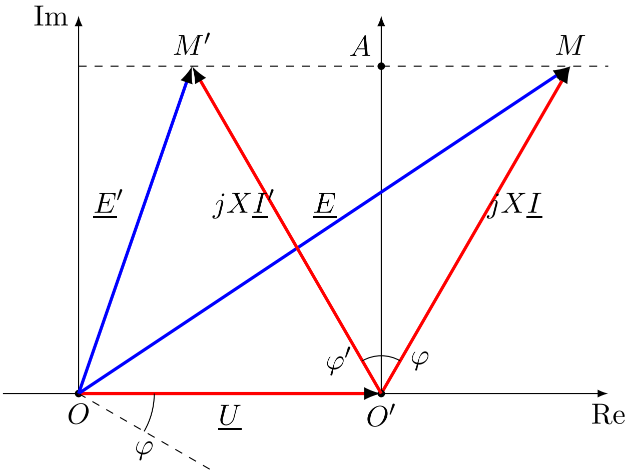
$$E^2 = (U_n + XI\sin\varphi)^2 + (XI\cos\varphi)^2 = U_n^2 + 2XI\sin\varphi + (XI)^2$$

L'énoncé ne précise pas quel point M doit être considéré pour le calcul. On suppose dans la suite que le point M correspond au fonctionnement nominal, et que la résistance R est négligeable, bien que ce ne soit pas le cas (je ne vois pas ce qu'il est possible de calculer sinon)

Comme R n'est pas négligeable, on ne peut pas utiliser la valeur de E calculée précédemment en fonctionnement nominal. On reprend les valeurs données $I_n = 11{,}1\,\text{kA}$, $\cos\varphi_n = 0,85$ et calculées $U_n = 12{,}7\,\text{kV}$, $X = 2{,}1\,\Omega$ et $\sin\varphi = 0,53$, pour calculer

$$E = 32\,\text{kV},\ I_e = 1{,}25\,\text{kA} \quad ; \quad E' = 20\,\text{kV},\ I'_e = 0{,}78\,\text{kA}$$

On constate que la valeur de E ne correspond pas exactement à la valeur calculée précédemment, ce qui confirme l'influence non négligeable de R.



Remarque : On peut écrire en sommant les expressions de E et E', avec $\varphi' = -\varphi$

$$E^2 + E'^2 = 2(U_n^2 + (XI)^2)$$

Q33) On trace les intersections de l'horizontale associée au courant de phase nominal : $I/I_n = 1$ avec la courbe de Mordey associée à la puissance nominale $P = P_n$. On lit les courants d'excitation réduits correspondants : $I_e/I_{en} = 2,2$ et $I_e/I_{en} = 3,0$, d'où, comme $I_{en} = 498\,\text{A}$ les valeurs des courants d'excitation et des forces électromotrices

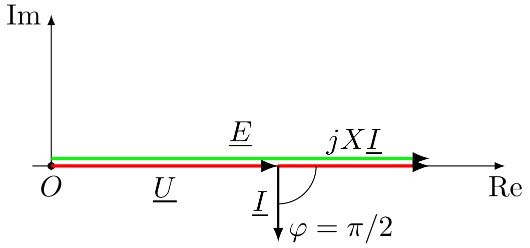
$$I_e = 1{,}1\,\text{kA},\ E = 28\,\text{kV} \quad ; \quad I_e = 1{,}5\,\text{kA},\ E = 38\,\text{kV}$$

On ne retrouve pas les valeurs précédentes (voir ci-dessous). Comme indiqué précédemment $\varphi' = -\varphi$ (ou j'ai raté un point ?)

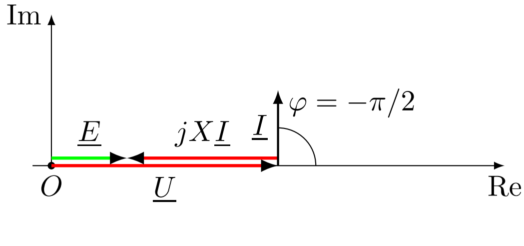
Remarque : En traçant les courbes de Mordey grâce à un script Python, on constate que les courbes de l'énoncé tiennent compte de la valeur de R, contrairement au calcul effectué à la question précédente. Ces deux questions sont à mon sens très mal posées.

Q34) Si l'alternateur tourne à vide, la puissance mécanique échangée est nulle : $P = 0$, donc $A = O'$. On en déduit $\varphi = \pi/2$ et $\varphi' = -\pi/2$. Dans ce cas

$$E = U_n + XI = U_n + XI = U_n + \frac{XI_n}{10} = 15{,}2\,\text{kV}\ ;\ E' = U_n - XI = U_n - \frac{XI_n}{10} = 10{,}1\,\text{kV}$$



$\varphi = \pi/2$



$\varphi = -\pi/2$

Le moteur se comporte comme un condensateur ($\underline{Z}_C = 1/(jC\omega)$, soit un courant en avance de phase de $\pi/2$ sur la tension) si $\varphi = -\pi/2$ (φ correspond au retard de phase du courant), donc si $E = 10{,}1\,\mathrm{kV}$.

L'interêt de ce fonctionnement en condensateur est de permettre de relever le facteur de puissance d'un réseau électrique, la plupart des consommations électriques étant de type inductif (moteurs électriques).