

9-Conversion de puissance (E1) électromécanique

Manipulations possibles :

- Moteur à courant continu
- Moteur asynchrone
- Haut rendement.

Notes sur la manip : A reprendre. Tracer $\eta = f(P_{\text{élec}})$.

Niveau : PSI

prérequis : électromagnétisme dans les milieux magnétiques
Induction
mécanique du solide
Matériaux ferromagnétiques (cycle d'hystérésis).

Introduction : Depuis révolutⁿ industrielle force animale \rightarrow machine.

Aujourd'hui élec vecteur idéal pour transporter énergie longue distance, mais au bout, c'est méca dont on a besoin TGV, pompe, ventilateur, ...

La conversion de puissance électroméca, c'est le lien entre les deux. Elle est réversible : permet élec \rightarrow méca (moteur) ou l'inverse (générateur / alternateur).

Aujourd'hui on va se demander comment on réalise concrètement et efficacement cette conversion? on va voir qu'elle repose sur l'interaction entre des courants et des champs magnétiques avec deux mécanismes physiques distincts qui entrent en jeu :

• des forces de Laplace sur des conducteurs parcourus par un courant dans \vec{B} .

• Les forces d'aimantation qui s'exercent sur des matériaux ferreux (aimant) sans courant macro.

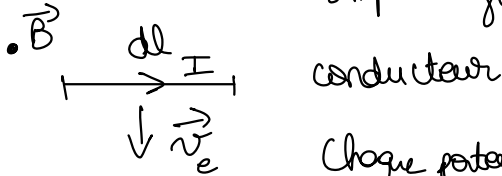
Ces deux phénomènes coexistent avec les phénomènes d'induction et adopter une approche énergétique permettra de tout unifier, on va commencer par établir les principes de base de cette conversion et les appliquer en

translation au contacteur avant de parler de machines tournantes.

I- Principes fondamentaux de la conversion

A) Relation fondamentale de conversion

Mécanisme le + simple : force de Laplace



Chaque porteur de charge a une vitesse totale

$$\vec{v} = \vec{v}_e + \vec{\omega}$$

\swarrow méca \nearrow courant

\rightarrow sur $d\tau$

$$d\vec{F}_{\text{Lorentz}} = m q (\vec{v}_e + \vec{\omega}) \times \vec{B} d\tau$$

$$P_{\text{Lorentz}} = \vec{F}_{\text{Lorentz}} \cdot \vec{v} = 0!$$

$$(m q \vec{\omega} d\tau \times \vec{B}) \cdot \vec{v}_e + (\vec{v}_e \times \vec{B}) \cdot m q \vec{\omega} d\tau = 0$$

$$\vec{j} = m q \vec{\omega} \quad \vec{j} d\tau = I d\vec{l}$$

$$\Rightarrow \underbrace{(I d\vec{l} \times \vec{B}) \cdot \vec{v}_e}_{d\vec{F}_{\text{Laplace}}} + \underbrace{(\vec{v}_e \times \vec{B}) \cdot I d\vec{l}}_{\text{Chap électromoteur}} = 0$$

Cause : courant
direction : \perp fil
conséq : mouvement
méca

Cause : mouvement
direction : \parallel fil
conséq : courant
induction (élec)

$$d\vec{F}_{\text{Laplace}} \cdot \vec{v}_e + I d\vec{l} \cdot \vec{v} = 0$$

$$P_l + P_e = 0$$

Conversion méca \leftrightarrow élec intrinsèquement parfaite!

Pas de pertes dans le mécanisme de conversion lui-même.

Pas de limite comme Carnot en thermo. C'est ce qui explique la supériorité écrasante des moteurs électriques en termes d'efficacité énergétique ($\eta \sim 95\%$ vs 40%).

Bien sûr dans la vraie vie, pertes foudre côté élec, frottements côté méca mais extérieurs au mécanisme de conversion.

- $P_e < 0$ consomme de la puissance électrique induction pour fournir un travail méca $P_e > 0 \rightarrow$ moteur, inverse \rightarrow générateur.

