

Conversion de puissance 3

Conversion électro-magnéto-mécanique

Compétences

- ❑ Exprimer l'énergie magnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable.
- ❑ Calculer la force électromagnétique s'exerçant sur une partie mobile en translation en appliquant l'expression fournie $F = \frac{\partial E}{\partial x})_i$.
- ❑ Sur l'exemple du relais, expliquer le fonctionnement d'un contacteur électromagnétique.
- ❑ Décrire la structure d'un moteur synchrone diphasé et bipolaire : rotor, stator, induit, inducteur.
- ❑ Exprimer, pour une machine de perméabilité infinie à entrefer constant, le champ magnétique dans l'entrefer généré par une spire passant dans deux encoches opposées.
- ❑ Expliquer qualitativement comment obtenir un champ dont la dépendance angulaire est sinusoïdale dans l'entrefer en associant plusieurs spires décalées.
- ❑ Justifier l'existence d'un champ glissant statorique lorsque les deux phases sont alimentées en quadrature.
- ❑ Justifier l'existence d'un champ glissant rotorique associé à la rotation de l'inducteur.
- ❑ Exprimer l'énergie magnétique totale stockée dans l'entrefer en fonction de la position angulaire du rotor.
- ❑ Calculer le moment électromagnétique s'exerçant sur le rotor en exploitant l'expression fournie $\Gamma = \frac{\partial E}{\partial \theta}$.
- ❑ Justifier la condition de synchronisme entre le champ statorique et le champ rotorique afin d'obtenir un moment moyen non nul.
- ❑ Discuter qualitativement la stabilité du système en fonction du déphasage entre les deux champs glissants.
- ❑ Expliquer la difficulté du démarrage et du contrôle de la vitesse d'un moteur synchrone.
- ❑ Établir les équations électriques vérifiées par les phases de l'induit en admettant les expressions des coefficients d'inductance ; donner les représentations de Fresnel associées.
- ❑ Justifier, à l'aide d'un bilan énergétique où seules les pertes cuivre sont envisagées, l'égalité entre la puissance électrique absorbée par les $f_{cém}$ et la puissance mécanique fournie.
- ❑ Décrire les conditions d'utilisation de la machine synchrone en alternateur.
- ❑ Citer des exemples d'application de la machine synchrone.
- ❑ Décrire la structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée : rotor, stator, induit, inducteur.
- ❑ Expliquer, par analogie avec le moteur synchrone, que le collecteur établit le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.
- ❑ Citer l'expression du moment du couple $\Gamma = \Phi i$ et établir l'expression de la force contre-électromotrice induite $e = \Phi \Omega$ par un argument de conservation énergétique.
- ❑ Décrire qualitativement les pertes existant dans une machine réelle : pertes cuivre, pertes fer, pertes mécaniques.
- ❑ Établir les équations électrique et mécanique.
- ❑ Tracer la caractéristique (Ω, Γ) à tension d'induit constante.
- ❑ Analyser le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment $-f\Omega$.
- ❑ faSignLanguage Mettre en œuvre un moteur à courant continu.
- ❑ Décrire les conditions d'utilisation de la machine à courant continu en génératrice.
- ❑ Choisir des conventions d'orientation adaptées.
- ❑ Citer des exemples d'application de la machine à courant continu.

Questions de cours des interrogations orales

- ❑ Déterminer le champ magnétique dans l'entrefer d'un contacteur électromagnétique en translation, puis en déduire la force s'exerçant sur la partie mobile, la formule $F_{ém} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x})_i$ étant fournie.

- ❑ Décrire la structure d'une machine synchrone et établir l'expression du champ magnétique créé dans l'entrefer par une spire d'un circuit électrique statorique.
- ❑ Le champ statorique glissant $\vec{B}_s(\theta) = k_s I_s \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta) \vec{e}_r$, le champ rotorique $\vec{B}_r(\theta) = k_r I_e \cos(\theta - \theta_r) \vec{e}_r$ et la formule $\Gamma_{\text{ém}} = \frac{\partial E}{\partial \theta_r}$ étant fournis, déterminer l'expression du couple électromagnétique moyen subi par le rotor.
- ❑ Représenter le schéma équivalent de l'induit en fonctionnement moteur et alternateur. Écrire la loi des mailles et la représenter sur un diagramme de Fresnel dans les deux cas.
- ❑ Présenter la machine à courant continu à l'aide d'un schéma. Expliquer l'intérêt et le fonctionnement du système balais-collecteurs.
- ❑ Énoncer la relation couple-courant pour une machine à courant continu. Établir la relation vitesse angulaire-tension pour une machine sans pertes. Présenter la chaîne énergétique pour un moteur à courant continu, en faisant apparaître tous les types de pertes.
- ❑ Présenter le modèle équivalent de l'induit d'un moteur à courant continu. En déduire la caractéristique (Ω, Γ) en régime stationnaire.

Entraînements

- ❑ [21.1](#) ❑ [21.2](#) ❑ [21.3](#) ❑ [21.4](#) ❑ [21.5](#) ❑ [21.6](#) ❑ [21.7](#) ❑ [21.8](#) ❑ [21.9](#) ❑ [21.10](#) ❑ [21.11](#) ❑ [21.12](#) ❑ [21.13](#)

Exercices

- ❑ [Exercice 1](#) ❑ [Exercice 2](#) ❑ [Exercice 3](#) ❑ [Exercice 4](#) ❑ [Exercice 5](#) ❑ [Exercice 6](#)
 ❑ [Exercice 7](#) ❑ [Exercice 8](#) ❑ [Exercice 9](#) ❑ [Exercice 10](#) ❑ [Exercice 11](#)

Devoirs maison

- ❑ DM 1

Résumé du cours

1. Contacteur électromagnétique en translation

1.1. Présentation

Le contacteur électromécanique en translation est composé de deux parties ferromagnétiques. Une partie est fixe, l'autre partie est mobile. Les deux parties sont séparées par deux entrefers.

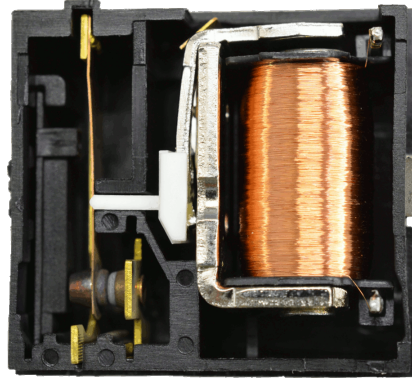


Fig. 1. – Contacteur électromécanique en translation

SCHÉMA : Contacteur électromécanique en translation

Le courant électrique crée un champ magnétique qui fait se déplacer la partie mobile.

