

CHAPITRE 1 : PRINCIPE GENERAUX

1- Principe de conversion d'énergie électromécanique

Les dispositifs électromécaniques sont conçus Pour permettre la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. En générale, ces dispositifs peuvent être classés en trois catégories.

- a- Les transducteurs (pour les mesures et la commande); ces dispositifs transforment les signaux de différentes formes exemple microphones, voltmètres, micros....).
- b- Les dispositifs à déplacement linéaire, ce type de dispositifs développe une force qui assure un déplacement linéaire. Exemple : les relais, solénoïdes et les électroaimants.

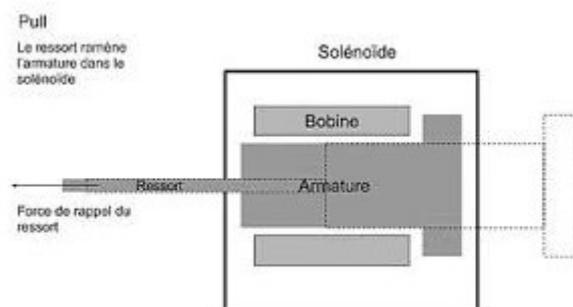


Figure (1) Dispositif à déplacement linéaire

- c- Dispositifs rotatifs (dispositifs à conversion continue de l'énergie)

Ces dispositifs fonctionnent en mode rotatif. Ils s'appellent : moteur lorsque ils convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique et générateur lorsque le processus est inversé.

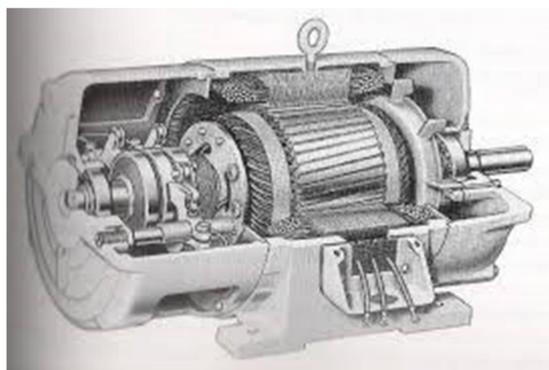
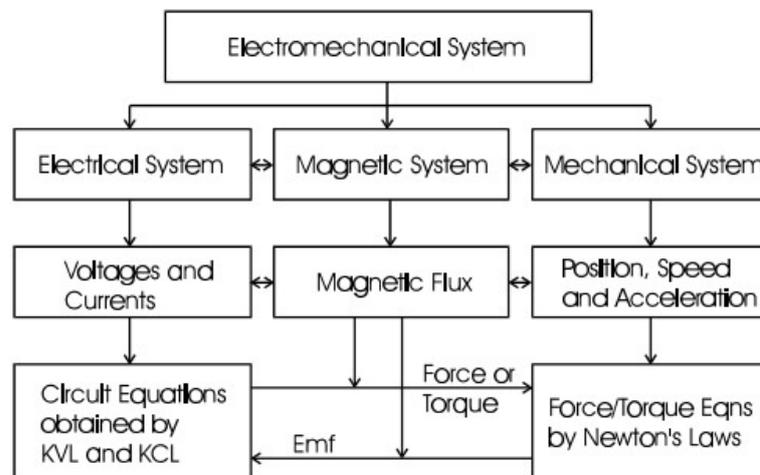


Figure (2) Dispositif rotatif

Puisque la perméabilité des matériaux ferromagnétiques est beaucoup plus grande que la permittivité des matériaux diélectriques, il est plus avantageux d'utiliser le champ électromagnétique comme milieu pour la conversion d'énergie électromécanique.

Comme illustré dans le schéma ci-dessous, un système électromécanique est constitué d'un sous-système électrique (les enroulements), un sous-système magnétique (champ magnétique dans les noyaux magnétiques et entrefers), et un sous-système mécanique (pièces mobiles mécaniquement telles qu'un plongeur dans un actionneur linéaire et un rotor dans une machine électrique tournante).



