


Conversion de puissance 3

Conversion électro-magnéto-mécanique

COMPÉTENCES

A la fin de ce chapitre, je saurai :

- 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 $F = \left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_i$.
- 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_{cem} 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 $-f\Omega$.
-  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.

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.

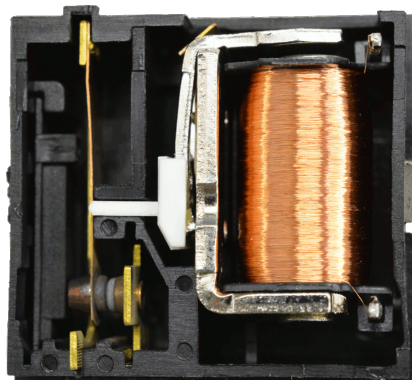


FIG. 1 : Le relais électromécanique utilise le courant passant dans le bobinage pour ouvrir ou fermer un interrupteur.

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



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.

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

Avec

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

Inductance propre



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 (en H)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- μ_r la perméabilité magnétique relative du matériau ferromagnétique (sans unité)
- l_{fixe} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique fixe (en m)
- l_{mobile} la longueur du circuit magnétique dans le milieu ferromagnétique mobile (en m)
- x la largeur des entrefers (en m)
- N le nombre de spires de l'enroulement (sans unité)

1.3 Énergie et forces électromagnétique

Force électromagnétique

$$F_{\text{em}} = \frac{\partial E}{\partial x}_i$$

Avec

- F_{em} la force électromagnétique s'exerçant sur la partie mobile (en N)
- E l'énergie magnétique dans le système (en J)
- x la taille de l'entrefer (en m)
- i le courant (en A)

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

Avec

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

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 $i = 400 \text{ mA}$, $\mu_r = 1 \times 10^5$, $N = 200$, $S = 1 \text{ cm}^2$, $l_{\text{fixe}} + l_{\text{mobile}} = 30 \text{ cm}$.

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.

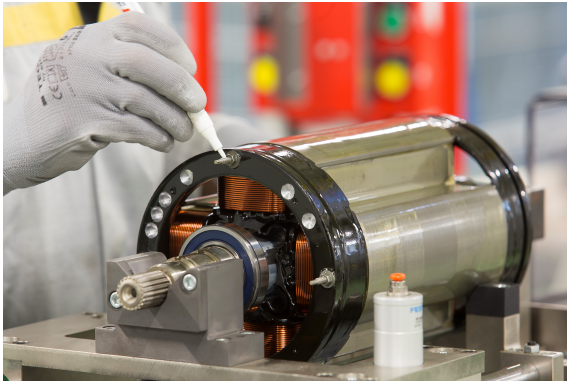
Sur le rotor, un circuit électrique est enroulé orthogonalement à l'axe de rotation.

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.

SCHÉMA Machine synchrone



(a) Moteur synchrone d'une Renault Zoé



(b) Stator d'un alternateur de centrale nucléaire

FIG. 2 : Photos de deux machines synchrones.

2.2 Champ statorique

Champ créé par une spire verticale dans l'entrefer

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.

Avec

- B le champ magnétique dans l'entrefer (en T)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- i l'intensité du courant dans l'enroulement statorique (en A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (en m)
- θ la seconde coordonnée du point dans l'entrefer (en rad)

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

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 $\vec{B}_2 = k_s i_1 \cos(\theta) \vec{e}_r$ avec $k_s = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi e}$.

SCHÉMA Champ statorique créé par plusieurs spires.

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 $i_2 = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \pi/2)$.

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 $i_1 = I\sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \pi/2)$.

$$\vec{B}_s(\theta) = k_s I \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta) \vec{e}_r$$

Avec

- \vec{B}_s le champ magnétique créé par les circuits statoriques dans l'entrefer (en T)
- $k_s = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi e}$
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
- θ la seconde coordonnée du point dans l'entrefer (en rad)
- N_s le nombre de spire de chacun des deux enroulements statoriques (sans unité)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- I la valeur efficace du courant dans chacun des deux enroulements statoriques (en A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (en m)

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

SCHÉMA Champ glissant

2.3 Champ rotorique

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

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

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 .

$$\vec{B}_r(\theta) = k_r I_e \cos(\theta - \theta_r) \vec{e}_r$$

Avec

- \vec{B}_r le champ magnétique créé par le circuit rotorique dans l'entrefer (en T)
- $k_r = \frac{2\mu_0 N_r}{\pi e}$
- θ la seconde coordonnée du point dans l'entrefer (en rad)
- θ_r l'angle entre le rotor et le stator (en rad)
- N_r le nombre de spire de l'enroulement rotorique (sans unité)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- I_e l'intensité du courant dans le circuit rotorique (en A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (en m)

SCHÉMA



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.

