# Électronique de puissance - Mécatronique

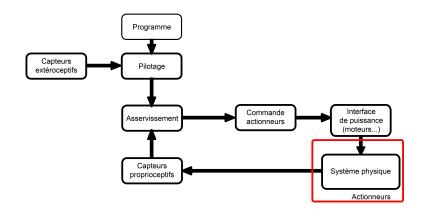
2. Actionneurs: Modélisation

Valentin Gies ISEN

SEATECH - Parcours SYSMER

## Plan du cours

#### Positionnement dans une chaine mécatronique



### Les machines tournantes

Utilité en mécatronique

Actionneurs dans les systèmes mécatroniques : 90% de machines tournantes.

En mécatronique , on souhaite avoir une machine ayant des **atouts** parmi les suivants :

- Faible coût de fabrication.
- Faible coût de pilotage : commande simple.
- Caractéristiques électromécaniques spécifiquement adaptées au problème (fort couple, faible inertie, faible encombrement, précision, possibilité de débrayage...).
- Rendement élevé (moins d'échauffement, low power).



## Les machines tournantes

Utilité en mécatronique



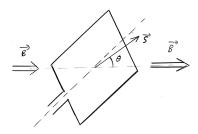
### Les machines tournantes

Machines étudiées en cours

Dans ce cours, nous passerons en revue les machines suivantes (les plus courantes) :

- Machines à courant continu.
- Machines synchrones.
- Machines asynchrones.

Spire alimentée par un courant I placée dans un champ magnétique.



Moment magnétique de la spire :

$$\overrightarrow{M} = I\overrightarrow{S}$$

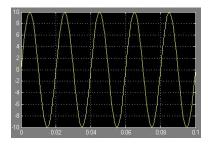
Couple électromagnétique :

$$\overrightarrow{C} = \overrightarrow{M} \wedge \overrightarrow{B}$$



### Couple scalaire instantané :

$$C = B.S.I\sin\theta$$
$$= \Phi I\sin(\theta)$$

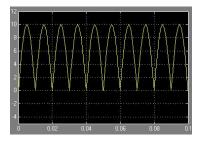


#### Couple Moyen:

$$< C >= 0$$



Solution : inverser le courant à chaque fois que le couple devient négatif :

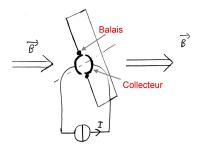


$$< C> = {2\Phi I \over \pi}$$

Pour cela on utilise un inverseur mécanique : Collecteur+Balais



#### Système collecteur-Balais :







Equations de la machine à courant continu :

• Mécanique :

$$J\frac{d^2\theta}{dt^2} + f\frac{d\theta}{dt} = C - Cr \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J}\left((C - Cr) - f\frac{d\theta}{dt}\right)$$

Electrique :

$$U = E + RI + L\frac{dI}{dt}$$
  $\Rightarrow$   $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L}(-Ri + U - K\frac{d\theta}{dt})$ 

• Couplage électromécanique :

$$E = K\Omega$$

$$C = KI$$



#### Modélisation dans le domaine de Laplace :

• Mécanique :

$$(Js+f)\Omega(s)=C(s)-Cr$$

• Electrique :

$$U(s) = E(s) + (R + Ls)I(s)$$

Couplage électromécanique :

$$E(s) = K\Omega(s)$$

$$C(s) = KI(s)$$



## Machine à courant continu : Fonction de transfert

$$\begin{split} H(s) &= \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_0}{1 + (\tau + \alpha \tau_e)s + \tau \tau_e s^2} \\ \text{avec } \tau_{em} &= \frac{JR}{K^2 + Rf}, \tau_e = \frac{L}{R}, K_0 = \frac{K}{K^2 + Rf} \text{ et } \alpha = \frac{Rf}{K^2 + Rf} \ll 1 \end{split}$$

Simplification :  $KI \gg f\Omega$  et  $K\Omega \gg RI$ , donc :  $K^2 \gg Rf \Leftrightarrow \alpha \ll 1$  :

$$\begin{split} \Rightarrow \textit{H(s)} &\simeq \frac{\textit{K}_0}{1 + \tau_{\textit{em}} s + \tau_{\textit{em}} \tau_{\textit{e}} s^2} \\ \textit{H(s)} &\simeq \frac{\textit{K}_0}{(1 + \tau_{\textit{em}} s)(1 + \tau_{\textit{e}} s)} \quad (\textit{avec} \ \tau_{\textit{e}} = \frac{\textit{L}}{\textit{R}} \quad \tau_{\textit{em}} = \frac{\textit{JR}}{\textit{K}^2}) \end{split}$$



## Machine à courant continu : Fonction de transfert

Fonction de transfert à 2 pôles stables :

$$\Rightarrow \textit{H}(\textit{s}) = \frac{\Omega(\textit{s})}{\textit{U}(\textit{s})} = \frac{\textit{K}_{0}}{(1 + \tau_{\textit{em}}\textit{s})(1 + \tau_{\textit{e}}\textit{s})}$$

- $au_{em} \simeq rac{JR}{K^2}$  ( $c^{ste}$  de temps électro-mécanique).
- $\tau_e = \frac{L}{R}$  ( $c^{ste}$  de temps électrique).
- $K_0 \simeq \frac{1}{K}$ : à basse fréquence, on a donc  $U(s) = K\Omega(s)$ .

