

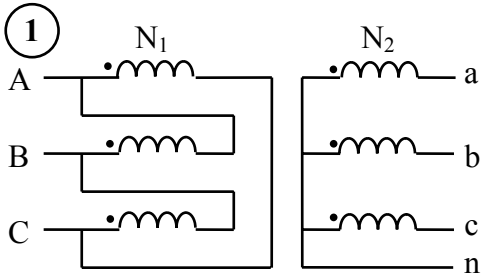
EXERCICES SUR LE TRANSFORMATEUR TRIPHASE ET SUR LES MACHINES TOURNANTES  
A COURANT ALTERNATIF

*Presser la touche F5 pour faire apparaître les signets  
qui favorisent la navigation dans le document.*

Sommaire

Exercices sur le transformateur triphasé.....	1
Exercices sur la machine asynchrone .....	3
Exercices sur la machine synchrone .....	8

## Exercices sur le transformateur triphasé



Un transformateur de puissance apparente  $S_n = 1000 \text{ kVA}$  et de tension à vide  $U_{20} = 410 \text{ V}$  est couplé comme indiqué ci-dessous. Dans tout ce qui suit, son primaire est alimenté sous  $3 \times 20 \text{ kV} - 50 \text{ Hz}$ .

- 1) Déterminer son indice horaire, son rapport de transformation  $m$  ainsi que son rapport des nombres de spires  $N_2/N_1$ .
- 2) Calculer son courant assigné au secondaire  $I_{2n}$ .

3) L'essai en court-circuit a été effectué par la méthode du double wattmètre. On note  $P_{AC}$  et  $P_{BC}$  les mesures correspondantes. Sachant que, pour  $I_2 = I_{2n}$ , on a relevé  $P_{AC} = 22 \text{ kW}$  et  $P_{BC} = -11 \text{ kW}$ , calculer  $R_s$ ,  $\tan(\varphi_C)$  et  $X_s$ .

4) Pour un débit de  $1400 \text{ A}$  sur une charge capacitive équilibrée de facteur de puissance  $0,8$ , calculer  $\Delta V_2$ ,  $U_2$  et le rendement  $\eta$  sachant que les pertes à vide valent  $2,3 \text{ kW}$ .

5) On place au secondaire une charge triphasée équilibrée couplée en étoile, d'impédance par phase  $Z = [0,17; 30^\circ]$ . Calculer  $I_2$  et  $U_2$ .

6) Le transformateur, supposé parfait ici, débite  $1400 \text{ A}$  dans un résistor placé entre la phase  $a$  et le neutre  $n$ . Calculer les courants en ligne au primaire et les valeurs  $P_{AC}$  et  $P_{BC}$  que l'on mesurerait par la méthode du double Wattmètre.

② Un transformateur triphasé  $T$ , de tension secondaire à vide  $U_{20} = 420 \text{ V}$  et d'impédance de court-circuit  $Z_s = 0,26 + j0,57$  est placé en parallèle sur un transformateur  $T'$ , de mêmes caractéristiques mais d'impédance de court-circuit  $Z'_s = 0,26 + j0,7$ .

1) Pour  $I_2$  (courant au secondaire de  $T$ ) égal à  $30 \text{ A}$ , calculer le courant  $I'_2$  fourni par  $T'$ , le courant total débité  $I_{2t}$ , la tension entre phases  $U_2$  et les puissances actives et réactives fournies par chaque transformateur si la charge est purement résistive.

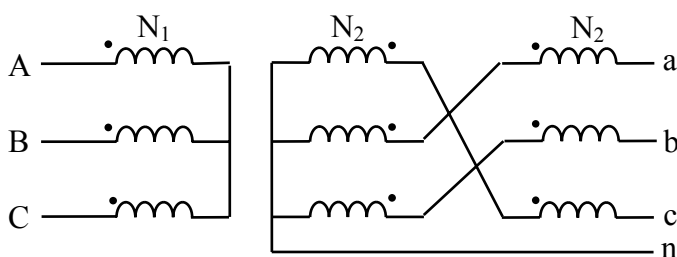
2) L'ensemble débite dans une charge constituée par trois éléments d'impédance  $Z = [15; 60^\circ]$  couplés en triangle.

a) Déterminer l'impédance  $Z_t$  équivalente à la mise en parallèle de  $Z_s$  et de  $Z'_s$ .

b) Remplacer le couplage triangle de la charge par un couplage étoile de trois impédances  $Z_e$  dont on précisera la valeur.

c) En utilisant ce qui précède, calculer  $I_{2t}$ ,  $U_2$ ,  $I_2$  et  $I'_2$ .

③ Un transformateur triphasé est supposé parfait (courant à vide et impédance interne négligeables). Sur chaque noyau, le secondaire est formé de deux demi-enroulements de  $N_2$  spires chacun. Le primaire est alimenté par un réseau équilibré direct de tension entre phases constante et égale à  $5500 \text{ V}$ .



1) Le transformateur est monté en étoile zig-zag comme indiqué ci-contre.

a) Déterminer son indice horaire.

b) Exprimer le rapport des nombres de spires  $N_2/N_1$  en fonction du rapport de transformation  $m$ .

A.N.:  $U_{20} = 400 \text{ V}$ , calculer  $N_2/N_1$ .

c) Un résistor qui absorbe  $50 \text{ A}$  est branché entre la phase  $a$  et le neutre secondaire. Calculer l'intensité des courants en ligne ainsi que la puissance absorbée par chaque enroulement du primaire.