Figure(3) Carte conceptuelle de la modélisation des systèmes électromécaniques

Les tensions et les courants sont utilisés pour décrire l'état du sous-système électrique et ils sont régis par les lois de circuit de base: loi d'Ohm, loi de Kirchhoff des courants (KCL) et loi de Kirchhoff des tensions (KVL).

Le système mécanique peut être décrit en termes de positions, de vitesses et d'accélérations, est régi par les lois de Newton.

Le sous-système magnétique ou le champ magnétique assure le couplage entre les sous-systèmes électriques et mécaniques.

Les grandeurs de champ telles que le flux magnétique, la densité de flux et l'intensité du champ, sont régis par les équations de Maxwell.

Lorsqu'il est couplé à un circuit électrique, le flux magnétique interagissant avec le courant dans le circuit produirait une force ou un couple sur une partie mobile mécanique.

D'autre part, le mouvement de la partie mobile pourrait faire varier le flux magnétique qui embrasse le circuit électrique et induire une force électromotrice (F_{em}) dans ce dernier.

Le produit du couple et de la vitesse (la puissance mécanique) est égal au composant actif du produit de la force électromotrice et du courant.

Par conséquent, l'énergie électrique et l'énergie mécanique sont inter-converties via le champ magnétique.

2- Force électromotrice induite (F_{em})

Pour une bobine avec N tours, la F_{em} induite est donnée par :

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

Où λ : est le flux magnétique (flux linkage) ; le signe (-) indique que le courant induit oppose la variation du flux.

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = -(L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt}) \quad (2)$$

Si on considère que le système est magnétiquement linéaire, l'inductance propre ne dépend pas du courant. L'inductance L dépend de la position x de la partie mobile.

Exemple : trouver l'expression de l'inductance puis calculer la F_{em} induite pour dispositif de la figure ci-dessous.

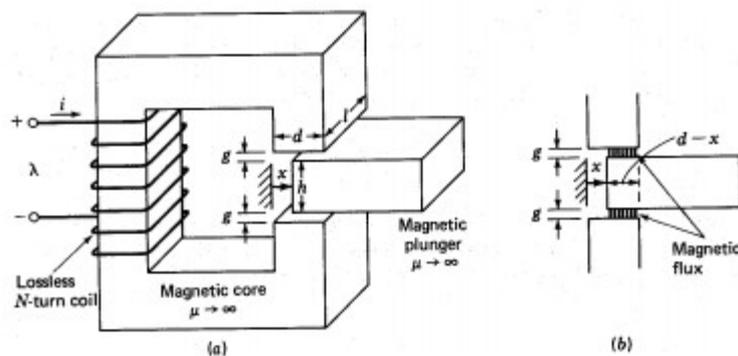


Figure (4) Actionneur linéaire

Solution

$$L(x) = \frac{N^2}{R_g(x)}$$

$$R_g(x) = \frac{2g}{\mu_0(d-x)l}$$

$$L(x) = \frac{\mu_0 N^2 l}{2g} (d-x)$$

$$e = \frac{d}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} = L(x) \frac{di}{dt} - i \frac{\mu_0 N^2 l}{2g} v$$

Si $i = I_{dc}$

$$e = -I_{dc} \frac{\mu_0 N^2 l}{2g} v$$

Si $i = I_m \sin \omega t$

$$e = \frac{\mu_0 N^2 l}{2g} (d-x) \omega I_m \cos(\omega t) - v I_m \sin(\omega t) \frac{\mu_0 N^2 l}{2g}$$

$$= I_m \frac{\mu_0 N^2 l}{2g} [(d-x) \omega \cos(\omega t) - v \sin(\omega t)]$$

$$= I_m \frac{\mu_0 N^2 l}{2g} \sqrt{(d-x)^2 \omega^2 + v^2} \cos[\omega t + \arctan(\frac{v}{(d-x)\omega})]$$