Le contacteur électromécanique en translation est utilisé pour fabriquer un relais. Un relais est un interrupteur commandé par un courant électrique.

1.2. Inductance

Champ magnétique dans l'entrefer

1

Hypothèses :

- Le matériau ferromagnétique est doux, hors saturation.
- $\mu_r \gg 1$
- La section du circuit magnétique est constante.
- Les effets de bord sont négligés dans l'entrefer.

$$B = \frac{\mu_0 N i}{\frac{l_{\text{fixe}} + l_{\text{mobile}}}{\mu_r} + 2x}$$

Avec

- B le champ magnétique (T)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- μ_r la perméabilité magnétique relative du matériau ferromagnétique (sans unité)
- N le nombre de spires (sans unité)
- i le courant (A)
- l_{fixe} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique fixe (m)
- l_{mobile} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique mobile (m)
- x la largeur des entrefers (m)

Hypothèses :

- Le matériau ferromagnétique est doux, hors saturation.
- $\mu_r \gg 1$
- La section du circuit magnétique est constante.
- Les effets de bord sont négligés dans l'entrefer.

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S}{l_{\text{fixe}} + l_{\text{mobile}} + 2\mu_r x}$$

Avec

- L l'inductance propre (H)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- μ_r la perméabilité magnétique relative du matériau ferromagnétique (sans unité)
- N le nombre de spires (sans unité)
- l_{fixe} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique fixe (m)
- l_{mobile} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique mobile (m)
- x la largeur des entrefers (m)
- S la section du circuit magnétique (m^2)

1.3. Énergie et forces électromagnétique

Force électromagnétique

$$F_{\text{ém}} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} \Big|_i$$

Avec

- $F_{\text{ém}}$ la force électromagnétique s'exerçant sur la partie mobile (N)
- $\mathcal{E}$ l'énergie magnétique dans le système (J)
- x la largeur des entrefers (m)
- i le courant (A)

Force sur la partie mobile

Hypothèses :

- Le matériau ferromagnétique est doux, hors saturation.
- $\mu_r \gg 1$
- La section du circuit magnétique est constante.
- Les effets de bord sont négligés dans l'entrefer.

$$F_{\text{ém}} = - \frac{\mu_0 \mu_r^2 N^2 S i^2}{(l_{\text{fixe}} + l_{\text{mobile}} + 2\mu_r x)^2}$$

Avec

- $F_{\text{ém}}$ la force électromagnétique s'exerçant sur la partie mobile (N)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- μ_r la perméabilité magnétique relative du matériau ferromagnétique (sans unité)
- N le nombre de spires (sans unité)
- S la section du circuit magnétique (m^2)
- i le courant (A)
- l_{fixe} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique fixe (m)
- l_{mobile} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique mobile (m)
- x la largeur des entrefers (m)

La force électromagnétique est toujours attractive. La force électromagnétique tend à diminuer le volume des entrefers.

APPLICATION

Déterminer la force nécessaire pour forcer un portail fermé par un verrou magnétique. On donne $i = 20 \text{ mA}$, $\mu_r = 1 \cdot 10^5$, $N = 2000$, $S = 4 \text{ cm}^2$, $l_{\text{fixe}} + l_{\text{mobile}} = 30 \text{ cm}$.

2. Machine synchrone

2.1. Structure

La machine synchrone peut être utilisée comme un moteur ou comme un alternateur. La machine synchrone a un très bon rendement.

EXEMPLE

Des machines synchrones sont utilisées dans les TGV, certaines voitures électriques et les centrales de production électriques (hors éoliennes).

La machine synchrone est constituée d'une partie fixe, appelée stator et d'une partie mobile appelée rotor. Le stator est aussi appelé induit. Le rotor est aussi appelé inducteur.

Sur le rotor, un circuit électrique est enroulé orthogonalement à l'axe de rotation.

Sur le stator, plusieurs circuits électriques sont enroulés orthogonalement à l'axe de rotation. Sur une machine diphasée, il y a deux enroulements tournés de 90° l'un par rapport à l'autre.

Les circuits électriques peuvent donner naissance à plusieurs paires de pôles. Dans une machine bipolaire, chaque enroulement donne naissance à une seule paire de pôles.

Les circuits électriques se trouvent dans des encoches sur le matériau ferromagnétique. L'entrefer est très étroit.

SCHEMA : Structure d'une machine synchrone diphasée et bipolaire

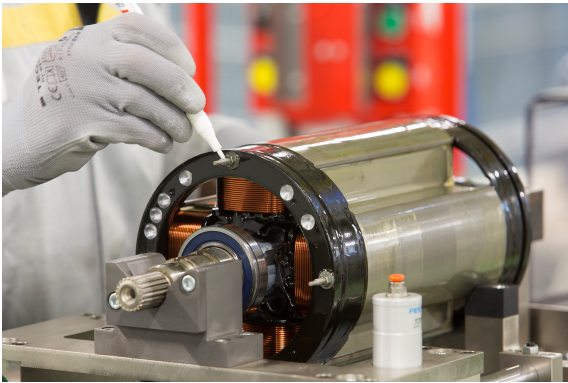


Fig. 2. – Stator du moteur synchrone d'une Renault Zoé.



Fig. 3. – Stator d'un alternateur de centrale nucléaire.

2.2. Champ statorique

Champ créé par une spire verticale dans l'entrefer

5

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.

$$\vec{B}_{s1}(\theta) = \begin{cases} \frac{\mu_0 i}{2e} \vec{e}_r & \text{si } \theta \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[\\ -\frac{\mu_0 i}{2e} \vec{e}_r & \text{si } \theta \in]\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}[\end{cases}$$

Avec

- B_{s1} le champ magnétique créé par le circuit statorique 1 dans l'entrefer (T)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- i le courant (A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (m)
- θ la seconde coordonnée du point en coordonnées cartésiennes (rad)

Un circuit statorique est constitué de plusieurs spires décalées dans l'espace. Ces spires sont placées de sorte que le champ créé soit sinusoïdal. Dans ces conditions, le champ magnétique créé par le circuit $\mathcal{C}_1$ est $\vec{B}_{s1} = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi e} i_1 \cos(\theta) \vec{e}_r$.