2) Le transformateur est monté Yy avec les deux demi-enroulements par noyau en série.

a) Calculer la valeur correspondante de  $U_{20}$ .

b) Déterminer l'intensité des courants en ligne au primaire si un résistor qui absorbe 50A est branché entre la phase b et le neutre secondaire

④ Un transformateur Yyn0, noté T, a pour puissance apparente nominale  $S_n = 100\text{kVA}$ . Les essais sous puissance réduite ont donné  
à vide:  $U_{10} = 20\text{kV}$   $U_{20} = 410\text{V}$   $P_{10} = 300\text{W}$   
en C.C.:  $U_{1C} = 1300\text{V}$   $I_{2C} = 140\text{A}$   $P_{1C} = 2\text{kW}$ .

Dans tout ce qui suit, le primaire est alimenté par un réseau  $3 \times 20\text{kV} - 50\text{Hz}$ .

1) La section d'un noyau étant de  $100\text{cm}^2$ , calculer  $N_1$  si l'induction maximale dans les tôles est égale à  $1,5\text{T}$ .

2) Calculer le rapport de transformation  $m$ . En déduire le rapport des nombres de spires  $N_2/N_1$ .

3) Calculer les éléments  $R_s$  et  $X_s$  du schéma monophasé équivalent ramené au secondaire et la puissance de court-circuit du transformateur.

4) Le transformateur débite  $100\text{A}$  sur une charge équilibrée de facteur de puissance  $\cos\varphi_2 = 0,8$  inductif. Calculer la chute de tension  $\Delta V_2$ , la tension entre phases  $U_2$  et le rendement  $\eta$ .

5) On branche en parallèle un transformateur T', de mêmes caractéristiques, à l'impédance ramenée au secondaire près, qui vaut  $0,034 + j0,08$ .

a) Quel est celui des deux transformateurs qui peut fournir son courant assigné?

b) Dans ces conditions, calculer le courant fourni par l'autre transformateur, le courant total débité  $I_{2t}$  ainsi que la valeur de  $U_2$  si l'ensemble débite sur une charge purement résistive.

6) Le transformateur T, supposé parfait ici, débite  $140\text{A}$  dans une inductance pure L placée entre la phase a et le neutre. Calculer la valeur de L, les courants au primaire et les puissances actives et réactives absorbées par chaque phase.

## Exercices sur la machine asynchrone

⑤ Un moteur asynchrone triphasé est alimenté par un réseau 3x220V, 60Hz. Les enroulements du stator sont couplés en triangle. En charge normale, il tourne à la vitesse de 570tr/min en donnant une puissance sur l'arbre de 2500W avec un rendement de 75% et un facteur de puissance de 0,8. Les pertes mécaniques sont supposées négligeables.

1) Calculer, pour la charge normale, – l'intensité du courant en ligne – l'intensité du courant dans un enroulement du stator – la vitesse de synchronisme – le glissement – la fréquence du courant dans le rotor – la puissance dissipée dans le rotor – le couple moteur.

2) Ce moteur entraîne une pompe dont le couple est proportionnel à la vitesse de rotation et qui absorbe une puissance de 2300W à la vitesse de 600tr/min. En admettant que la caractéristique mécanique du moteur est une droite dans toute sa partie utile, déterminer la vitesse de rotation du groupe.

⑥ Le moteur asynchrone à étudier possède les caractéristiques nominales suivantes:

$$U = 220\text{V} - 50\text{Hz} \quad I = 140\text{A} \quad p = 2 \quad P_u = 40\text{kW} \quad g = 0,04$$

Par ailleurs, on donne:

La résistance entre bornes du stator couplé en triangle:  $R_a = 0,06\Omega$ .

La résistance par enroulement du rotor couplé en étoile:  $R_2 = 0,05\Omega$ .

Les pertes fer et les pertes mécaniques:  $P_{\text{fer}} = P_{\text{méca}} = 1\text{kW}$ .

1) Pour le point de fonctionnement nominal, calculer – le moment du couple utile – les pertes Joule rotoriques et l'intensité du courant dans un enroulement rotor – les pertes Joule statoriques – la puissance absorbée – le rendement – le facteur de puissance.

2) Le démarrage du moteur s'effectue à l'aide d'un rhéostat rotorique couplé en étoile, dont la résistance par phase est notée R. Calculer R pour que le couple au démarrage soit égal au couple nominal.

3) Le moteur entraîne un ventilateur dont le couple résistant est proportionnel au carré de la vitesse et vaut 80Nm à 1000tr/min. On admet que la caractéristique mécanique du moteur est rectiligne dans sa partie utile.

a) Calculer la fréquence de rotation et le couple au point de fonctionnement du groupe.

b) La tension du réseau d'alimentation restant la même, on couple les enroulements statoriques en étoile. Calculer la nouvelle fréquence de rotation du groupe.

⑦ Un moteur asynchrone triphasé, hexapolaire, rotor à bagues couplé en étoile, est alimenté par un réseau triphasé 220V, 50Hz. Cette alimentation reste inchangée pour les différents fonctionnements envisagés.

A la charge nominale, bagues en court-circuit, ce moteur consomme une puissance active  $P_n = 13,2\text{kW}$  avec un courant en ligne  $I_n = 40\text{A}$  et une fréquence de rotation  $n_n = 970\text{tr/min}$ .

A vide, bagues en court-circuit, il consomme une puissance active  $P_0 = 1,06\text{kW}$  avec un courant en ligne  $I_0 = 14,9\text{A}$ .

On connaît d'autre part

la résistance du stator, mesurée entre 2 bornes:  $R_s = 0,30\Omega$

la résistance du rotor, mesurée entre 2 bornes:  $R_r = 0,20\Omega$

Les pertes mécaniques sont égales aux pertes fer qu'on admettra totalement localisées au stator. De plus ces pertes mécaniques sont supposées constantes lorsque la vitesse varie de moins de 10%.

1) La puissance  $P_n$  ayant été mesurée par la méthode des deux wattmètres, quelles ont été les deux lectures

faites au cours de cette mesure?

