

Exercice 8 : Motorisation d'un tramway

Il s'agit d'un moteur asynchrone triphasé à rotor à cage dont les enroulements statoriques sont couplés en étoile.

Caractéristiques nominales du moteur

- Tension nominale entre phases : $U_N = 585 \text{ V}$
- Fréquence statorique nominale : $f_N = 88 \text{ Hz}$
- Intensité nominale du courant statorique : $I_N = 35,4 \text{ A}$
- Facteur de puissance nominal : $\cos\phi_N = 0,732$
- Fréquence nominale de synchronisme : $N_s = 2640 \text{ tr.min}^{-1}$
- Fréquence nominale de rotation du rotor : $N_N = 2610 \text{ tr.min}^{-1}$

Dans ce qui suit, on néglige :
- les résistances et inductances de fuites statoriques ;

- les pertes dans le fer ;
- les pertes mécaniques.

A.1 - Etude du fonctionnement nominal du moteur

A.1.1 - Déterminer le nombre p de paires de pôles du moteur sachant que la fréquence statorique nominale est $f_N = 88 \text{ Hz}$.

Pour le point nominal de fonctionnement :

A.1.2 - Calculer le glissement g_N .

A.1.3 - Calculer la puissance électrique P_N absorbée par le moteur et préciser la valeur de la puissance électromagnétique P_{TrN} transmise au rotor.

A.1.4 - Calculer le couple électromagnétique C_N .

A.1.5 - Exprimer les pertes par effet Joule au rotor p_{Jr} en fonction de P_{Tr} . Calculer P_{JrN} .

A.1.6 - Calculer la puissance utile P_{UN} développée par le moteur.

A.2 - Expression simplifiée du moment du couple électromagnétique

Pour chaque phase du moteur, on adopte le modèle équivalent monophasé simplifié de la figure 2.

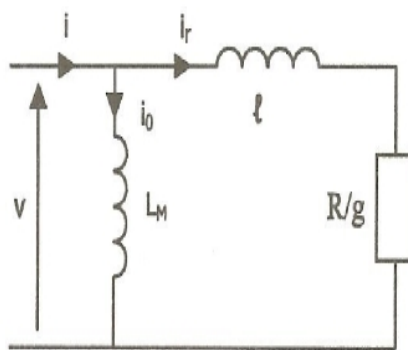


figure 2

- R/g est la résistance modélisant le transfert de puissance active au rotor

L_M est l'inductance magnétisante

l est l'inductance totale de fuites vue du stator

g est le glissement

v est une tension simple du réseau d'alimentation de valeur efficace V

i est l'intensité du courant de ligne

On donne $L_M = 26,6 \text{ mH}$ $l = 2,38 \text{ mH}$ $R = 0,147 \Omega$

A.2.1 - Calculer, sous alimentation nominale ($V = 338 \text{ V}$ et $f = 88 \text{ Hz}$), la valeur efficace I_0 du courant i_0 .

A.2.2 - A partir du modèle équivalent monophasé de la figure 2, exprimer la valeur efficace I_r du courant i_r en fonction de V , $l\omega$, R et g .

A.2.3 - Montrer que pour les faibles valeurs du glissement ($g \ll 1$), la relation

précédente devient :
$$I_r = \frac{V}{R} \cdot g$$

A.2.4 - Exprimer la puissance transmise au rotor P_{Tr} en fonction de I_r et de $\frac{R}{g}$

A.2.5 - En déduire alors que, pour les faibles valeurs du glissement, le moment du couple électromagnétique s'écrit : $C = K \cdot g$
Exprimer K en fonction de la tension efficace V , de la résistance R et de la vitesse de synchronisme Ω_s exprimée en rad.s^{-1} . Calculer la valeur numérique de K sous alimentation nominale ($V = 338 \text{ V}$ et $f = 88 \text{ Hz}$).

A.3 - Fonctionnement en traction

On envisage le cas où le moteur développe un couple électromagnétique $C = 170 \text{ N.m}$ en fonctionnant sous alimentation nominale ($V = 338 \text{ V}$ et $f = 88 \text{ Hz}$).