3- Force et couple dans les dispositifs électromécaniques

3-1 Force dans les actionneurs linéaires

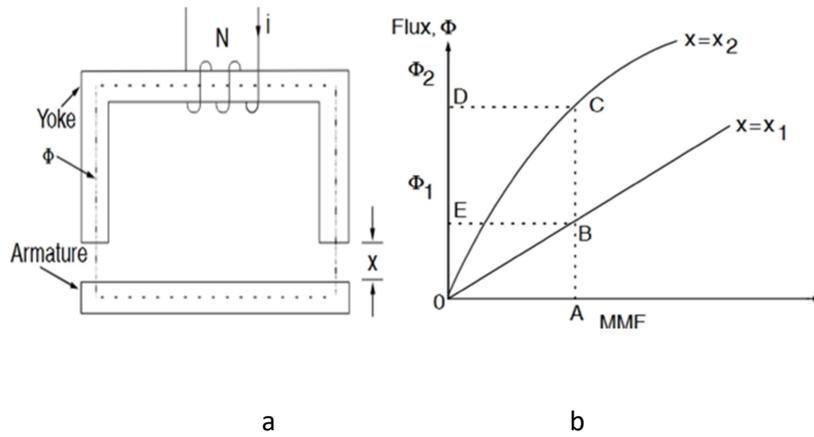
Considérant le dispositif de la figure (5). L'énergie électrique fournie au système est donné par :

$$w_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN}{dt} = \int N i d\Phi = \int F M M d\Phi \quad (3)$$

Où :

e est la tension induite, FMM est la force magnétomotrice.

Cette énergie électrique w_e est égale à la somme de l'énergie magnétique w_f stockée dans la bobine et l'énergie mécanique (w_m) convertie en travail.



Figure(5) solénoïde (a), caractéristique flux-courant (b)

$$w_e = w_f + w_m \quad (4)$$

Si la partie mobile est fixe, l'énergie électrique égale dans ce cas l'énergie magnétique.

L'énergie magnétique est représentée par la surface OBEO (voir figure (5)).

Le complément de l'énergie magnétique appelé co-énergie est représentée par la surface OBAO.

L'énergie magnétique correspond à la surface OCDO et la co-énergie à la surface OCAO.

La variation de l'énergie électrique est exprimée par :

Pour une FMM constante (point A), les différentes énergies sont dérivées comme suit :

$$\delta w_e = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} F_1 d\Phi = F_1(\Phi_2 - \Phi_1) = \text{surface (BCDEB)} \quad (5)$$

$$\delta w_f = \delta w_f|_{x=x_2} - \delta w_f|_{x=x_1} = \text{surface(OCDO)} - \text{surface(OBEO)} \quad (6)$$

Utilisant (4) à (6), l'incrément de l'énergie mécanique est donnée par :

$$\delta w_m = \delta w_e - \delta w_f = \text{surface (OBCO)} \quad (7)$$

L'incrément de l'énergie mécanique en terme du couple électromagnétique et la variation de position du rotor est exprimé par :

$$\delta w_m = F_y \delta x \quad (8)$$

Avec F_y : force électromagnétique et δx l'incrément de la position du rotor.

$$F_r = \frac{\delta w_m}{\delta x} \quad (9)$$

Le travail effectué par la pièce mobile est égal à taux de variation de la Co-énergie, il est donné par cette expression

$$\delta w_m = \delta w'_f \quad (10)$$

Avec

$$w'_f = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int (N \Phi) di = \int \lambda (\theta, i) di \quad (11)$$

Où

L : inductance

λ : le Flux (flux linkage) qui est fonction de la position et le courant.

Cette variation de la Co-énergie est effectuée entre deux positions x_1 et x_2 .