Parfait sur le papier mais forces de Laplace seules sont trop faibles pour les applications industrielles:

$$B \text{ dans l'air} \sim 0,1 \text{ T} \quad I \sim 1 \text{ A} \quad l \sim 10 \text{ cm} \\ \rightarrow F \sim 0,01 \text{ N} \quad \text{dérisoire}$$

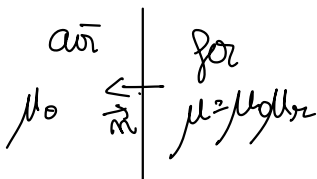
Pour obtenir forces suffisantes \rightarrow matériaux ferromagnétiques (doux)

B) Rôle du ferromagnétique

Matériaux ferro vont avoir deux rôles:

- Canaliser les lignes de champ (tuyau, fil, ...)
- Subir eux-mêmes des forces: morceau de fer plongé dans B attiré vers zones champ fort (clou + aimant).

Montrons pourquoi le ferro canalise le champ:



Relation de passage pour \vec{H}

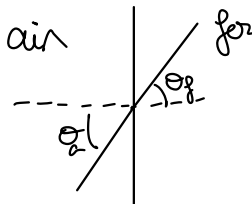
$$\vec{n} \cdot (\vec{H}^{\text{air}} - \vec{H}^{\text{fer}}) = \vec{j}_s \leftarrow \text{libre et surfacique} \\ = 0$$

donc $\vec{H}^{\text{air}} = \vec{H}^{\text{fer}}$

2 plus $\vec{B} = \mu \vec{H}$ donc

$$B_{\text{air}}^t = \mu_0 H_{\text{air}}^t \text{ et } B_{\text{fer}}^t = \mu_0 \mu_r H_{\text{fer}}^t$$

Ainsi $\frac{B_{\text{fer}}^t}{B_{\text{air}}^t} = \mu_r \gg 1$ ($\sim 1000-5000$) et $B_{\text{air}}^m = B_{\text{fer}}^m$


$$\tan \alpha_f = \frac{B_{\text{fer}}^t}{B_{\text{fer}}^m} = \mu_r \frac{B_{\text{air}}^t}{B_{\text{air}}^m} = \mu_r \tan \alpha_a$$

Si fuite $\tan \alpha_a \neq 0$ avec $\mu_r \gg 1 \Rightarrow \tan \alpha_f \gg 1 \Rightarrow \alpha_f \approx 90^\circ$

Ainsi $B_{\text{fer}}^t \gg B_{\text{air}}^t$ canalisation

+ B_{air} petit car n petit car = fer et t petit car μ_r .
 \Rightarrow peu de fuite !

Dans le fer pas de courant électrique donc pas Laplace
 $d\vec{f} = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$. Pourtant force d'aimantation.
Pour trouver cette force de manière + générale qu'elle soit Laplace, fer ou les 2 \Rightarrow approche énergétique. Démontrer sur exemple concret en translation: le contacteur.

2) Contacteur et approche énergétique

a) Description et fonctionnement

Slide schéma Dumod. Contacteur (relais électromagnétique): appareil qui permet d'établir ou d'interrompre le passage d'un courant dans circuit de forte puissance à partir d'une commande électrique de faible puissance.

- 2 parties :
- circuit ferreux en U avec bobine de N spires + barreau ferreux mobile avec 2 entrefers α . Quand i bobine, B circuit, attire barreau.
 - interrupteur. Barreau en $\alpha = 0 \rightarrow$ circuit de puissance alimenté. Quand active, circuit ouvert.

Interrupteur commandé électriquement. Tableaux électriques industriels, démarreurs auto...

Pas de conducteur porteur de courant, barreau ferre, pas de Laplace \Rightarrow approche énergétique.