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 $i_1 = I\sqrt{2}\cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \pi/2)$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .

$$E = \frac{k_r^2 \pi I_e^2 R e h}{2\mu_0} + \frac{k_s^2 \pi I^2 R e h}{\mu_0} + \frac{\sqrt{2} \pi k_r k_s I I_e R e h}{\mu_0} \cos(\omega t - \theta_r)$$

Avec

- E l'énergie magnétique stockée dans l'entrefer (en J)
- $k_r = \frac{2\mu_0 N_r}{\pi e}$
- $k_s = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi e}$
- θ_r l'angle entre le rotor et le stator (en rad)
- N_r le nombre de spire de l'enroulement rotorique (sans unité)
- N_s le nombre de spire de l'enroulement statorique (sans unité)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- I_e l'intensité du courant dans le circuit rotorique (en A)
- I la valeur efficace du courant dans chacun des deux enroulements statoriques (en A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (en m)
- R le rayon du rotor (en m)
- h la hauteur du moteur (en m)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

Moment électromagnétique

$$\Gamma_{\text{em}} = \frac{\partial E}{\partial \theta_r}$$

Avec

- Γ_{em} le moment électromagnétique exercé sur le rotor (en Nm)
- E l'énergie magnétique dans l'entrefer (en J)
- θ_r l'angle entre le rotor et le stator (en 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 $i_1 = I\sqrt{2}\cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \pi/2)$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .

$$\Gamma_{\text{em}} = K I I_e \sin(\omega t - \theta_r)$$

Avec

- Γ_{em} le moment électromagnétique exercé sur le rotor (en Nm)
- $K = \frac{\sqrt{2}\pi k_r k_s R e h}{\mu_0}$
- $k_r = \frac{2\mu_0 N_r}{\pi e}$
- $k_s = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi e}$
- θ_r l'angle entre le rotor et le stator (en rad)
- N_r le nombre de spire de l'enroulement rotorique (sans unité)
- N_s le nombre de spire de l'enroulement statorique (sans unité)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- I_e l'intensité du courant dans le circuit rotorique (en A)
- I la valeur efficace du courant dans chacun des deux enroulements statoriques (en A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (en m)
- R le rayon du rotor (en m)
- h la hauteur du moteur (en m)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

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 $\theta_r = \Omega t - \alpha$.

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 $i_1 = I\sqrt{2}\cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \pi/2)$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.

$$\langle \Gamma_{em} \rangle = \begin{cases} 0 & \text{si } \Omega \neq \omega \\ K I I_e \sin(\alpha) & \text{si } \Omega = \omega \end{cases}$$

Avec

- Γ_{em} le moment électromagnétique exercé sur le rotor (en Nm)
- $K = \frac{\sqrt{2}\pi k_r k_s R e h}{\mu_0}$
- $k_r = \frac{2\mu_0 N_r}{\pi e}$
- $k_s = \frac{2\mu_0 N_s}{\pi e}$
- θ_r l'angle entre le rotor et le stator (en rad)
- N_r le nombre de spire de l'enroulement rotorique (sans unité)
- N_s le nombre de spire de l'enroulement statorique (sans unité)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- I_e l'intensité du courant dans le circuit rotorique (en A)
- I la valeur efficace du courant dans chacun des deux enroulements statoriques (en A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (en m)
- R le rayon du rotor (en m)
- h la hauteur du moteur (en m)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Ω la vitesse angulaire du rotor (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
- α l'angle entre le rotor et le champ tournant (en 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 moteur.

2.6 Stabilité du système

SCHEMA 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 résistante.

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 $KII_e \sin(\alpha)$, 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'induit

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.

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

Modèle électrique des enroulements statoriques

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 $i_1 = I\sqrt{2} \cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \pi/2)$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.