La force électromagnétique développée est exprimée comme suit :

$$F_r = \frac{\delta w_m}{\delta x} = \frac{\delta w'_f}{\delta x} = \frac{\delta w'_f}{\delta x} \Big|_{i_{\text{constant}}} \quad (12)$$

Si l'inductance varie linéairement avec la position du rotor pour un courant donné, ce qui est n'est pas le cas de façon générale, donc le couple est donné par cette expression

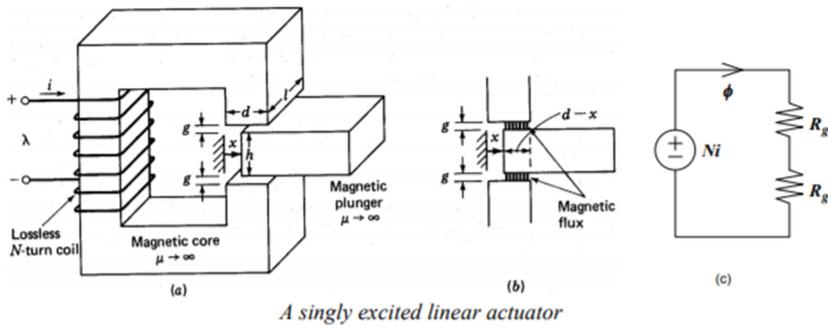
$$F_r = \frac{dL(x,i)}{dx} \frac{i^2}{2} \quad (13)$$

Où :

$$\frac{dL(x,i)}{dx} = \frac{L(x_2,i) - L(x_1,i)}{x_2 - x_1} \Big|_{i_{\text{constant}}} \quad (14)$$

Exemple d'application :

Calculate the force acting on the plunger of a linear actuator discussed in this section.



Solution:

Assume the permeability of the magnetic core of the actuator is infinite, and hence the system can be treated as magnetically linear. From the equivalent magnetic circuit of the actuator shown in figure (c) above, one can readily find the self inductance of the excitation winding as

$$L(x) = \frac{N^2}{2R_g} = \frac{\mu_0 N^2 l (d-x)}{2g}$$

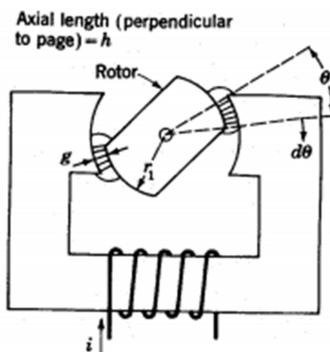
Therefore, the force acting on the plunger is

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} = -\frac{\mu_0 l}{4g} (Ni)^2$$

The minus sign of the force indicates that the direction of the force is to reduce the displacement so as to reduce the reluctance of the air gaps. Since this force is caused by the variation of magnetic reluctance of the magnetic circuit, it is known as the **reluctance force**.

3-2 Force dans les actionneurs rotatifs

La même procédure que celle du calcul de la force est suivie pour le calcul du couple développé dans les dispositifs à parties mobiles tournantes.



Figure(6) Schéma d'un actionneur rotatif

A partir de la co-énergie

$$dW'_f = \lambda di + Td\theta$$

$$w'_f(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di \quad (15)$$

$$\lambda = \frac{\partial w'_f(i, \theta)}{\partial i} \quad (16)$$

$$T = \frac{\partial w'_f(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (17)$$

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (18)$$

4- Actionneurs rotatifs à double excitation

Le principe général du calcul de la force et du couple discuté ci-dessus est également applicable aux systèmes multi-excités. Considérons un actionneur rotatif doublement excité montré schématiquement dans le diagramme ci-dessous à titre d'exemple. L'énergie différentielle et les fonctions de co-énergie peuvent être dérivées comme suit:

