

Éléments de base du génie électrique



Convertisseurs électromécaniques

G. Vinsard

Gerard.Vinsard@univ-lorraine.fr

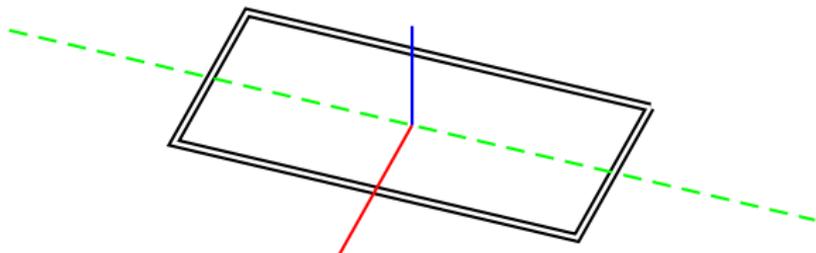
20 mai 2020

Objectifs de la leçon

- ▶ Aborder le couplage électromagnétique en considérant que les énergies mécanique et électromagnétique s'échangent mutuellement ;
- ▶ Décrire l'établissement des équations des machines de nature synchrone (courant continu inclus) sur ce principe avec l'ajout des contacts glissants et de la commutation qu'ils rendent possible.
- ▶ Esquisser l'approche synthétique de l'électromécanique.

Le cadre tournant : équation électrique

- Un cadre de surface S possède un $d\vec{l} \cdot \vec{\Theta}$ en rotation autour de l'axe **vert** ($\Omega = \dot{\Theta}$ est la vitesse angulaire)



- Le cadre est placé dans une induction magnétique uniforme b normale à l'axe de rotation ; la loi de Faraday affirme que la force électromotrice dans le cadre est

$$-\frac{d}{dt} \left(b \cos \Theta S \right) = b S \Omega \sin \Theta$$

- S'il est conducteur de l'électricité de résistance r et que son inductance propre est l Le courant électrique i parcourant le cadre est donc solution de

$$b S \Omega \sin \Theta = r i + l \frac{di}{dt}$$

Le cadre tournant : équation mécanique

- ▶ L'analyse des forces de Laplace¹ conduit à un couple

$$\Gamma_x = -2 b i \underbrace{\text{longueur du cadre} \times \text{demi-largeur}}_{= S/2} \sin \Theta = -b i S \sin \Theta$$

- ▶ L'équation mécanique est alors

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -b i S \sin \Theta + \Gamma_x$$

où Γ_x est un couple extérieur (autre qu'électromagnétique, des frottements par exemple); J est le moment d'inertie du cadre.

1. $i \times b \times \sin$ de l'angle entre courant et induction

Bilan de puissance

- Le bilan des puissance entre équations électrique et mécanique

$$\begin{aligned} b S \Omega \sin \Theta &= r i + l \frac{di}{dt} && \times -i \\ + &&& \\ J \frac{d\Omega}{dt} &= -b i S \sin \Theta + \Gamma_x && \times \Omega \end{aligned}$$

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \Omega^2 + \frac{1}{2} l i^2 \right)}_{\text{variation vs temps des}} + \underbrace{r i^2}_{\text{P Joule}} = \underbrace{\Gamma_x \Omega}_{\text{travail du couple extérieur}}$$

énergies magnétique
et cinétique

conduit à l'élimination du terme

$$-b S i \Omega \sin \Theta$$

qui est exactement la puissance échangée entre l'électricité et la mécanique.

La commutation : nécessité

- ▶ Le cadre précédent placé dans une induction uniforme n'est pas très utile comme moteur. Si le couple extérieur Γ_x est nul alors

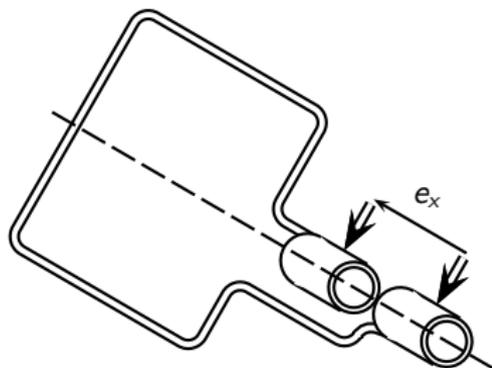
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \Omega^2 + \frac{1}{2} I i^2 \right) = -r i^2 \leq 0$$

S'il y avait un courant i_0 et une vitesse Ω_0 à l'origine, ceux-ci disparaîtraient, consommés par les pertes joules.

- ▶ Il faudrait pour que le mouvement soit entretenu que :
 - ▶ soit l'induction magnétique soit elle même tournante ;
 - ▶ soit une force électromotrice extérieure à celle qu'engendre le mouvement du cadre soit apportée. C'est ce que réalise la commutation.

Le contact glissant

- L'ouverture du cadre permet d'intercaler des bagues



à partir desquelles une tension extérieure e_x peut être imposée en utilisant des contacts glissants. L'équation électrique devient alors

$$e_x + b S \Omega \sin \Theta = r i + l \frac{di}{dt}$$

sans que les équations mécaniques changent.

- Si e_x est contrôlée de manière que le couple électromagnétique, dont l'expression est encore

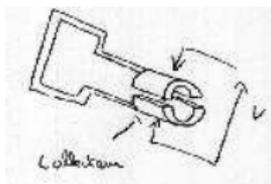
$$\Gamma = -b S i \sin \Theta$$

soit toujours positif alors la fonction de moteur sera réalisée.

La commutation

► Un tel contrôle est réalisé par commutation. Il y a deux types de commutations possibles : 1) la commutation électronique où la tension e_x est fournie par un dispositif d'électronique de puissance voisin de ceux qui ont été étudiés dans le chapitre 3 ; 2) **la commutation mécanique**.