Avec

- u_1 et u_2 les tensions aux bornes des enroulements statoriques (en convention récepteur) (en V)
- i_1 et i_2 les intensités des courants dans les enroulements statoriques (en A)
- L l'inductance propre des enroulements statoriques (en H)
- R la résistance des enroulements statoriques (en Ω)
- $E_1 = \frac{d\Phi_{e1}}{dt}$ et $E_2 = \frac{d\Phi_{e2}}{dt}$ les forces contre-électromotrices (en V)
- Φ_{e1} et Φ_{e2} les flux mutuels du circuit rotorique sur le circuit rotorique (en Wb)

SCHÉMA Schéma équivalent d'une phase

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

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

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 $i_1 = I\sqrt{2}\cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \pi/2)$.
- Le circuit rotorique est alimenté par un courant I_e .
- Le rotor tourne à une vitesse angulaire constante.

$$\Phi_{e1} = \Phi_0 \sqrt{2} \cos(\omega t - \alpha)$$
$$\Phi_{e2} = \Phi_0 \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \alpha + \frac{\pi}{2}\right)$$

Avec

- Φ_{e1} et Φ_{e2} les flux mutuels du circuit rotorique sur le circuit rotorique (en Wb)
- ω la pulsation du courant circulant dans les enroulements statoriques (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
- α l'angle entre le rotor et le champ tournant (en rad)
- $\Phi_0 = \frac{2k_r N_s I_e R h}{\sqrt{2}}$
- $k_r = \frac{2\mu_0 N_r}{\pi e}$
- N_r le nombre de spire de l'enroulement rotorique (sans unité)
- μ_0 la perméabilité magnétique du vide (en $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)
- I_e l'intensité du courant dans le circuit rotorique (en A)
- e l'épaisseur de l'entrefer (en m)
- R le rayon du rotor (en m)
- h la hauteur du moteur (en m)

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.

SCHÉMA Diagramme de Fresnel de la loi des mailles

2.9 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.

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

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 $i_1 = I\sqrt{2}\cos(\omega t)$ et $i_2 = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \pi/2)$.
- 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_{em} la puissance moyenne reçue par les forces contre-électromotrices (en W)
- $P_{méca}$ la puissance mécanique moyenne fournie par le moteur (en W)

SCHÉMA Bilan de puissance



$$P_{em} = P_{méca}$$

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

SCHÉMA Transfert de puissance électrique - mécanique



2.10 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 moteur, 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.

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 voirie (essuie-glaces, vites, 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.

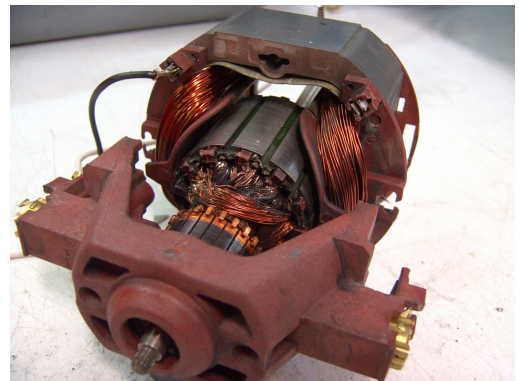
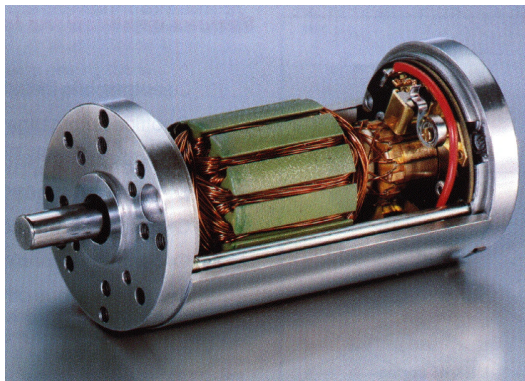


FIG. 3 : Photographies de machines à courant continu dont on a retiré le capot.

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.

Par analogie avec la machine synchrone, l'interaction entre le champ induit et le champ inducteur donne lieu à un couple électromagnétique subit par le rotor $\Gamma_{em} = KI_e I_r \sin \alpha$ si la condition de synchronisme est vérifiée.

3.2 Système balais-collecteur

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



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.

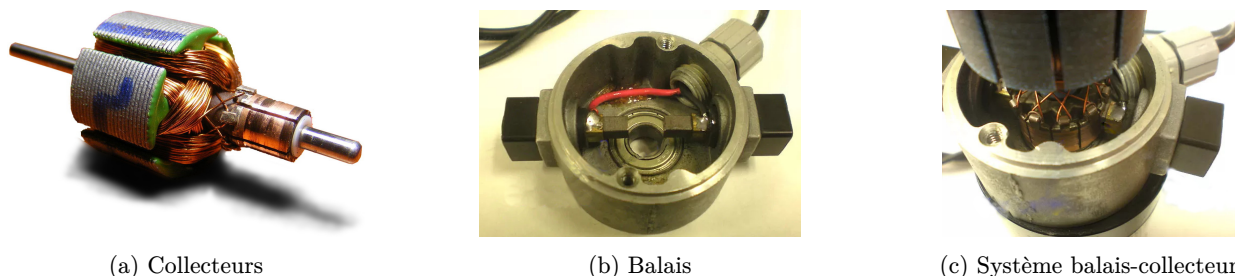


FIG. 4 : Photographies de systèmes balais-collecteurs dans plusieurs machines à courant continu.