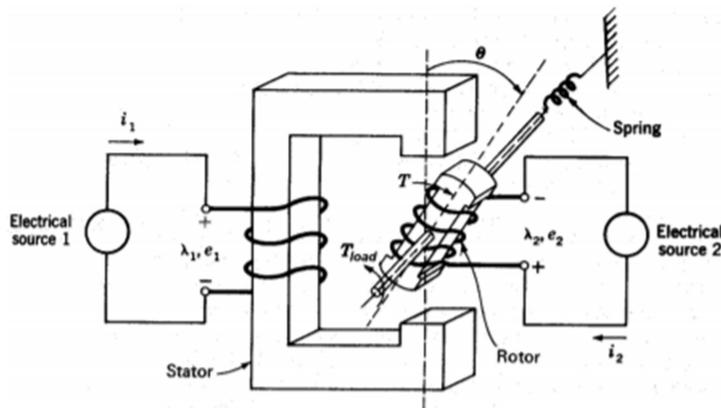


Figure (7) dispositif rotatif à double excitation

$$dw_f = dw_e - dw_m$$

Ou :

$$dw_e = e_1 i_1 dt - e_2 i_2 dt$$

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} \quad e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt}$$

Et $dw_m = Td\theta$ (19)

La co-énergie est donnée par :

$$\begin{aligned}
 dw'_f(i_1, i_2, \theta) &= d[i_1\lambda_1 + i_2\lambda_2 - w'_f(i_1, i_2, \theta)] \\
 &= \lambda_1 di_1 + \lambda_2 di_2 + Td\theta \\
 &= \frac{\partial w'_f(i_1, i_2, \theta)}{\partial i_1} di_1 + \frac{\partial w'_f(i_1, i_2, \theta)}{\partial i_2} di_2 + \frac{\partial w'_f(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} d\theta
 \end{aligned} \tag{20}$$

Des équations (19) et (20) on peut déduire l'expression du couple donnée comme suit :

$$T = \frac{\partial w'_f(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} \tag{21}$$

Pour un système magnétiquement linéaire, les courants et les flux sont reliés par des inductances constantes. Les expressions de l'énergie et la co-énergie sont données par :

$$\partial w'_f(i_1, i_2, \theta) = L_{11}i_1 + L_{22}i_2 + L_{12}i_1i_2 \tag{22}$$

Où :

L_{11} : Inductance propre du bobinage 1

L_{22} : Inductance propre du bobinage 2

L_{12} : Inductance mutuelle entre le bobinage 1 et le bobinage 2.

L'expression du couple devient :

$$T = \frac{\partial w'_f(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{2}i_1^2 \frac{dL_{11}(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2}i_2^2 \frac{dL_{22}(\theta)}{d\theta} + i_1i_2 \frac{dL_{12}(\theta)}{d\theta} \tag{23}$$

Les deux premiers termes de l'équation de couple (23) représentent le couple de reluctance tandis que le dernier terme représente le couple électromagnétique (couple hybride).

- Dans le cas d'un rotor rond (rotor à pôles lisses), l'inductance propre $L_{11}(\theta)$ ne dépend pas de la position (le flux magnétique généré par le bobinage statorique ne varie pas lorsque le rotor tourne) et le couple dans ce cas est donné par :

$$T = \frac{1}{2}i_2^2 \frac{dL_{22}(\theta)}{d\theta} + i_1i_2 \frac{dL_{12}(\theta)}{d\theta} \tag{24}$$

- Pour le cas d'un stator cylindrique (stator lisse), l'inductance propre du rotor ne varie pas lorsque le rotor tourne. L'équation du couple dans ce cas se réduit à :

$$T = \frac{1}{2}i_1^2 \frac{dL_{11}(\theta)}{d\theta} + i_1i_2 \frac{dL_{12}(\theta)}{d\theta} \tag{25}$$

- Pour une machine avec stator et rotor en forme cylindrique, le couple est donné par l'équation (25).

$$T = i_1 i_2 \frac{dL_{12}(\theta)}{d\theta} \quad (26)$$