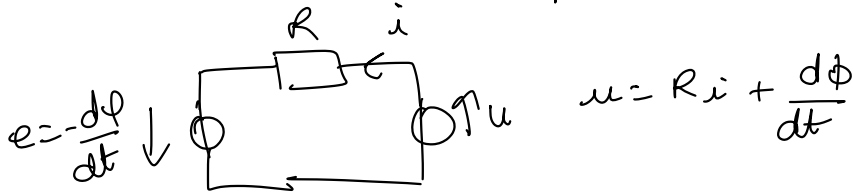
b) Approche énergétique

Hypothèses :

- ferre linéaire infiniment doux : $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$
- pas de fuite

Syst : { bobine + ferre + entrefers }

Bobine circuit élec équivalent Faraday



donc puissance instantanée générateur :

$$p = u i = \underbrace{R i^2}_{\text{Joule}} + i \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\phi = L(i) i \quad \text{ici } \underline{L(i)} \propto \searrow, \text{ entrefers } \searrow, L \nearrow$$

$$i \frac{d\Phi}{dt} = i \frac{d(Li)}{dt} = i^2 \frac{dL}{dt} + Li \frac{di}{dt}$$

$$E_{em} = \frac{1}{2} Li^2 \quad \frac{dE_{em}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = Li \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt}$$

$$\text{Ainsi } i \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dE_{em}}{dt} + \frac{i^2}{2} \frac{dL}{dt}$$

puissance fournie par générateur (- pertes) = variation énergie magnétique (stockage) + ? méca

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dL}{dx} v$$

$$\text{donc puissance méca} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dx} v = F_{em} \times v$$

$$\text{et } F_{em} = \left. \frac{\partial E_m}{\partial x} \right|_i$$

force totale exercée par le champ à l'origine (l'espace ou aimantation ou les 2)

Puissance de l'approche énergétique

Relation très générale. Par ex, pour un mouvement de rotation

$$F_{em} = \left. \frac{\partial E_m}{\partial \theta} \right|_i$$

Il nous reste à exprimer L pour avoir F_{em} et A.N.

c) Calcul de $L(x)$

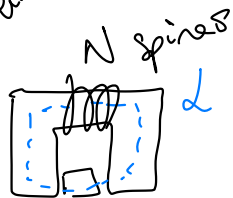
Théorème d'Ampère pour H sur α

$$\int_{\alpha} \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni$$

$$H_{\text{fer}} (l_1 + l_2) + H_{\text{entrefer}} \times 2x = Ni$$

"lf"

— déduire seulement



$$\frac{B_{\text{fer}}}{\mu_0 \mu_r} l_f + \frac{B_e}{\mu_0} 2x = Ni$$

Or $\text{div} \vec{B} = 0$
 même surface
 $\Rightarrow B_{\text{fer}} = B_e$

d'où $B = \frac{\mu_0 Ni}{\underbrace{2x + \frac{l_f}{\mu_r}}_{\text{résistance magnétique (rélectans)}}$

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{NB S}{i} = \frac{\mu_0 N^2 S}{2x + \frac{l_f}{\mu_r}}$$

$$E_{\text{em}} = \frac{1}{2} L i^2 = \frac{\mu_0 N^2 S i^2}{4x + 2 \frac{l_f}{\mu_r}}$$

$$F_{\text{em}} = \left. \frac{\partial E_{\text{em}}}{\partial x} \right|_i = - \frac{\mu_0 N^2 S i^2}{\left(2x + \frac{l_f}{\mu_r}\right)^2}$$

force toujours négative donc attractive et signe de i^2
 le système cherche à fermer les entrefers
 car énergie dans entrefer $\frac{B^2}{2\mu_0}$ et dans la fer $\frac{B^2}{2\mu_0 \mu_r} \ll$

A.N. $N \sim 250$ $S \sim 20 \text{ cm}^2$ $l_f \sim 50 \text{ cm}$ $\mu_r \sim 3000$
 $i \sim 1 \text{ A}$

$$F_{\text{max}} (x \rightarrow 0) \approx 1.1 \text{ kN}$$

Enorme \rightarrow puissance du fer

Le contacteur c'est génial mais son mouvement de translation s'arrête en butée. Pour faire rouler un TGV, il nous faut un mouvement continu \rightarrow rotation!