2) Calculer, à la charge nominale, les bagues étant en court-circuit:

- a) le rendement du moteur
- b) le moment  $C_e$  du couple électromagnétique développé et le moment  $C_u$  du couple utile
- c) la valeur efficace  $I_2$  du courant rotorique et sa fréquence  $f_2$ .

3) La valeur efficace et la fréquence du réseau d'alimentation restant fixes, on peut, en négligeant les chutes de tension au stator, mettre le moment  $C_e$  du couple électromagnétique sous la forme

$$C_e = K \frac{\frac{R_2}{g}}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + X_2^2}$$

expression dans laquelle  $K$  est une constante,  $R_2$  désigne la résistance d'une phase du rotor,  $X_2$  sa réactance de fuite et  $g$  le glissement.

- a) En admettant que  $C_e$  peut être considéré comme une fonction linéaire de  $g$  pour  $0 \leq g \leq 1,2g_n$  ( $g_n$  étant le glissement nominal), donner l'expression simplifiée de  $C_e$  en fonction de  $K$ ,  $R_2$  et  $g$ . A.N.: Calculer  $K$  en utilisant les résultats de l'essai à charge nominale.
- b) Soit  $g_m$  le glissement correspondant au couple maximal, noté  $C_{em}$ . Déterminer les expressions littérales de  $g_m$  et de  $C_{em}$ . Sachant que  $C_{em}$  vaut les  $8/3$  du couple nominal, calculer  $X_2$ , puis  $g_m$ .
- c) Calculer le moment du couple de démarrage  $C_D$ .
- d) Calculer les valeurs de chacune des trois résistances  $R$  qu'il faudrait mettre en série avec chaque enroulement du rotor pour avoir  $C_D = C_{em}$ . A quelle fréquence de rotation  $n'$  le moteur développerait-il son couple nominal si les résistances  $R$  n'étaient pas éliminées au cours du démarrage?

**8** Une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné est reliée

- électriquement à une distribution triphasée équilibrée en tension  $U = 220V-50Hz$
- mécaniquement à un treuil de rayon  $10,7cm$  par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse de rapport de réduction  $0,1$  et de rendement supposé égal à l'unité. Ce treuil supporte une charge de  $9000N$ .

Dans tout ce qui suit, on suppose que les pertes mécaniques sont négligeables ( le couple utile est donc égal au couple électromagnétique ).

- 1) Cette machine, fonctionnant en moteur, élève la charge à la vitesse  $v$  de  $1m/s$ . Déterminer pour ce point de fonctionnement:
  - sa vitesse de rotation
  - son nombre de pôles
  - son glissement
  - sa puissance utile
  - son couple utile.

Si le moteur asynchrone a pour rendement  $0,84$  et pour facteur de puissance  $0,83$  quelles seront les valeurs de la puissance absorbée et du courant en ligne?

- 2) Au cours de la descente de la charge, après avoir croisé deux des liaisons du stator au réseau de distribution, on constate que la vitesse du rotor est égale à  $1097tr/min$  et que le courant en ligne est de  $31,2A$ .
  - a) Préciser pourquoi cette machine fonctionne alors en génératrice asynchrone et pourquoi il a été nécessaire de modifier les liaisons au réseau.
  - b) Calculer la vitesse de descente et la puissance fournie par la charge, puis, sachant que les pertes fer sont de

275W et que la résistance entre bornes du stator est égale à  $0,2\Omega$ , calculer:

- les pertes Joule au rotor
- les pertes Joule au stator
- la puissance restituée au réseau.

3) Pour stabiliser la vitesse de descente de la charge, on peut également faire fonctionner la machine asynchrone en frein.

a) Préciser pourquoi il faut utiliser un rhéostat rotorique.

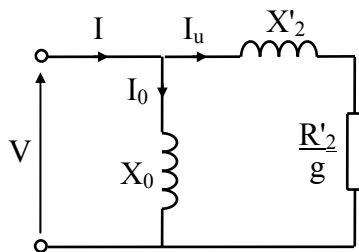
b) La valeur par phase du rhéostat rotorique est notée  $kR_2$  où  $R_2$  désigne la résistance par enroulement du rotor. Calculer la valeur qu'il faut donner à  $k$  pour avoir la même vitesse de descente qu'à la question précédente. Calculer également la puissance totale dissipée par effet Joule au rotor, la comparer à celle obtenue précédemment et conclure.

9 Un moteur asynchrone, alimenté par un réseau  $3 \times 380V-50Hz$ , comporte 4 pôles et a son stator couplé en étoile. Le rotor est bobiné et couplé en étoile. On néglige dans tout ce qui suit la résistance et l'inductance de fuite du stator ainsi que les pertes ferromagnétiques et mécaniques.

1) On effectue sur le moteur les essais suivants

- 1<sup>er</sup> essai: Fonctionnement à vide sous tension nominale. La fréquence de rotation est alors  $n = 1500tr/min$  et le courant en ligne est  $I_0 = 15A$ .
- 2<sup>ème</sup> essai: Rotor en court-circuit, maintenu à l'arrêt. Le moteur est alimenté sous tension réduite  $U_{CC} = 95V$  entre phases. Le courant en ligne est alors  $I_{CC} = 38A$  et la puissance absorbée est  $P_{CC} = 1,8kW$ .

1) A partir de ces essais, on veut déterminer les éléments du schéma équivalent d'une phase du moteur représenté ci-contre.



a) A partir de l'essai à vide, calculer  $X_0$ .

b) A partir de l'essai en court-circuit, déterminer les expressions complexes de  $I_{CC}$ ,  $I_{0CC}$  et  $I_{uCC}$ . En déduire les valeurs de  $R'_2$  et de  $X'_2$ .

c) En négligeant  $I_{0CC}$  devant  $I_{uCC}$ , calculer une valeur approchée de  $R'_2$  à partir de  $P_{CC}$  et de  $I_{CC}$ .