SCHEMA : Champ statorique créé par 3 spires d'un circuit statorique

Les deux circuits statoriques sont parcourus par des courants sinusoïdaux de même amplitudes en quadrature de phase $i_1 = I\sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$.

Champ glissant statorique

6

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Les deux circuits statoriques sont parcourus par des courants $i_1 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$.

$$\vec{B}_s = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi e} I_s \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta) \vec{e}_r$$

Avec

- B_s le champ magnétique créé par les deux circuits statoriques dans l'entrefer (T)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- N_s le nombre de spires de l'enroulement statorique (sans unité)
- I_s la valeur efficace du courant dans chacun des deux enroulements statoriques (A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (m)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (rad s^{-1})
- t le temps (s)
- θ la seconde coordonnée du point en coordonnées cartésiennes (rad)

Ce champ magnétique est appelé champ glissant car il tourne¹ à la pulsation ω dans le sens trigonométrique.

¹Pour être précis, la position du maximum de B_s tourne.

2.3. Champ rotorique

Le circuit rotorique est parcouru par un courant continu I_e appelé courant exciteur. Le champ produit par cet enroulement peut être trouvé par analogie avec le champ statorique.

Champ rotorique



Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .

$$\vec{B}_r(\theta) = \frac{2\mu_0 N_r}{\pi e} I_e \cos(\theta - \theta_r) \vec{e}_r$$

Avec

- B_r le champ magnétique créé par le circuit rotorique dans l'entrefer (T)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- N_r le nombre de spires de l'enroulement rotorique (sans unité)
- I_e l'intensité du courant (continu) dans le circuit exciteur (A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (m)
- θ la seconde coordonnée du point en coordonnées cartésiennes (rad)
- θ_r l'inclinaison du rotor (rad)

2.4. Énergie et couple

Connaissant le champ magnétique dans l'entrefer, il est possible d'en déduire l'énergie magnétique qui y est stockée et le couple électromagnétique exercé sur le rotor.

Moment électromagnétique

$$\Gamma_{\text{ém}} = \left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \theta_r} \right)_i$$

Avec

- $\Gamma_{\text{ém}}$ le moment électromagnétique exercé sur le rotor (Nm)
- $\mathcal{E}$ l'énergie magnétique dans le système (J)
- θ_r l'inclinaison du rotor (rad)

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Les deux circuits statoriques sont parcourus par des courants $i_1 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .

$$\Gamma_{\text{ém}} = \frac{4\sqrt{2}\mu_0 N_r N_s R h}{\pi e^2} I_s I_e \sin(\omega t - \theta_r)$$

Avec

- $\Gamma_{\text{ém}}$ le moment électromagnétique exercé sur le rotor (N m)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- N_r le nombre de spires de l'enroulement rotorique (sans unité)
- N_s le nombre de spires de l'enroulement statorique (sans unité)
- I_e l'intensité du courant (continu) dans le circuit exciteur (A)
- I_s la valeur efficace du courant dans chacun des deux enroulements statoriques (A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (m)
- R le rayon moyen de la machine (m)
- h la hauteur de la machine (m)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (rad s^{-1})
- t le temps (s)
- θ_r l'inclinaison du rotor (rad)

2.5. Condition de synchronisme

On s'intéresse au régime permanent, dans lequel le rotor tourne à une vitesse angulaire Ω constante. L'angle entre le rotor et le stator est donc une fonction affine du temps $\theta_r = \Omega t - \alpha$.

Couple moyen

9

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Les deux circuits statoriques sont parcourus par des courants $i_1 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant continu I_e .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.

$$\langle \Gamma_{\text{ém}} \rangle = \begin{cases} 0 & \text{si } \Omega \neq \omega \\ \frac{4\sqrt{2}\mu_0 N_r N_s R h}{\pi e^2} I_s I_e \sin(\alpha) & \text{si } \Omega = \omega \end{cases}$$

Avec

- $\Gamma_{\text{ém}}$ le moment électromagnétique exercé sur le rotor (N m)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- N_r le nombre de spires de l'enroulement rotorique (sans unité)
- N_s le nombre de spires de l'enroulement statorique (sans unité)
- I_e l'intensité du courant (continu) dans le circuit exciteur (A)
- I_s la valeur efficace du courant dans chacun des deux enroulements statoriques (A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (m)
- R le rayon moyen de la machine (m)
- h la hauteur de la machine (m)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (rad s^{-1})
- Ω la vitesse angulaire du rotor (rad s^{-1})
- α l'angle entre le rotor et le champ statorique (rad)

La condition $\Omega = \omega$ est appelée condition de synchronisme. Dans une machine synchrone, pour avoir un couple non nul, il est indispensable que la rotation du rotor soit synchrone avec la rotation du champ glissant.

Si $\alpha > 0$ le champ glissant est en avance sur le rotor. Le couple moyen subi par le rotor est positif, le fonctionnement est moteur.

Si $\alpha < 0$ le rotor est en avance sur le champ glissant. Le couple moyen subi par le rotor est négatif, le fonctionnement est générateur.

2.6. Stabilité du système

SCHÉMA : Courbe du couple moyen en fonction de α

Pour $\alpha \in]-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}[$, le système est stable : si le couple résistant augmente, le rotor ralentit brièvement, augmentant ainsi l'angle α entre rotor et champ tournant ; le couple moteur augmente alors pour s'ajuster au couple résistant.

Pour $\alpha > \frac{\pi}{2}$, le système est instable : si le couple résistant augmente, le rotor ralentit, augmentant ainsi l'angle α entre rotor et champ tournant ; le couple moteur diminue alors, ce qui empire encore la situation.

Si le couple résistant dépasse $\frac{4\sqrt{2}\mu_0 N_r N_s R h}{\pi e^2} I_s I_e$, le moteur décroche et le couple moyen devient alors nul.

2.7. Démarrage

La condition de synchronisme exige que la vitesse angulaire du rotor Ω soit égale à la pulsation du courant statorique ω pour avoir un couple non nul. Mais alors, comment faire démarrer un moteur synchrone initialement à l'arrêt ($\Omega = 0$) ? Il est possible de transformer le moteur synchrone en moteur asynchrone le temps du démarrage ou d'utiliser un système d'auto-pilotage qui asservit α à une valeur voulue pour augmenter progressivement la vitesse angulaire du rotor.

2.8. Modèle électrique de l'inducteur

L'enroulement rotorique est parcouru par un courant continu. Il n'est le siège d'aucun phénomène d'induction. La relation tension-courant s'écrit simplement $U_e = R_e I_e$ où R_e est la résistance des fils.

