

BTS Electrotechnique 2006

Physique Appliquée

Motorisation d'un tramway

Partie A : Etude d'un moteur de traction

Caractéristiques du moteur :

Tension nominale entre phases	$U_n = 585V$
Fréquence statorique nominale	$f_n = 88 \text{ Hz}$
Intensité nominale du courant statorique	$I_n = 35,4A$
Facteur de puissance nominal	$\cos \varphi_n = 0,732$
Fréquence nominale desynchronisme	$N_s = 2640 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$
Fréquence nominale de rotation du rotor	$N_n = 2610 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$

A.1. Etude du fonctionnement nominal du moteur

1.1. Nombre p de paires de pôles :

$$f = p \cdot n \rightarrow p = \frac{f_n}{N_s} \rightarrow \frac{88}{2640/60} = 2$$

1.2. Glissement g_n :

$$g_n = \frac{N_s - N_n}{N_s} = \frac{(2640 - 2610)}{2640} = 0,0114 \rightarrow 1,14\%$$

1.3. Valeur de la puissance absorbée P_n et puissance électromagnétique P_{Tm} :

$$P_n = U_n \cdot I_n \sqrt{3} \cdot \cos \varphi_n \rightarrow 585 \times 35,4 \times \sqrt{3} \times \cos 0,732 = 26256 \text{ W} \rightarrow 26,3 \text{ kW}$$

Comme les pertes dans le fer, les pertes mécaniques, aussi les résistances et inductances de fuites sont négligées, on aura

$$P_{Tm} = 26,3 \text{ kW}$$

1.4. Couple électromagnétique C_n :

$$P_{Tm} = C_n \times \frac{\pi N_s}{30} \rightarrow C_n = \frac{P_{Tm} \cdot 30}{\pi N_s} = \frac{26256 \times 30}{\pi \times 2640} = 95 \text{ Nm}$$

1.5. Pertes par effet Joule au rotor P_{jr} en fonction de P_r :

$$\rightarrow P_{jr} = g \cdot P_r \rightarrow P_{jm} = g_n \cdot P_{Tm} \rightarrow 0,114 \times 26300 = 299 \text{ W}$$

1.6. Puissance utile P_{un} :

Etant donné que les pertes mécaniques sont négligées, $P_u = P_{Tm} - P_{jr}$

$$\rightarrow P_{un} = P_{Tm} - P_{jm} \rightarrow 26300 - 299 = 26 \text{ kW}$$

A.2. Expression simplifiée du moment du couple électromagnétique

$$L_m = 26,6 \text{ mH} \quad L = 2,38 \text{ mH} \quad R = 0,147 \Omega$$

2.1. Valeur efficace I_0 :

$$V = 338 \text{ V} \quad \text{et} \quad f = 88 \text{ Hz}$$

$$I_0 = \frac{V}{L_m \omega} \rightarrow \frac{338}{(26,6 \cdot 10^{-3}) \times (2\pi \cdot 88)} = 23 \text{ A}$$

2.2. Exprimer la valeur efficace I_r en fonction de V, R, g et ω :

$$I_r = \frac{V}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + (L\omega)^2}}$$

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

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

2.4. Exprimer la puissance P_r en fonction de I_r et de $\frac{R}{g}$:

$$P_r = 3 \times \frac{R}{g} \cdot I_r^2 \rightarrow P_r = 3 \cdot \frac{R}{g} \cdot g^2 \frac{V^2}{R^2}$$

Donc $\rightarrow P_r = 3 \cdot g \cdot \frac{V^2}{R}$

2.5. Valeur de K en fonction de V, R et Ω_s :

$$P_r = C \cdot \Omega_s \rightarrow C = 3g \frac{V^2}{R \cdot \Omega_s} \text{ de la forme } C = K\Omega_s$$

$$\rightarrow K = \frac{3V^2}{R \Omega_s} \rightarrow K = \frac{(3 \cdot (338)^2)}{0,147 \times 276,32} = 8437 \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{rad}^{-1}$$

A.3. Fonctionnement en traction

3.1. Valeur du glissement :

$$I_0 = 23 \text{ A} \quad I_r = \frac{V}{R} \cdot g \quad C = 8433 \cdot g \quad C = 170 \text{ Nm}$$

$$170 = 8433 \times g \Rightarrow \frac{170}{8433} = g \rightarrow g = 0,02015 \rightarrow g = 2,02 \cdot 10^{-2}$$

3.2. Valeur de la fréquence de rotation N :

$$N = (1 - g) \cdot N_s \rightarrow (1 - 0,0202) \times 2640 = 2587 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$$

3.3 Valeur de I_r :

$$I_r = \frac{V}{R} \cdot g \rightarrow I_r = \frac{338}{0,147} \times 0,0202 = 46,4 \text{ A}$$