II- La machine synchrone \rightarrow TGV, servomoteurs
 \rightarrow Centrales électriques

A) Champ tournant

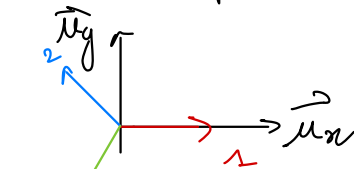
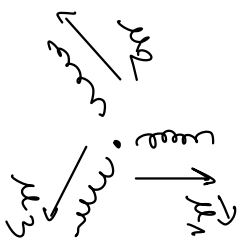
Tesla fin du 19^e Siècle : puisque fer attiré par B, pour créer rotation il suffit B tournant et le fer lui colle après indéfiniment.

fer avec B tournant sans faire tourner les bobines
 \rightarrow courants déphasés. C'est le théorème de Ferraris.

Manip qualitative aiguille. Décalés de $\frac{2\pi}{3}$ dans l'espace $\frac{2\pi}{3}$ et en phase.

Si on inverse deux fils, tourne dans l'autre sens.

On va calculer le champ au centre du dispositif.



$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 \quad \text{triphase!}$$

$$= B_0 \left[\cos(\omega t) \vec{u}_1 + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \vec{u}_2 + \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \vec{u}_3 \right]$$

On passe en complexes $\vec{B} = \text{Re}(\underline{B}) \vec{u}_x + \text{Im}(\underline{B}) \vec{u}_y$

$$\underline{u}_1 = 1 \quad \underline{u}_2 = e^{2j\pi/3} \quad \underline{u}_3 = e^{j4\pi/3}$$

$$= a \quad \quad \quad = a^2$$

$$1 + a + a^2 = 0$$

$$\underline{B} = B_0 \left(\frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \times 1 + \frac{e^{j\omega t}}{a} + e^{-j\omega t}}{a} a \right.$$

$$\left. + \frac{e^{j\omega t}}{a^2} + e^{-j\omega t}}{a^2} a^2 \right)$$

$$= \frac{B_0}{2} \left(3 e^{j\omega t} + e^{-j\omega t} \underbrace{(1 + a^2 + a^4)}_a \right)$$

$$= 0$$

$$= \frac{3B_0}{2} e^{j\omega t}$$

Donc $\vec{B}(t) = \frac{3B_0}{2} (\cos(\omega t) \vec{u}_x + \sin(\omega t) \vec{u}_y)$

Champ tournant d'amplitude constante
à ω

Ces 3 circuits vont former le stator de la machine synchrone.

Plus généralement, en mettant les spires des 3 bobines bien, on peut avoir partout dans le stator un champ B radial comme une onde progressive

le long de la périphérie



$$\vec{B}_s(\theta, t) = B_{s,0} \cos(\omega t - \theta) \vec{u}_r$$

de max est à $\theta = \omega t$ lorsque on glisse.

Dans une machine Synchrone on va mettre au centre de ce stator un rotor qui est soit un aimant permanent soit un électroaimant avec du fer dedans (comme un contacteur).

Le rotor tourne. Si on note $\theta_r(t)$ sa position angulaire, il crée lui aussi un champ tournant $\vec{B}_r(\theta, t) = B_{r,0} \cos(\theta_r(t) - \theta) \vec{u}_r$ max sur l'axe du rotor.

Si rotor tourne à Ω constant alors

$$\theta_r(t) = \Omega t + \alpha_0$$

$$\text{et } \vec{B}_r(\theta, t) = B_{r,0} \cos(\Omega t + \alpha_0 - \theta) \vec{u}_r$$

C) Couple électromagnétique et synchronisme

Hypothèse $\mu_r \gg 1$ dans le fer donc on néglige le champ H et énergie électromag dans le fer négligeable devant celle de l'entrefer

$2x \gg \frac{l_f}{\mu_r}$ en gros.

$$E_{em} = \int_{\text{entrefer}} \frac{B^2}{2\mu_0} dt = \int_{\text{entrefer}} \frac{(B_s^2 + B_r^2 + 2B_s B_r)}{2\mu_0} dt$$

$$E_S \propto \int_0^{2\pi} \cos^2(\omega t - \theta) d\theta = \pi \quad \text{constante}$$

$$E_R \propto \int_0^{2\pi} \cos^2(\Omega t + \alpha_0 - \theta) d\theta = \pi \quad \text{constante}$$