2.9. Modèle électrique de l'induit

Les enroulements statoriques sont le siège d'un phénomène d'induction.

Modèle électrique des enroulements statoriques

10

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Les deux circuits statoriques sont parcourus par des courants $i_1 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.

$$u_1(t) = R_s i_1 + L \frac{di_1}{dt} + E_1$$

$$u_2(t) = R_s i_2 + L \frac{di_2}{dt} + E_2$$

Avec

- u_1 la tension aux bornes de l'enroulement statorique 1 (V)
- u_2 la tension aux bornes de l'enroulement statorique 2 (V)
- i_1 le courant dans l'enroulement statorique 1 (A)
- i_2 le courant dans l'enroulement statorique 2 (A)
- R_s la résistance de chaque enroulement statorique (Ω)
- L l'inductance propre (H)
- $E_1 = \frac{d\Phi_1}{dt}$ la force contre-électromotrice dans l'enroulement statorique 1 (V)
- $E_2 = \frac{d\Phi_2}{dt}$ la force contre-électromotrice dans l'enroulement statorique 2 (V)
- Φ_1 le flux mutuel du circuit rotorique sur le circuit statorique 1 (Wb)
- Φ_2 le flux mutuel du circuit rotorique sur le circuit statorique 2 (Wb)

SCHÉMA : Schéma équivalent de l'induit

Flux induit du rotor sur le stator

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Les deux circuits statoriques sont parcourus par des courants $i_1 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.

$$\Phi_1 = \frac{4\mu_0 N_r N_s I_e R h}{\pi e} \cos(\omega t - \alpha)$$

$$\Phi_2 = \frac{4\mu_0 N_r N_s I_e R h}{\pi e} \cos\left(\omega t - \alpha + \frac{\pi}{2}\right)$$

Avec

- Φ_1 le flux mutuel du circuit rotorique sur le circuit statorique 1 (Wb)
- Φ_2 le flux mutuel du circuit rotorique sur le circuit statorique 2 (Wb)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (H m^{-1})
- N_r le nombre de spires de l'enroulement rotorique (sans unité)
- N_s le nombre de spires de l'enroulement statorique (sans unité)
- I_e l'intensité du courant (continu) dans le circuit excitateur (A)
- R le rayon moyen de la machine (m)
- h la hauteur de la machine (m)
- e l'épaisseur de l'entrefer (m)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (rad s^{-1})
- α l'angle entre le rotor et le champ statorique (rad)

L'angle de pilotage est $\Psi = \frac{\pi}{2} - \alpha$.

SCHÉMA : Angle de pilotage

La loi des mailles peut être représentée sur un diagramme de Fresnel².

²Dans ce contexte, le diagramme de Fresnel est parfois appelé diagramme de Behn-Eschenburg

2.10. Rendement et puissance

Le moteur synchrone reçoit de la puissance sous forme électrique. Une partie est dissipée par effet Joule, le reste est transformée en puissance électromagnétique puis en puissance mécanique.

Transfert de puissance électrique - mécanique

♥ 11

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Les deux circuits statoriques sont parcourus par des courants $i_1 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I_s \sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.
- Les seules pertes considérées sont les pertes cuivre.

Avec

- $P_{\text{ém}}$ la puissance moyenne reçue par les forces contre-électromotrices (W)
- $P_{\text{méca}}$ la puissance mécanique moyenne fournie par le moteur (W)

$$P_{\text{ém}} = P_{\text{méca}}$$

Il est possible de réaliser un bilan de puissance plus complet faisant apparaître toutes les formes de pertes.

SCHÉMA : Transfert de puissance électrique - mécanique

2.11. Fonctionnement en alternateur

Lorsqu'une machine synchrone fonctionne en alternateur, un système extérieur met le rotor en rotation, ce qui crée une force électromotrice dans les circuits induits.

En fonctionnement alternateur, le rotor « entraîne » le champ glissant. En fonctionnement alternateur, le couple subi par le rotor est négatif donc $\alpha < 0$.

Si les courants dans les deux circuits induits sont identiques, on dit que l'alternateur est équilibré.

Si l'alternateur est équilibré, les relations vues précédemment sont valables en fonctionnement alternateur comme en fonctionnement moteur.

On définit la force électromotrice $-E_1$ l'opposé de la force contre-électromotrice.

SCHÉMA : Schéma équivalent et diagramme de Fresnel en fonctionnement générateur

3. Machine à courant continu

3.1. Structure

La machine à courant continu est constituée d'un stator, aussi appelé inducteur³ sur lequel est enroulé un circuit électrique et d'un rotor, aussi appelé induit sur lequel sont enroulés plusieurs circuits électriques indépendants.

EXEMPLE

Les machines à courant continu sont utilisées pour les petits équipements de voiture (essuie-glaces, vitres, rétroviseurs, ...), dans la plupart des appareils électroménagers et comme dynamo sur les anciennes bicyclettes.

Les enroulements rotorique et statorique sont parcourus par des courants continus I_r et I_e respectivement.

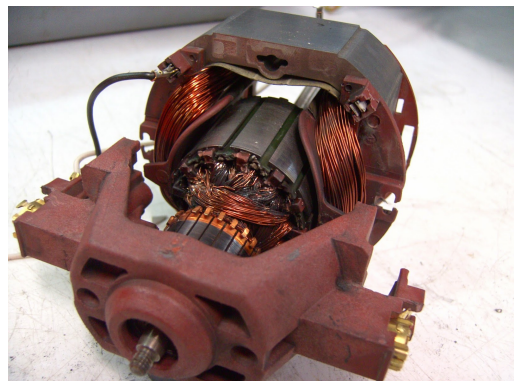
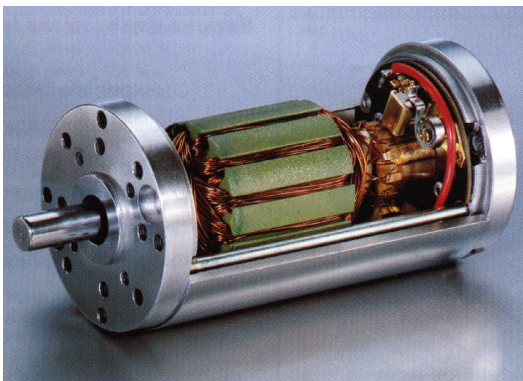


Fig. 4. – Photographies de machines à courant continu dont on a retiré le capot.