On supposera le glissement faible et on admettra les résultats suivants :

$$I_0 = 23 \text{ A} \qquad I_r = \frac{V}{R} \cdot g \qquad C = 8433 \cdot g$$

A.3.1 - Déterminer la valeur du glissement correspondant au fonctionnement étudié.

A.3.2 - En déduire la valeur de la fréquence de rotation du rotor N en tr.min^{-1} .

A.3.3 - Déterminer la valeur de I_r .

A.3.4 - On note ϕ_r le déphasage de I_r par rapport à la tension simple v prise comme référence des phases. En se reportant au modèle équivalent monophasé de la

figure 2, exprimer $\tan \phi$ en fonction de $\ell \omega$ et de $\frac{R}{g}$. En déduire que $\phi_r \approx 10,2^\circ$.

A.3.5 - La tension simple v étant toujours choisie comme référence des phases,

dessiner les vecteurs de Fresnel $\vec{I}_0$ et $\vec{I}_r$ associés aux courants i_0 et i_r (on adoptera l'échelle 5 A / cm).

A.3.6 - En déduire la construction du vecteur de Fresnel $\vec{I}$ associé à i .

A.3.7 - Déterminer alors graphiquement la valeur efficace I et le déphasage ϕ de i par rapport à v .

A.3.8 - Calculer la puissance électrique P reçue par le moteur dans ce cas de fonctionnement.

Solution EXO 8:

A.1. Etude du fonctionnement nominal du moteur

A.1.1. de $f = p \cdot \frac{n}{60}$ on tire $f_N = p \cdot \frac{n_s}{60}$ avec les notations du problème

$$\Rightarrow p = 60 \cdot \frac{f_n}{n_s} = 60 \cdot \frac{88}{2640} = 2$$

Le nombre de paire de pôle est de 2.

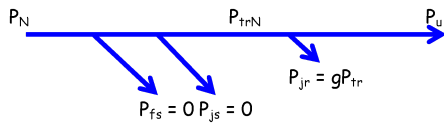
$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{2640 - 2610}{2640} = 0,01136$$

A.1.2. Par définition

Le glissement est donc $g = 1,14\%$

A.1.3. $P_n = \sqrt{3} \cdot U_N I_N \cos \varphi_N = \sqrt{3} \cdot 585 \times 35,4 \times 0,732 = 26,25 \text{ kW}$

Comme les pertes dans le fer et les pertes joules stator sont négligeables on aura



$$P_N = P_{trN} = 26,3 \text{ kW}$$

A.1.4. A partir de $P_{trN} = C_n \cdot \Omega_s = C_n \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n_s$ donc

$$C_n = \frac{P_{trN}}{\frac{2\pi}{60} \cdot n_s} = \frac{26,3 \cdot 10^3}{\frac{2\pi}{60} \cdot 2640} = 95,13 \text{ Nm}$$

Le couple nominal est donc $C_n = 95,13 \text{ Nm}$

A.1.5. On sait que les pertes joules stator valent

$$p_{jrN} = g_n P_{trN} = 0,01136 \times 26,3 \cdot 10^3 = 298 \text{ W}$$

Les pertes joules rotoriques sont donc de $p_{jrN} = 298 \text{ W}$

A.1.6. Les pertes mécaniques étant négligées, la puissance utile développée par le moteur est donnée par $P_{uN} = P_{trN} - p_{jrN} = 26300 - 298 = 26,0 \text{ kW}$.

La puissance utile développée par le moteur est donc $P_{uN} = 26,0 \text{ kW}$

A.2. Expression simplifiée du moment du couple électromagnétique

A.2.1. D'après le schéma on a $I_0 = \frac{V}{L_M \omega} = \frac{338}{26,6 \cdot 10^{-3} \times 2\pi \times 88} = 23,0 \text{ A}$.