3.4. Exprimer $\tan \varphi_r$ en fonction de P_w et $\frac{R}{g}$:

$$\tan \varphi_r = \frac{P_w}{R/g} \rightarrow \tan \varphi_r = g \cdot \frac{P_w}{R}$$

$$\tan \varphi_r = 0,0202 \times \frac{(2,38 \cdot 10^{-3}) \cdot (2\pi 88)}{0,147} = 0,18$$

$$\rightarrow \varphi_r = 10,2^\circ$$

3.5. Construction de Fresnel :

$$\vec{I}_0 \text{ en retard de } 90^\circ \text{ sur } \vec{V}$$

$$\vec{I}_r \text{ en retard de } 10,2^\circ \text{ sur } \vec{V}$$

3.6. Vecteur de Fresnel $\vec{I}$:

$$\text{de } i = i_0 + i_r \rightarrow \vec{I} = \vec{I}_0 + \vec{I}_r$$

3.7. Valeur efficace I et déphasage φ :

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

3.8. Puissance P_{res} par le moteur :

$$P = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \rightarrow P = 3 \times 338 \times 55 \times \cos(34,5) = 46000 \text{ W}$$

Partie B : Performances mécaniques du tramway

B.1. Expression de la vitesse de rotation du rotor du moteur asynchrone en fonction de la vitesse de déplacement du tramway :

$$v = 3,6 \cdot \frac{D}{2} \cdot \Omega_{\text{roue}} \quad D = 0,52 \text{ m} ; r = 10 \text{ m} ; \Omega_{\text{roue}} = \frac{\Omega}{10} ; \eta = 1$$

$$\rightarrow \Omega = \frac{20}{3,60} v \rightarrow \Omega = \frac{20}{3,6 \times 0,52} v = 10,7 v \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

B.2. Performances maximales de la rame de tramway

B.2.1. Fonctionnement en régime permanent sur le plat

$$C_{R1} = 2,7 \cdot 10^4 \cdot M + 0,135 v$$

2.1.1. Document réponse n°2 :

$$\text{Pour } 60 \text{ tonnes} \rightarrow C_{R1} = 16,2 + 0,135 v$$

2.1.2. Vitesse maximale v_1 :

La vitesse maximale est $v_1 = 60 \text{ km/h}$

2.1.3. Valeur de C_1 , Ω_1 et P_1 :

$$\text{On déduit } C_1 = 24,3 \text{ Nm} ; \Omega_1 = 642 \text{ rad/s}$$

$$\text{Donc } P_1 = C_1 \cdot \Omega_1 \rightarrow P_1 = 24,3 \times 642 = 15600 \text{ W}$$

B.2.2. Fonctionnement en régime permanent sur une montée de pente 8%

2.2.1. Document réponse n°2 :

$$\text{Pour } M = 60 \text{ tonnes} \rightarrow C_{R2} = 144 + 0,135v$$

2.2.2. Vitesse maximale v_2 :

La vitesse maximale est $v_2 = 29 \text{ km/h}$

2.2.3. Valeur P_2 :

$$C_{R2} = 148 \text{ Nm et } \Omega_2 = 310 \text{ rad/s}$$

$$\rightarrow P_2 = C_{R2} \cdot \Omega_2 \rightarrow P_2 = 148 \times 310 = 45,9 \text{ kW}$$

B.2.3. Démarrage sur le plat

$$J = 4,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$C = 170 \text{ Nm}$$

$$C_R = 16,2 \text{ Nm}$$

2.3.1. Relation fondamentale de la dynamique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C - C_R$$

2.3.2. Vitesse de rotation :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{170 - 16,2}{4,4} \rightarrow \frac{C - C_R}{J} \rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = 35 \text{ rad/s}^2$$

2.2.3. Durée nécessaire au tramway :

Pour atteindre 25 km/h soit $\Omega = 267,5 \text{ rad/s}$ avec une accélération de $35 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$ constante, il faudra : $\frac{267,5}{35} = 7,6 \text{ s}$.

Partie C : Etude de l'onduleur

Réseau de 750V continu

C.1. Onduleur à commande pleine onde

1.1. Valeur de la tension v_{ao} :

Lorsque K_1 est fermé $v_{ao} = \frac{U_c}{2}$; K_4 est fermé $v_{ao} = -\frac{U_c}{2}$

1.2. Document réponse n°3 : Tracé de v_{bo} et v_{co} :

1.3. Document réponse n°3 : Tracé de $v_{an}(t)$:

1.4. Valeur efficace V_{an} :

$$V_{an}^2 \cdot \frac{T}{2} - \left(\frac{U_c}{3}\right)^2 [2+4] \cdot \frac{T}{6} \rightarrow V_{an} = \frac{\sqrt{2}}{3} U_c$$