► Une commutation mécanique du courant électrique peut être réalisée en reliant le cadre à une seule bague coupée en deux de manière que si la tension V du dessin est continue alors le courant injecté à la demi-bague du dessus ainsi que le courant collecté par la demi-bague du dessous sont toujours dirigés dans le même sens



Ce dispositif s'appelle un collecteur ; la tension d'excitation est

$$e_x = V \Pi(\sin(\Theta - \Theta_x))$$

Système électromécanique

- Le système électromécanique devient alors

$$\begin{cases} l \frac{di}{dt} = -r i + V \Pi(\sin(\Theta - \Theta_x)) + b S \Omega \sin \Theta \\ J \frac{d\Omega}{dt} = -b i S \sin \Theta + \Gamma_x \\ \frac{d\Theta}{dt} = \Omega \end{cases}$$

- Et, en régime quasi-statique, après quelques approximations, il reste

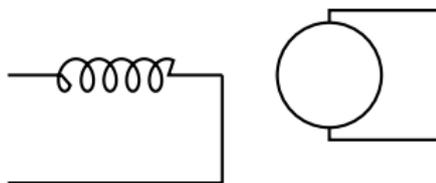
$$\Gamma = b S I \text{ et } V - b S \Omega = r I$$

où Γ est le couple moteur qui doit être équilibré par le couple extérieur Γ_x et I est le courant (constant) circulant dans la partie fixe du circuit.

Mutatis mutandis, ce sont les équations des machines (moteur / génératrice / frein) à courant continu.

Moteur/génératrice/frein à courant continu

► Une machine à courant continue dite à excitation séparée se compose de deux parties : l'inducteur qui produit l'induction magnétique correspondant au b du cadre tournant ; l'induit qui correspond au cadre lui même. L'idéographie de la machine est



► Les équations sont alors

$$\text{Tension } (v) / \text{ Courant } (i) \text{ inducteur} \quad v = r i$$

$$\text{Tension } (V) / \text{ Courant } (I) \text{ induit} \quad V = R I + k i \Omega$$

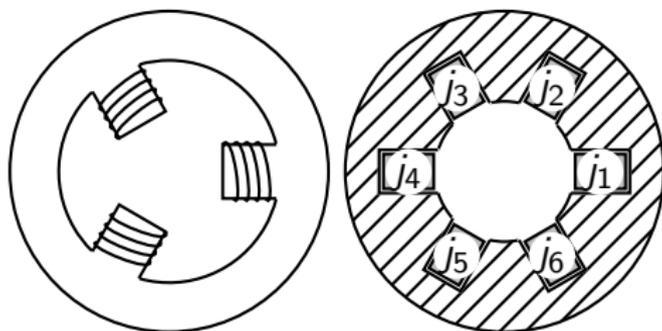
$$\text{Couple } (\Gamma) \quad \Gamma = k i I$$

où k , r et R sont des coefficients dépendant de la machine.

► Il y a deux connexions principales (parallèle et série) de l'inducteur et de l'induit qui correspondent à des fonctionnements différents (qui sont vus en exercice No 1).

Induction magnétique tournante

- ▶ À partir d'une source triphasée il est possible de réaliser une induction tournante :



- ▶ Et réciproquement une induction fixe dans son référentiel et mise mécaniquement en rotation crée une force électromotrice triphasée dans les enroulements. **c'est le principe de l'alternateur triphasé.**

Alternateur triphasé élémentaire

- Une induction est générée par un courant i dit d'excitation (on peut imaginer un cadre) ;

Cette induction tourne à la vitesse angulaire Ω dans l'espace interne aux enroulements triphasés, elle crée une force électromotrice (\underline{E} , $a^2 \underline{E}$, $a \underline{E}$) avec

$$\underline{E} = k i \exp^{j \delta}$$

où k est un coefficient de l'alternateur et δ (l'angle interne) représente la différence angulaire entre les directions de l'induction excitatrice et celle qui correspond à l'induction que génère l'enroulement triphasé.

- Les phases ayant une réactance cyclique X et une résistance R , si le courant de phase est \underline{I} , la tension entre neutre et phase en sortie est

$$\underline{V} = \underline{E} + (R + j X)\underline{I}$$

- Cette description élémentaire est suffisante en 1^o approximation, mais elle doit cependant être complétée par l'idée que les enroulements peuvent être répétés spatialement et donc qu'il y a une relation entre vitesse angulaire Ω de l'alternateur et pulsation électrique ω de la forme

$$p \Omega = \omega$$

où p est un nombre entier qui s'appelle le nombre de paires de pôles. (cf. Exercice 2 et animation).

Approche synthétique

- ▶ Si la dissipation mise de côté, l'interaction électromécanique est hamiltonienne. Il y a une énergie cinétique et une énergie magnétique qui est de nature cinétique : la co-énergie magnétique. Les autres énergies sont de nature potentielle ou de celle d'une travail de force prescrite (ce qui revient au même).
- ▶ Ainsi il est possible de construire un lagrangien global dont les arguments sont à la fois mécanique et électrique et d'utiliser ainsi le formalisme de Lagrange–Hamilton pour obtenir directement les équations électromécaniques (cf. poly).
- ▶ D'autre part la dissipation peut être ré-introduite *a posteriori* via une fonction de dissipation de Rayleigh.
- ▶ Cela permet d'obtenir une description synthétique très pratique. Mais il ne s'agit en aucun cas d'une surprise puisque Maxwell a bâti les équations de circuit électrique (qui précèdent celle de l'électromagnétisme dans son traité) en considérant que l'électricité n'était qu'une mécanique particulière.