2) Exprimer la puissance transmise au rotor en fonction de  $V$ ,  $R'_2/g$  et de  $X'_2$ . Exprimer ensuite le couple électromagnétique  $C_e$  en fonction de cette puissance. En déduire que  $C_e$  peut s'exprimer par la relation:

$$C_e = \frac{6V^2}{\omega} \frac{\frac{R'_2}{g}}{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + X_2'^2}$$

3) Déterminer l'expression de  $C_e$  aux faibles glissements et la mettre sous la forme  $C_e = \frac{K}{R'_2} g$  en donnant la

valeur numérique de  $K$ . Application:

a) Pour  $R'_2 = 0,505\Omega$  et  $-150Nm \leq C_e \leq 150Nm$ , tracer la courbe  $C_e = f(n)$  en précisant les zones de fonctionnement en moteur et en génératrice

b) Pour  $C_e = -150Nm$ , calculer la puissance fournie par la charge et les pertes Joule rotoriques. Déterminer ensuite  $I$  à l'aide du schéma équivalent défini à la question 1). En déduire la puissance active restituée au réseau ainsi que la puissance réactive fournie par celui-ci.

c) On veut que la machine, fonctionnant en frein, tourne à  $-1500tr/min$  en fournissant un couple de  $150Nm$ .

Calculer la valeur que doit prendre  $R'_2$  et les pertes Joule au rotor dans ce cas.

**10** La plaque signalétique de la machine asynchrone que l'on se propose d'étudier indique les valeurs nominales suivantes:  $P_u = 4,5 \text{ kW}$   $U = 380 \text{ V}$ – $50 \text{ Hz}$   $I = 11 \text{ A}$   $n = 1395 \text{ tr/min}$   $\cos\varphi = 0,76$ .

Des essais annexes ont donné les résultats ci-dessous:

à vide, sous tension nominale:  $I_0 = 5,6 \text{ A}$   $P_0 = 600 \text{ W}$   $n_0 \cong 1500 \text{ tr/min}$

à l'arrêt, rotor en court-circuit:  $U_C = 92 \text{ V}$   $I_C = 11 \text{ A}$   $P_C = 800 \text{ W}$

résistance entre bornes du stator:  $R_a = 1,8 \Omega$

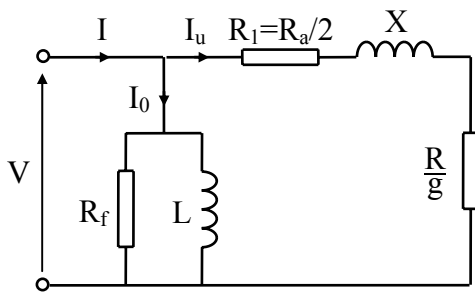
couple de pertes:  $C_p = 1,5 \text{ Nm}$  indépendant de la vitesse de rotation.

I) Pour le point de fonctionnement nominal, en partant de la puissance utile, présenter un bilan numérique des puissances actives. En déduire en particulier la puissance absorbée  $P_a$  et le rendement de la machine. Comparer  $P_a$  à la valeur que l'on obtiendrait directement à partir des indications de la plaque signalétique.

II) Pour simplifier, on assimile ici la caractéristique mécanique de la machine à une droite en posant  $C_e$  ( couple électromagnétique ) =  $K \cdot g$ .

1) Calculer  $C_e$  au point nominal. En déduire la valeur de  $K$ .

2) Calculer la valeur exacte de la fréquence de rotation en tr/min à vide.



III) On admet maintenant que le comportement de la machine peut être décrit à l'aide du schéma équivalent représenté ci-contre.

1) A vide,  $I_u$  est négligeable devant  $I_0$ . Déduire de l'essai correspondant les valeurs de  $R_f$  et de  $L$

2) On se place dans les conditions de l'essai rotor bloqué et on note  $\underline{V}_C$ ,  $\underline{I}_C$ ,  $\underline{I}_{0C}$  et  $\underline{I}_{uC}$  les grandeurs correspondantes. En prenant  $\underline{V}_C$  comme origine des phases, donner l'expression de  $\underline{I}_C$ . Calculer  $\underline{I}_{0C}$ , puis  $\underline{I}_{uC}$ . En

déduire les valeurs de  $R$  et de  $X$ .

3) Soit  $\underline{Z}_u$  l'impédance équivalente au circuit  $R_1$ ,  $X$  et  $R/g$ . Calculer  $\underline{Z}_u$  pour la vitesse nominale. En déduire  $\underline{I}_u$ , puis  $\underline{I}$ . Comparer les valeurs du courant efficace  $I$  et du facteur de puissance à celles de la plaque signalétique.

4) Déterminer l'expression littérale de  $C_e$ . Déterminer la valeur  $g_M$  de  $g$  pour laquelle  $C_e$  est maximum et l'expression correspondante  $C_M$  de  $C_e$ .

A.N.: Calculer  $g_M$ ,  $C_M$  ainsi que le couple au démarrage  $C_D$ .

5) En première approximation, on peut négliger  $R_1$  et  $X$  devant  $R/g$ . Dans cette hypothèse, montrer que  $C_e$  est proportionnel à  $g$ . Calculer la constante de proportionnalité et comparer le résultat à celui obtenu au II).

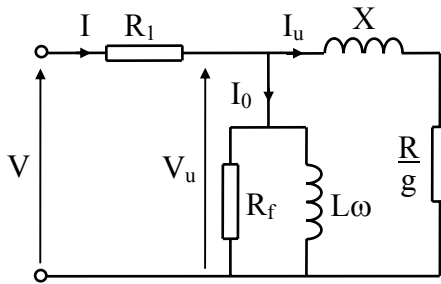
**11** L'étude porte sur un moteur asynchrone triphasé tétrapolaire ( $p = 2$ ), alimenté par un réseau de caractéristiques constantes  $U = 392 \text{ V}$ – $50 \text{ Hz}$ . Les puissances étant mesurées par la méthode du double wattmètre, on a relevé

à vide:	$n \cong 1500 \text{ tr/min}$	$P_{10} = 1650 \text{ W}$	$P_{20} = -955 \text{ W}$
au point nominal:	$n = 1470 \text{ tr/min}$	$P_{1N} = 3700 \text{ W}$	$P_{2N} = 1080 \text{ W}$ .