SCHÉMA : Schéma en couple d'une machine à courant continu

Dans une machine bipolaire, chaque enroulement donne naissance à une seule paire de pôles.

Dans une machine à excitation séparée, les circuits rotoriques et statoriques sont séparés.

³La correspondance induit/inducteur - rotor/stator est inversée par rapport à la machine synchrone.

Par analogie avec la machine synchrone, l'interaction entre le champ induit et le champ inducteur donne lieu à un couple électromagnétique subi par le rotor si la condition de synchronisme est vérifiée.

Couple électromagnétique

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est diphasée et bipolaire.
- Le circuit statorique est alimenté par un courant I_e .
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant continu I_r .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.

$$\Gamma_{\text{ém}} = K I_e I_r \sin \alpha$$

Avec

- $\Gamma_{\text{ém}}$ le moment électromagnétique exercé sur le rotor (Nm)
- K la constante de couplage de la machine à courant continu (Nm A^{-2})
- I_e l'intensité du courant (continu) dans le circuit exciteur (A)
- I_r l'intensité du courant (continu) dans le circuit rotorique (A)
- α l'angle entre le rotor et le champ statorique (rad)

3.2. Système balais-collecteurs

Pour faire en sorte que la condition de synchronisme soit toujours vérifiée et pour maximiser le couple électromagnétique, le système balais-collecteurs est utilisé. Parmi tous les enroulements rotoriques, le système balais-collecteurs fait passer du courant dans celui qui forme un angle $\alpha = \frac{\pi}{2}$ avec le stator.

Le système balais-collecteurs est constitué de collecteurs solidaires du rotor et reliés à chacun des enroulements rotoriques et de balais⁴ qui sont solidaires avec le stator. Les balais frottent sur les collecteurs et connectent celui qui correspond au bon enroulement rotorique.

Le lien ci-dessous mène à une animation illustrant le fonctionnement du système balais-collecteurs.



<https://youtu.be/LAtPHANefQo?feature=shared>



Fig. 5. – Collecteurs

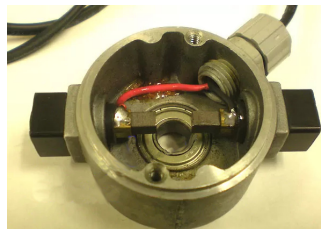


Fig. 6. – Balais

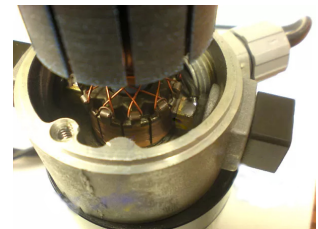


Fig. 7. – Système balais-collecteurs

Le frottement des balais sur les collecteurs dégrade le rendement de la machine à courant continu et use les balais, qu'il faut changer régulièrement.

3.3. Relations entre grandeurs électriques et grandeurs mécaniques

Par analogie avec la machine synchrone, le couple électromagnétique subi par le rotor est proportionnel au courant rotorique.

⁴Les balais sont aussi appelés charbon car ils sont souvent constitués de graphite.

Couple électromagnétique d'une machine à courant continu



Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est bipolaire à excitation séparée.
- Le circuit statorique est alimenté par un courant I_e .

Avec

- $\Gamma_{\text{ém}}$ le moment électromagnétique exercé sur le rotor (Nm)
- Φ_0 la constante de couplage (Wb)
- I_r l'intensité du courant (continu) dans le circuit rotorique (A)

$$\Gamma_{\text{ém}} = \Phi_0 I_r$$

APPLICATION

12

Vérifier l'homogénéité de la relation ci-dessus.

APPLICATION

13

Pour réaliser un treuil, on utilise un moteur à courant continu de constante de couplage 0.11 Wb pour faire tourner un réducteur de rapport de transmission $\frac{1}{100}$ qui fait à son tour tourner une poulie de rayon 3 cm sur lequel est enroulé un câble. Sachant que le moteur à courant continu a un courant maximum de 6 A, quelle masse maximale le treuil peut-il soulever ?

La conservation de l'énergie dans une machine sans perte permet d'en déduire le lien entre force contre-électromotrice et vitesse angulaire.

Force contre-électromotrice d'une machine à courant continu

14

Hypothèses :

- L'entrefer a une épaisseur constante.
- Les matériaux ferromagnétiques sont doux, hors saturation et de perméabilité magnétique infinie.
- La machine est bipolaire à excitation séparée.
- Le circuit statorique est alimenté par un courant I_e .
- La machine ne comporte pas de pertes.

Avec

- $E_{\text{cém}}$ la force contre-électromotrice dans le circuit rotorique (V)
- Φ_0 la constante de couplage (Wb)
- Ω la vitesse angulaire du rotor (rad s^{-1})

$$E_{\text{cém}} = \Phi_0 \Omega$$

APPLICATION

15

Le moteur de treuil de l'application précédente a une tension d'alimentation de 12 V. À quelle vitesse maximale le câble s'enroule-t-il ?

3.4. Pertes

Les bilans énergétiques aux différentes étapes de conversion peuvent être représentés sur un schéma.

SCHÉMA : Pertes aux différentes étapes de conversion en régime stationnaire

3.5. Modèle électrique

Comme pour la machine synchrone, le modèle électrique de l'inducteur ne se compose que d'une résistance parcourue par un courant constant.

Le modèle équivalent de l'induit est le même que pour la machine synchrone, mais il n'y a qu'un seul circuit.

SCHÉMA : Modèle électrique de l'induit

Il est possible de déduire de ce modèle la caractéristique couple-vitesse angulaire lorsque la tension d'alimentation du moteur est constante.

APPLICATION

16

Déterminer la relation entre le couple Γ et la vitesse angulaire Ω en régime stationnaire. Tracer Ω en fonction de Γ .

3.6. Démarrage

Le moteur à courant continu n'a pas besoin d'aide pour démarrer, c'est même là que son couple est le plus important. En revanche, ce couple important se traduit aussi par un courant important, qu'il peut être souhaitable de limiter.

APPLICATION

17

On considère un moteur dont le rotor est lié à une hélice de bateau subissant un frottement fluide de couple $-f\Omega$ mais pas de frottements solides. On note J le moment d'inertie du système {rotor + hélice}. Déterminer 4 relations liant les grandeurs électriques ($E_{\text{cém}}$ et I_r) et mécaniques (Γ et Ω).

APPLICATION

18

Pour un moteur à courant continu soumis à un frottement fluide $-f\Omega$, présenter un schéma bloc résumant les relations entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques.