Le frottement des balais sur les collecteurs génère des frottements qui affectent le rendement de la machine à courant continu. Le frottement des balais sur les collecteurs use les balais, qu'il faut alors 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.

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

- Γ_{em} le couple électromagnétique subi par le rotor (en $N \cdot m$)
- Φ_0 la constante de couplage (en Wb)
- I_r la courant dans le circuit rotorique (en A)

$$\Gamma_{em} = \Phi_0 I_r$$

Couple électromagnétique pour une machine à courant continu

$$\Gamma_{em} = \Phi_0 I_r$$

APPLICATION

Vérifier l'homogénéité de la relation ci-dessus.

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

Pour réaliser un treuil, on utilise un moteur à courant continu de constante de couplage $0,11 \text{ Wb}$ 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

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_{cem} la force contre-électromotrice (en V)
- Φ_0 la constante de couplage (en Wb)
- Ω la vitesse angulaire du rotor (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$E_{cem} = \Phi_0 \Omega$$

Force contre-électromotrice pour une machine à courant continu

$$E_{cem} = \Phi_0 \Omega$$

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.

SCHEMA Pertes aux différentes étapes de conversion

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

17

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, qui peut falloir mitiger.

APPLICATION

18

On considère un moteur dont le rotor est lié à une hélice de bateau subissant un frottement fluide de couple $-f\Omega$. Déterminer 4 relations liant les grandeurs électriques (E_{cem} et I_r) et mécaniques (Γ et Ω). Représenter ces relations sous forme d'un schéma bloc en mettant en évidence le caractère bouclé du système.

APPLICATION

19

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

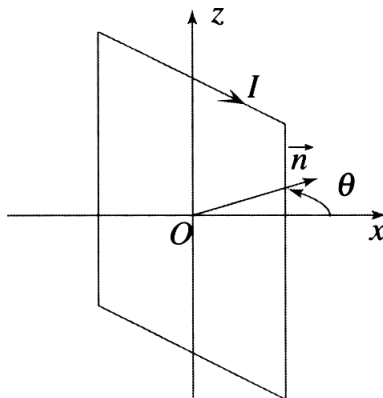
Les dynamos étaient utilisées pour générer l'électricité dans les voitures jusqu'aux années 60 et dans les bicyclettes jusqu'aux années 1990. Les dynamo ne sont quasiment plus utilisées en raison de leur mauvais rendement comparé aux alternateurs.

En fonctionnement générateur, on adopte préférentiellement la convention générateur, en posant $I_G = -I_r$ le courant parcourant l'induit en convention générateur et $\Gamma_G = -\Gamma_{em}$ le couple exercé par le rotor. On a alors $\Gamma_G = \Phi_0 I_G$.