1.5. Expression du fondamental $v_1(t)$ de la tension $v_{an}(t)$:

D'après le développement donné : $v_1(t) = \frac{2U_c}{\pi} \sin \omega t$

$$\text{Valeur efficace : } V_1 = \sqrt{2} \cdot \frac{U_c}{\pi} \rightarrow V_1 = \sqrt{2} \times \frac{750}{\pi} = 338 \text{ V}$$

C.2. Association onduleur - moteur de traction

$$L = 2,31 \text{ mH} \quad \text{et} \quad e_a(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega t - \psi)$$

$$V_1 = 338 \text{ V}; I_1 = 35,4 \text{ A}; \varphi_1 = 43^\circ; E = 309 \text{ V}; \psi = 6,2^\circ; f = 88 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad \omega = 553 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.1. Impédances Z_s et Z_r :

$$p_s = 5 \text{ p} \quad \text{et} \quad p_r = 7 \text{ p}$$

$$Z_s = L \cdot 5\omega \rightarrow Z_s = (2,31 \cdot 10^{-3}) \times [5(2\pi \cdot 88)] = 6,39 \Omega$$

$$Z_r = L \cdot 7\omega \rightarrow Z_r = (2,31 \cdot 10^{-3}) \times [7(2\pi \cdot 88)] = 8,94 \Omega$$

2.2. Valeurs efficaces I_s et I_r :

$$I_s = \frac{V_s}{Z_s} = \frac{V_1}{(Z_s \cdot 5)} = \frac{338}{(6,39 \cdot 5)} = 10,57 \text{ A}$$

$$I_r = \frac{V_r}{Z_r} = \frac{V_1}{(Z_r \cdot 7)} = \frac{338}{(8,94 \cdot 7)} = 5,4 \text{ A}$$

2.3. Couple électromagnétique:

$$\text{On déduit} \quad c(t) = \frac{3EI_1}{\Omega_s} \cos(\varphi_1 - \psi) \rightarrow c(t) = \frac{3 \times 309 \times 35,4}{276,32} \cos(43 - 6,2) = 95 \text{ Nm}$$

$$c'(t) = \frac{3E}{\Omega_s} (I_s - I_r) \sin(6\omega t)$$

La fréquence de $c'(t)$ est : $6 \times 88 = 528 \text{ Hz}$

L'amplitude de $c'(t)$ est : $\frac{3E}{\Omega_s} (I_s - I_r) = 17,4 \text{ Nm}$

2.4. Rapport $\frac{C'_{max}}{C}$:

$$\frac{C'_{max}}{C} = \frac{17,4}{95} = 0,18$$

L'importance du couple pulsatoire sera source de différentes nuisances sonore, mécanique d'où des pertes supplémentaires assez importantes. On cherchera à réduire les harmoniques proches du fondamental comme le décrit la suite du problème.

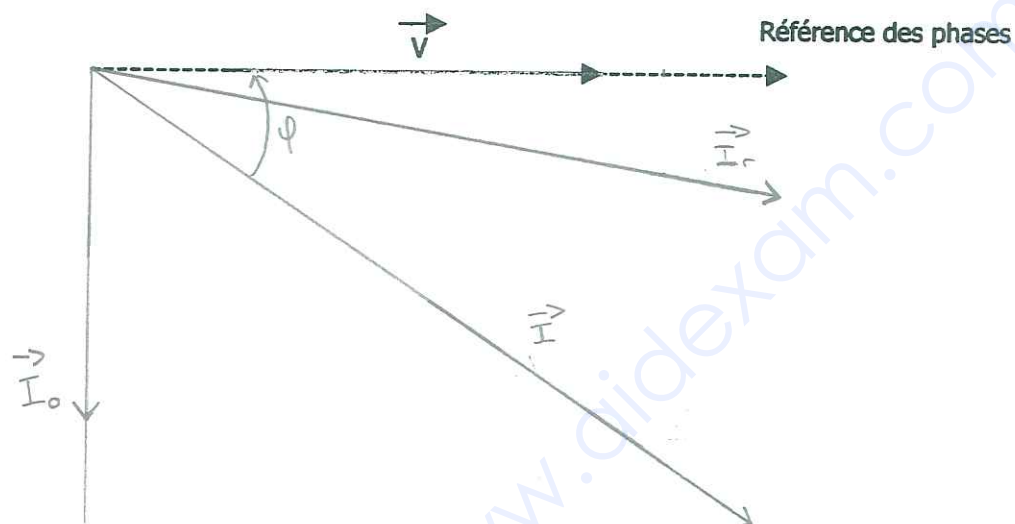
2.5. Rang harmonique de $v_{an}(t)$:

Le plus proche harmonique de $v_{an}(t)$ est le 18^{ème}.

Cette commande vis-à-vis du couple permettra la réduction du couple pulsatoire.

Document réponse n°1

Échelle : 1 cm pour 5 A



Document réponse n°2



Document réponse n°3