3.7. Fonctionnement générateur

La machine à courant continu peut être utilisée en fonctionnement générateur, on parle alors de dynamo. En fonctionnement générateur, le champ statorique induit une tension dans l'enroulement rotorique.

EXEMPLE

Les dynamos étaient utilisées pour générer l'électricité dans les voitures jusqu'aux années 60 et dans les bicyclettes jusqu'aux années 1990. Les dynamos ne sont quasiment plus utilisées en raison de leur mauvais rendement comparé aux alternateurs.

En fonctionnement générateur, on adopte préférentiellement la convention générateur, en posant $E_{\text{cém}} = -E_{\text{ém}}$.

SCHÉMA : Schéma équivalent en fonctionnement générateur

Méthodes

1. Représenter la loi des mailles sur un diagramme de Fresnel

1. Écrire la loi des mailles en utilisant les notations complexes.
2. Chaque tension correspond à un vecteur sur le diagramme de Fresnel. La norme du vecteur est la valeur efficace de la tension, et l'angle du vecteur avec l'horizontale est l'argument de la tension complexe.
3. Une multiplication par j correspond à une rotation de 90° dans le sens trigonométrique.
4. Pour représenter une somme de tensions, on place les vecteurs bout à bout.

Exercices

1. Fonctionnement réversible d'un moteur électrique

En Python, le nombre complexe i s'écrit `1j`. L'exponentielle complexe peut être la fonction `exp` du module `cmath`. Le module est réalisé par la fonction `abs`.

À l'aide de Python, déterminer la tension efficace aux bornes d'un moteur synchrone diphasé dipolaire dans chacun des cas suivants. On sommerait les amplitudes complexes résultant de la loi des mailles.

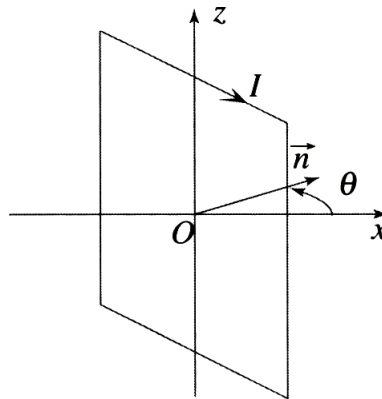
1/ La force contre-électromotrice induite efficace est 250 V , la résistance de l'induit est négligeable, l'inductance de l'induit est 0.10 H , la fréquence de rotation est 3000 min^{-1} et le courant est 10 A . L'angle de pilotage est nul. Le calcul effectué par Python pourra être vérifié à la main de ce premier cas simple.

2/ La force contre-électromotrice induite efficace est 250 V , la résistance de l'induit est négligeable, l'inductance de l'induit est 0.1 H , la fréquence de rotation est 3000 min^{-1} et le courant est 10 A . L'angle de pilotage vaut 30° .

3/ La force contre-électromotrice induite efficace est 250 V , la résistance de l'induit est $0.1\ \Omega$, l'inductance de l'induit est 0.1 H , la fréquence de rotation est 3000 min^{-1} et le courant est 10 A . L'angle de pilotage vaut 30° .

2. Couple de mutuelle et règle du flux maximal

Une spire rectangulaire de centre O , de section S , parcourue par un courant d'intensité I et qui peut tourner librement autour de l'axe (Oz) est représentée ci-contre. La position angulaire de la spire est repérée par l'angle θ entre $\vec{e}_x$ et $\vec{n}$, vecteur normal à la spire, orienté conjointement à I .



Cette spire est située à l'intérieur d'un solénoïde de grande dimension, comportant n spires par unité de longueur parcourues par un courant d'intensité I' , non représenté sur la figure, dont l'axe de symétrie de révolution est confondu avec l'axe (Ox) .

1/ Déterminer l'inductance mutuelle M entre les deux circuits.

2/ On note L et L' , les inductances propres respectives de la spire et du solénoïde. Donner l'énergie électromagnétique $\mathcal{E}_{\text{ém}}$ stockée dans ces deux circuits.

3/ Le solénoïde étant fixe, calculer le couple électromagnétique $\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{ém}}}{\partial \theta} \right)_{I, I'}$ que subit la spire.

4/ La règle du flux maximal stipule que les actions électromagnétiques agissent sur un circuit mobile de telle sorte qu'il soit traversé par un flux maximal. Vérifier que le système formé par la spire et le solénoïde suit bien cette règle.

3. Détermination des paramètres d'un moteur synchrone

On étudie un moteur synchrone diphasé, monopolaire, dont on cherche à déterminer les principaux paramètres.

Le circuit rotorique est parcouru par le courant d'excitation continu d'intensité I_e maintenu constant pendant tous les essais.

Le circuit diphasé statorique est parcouru par deux courants sinusoïdaux de pulsation ω , déphasé de $\frac{\pi}{2}$, de valeurs efficaces identiques égales à I .

1/ En régime permanent de rotation, quelle est la relation entre la vitesse de rotation du rotor Ω et ω ?

On désigne par L l'inductance d'une phase et on néglige la résistance des enroulements. En régime permanent de rotation, on note $\underline{U}$ la représentation complexe de la tension d'alimentation de la phase, $\underline{I}$ celle de l'intensité du courant et $\underline{E}$ celle de la force contre-électromotrice.

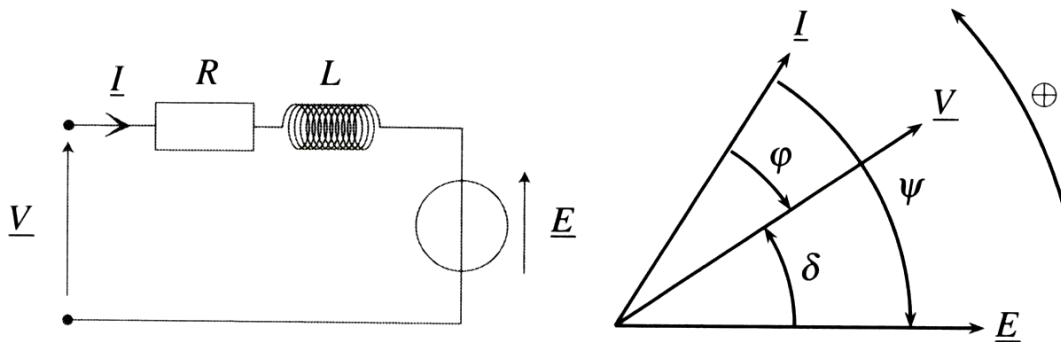
2/ Rappeler le schéma électrique d'une phase en fonctionnement moteur et en fonctionnement générateur.