Par ailleurs, la mesure de la résistance du stator entre bornes a donné  $R_a = 1,6 \Omega$ .

I) A partir des résultats de l'essai à vide, calculer les puissances active  $P_0$  et réactive  $Q_0$  mises en jeu. En déduire la puissance apparente  $S_0$ , le courant  $I_0$  en ligne et le facteur de puissance  $\cos\varphi_0$ . Constater d'autre part que les pertes mécaniques peuvent être négligées.

II) Calculer de même  $P_N$ ,  $Q_N$ ,  $S_N$ ,  $I_N$  et  $\cos\varphi_N$  pour le point nominal.



III) Le fonctionnement de la machine peut être décrit à l'aide du schéma équivalent ci-contre avec  $R_1 = R_a/2$ . Pour les calculs en complexe, on prendra  $\underline{V}$  comme origine des phases et on notera  $\underline{Y}_0$  l'admittance équivalente à la mise en parallèle de  $R_f$  et de  $L\omega$ .

1) Calculer  $\underline{V}_u$  à vide. Que vaut  $\underline{I}_u$  pour ce point de fonctionnement? En déduire la valeur de  $\underline{Y}_0$ .

2) Pour le point de fonctionnement nominal:

a) Calculer  $\underline{V}_u$ , puis  $\underline{I}_u$ . En déduire les valeurs de  $R$  et de  $X$ .

b) Calculer directement le couple électromagnétique  $C_e$  à partir, entre autres, de la valeur de  $\underline{I}_u$ .

3) On néglige dans cette question l'influence de  $R_1$  ( $\underline{V}_u$  est donc égal à  $\underline{V}$ ).

a) Pour le glissement correspondant au point nominal, calculer  $\underline{I}_u$ , puis les valeurs de  $I$  et de  $C_e$ . Comparer ces dernières à celles obtenues précédemment et conclure sur la validité de l'hypothèse faite.

b) Déterminer l'expression littérale de  $C_e$  en fonction de  $p$ ,  $V$ ,  $\omega$ ,  $R$ ,  $X$  et  $g$ . A.N.: Calculer  $C_e$  pour  $g = 1$ .

4) On considère maintenant le point de fonctionnement correspondant au démarrage de la machine. L'impédance ramenée du rotor étant alors très faible, il faut évidemment tenir compte ici de  $R_1$ . Par contre, on pourra négliger l'influence de  $\underline{Y}_0$ . Compte tenu de ceci, calculer les valeurs du courant de démarrage  $I_D$  et du couple de démarrage  $C_D$ . Comparer ce dernier résultat à celui trouvé à la question précédente et conclure.

## Exercices sur la machine synchrone

**12** Soit un alternateur triphasé à stator couplé en étoile. Pour son étude, on utilise le modèle de Behn-Eschenburg, mais en négligeant l'effet de la résistance d'induit. Par ailleurs, on met la f.é.m. à vide sous la forme  $E_0 = K \cdot J$ , où  $J$  désigne le courant d'inducteur.

1) Calculer la valeur de  $K$  sachant qu'un essai à vide à la fréquence nominale de 50Hz a donné  $E_0 = 1000V$  pour  $J = 10A$ .

2) L'alternateur étant mis en court-circuit, on relève un courant en ligne  $I = 100A$  pour  $J = 5A$ . Calculer la valeur de la réactance synchrone  $L\omega$ .

3) Déterminer la valeur de  $J$  permettant d'obtenir les points de fonctionnement suivants:

$U = 3000V$   $I = 100A$   $\cos\varphi = 0,8$  inductif, puis capacitif. Sur les diagrammes de Behn-Eschenburg correspondants, positionner les champs rotorique et statorique et en déduire leur déphasage ainsi que leur décalage angulaire  $\theta$  sachant que l'alternateur possède 12 pôles.

4) L'excitation étant réglée à 25A, l'alternateur débite sur une charge équilibrée couplée en triangle d'impédance par phase  $\underline{Z} = [60; 45^\circ]$ . Déterminer les valeurs de  $I$  et de  $U$  puis, en négligeant toutes les pertes, calculer le couple fourni par le dispositif d'entraînement.

**13** Soit un alternateur triphasé tétrapolaire à stator couplé en étoile. L'essai à vide sous fréquence nominale de 50Hz a donné

J (A)	2	4	6	8	10	12	14	16
$E_0$ (V)	540	1040	1440	1730	1900	2030	2120	2200

Dans tout ce qui suit, on utilise le modèle de Behn-Eschenburg en notant  $L\omega$  l'inductance synchrone. Sauf indication contraire, on néglige la chute de tension dans la résistance d'induit.

1) L'alternateur étant mis en court-circuit, on règle son courant d'excitation  $J$  pour que le courant  $I$  débité soit égal à 225A. Sans modifier  $J$ , on ouvre ensuite le circuit d'induit et on mesure la tension à vide  $U_0$  entre bornes. Sachant que  $U_0 = 2500V$ , calculer  $L\omega$ .

2) L'alternateur débite 150A sous une tension composée  $U = 3300V$ . Déterminer les valeurs de  $J$  pour les deux cas suivants a)  $\cos\varphi = 1$  b)  $\cos\varphi = 0,8$  (déphasage avant).