Le courant magnétisant est donc $I_0 = 23,0 \text{ A}$

A.2.2. D'après le modèle on a $\underline{V} = \frac{R}{g} \underline{I}_r + j\ell\omega \underline{I}_r$ donc $I_r = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + (\ell\omega)^2}}$

A.2.3. Quand le glissement diminue on peut s'attendre à ce que $\frac{R}{g}$ devienne de plus en plus grand devant $\ell\omega$. En effet

$$\left(\frac{R}{g} = \frac{0,147}{0,01} = 14,7 \gg \ell\omega = 2,38 \cdot 10^{-3} \times 2\pi \times 88 = 1,31 \right)$$

Alors $I_r = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2}} = V \frac{g}{R}$ donc $I_r = V \frac{g}{R}$

A.2.4. On a $P_{tr} = 3 \frac{R}{g} I_r^2$ donc $P_{tr} = 3 \frac{R}{g} g^2 \frac{V^2}{R^2}$

A.2.5. En remplaçant $I_r = V \frac{g}{R}$ dans $P_{tr} = 3 \frac{R}{g} I_r^2$, on obtient $P_{tr} = 3 \frac{R}{g} g^2 \frac{V^2}{R^2}$

Soit $P_{tr} = 3g \frac{V^2}{R}$ et comme $P_{tr} = C \cdot \Omega_s$ donc $C = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} = 3g \frac{V^2}{R \cdot \Omega_s}$ de la forme

$C = k \cdot g$ avec $k = 3 \frac{V^2}{R \cdot \Omega_s} = 8433 \text{ Nm}$

A.3. Fonctionnement en traction

A.3.1. Avec $C = 8433 \cdot g$ et $C = 170 \text{ Nm}$ alors $g = \frac{C}{k} = \frac{170}{8433} = 2,02 \cdot 10^{-2}$ soit $g = 2,02 \cdot 10^{-2} = 2\%$

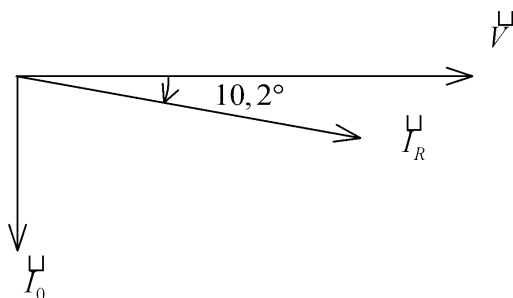
A.3.2. Alors $N = N_s (1 - g) = 2640 \times (1 - 0,0202)$ donc $N = 2587 \text{ tr/min}$

A.3.3. De $I_r = V \frac{g}{R} = 338 \times \frac{0,0202}{0,147}$ donc $I_r = 46,4 \text{ A}$

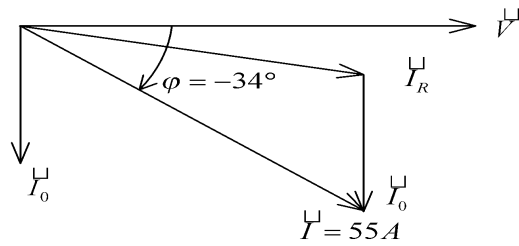
A.3.4. On voit que $\tan \varphi_r = \frac{\frac{l \omega}{R/g}}{\frac{g l \omega}{R}} = \frac{0,0202 \times 2,38 \cdot 10^{-3} \times 2\pi \times 88}{0,147} = 0,180$ soit $\varphi_r = \arctan 0,180 = 10,2^\circ$

A.3.5. Construction de Fresnel

$\vec{I}_0$ est de 23 A et en retard de 90° sur $\vec{V}$
 $\vec{I}_r$ est de 46,4 et en retard de $10,2^\circ$ sur $\vec{V}$
 avec l'échelle 5A/cm on a



A.3.6. De $i = i_0 + i_r$ donc $\vec{I} = \vec{I}_0 + \vec{I}_r$ d'où la construction ci dessous



A.3.7 On mesure sur la construction $I = 55\text{ A}$ et $\varphi = 34,5^\circ$

A.3.8. Avec $P = 3VI \cos \varphi = 3 \times 338 \times 55 \times \cos 34,5 = 45961$ on trouve donc $P = 46000\text{ W}$ (bien loin de P_{un})