3/ La valeur efficace de la force contre-électromotrice s'écrit sous la forme $E = \Phi\Omega$. Que représente la grandeur Φ ? De quels paramètres dépend-elle ?

4/ Afin de mesurer Φ , on réalise un essai en circuit ouvert, le rotor de la machine synchrone étant entraîné par un moteur auxiliaire à la vitesse de $6.0 \cdot 10^3 \text{ min}^{-1}$, on mesure la tension efficace aux bornes d'une phase égale à $1.2 \cdot 10^2 \text{ V}$. Calculer la valeur de Φ .

5/ Pour mesurer la valeur de l'inductance d'une phase, on réalise un essai en court-circuit, le rotor étant toujours entraîné par le moteur auxiliaire à $6.0 \cdot 10^3 \text{ min}^{-1}$. Le dipôle de sortie d'une phase étant court-circuité, la mesure de l'intensité efficace du courant de court-circuit dans une phase donne la valeur $I_{cc} = 1.2 \cdot 10^2 \text{ A}$. Calculer l'inductance L d'une phase.

4. Étude d'un moteur synchrone ★



Afin de simplifier l'étude, les pertes mécaniques ainsi que les pertes fer du moteur seront négligées. Le moteur est une machine synchrone diphasée dont les deux enroulements statoriques sont identiques.

Toutes les valeurs de tension et courant données le sont en valeur efficace.

L'inducteur du moteur synchrone est à aimants permanents et possède 8 pôles, soit 4 paires de pôles. En régime permanent de vitesse, la condition de synchronisme pour un moteur possédant p paires de pôles s'écrit $\omega = p\Omega$, où Ω désigne la vitesse de rotation du rotor en rad s^{-1} .

Chaque bobinage du stator possède une résistance $R = 0.03 \Omega$. L'intensité nominale du courant dans un enroulement du stator est $I_N = 155 \text{ A}$. Pendant une durée limitée, elle peut atteindre la valeur maximale $I_M = 185 \text{ A}$. La machine est étudiée en convention récepteur. Le modèle équivalent à une phase de l'induit est représenté ci-contre. Les tensions et courants sont sinusoïdaux de pulsation $\omega = 2\pi f$ constante.

Afin de déterminer les paramètres du modèle, divers essais sont effectués :

essai n°1 sur un banc d'essai, on entraîne la machine synchrone à vide par l'intermédiaire d'un moteur auxiliaire à la vitesse $n = 1500 \text{ min}^{-1}$. Aux bornes d'une phase, on a mesuré une tension de 57 V .

essai n°2 avec une alimentation électrique appropriée, on effectue un essai de la machine en moteur à 1500 min^{-1} , pour lequel l'angle de pilotage vaut $\Psi = 0$, $I = I_M$ et $V = 72 \text{ V}$.

- 1/ Déterminer la fréquence des tension statoriques quand $n = 1\,500\text{ min}^{-1}$. 2/ Représenter le diagramme vectoriel relatif à l'essai n°2. La résistance R n'étant **pas** négligée, en déduire la valeur numérique de L .
- 3/ La valeur efficace de la force contre-électromotrice E a pour expression $E = \Phi_0 \omega$. Quelle est l'unité de la constante Φ_0 dans le système SI ? Que représente-t-elle ? De quels paramètres de la machine dépend-elle ? Montrer que $E = A\Omega$, où A est une constante dont on précisera l'expression et la valeur numérique.
- 4/ Dans toute la suite, on négligera la chute de tension ohmique ainsi que les pertes par effet Joule dans les circuits statoriques. Tracer un diagramme vectoriel représentatif d'un point de fonctionnement quelconque dans le cas où $0 < \Psi < \frac{\pi}{2}$. En déduire une relation entre V , E , φ et Ψ .
- 5/ Déterminer l'expression de la puissance électrique P_a absorbée par le moteur en fonction de V , I et φ , puis en fonction de E , I et Ψ . Quelle relation existe-t-il entre cette puissance électrique P_a et la puissance mécanique électromagnétique P_m reçue par le rotor ?
- 6/ Exprimer le couple électromécanique C développé par le moteur en fonction de A , I et Ψ . Pour une intensité efficace I donnée, que doit-on faire pour maximiser le couple développé par la machine ? De quelle unique variable le couple dépend-il alors ? À quelle autre moteur ce fonctionnement fait-il penser ?
- 7/ On se place sur un point de fonctionnement à $\Psi = 0$, $I = I_N$ et $n = 1\,500\text{ min}^{-1}$. Que vaut le moment du couple C développé par le moteur ? Représenter le diagramme vectoriel représentatif du fonctionnement. Placer les vecteurs représentatifs des complexes $\underline{E}$, $\underline{V}$ et $\underline{I}$. En déduire les expressions numériques de V et φ . Calculer leurs valeurs numériques correspondantes.

5. Alternateur d'une centrale hydroélectrique

Une machine turbine hydraulique est accouplée à une machine synchrone qui fonctionne en alternateur, le groupe turbine-alternateur fournit de l'énergie au réseau.

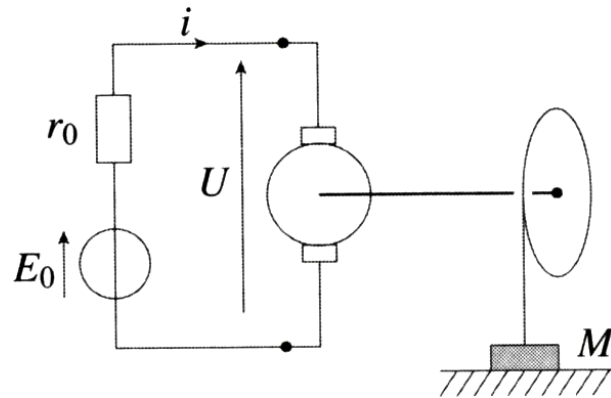
Les caractéristiques de la machine synchrone diphasée sont les suivantes :

- puissance apparente nominale⁵ $S_n = 65\text{ MV A}$
- tension nominale aux bornes d'une phase $V_n = 10\text{ kV}$
- fréquence des courants statoriques imposée par le réseau $f = 50\text{ Hz}$
- résistance d'une phase statorique $R = 0.01\ \Omega$
- la fém à vide dépend du courant d'excitation selon la relation $E = kI_e$ avec $k = 290\text{ V A}^{-1}$
- courant de court-circuit $I_{cc} = 300I_e$