3) Pour entraîner l'alternateur à vide, non excité, il faut lui fournir une puissance mécanique de 1800W à 1500tr/min. L'alternateur est lancé à 1800tr/min, puis abandonné à lui-même. Il ralentit et passe à 1500tr/min avec une accélération angulaire  $d\Omega/dt = -0,191\text{rad/s}^2$ . Calculer le moment d'inertie  $J$  de la partie tournante.

4) Toujours à vide, on excite la machine de telle sorte que ses pertes ferromagnétiques soient les mêmes qu'à la question 2)a).

a) En admettant que les fuites magnétiques sont négligeables devant l'effet de la réaction d'induit, cette hypothèse implique que l'on ait  $E_0$  égal à la tension simple  $V$  correspondant au point de fonctionnement considéré. En déduire la valeur à donner au courant d'excitation.

b) Pour cette valeur de  $J$ , on répète l'expérience de ralentissement décrite au 3). Au passage à 1500tr/min, on mesure  $d\Omega/dt = -1,27\text{rad/s}^2$ . Calculer les pertes ferromagnétiques de la machine.

5) En tenant compte ici de la résistance d'induit, égale à  $0,2\Omega$  par enroulement, et sachant que le courant d'excitation est fourni par une source indépendante, calculer le couple mécanique que doit fournir le moteur d'entraînement dans les conditions du 2)a).

14 Les essais d'un alternateur octopolaire 3x3600V–50Hz, monté en étoile, ont donné, avec U tension entre bornes

à vide entre bornes:	J (A)	2	6	10	12	14	18	24	30
	U (V)	730	1900	3010	3430	3720	4090	4470	4770

en court-circuit:  $I = 80\text{A}$   $J = 8\text{A}$

sur charge inductive pure:  $U = 3600\text{V}$   $I = 50\text{A}$   $J = 24\text{A}$

mesure de la résistance d'induit:  $R_a = 1,4\Omega$  entre bornes

1) Déterminer les coefficients de Potier  $\alpha$  et  $\lambda\omega$  de la machine.

2) L'alternateur, couplé à un réseau fixe de tension  $U = 3600\text{V}$ , fonctionne à puissance utile  $P_u = 380\text{kW}$  constante.

a) Pour  $\cos\varphi = 0,8$  inductif, déterminer la valeur de J puis calculer la valeur du couple fourni par le dispositif d'entraînement si les pertes autres que celles par effet Joule dans l'induit sont égales à 25kW.

b) Déterminer de même les valeurs de J correspondant à  $\cos\varphi = 1$  et à  $\cos\varphi = 0,8$  capacitif.

c) Esquisser la courbe  $I = f(J)$  relative à ce mode de fonctionnement.

3) L'alternateur débite dans une charge capacitive pure. On néglige dans cette question l'effet de la résistance d'induit.

a) Tracer le diagramme de Potier correspondant. En déduire les relations arithmétiques liant  $V$ ,  $E_r$ ,  $\lambda\omega$  et  $I$  d'une part,  $J_r$ ,  $J$ ,  $\alpha$  et  $I$  d'autre part.

b) On veut obtenir  $V = 1500\text{V}$  lorsque  $J = 0$  ( auto-amorçage sur condensateur). Déduire de la question a) l'expression numérique de  $E_r$  en fonction de  $J_r$ . Tracer la courbe correspondante en la superposant à la caractéristique à vide et en déduire la valeur de  $J_r$ . Calculer alors  $I$  ainsi que la capacité  $C$  par phase de la charge supposée couplée en étoile.

15 Un alternateur triphasé possède les caractéristiques suivantes:

$$U_N = 380\text{V} - 50\text{Hz} \quad S_N = 1000\text{kVA} \quad p (\text{nombre de paires de pôles}) = 2 \quad \text{stator couplé en étoile.}$$

Les essais habituels ont donné les résultats suivants

caractéristique à vide à vitesse nominale:

J (A)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$E_0$ (V)	0	83,1	147	193	224	244	257	268	277	285

essai en court-circuit:  $J = 59\text{A}$  pour  $I = 1520\text{A}$

essai en déwatté:  $J = 160\text{A}$  pour  $I = 1520\text{A}$  et  $U = 380\text{V}$ .

résistance par enroulement du stator:  $r = 0,00214\Omega$

résistance du circuit inducteur:  $R = 0,549\Omega$

pertes constantes:  $P_{\text{const}} = 10\text{kW}$

Sauf indication contraire, on utilisera le modèle de Potier en raisonnant sur les grandeurs par phase  $V$  et  $I$ . Par ailleurs, on ne tiendra compte de la résistance du stator que dans les bilans de puissance.

1) Tracer la caractéristique à vide  $E_0 = f(J)$  ( échelles  $1\text{cm} = 10\text{A}$   $1\text{cm} = 20\text{V}$  ) puis déterminer les coefficients de Potier  $\alpha$  et  $\lambda\omega$  de la machine.

2) Déterminer la valeur de J permettant d'obtenir le point de fonctionnement nominal de tension et de courant avec  $\cos\varphi = 0,5$  inductif. Dans ces conditions, calculer le rendement de l'alternateur ainsi que le couple fourni par le dispositif d'entraînement sachant que l'inducteur est alimenté par un redresseur statique.