$$E_{SR} = \int_0^{2\pi} \frac{B_{0,r} B_{0,s}}{\mu_0} \underbrace{\cos(\Omega t + \alpha_0 - \theta) \cos(\omega t - \theta)}_{\frac{1}{2} \left[\cos((\Omega + \omega)t + \alpha_0 - 2\theta) + \cos((\Omega - \omega)t + \alpha_0) \right]} d\theta$$

$$\text{d'où } \Gamma_{em} = \frac{\partial E_{em}}{\partial \theta_r} \Big|_i = \frac{\partial E_{SR}}{\partial \theta_r} \propto \sin((\Omega - \omega)t + \alpha_0)$$

et en moyenne $\langle \Gamma_{em} \rangle = 0$ sauf si

$\Omega = \omega$ c'est la condition de synchronisme.

Au synchronisme $\Gamma_{moy} = \Gamma_{max} \sin(\alpha_0)$

Slide Neveu $\Gamma = f(\alpha)$

branches | stable / instable
moteur / alternateur

Problème au démarrage \rightarrow onduleur
+ rotor \rightarrow autre moteur

aimant \swarrow
cher \searrow électroaimant
traces rares \searrow bague, balais
usure.

III - la machine asynchrone

→ industrie,
électromécanique
→ éoliennes

A) Principe

- Même champ tournant et stator
- Rotor : Cage d'écurieil (aluminium)
en court circuit de très faible R
↳ Robustesse

Fonctionnement : champ tournant → courants induits
→ forces de Laplace qui par l'effet Lenz
s'oppose à leur cause = différence de
vitesse Ω rotor Stator
⇒ le rotor tourne

Dès que $\Omega_s = \Omega_r$, plus de couple. Il faut
un écart : asynchrone ⇒ glissement

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad g \approx 2 \text{ à } 5\% \text{ en régime nominal}$$

Manip écurieil qualitatif.

B) Caractérisation expérimentale du rendement

Expliquer bien la manip.

On trace le rendement en fonction de $P_{\text{utile}} = C \times \Omega_r$

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{abs}}} = U \times I \quad (\text{attention } \times 3 \text{ wattmètre}).$$

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{utile}} + P_{\text{pertes fixes}} + P_{\text{pertes variables}}$$

fixes: hystérésis
 + frottements méca (dépendent de Ω_r mais change peu)

Dominantes à faibles puissances donc $\eta \uparrow$ au début

Pertes variables: seule partout

$$P_{\text{Joule, rotor}} = g \quad P_{\text{th, rotor}} \quad P_{\text{Joule, stator}} \propto I^2$$

Démo: embrayage

P_e - pertes stator injectée
 $P_{\text{th, rotor}} = \Gamma_{\text{em}} \Omega_s$
 $P_{\text{meq}} = \Gamma_{\text{em}} \Omega$
 $P_{\text{meq}} = P_{\text{th}} - P_{\text{Joule, rotor}}$
 d'où $P_{\text{Joule, rotor}} = \Gamma_{\text{em}} (\Omega_s - \Omega)$
 $= P_{\text{th}} g$

\uparrow
 même couple
 comme embrayage

donc au début $\eta \uparrow$ avec $P_{\text{utile}} / \text{charge}$ puis

↘ car glissement et $I_{\text{stator}} \uparrow$

⇒ courbe en cloche.

Puissance nominale: puissance méca max que peut fournir le moteur en continu $\frac{T_f}{7}$ sans que rien ne fonde (dimensionnement syst. refroidisse)

Puissance en η max là où pertes fixes = variables à 70 ou 80% de la puissance nominale. Comme ça le moteur tourne presque toujours en sous-régime (safe) et peut avoir des pics en rebrait < nominal (ex escalateur).

Ici on trouve et on compare notice.

Conclusion Conversion au cœur de notre monde
industriel

Repose sur l'utilisation de ferres
et approche énergétique la + puissante.
Synchrone vs asynchrone.
mini ouverture vers ACC.

Les moteurs éac consomment environ 40% de l'énergie
électrique mondiale. Amélioration de leur
rendement est un levier majeur de la transition
énergétique (nouveaux matériaux + électronique).

Bibliographie

Dunod PSI
Nouveaux cours
Electrotechnique
Brenders Brial
édition