SCHÉMA Schéma équivalent en fonctionnement générateur

TD

1 Couple de mutuelle et règle du flux maximal

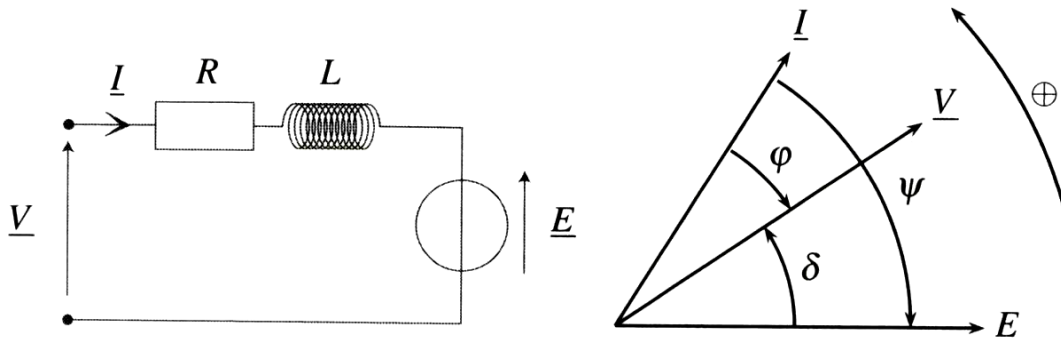


Une spire rectangulaire de centre O , de section S , parcourue par un courant d'intensité I et qui peut tourner librement autour de l'axe (Oz) est représentée ci-contre. La position angulaire de la spire est repérée par l'angle θ entre \vec{u}_x et \vec{n} , vecteur normal à la spire, orienté conjointement 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. Calculer l'inductance mutuelle \mathcal{M} entre les deux circuits.
2. On note \mathcal{L} et \mathcal{L}' , les inductances propres respectives de la spire et du solénoïde. Exprimer l'énergie électromagnétique \mathcal{E}_{em} stockée dans ces deux circuits.
3. Le solénoïde étant fixe, calculer le couple électromagnétique $\Gamma = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{em}}{\partial \theta} \right)_{I,I'}$ 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.

2 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 $w = p\Omega$, où Ω désigne la vitesse de rotation du rotor en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

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 $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. 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 $1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, pour lequel $\Psi = 0$, $I = I_M$ et $V = 72 \text{ V}$.
1. Déterminer la fréquence des tension statoriques quand $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$.
 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 $0 < \Psi < \pi/2$. 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 $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$. 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.

3 Alternateur d'une centrale hydroélectrique

Une machine turbine hydraulique est accouplé 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 nominale $S_n = 65 \text{ MVA}$
 - 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 $k = 290 \text{ V} \cdot \text{A}^{-1}$
 - courant de court-circuit $I_{cc} = 300I_e$
1. Quelle condition doit être satisfaite pour que la relation entre E et I_e fournie soit valable?
 2. Calculer l'intensité du courant d'induit nominal.
 3. Calculer la résistance synchrone $X = L\omega$ de chaque enroulement.
 4. Fonctionnement en charge. L'intensité du courant d'excitation vaut $I_e = 44 \text{ A}$ et le facteur de puissance du réseau vaut $\cos(\phi) = 0.9$ arrière (charge inductive). Représenter le schéma électrique d'une phase en négligeant la résistance R .
 5. En déduire l'intensité efficace du courant dans une phase statorique.
 6. Calculer la puissance fournie au réseau et le rendement de l'alternateur sachant que l'ensemble des pertes mécaniques, ferromagnétiques et d'excitation valent $P_p = 2,4 \text{ MW}$.

4 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.

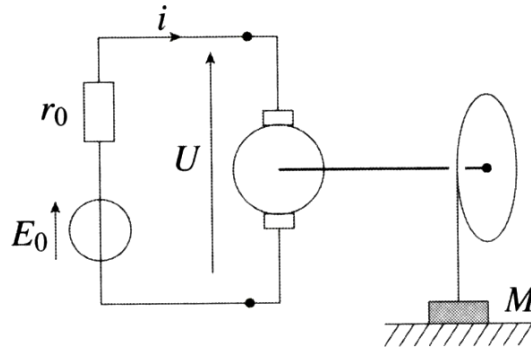
Le circuit diphasé statorique est parcouru par deux courants sinusoïdaux de pulsation ω , déphasé de $\pi/2$, de valeurs efficaces identiques égales à I .

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 $E = \Phi\omega$, où ω désigne la vitesse de rotation du rotor. 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 $6,0 \times 10^3$ tr/min, on mesure la tension efficace aux bornes d'une phase égale à $1,2 \times 10^2$ 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 $6,0 \times 10^3$ tr/min. 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 $I_{cc} = 1,2 \times 10^2$ A. Calculer l'inductance L d'une phase.

5 DC motor lifts 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 .

Ascertain the current i and the voltage E_0 delivered by the generator as a function of $M, g, a, \Phi_0, f, r, r_0$

6 Rendement d'une génératrice à courant continu

Une génératrice à courant continu de constante de couplage $\phi_0 = 0,12$ Wb, de résistance interne $r = 0,45 \Omega$, d'inductance propre $L = 20$ mH et dont les valeurs nominales de tension et courant sont $U_n = 40$ V et $I_n = 6$ 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 $\Gamma_t = 0,5$ N · m. La MCC tourne à la vitesse de rotation $\Omega > 0$.

1. Représenter le schéma électrique de l'induit alimentant la charge électrique et préciser les expressions du couple électromagnétique qu'exerce la machine.
2. Calculer les valeurs de l'intensité du courant dans le 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 ?