- 3) Dans les mêmes conditions, déterminer  $J$  lorsque  $\cos\varphi = 0,5$  capacitif.
- 4) On rappelle que la f.é.m. induite dans un enroulement peut se mettre sous la forme  $KNf\Phi$ , avec  $\Phi = \Phi_r$  en charge et  $\Phi = \Phi_0$  à vide. Sachant que  $KN = 80$ , calculer le flux résultant sous un pôle correspondant au point de fonctionnement en inductif, puis le flux que l'on obtiendrait à vide avec le même courant inducteur. En déduire le type de réaction d'induit ( magnétisante ou démagnétisante ) pour ce mode de fonctionnement. Refaire ensuite la même étude pour le fonctionnement en capacitif.
- 5) Dans le cas du débit capacitif de la question 3), le flux résultant est suffisamment faible pour que l'on puisse négliger en première approximation l'effet de la saturation et utiliser le modèle de Behn-Eschenburg. On pose donc  $E_0 = k \cdot J$ .
- a) En raisonnant sur le premier point non nul de la caractéristique à vide, déterminer la valeur de  $k$ . Calculer ensuite le courant de court-circuit que l'on obtiendrait pour la valeur correspondante de  $J$  et en déduire la réactance synchrone  $L\omega$ .
- b) Déterminer alors  $J$  pour le point de fonctionnement de la question 3) et comparer le résultat à celui obtenu précédemment.
- c) Juste à titre de comparaison, procéder de même pour le point de fonctionnement de la question 2) et conclure.

**16** On dispose d'un moteur synchrone à 8 pôles alimenté par un réseau de caractéristiques constantes 3800V–50Hz. La puissance nominale du moteur est  $P_n = 165\text{kW}$  et il peut supporter une intensité maximale  $I_{\max} = 50\text{A}$ . Sauf dans la question 5, la résistance d'induit et les différentes pertes sont supposées négligeables. Pour son étude, on utilisera le modèle de Behn-Eschenburg sachant que:

- la caractéristique à vide est de la forme  $E_0 = K \cdot J$  avec  $K = 2000\Omega$
- l'induit, monté en étoile, a une réactance synchrone par phase  $L\omega$  égale à  $38\Omega$ .

- 1) Le moteur travaille dans les conditions optimales d'excitation (  $\cos\varphi = 1$  ) et absorbe un courant égal à  $I_{\max}/2$ . Déterminer la f.é.m  $E_0$ , l'excitation  $J$ , la puissance active  $P$ , le couple moteur  $C$  et le décalage polaire  $\theta$  correspondant à ce fonctionnement.
- 2) La machine fonctionne à puissance constante, égale à  $P_n$ . Calculer la valeur minimale que peut prendre  $\cos\varphi$ , puis, en envisageant à chaque fois les deux modes de fonctionnement inductif et capacitif, déterminer les valeurs de  $J$  correspondant à cette valeur minimale et à  $\cos\varphi = 0,8$  ( regrouper les résultats dans un tableau où figurera également le résultat correspondant à  $\cos\varphi = 1$ , déduit de la question 1 ). Tracer ensuite la courbe  $I = f(J)$  en précisant la partie correspondant à chaque mode de fonctionnement.
- 3) Le moteur fonctionne en compensateur synchrone. Pour  $I = I_{\max}$ , déterminer la valeur de  $J$  et la puissance réactive fournie. Calculer ensuite la capacité des trois condensateurs identiques qui, branchés en triangle, fourniraient la même puissance réactive.
- 4) On associe le moteur synchrone, travaillant à sa puissance nominale et absorbant son intensité maximale, à une installation consommant une puissance  $P_1 = 600\text{kW}$  avec un facteur de puissance  $\cos\varphi_1 = 0,6$  AR, que l'on désire améliorer. Déduire de la question 2 les valeurs de l'excitation du moteur synchrone et de la puissance réactive qu'il fournit, puis calculer le nouveau facteur de puissance  $\cos\varphi_2$  de l'ensemble.
- 5) On tient compte maintenant de l'ensemble des pertes et on donne  $P_{\text{méca}} = 1\text{kW}$ ,  $P_{\text{fer}} = 2\text{kW}$  et  $R_a = 0,8\Omega$  entre bornes. L'excitation est fournie par une excitatrice en bout d'arbre de rendement  $\eta_G = 80\%$  et délivrant une tension  $U_e = 600\text{V}$ . Calculer le rendement  $\eta$  du moteur synchrone lorsqu'il fournit une puissance mécanique de  $165\text{kW}$  et qu'il absorbe un courant de  $50\text{A}$  ( ce point de fonctionnement étant, aux pertes près, celui de la

question précédente, on admettra que le courant  $J$  reste le même ).

**17** Un moteur synchrone tétrapolaire de puissance utile 18kW est alimenté par un réseau de caractéristiques constantes  $U_N = 220V - 50Hz$ . On connaît pour cette machine:

– la caractéristique à vide, relevée entre bornes, pour  $n = 1500tr/min$ :

J (A)	0,5	1	2	3,5	4,5	7	8	10	15
U (V)	43,3	86,6	160	214	234	260	265	275	291

– un point de la caractéristique en court-circuit:  $I = 60A$   $J = 6A$ .

Dans tout ce qui suit, on admet que la réactance synchrone  $L\omega$  reste constante et on néglige la résistance statorique ainsi que l'ensemble des autres pertes.

1) Déterminer la valeur de  $L\omega$  pour  $J = 10A$ .

2) La machine, supposée parfaite, fonctionne en compensateur synchrone. L'excitation étant réglée à 10A, déterminer le courant débité par le réseau et la puissance réactive fournie.

3) Montrer qu'en prenant  $\underline{V}$  comme origine des phases, l'équation électrique régissant le fonctionnement se met sous la forme  $V = jL\omega\underline{I} + \underline{E}_0$  avec  $\underline{I} = [I; -\varphi]$  et avec  $\underline{E}_0 = [E_0; -\delta]$  ( $\delta$ : angle interne). En raisonnant sur la partie imaginaire de cette relation, montrer que  $E_0 \sin \delta = L\omega I \cos \varphi$ .

4) Compte tenu de ce qui précède et du fait qu'on néglige toutes les pertes, donner l'expression du couple moteur  $C$  en fonction de  $V$ ,  $I$ ,  $\varphi$  et  $\Omega$  d'une part, de  $V$ ,  $E_0$ ,  $\delta$ ,  $L\omega$  et  $\Omega$  d'autre part.