- 1/ Calculer l'intensité du courant d'induit nominal.
- 2/ Calculer la résistance synchrone $X = L\omega$ de chaque enroulement.
- 3/ Fonctionnement en charge. L'intensité du courant d'excitation vaut $I_e = 44\text{ A}$, la tension efficace aux bornes d'une phase est 8.64 kV et le facteur de puissance du réseau vaut $\cos(\varphi) = 0.9$ arrière (charge inductive). Représenter le schéma électrique d'une phase en négligeant la résistance R .
- 4/ Représenter la loi des mailles sur un diagramme de Fresnel. Montrer que $(V \cos(\varphi))^2 + (V \sin(\varphi) + IX)^2 = E^2$. En déduire l'intensité efficace du courant dans une phase statorique.
- 5/ Calculer la puissance fournie au réseau et le rendement de l'alternateur sachant que l'ensemble des pertes mécaniques, ferromagnétiques et d'excitation valent $P_p = 2.4\text{ MW}$.

⁵Les grandeurs nominales sont les grandeurs pour lesquelles la machine est conçue pour fonctionner de façon optimale.

6. DC motor lifting a mass ★★



A DC machine of coupling constant Φ_0 , of internal resistance r and of inductance L is used to lift a mass M . The axis of the rotor is connected to a pulley of radius a . On the pulley is fixed a string on which a mass is attached.

A friction couple $\Gamma_f = -f\Omega$ apply on the rotor. The moment of inertia of the system {rotor + pulley} is J . Hysteresis and Foucault currents are neglected.

The mass is lifted at a constant speed v_0 .

1/ Ascertain the current i and the voltage E_0 delivered by the generator as a function of M , g , a , Φ_0 , f , r , r_0 .

7. Rendement d'une génératrice à courant continu

Une génératrice à courant continu de constante de couplage $\varphi_0 = 0.12 \text{ Wb}$, de résistance interne $r = 0.45 \Omega$, d'inductance propre $L = 20 \text{ mH}$ et dont les valeurs nominales de tension et courant sont $U_n = 40 \text{ V}$ et $I_n = 6 \text{ A}$, est utilisée pour alimenter une charge électrique symbolisée par une résistance $R_c = 3 \Omega$.

On néglige les pertes mécaniques.

La machine est entraînée par une turbine qui exerce sur son rotor un couple de moment $\Gamma_t = 0.5 \text{ N m}$. La MCC tourne à la vitesse de rotation $\Omega > 0$.

1/ Représenter le schéma électrique de l'induit alimentant la charge électrique (on placera la machine à courant continu en convention générateur). Préciser l'expression du couple électromagnétique qui s'exerce sur la machine en fonction de Φ_0 et i .

2/ Calculer les valeurs de l'intensité du courant dans la charge et la vitesse de rotation de la machine.

3/ Définir puis calculer le rendement de conversion de la machine? La machine fonctionne-t-elle dans les conditions nominales ?

8. 😊 J'explique à mon frère : Fonctionnement réversible d'un moteur électrique

Le but de cet exercice est de vous faire expliquer un concept/phénomène avec des mots simples et courants (pas de vocabulaire technique ou scientifique) à une personne de votre entourage. Tachez de faire simple et court, utilisez des analogies avec des choses connues. Vous pouvez vous inspirer de Ma thèse en 180 secondes. Profitez-en pour prendre des nouvelles !

Dans une voiture électrique, lors du freinage, une partie de l'énergie est récupérée pour recharger la batterie.

Comment se fait-il que le moteur électrique puisse récupérer l'énergie ?

9. 😊 J'explique à ma sœur : Étincelles dans un moteur

Le but de cet exercice est de vous faire expliquer un concept/phénomène avec des mots simples et courants (pas de vocabulaire technique ou scientifique) à une personne de votre entourage. Tachez de faire simple et court, utilisez des analogies avec des choses connues. Vous pouvez vous inspirer de Ma thèse en 180 secondes. Profitez-en pour prendre des nouvelles !



<https://www.youtube.com/shorts/V8N7XT0DR6g>

Le moteur de mon mixeur fait des étincelles. Dois-je m'en débarrasser ?

10. 🤔 Rendement d'un moteur

Cet exercice est un problème ouvert. Il nécessite de prendre des initiatives et de faire des choix dans la modélisation. Des approximations et des estimations sont souvent nécessaires pour arriver à une solution.

La plaque signalétique d'un moteur à courant continu indique les caractéristiques suivantes :



16015 ANGOULEME Cedex FRANCE MADE IN FRANCE

LR 57008

2102718.A





DATE

01/09/99

TYPE: LSK 1604 S 02

N° 7000000 / 001

M 249 Kg

Classe / Ins class H

IM 1001 IP 23s IC 06

M / Rated torque 810 N.m

Alt. 1000 m Temp. 40 °C

kW min⁻¹

V A V A

Nom./Rat. 36,3 1150

440 95,5 360 3

T Système peinture: I

Induit / Arm.

Excit. Field

SEPARÉE

Service/Duty

S1 DE 6312 2RS C3 NDE 6312 2RS C3

Calculer le rendement du moteur lorsqu'il fonctionne à sa puissance nominale.

11. 🤔 Pertes fer ★★★

Cet exercice est un problème ouvert. Il nécessite de prendre des initiatives et de faire des choix dans la modélisation. Des approximations et des estimations sont souvent nécessaires pour arriver à une solution.

La plaque signalétique d'un moteur à courant continu indique les caractéristiques suivantes :

							
16015 ANGOULEME Cedex FRANCE MADE IN FRANCE							
LR 57008		MOTEUR A COURANT CONTINU		DATE			
2102718.A		DIRECT CURRENT MOTOR		01/09/99			
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 7000000 / 001		M 249 Kg			
Classe / Ins class H		IM 1001	IP 23s	IC 06			
M / Rated torque 810 N.m		Alt. 1000 m	Temp. 40 °C				
kW min ⁻¹		V A	V A				
Nom./Rat. 36,3 1150		440 95,5	360 3				
T Système peinture: I		Induit / Arm.		Excit. Field SEPARÉE			
Service/Duty S1		DE 6312 2RS C3		NDE 6312 2RS C3			

Montrer que les pertes fer sont négligeables devant les pertes cuivre dans les conditions nominales.