5) Le moteur entraîne une charge qui lui oppose un couple résistant constant et égal au couple nominal, noté  $C_N$ .

a) Calculer la valeur de  $C_N$ .

b) On règle l'excitation pour que le fonctionnement se fasse à  $\cos \varphi = 1$ . Utiliser la première relation donnant le couple pour calculer  $I$ , puis déterminer  $\underline{E}_0$  et en déduire  $J$ .

c) Pour  $J$  égal à 10A, prévoir le mode de fonctionnement électrique (capacitif ou inductif) du moteur, puis, en utilisant la deuxième relation donnant le couple, calculer  $\delta$ . Déterminer ensuite  $\underline{I}$  et en déduire la puissance réactive mise en jeu. Vérifier la compatibilité avec la prévision du mode de fonctionnement électrique.

d) Toujours en raisonnant sur la deuxième équation donnant le couple, déterminer l'expression du couple maximum  $C_M$  que peut fournir le moteur pour une excitation donnée. Pour éviter tout risque de décrochement, on impose que le rapport  $C_M/C_N$  reste supérieur ou égal à 1,5. En déduire la valeur minimale que peut prendre  $J$ .

**18** L'étude porte sur un moteur synchrone hexapolaire à aimants permanents ( donc à flux inducteur constant ), alimenté par un réseau de fréquence et de tension réglables. Le constructeur donne en particulier

– la fréquence de rotation nominale:  $n_N = 2000tr/min$

– le courant d'induit maximal:  $I_M = 14A$

– la résistance du stator:  $R = 0,23\Omega$

– l'inductance synchrone, supposée constante:  $L = 1,72mH$

– la constante de f.c.é.m.:  $K_E = 0,35Vs/rad$

– les pertes à vide pour  $n = 2000tr/min$ :  $P_0 = 100W$  ( que l'on supposera entièrement constituées par des pertes mécaniques ).

1) Dans tout ce qui suit, on suppose que la vitesse de rotation est constante et égale à sa valeur nominale. Calculer la fréquence d'alimentation et les valeurs correspondantes de  $E_0$  et de la réactance  $L\omega$ .

2) Exprimer  $\underline{V}$  en fonction de  $\underline{E}_0$ ,  $R$ ,  $L\omega$  et  $\underline{I}$ . On choisit  $\underline{I}$  comme origine des phases et on note  $\varphi = (\vec{I}, \vec{V})$  et  $\psi = (\vec{I}, \vec{E}_0)$ . En raisonnant sur les parties réelles et imaginaires de chacun des termes de l'expression, obtenir deux relations entre les grandeurs  $V$ ,  $E_0$ ,  $R$ ,  $L\omega$ ,  $I$ ,  $\varphi$  et  $\psi$ .

3) Le moteur est alimenté sous tension constante, réglée de telle sorte qu'on ait  $\cos\varphi = 1$  pour  $I = I_M$ .

a) Compte tenu de l'hypothèse faite sur son réglage, déterminer la valeur de  $V$  (on commencera par calculer la valeur correspondante de  $\psi$ ). Toujours pour  $I = I_M$ , calculer la puissance électromagnétique  $P_e = 3E_0I\cos\psi$ , la puissance utile  $P_u$  et les couples  $C_e$  et  $C_u$ .

b) Le moteur fonctionne maintenant à vide.

– Sachant que  $\varphi$  est alors pratiquement égal à  $\psi$ , réécrire les relations obtenues au 2) en ne conservant par exemple que  $\varphi$ , puis calculer  $I$  en éliminant cet angle entre les deux équations.

– Que vaut  $P_e$  ici? En déduire la valeur de  $I\cos\psi$ , puis celle de  $\psi$ .

– Vérifier l'hypothèse faite sur les angles en calculant  $\varphi$  à l'aide d'une des deux relations initiales.

c) Tracer les diagrammes de Behn-Eschenburg correspondant aux deux modes de fonctionnement précédents.

Positionner sur ceux-ci les champs rotorique et statorique et calculer leur décalage angulaire.

4) Le moteur est alimenté sous tension variable, telle que l'on ait en permanence  $\psi = 0$ .

a) Quels sont maintenant le déphasage et le décalage entre les champs rotorique et statorique?

b) Déterminer l'expression de  $C_e$  en fonction de  $K_E$  et de  $I$ . En déduire la valeur de la constante de couple  $K_C = C_e/I$ . A.N.: Calculer la valeur maximale de  $C_e$  et l'intensité du courant absorbé à vide. Comparer cette dernière à celle trouvée au 3).

c) A vide, puis pour  $I = I_M$ , calculer les valeurs de  $V$ .

**19** On dispose d'une machine synchrone hexapolaire possédant en particulier les caractéristiques suivantes:  $U_N = 380V-50Hz$   $I_N = 1000A$   $R = 9,21m\Omega$ . Ses pertes mécaniques et magnétiques sont supposées constantes et égales à  $20kW$  et le courant d'excitation est fourni par un réseau continu auxiliaire (on ne tiendra donc pas compte des pertes correspondantes). A vitesse nominale, un essai en génératrice à vide a donné les résultats suivants:

J (A)	0	50	100	200	300	400	500	600
$E_0$ (V)	5	71	125	194	230	247	256	260

Pour l'étude, on utilise le modèle de Potier avec  $\alpha = 0,325$  et  $\lambda\omega = 0,044\Omega$ .

1) La machine fonctionne en moteur et absorbe son courant nominal. L'excitation est réglée de telle sorte que  $\cos\varphi = 1$ .

a) Déterminer la valeur de  $J$ .

b) Effectuer le bilan des puissances et des pertes. En déduire le couple utile développé par le moteur.

2) La machine fonctionne en compensateur synchrone. Pour un courant absorbé de  $500A$ , calculer la puissance active consommée et le facteur de puissance, puis déterminer la valeur correspondante de  $J$ .