La MCC permet un pilotage de la vitesse en tension.



# Machine à courant continu : Comparatif

#### La reine de la mécatronique actuelle :

#### Avantages:

- Commande simple (pilotage en tension).

#### Inconvénients :

- Oscillations de couple (précision imparfaite).
- Frottement mécanique (balais sur collecteur).
- Coût élevé pour les fortes puissances.

Utilisée dans l'industrie automobile : Megane Scénic (Renault)  $\Rightarrow \approx$  200 MCC !

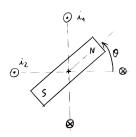


# Machine synchrone



Machine synchrone triphasée à rotor externe (lecteur CD, 135g)

#### Aimant dans un champ tournant :



Champ créé par l'aimant :

$$\overrightarrow{B} = B_0(\cos\theta \overrightarrow{u_p} + \sin\theta \overrightarrow{u_q})$$

Courants  $i_1$  et  $i_2$ :

$$i_1 = I \cos \omega t$$
$$i_2 = I \sin \omega t$$



Moments magnétiques créés par les spires :

$$\overrightarrow{M_1} = S i_1 \overrightarrow{u_p} = SI \cos \omega t \overrightarrow{u_p}$$

$$\overrightarrow{M_2} = S i_2 \overrightarrow{u_q} = SI \sin \omega t \overrightarrow{u_q}$$

Couple exercé par les spires sur l'aimant :

$$\overrightarrow{C} = (\overrightarrow{M_1} + \overrightarrow{M_1}) \wedge \overrightarrow{B}$$

$$= (\cos \theta \sin \omega t - \sin \theta \cos \omega t) B_0 SI \overrightarrow{u_z}$$

$$= (\sin (\omega t - \theta)) B_0 SI \overrightarrow{u_z}$$

Condition pour avoir un couple moyen non nul :  $\omega t = \theta + \delta$  $\Rightarrow$  Synchronisme



Couple exercé par les spires sur l'aimant :

$$\overrightarrow{C} = B_0 \ SI \ \sin \delta \ \overrightarrow{u_z}$$

 $\delta$  dépend du couple demandé :

- $\sin \delta = 0$  : couple nul
- $\sin \delta = 1$  : couple maximal
- $\sin \delta > 1$ : impossible  $\Rightarrow$  décrochage de la machine synchrone (C = 0 car  $\omega t$  et  $\theta$  n'ont pas la même pulsation)

# Machine synchrone : Comparatif

#### Avantages:

- Couple de démarrage excellent.
- Couple lisse ⇒ positionnement très précis.
- Rendement excellent (peu de pertes mécaniques)

#### Inconvénients :

- Coût élevé (aimants au rotor).
- Nécessité d'un autopilotage : asservissement de la pulsation d'alimentation en fonction de la vitesse du rotor.

Utilisé pour les démarrages à fort couple (moteur hybride, traction, levage...).



## Machine synchrone : Commande

- On souhaite une **commande simple** de type  $\Omega = KU$  comme pour la machine à courant continu.
- On a une machine dont il faut asservir la fréquence d'alimentation sur la fréquence de rotation.

#### ⇒ Autopilotage

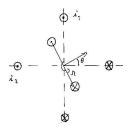
- Autopilotage scalaire : pilotage des courants par asservissement sur une consigne sinusoïdale.
- Autopilotage vectoriel : pilotage des courants par asservissement sur une consigne constante après transformation vectorielle.

# Machine asynchrone



Moteur asynchrone triphasé (450 kW)

#### Spire dans un champ tournant :



Champs statoriques :

$$\overrightarrow{B_1} = -B_0 \sin(\omega_s t) \overrightarrow{u_x}$$

$$\overrightarrow{B_2} = B_0 \cos(\omega_s t) \overrightarrow{u_y}$$

Rotor : Spire = {Résistance(R)+Inductance(L)}



#### Principe de fonctionnement :

- Rotor : pulsation  $\omega_r$
- Stator : pulsation  $\omega_s$
- Champ tournant au stator (  $(\omega_s)_{/Stator}$  )
  - $\Rightarrow$  Flux au rotor (  $(\omega_s \omega_r)_{/Rotor}$ )
  - $\Rightarrow$  Force électromotrice rotorique (  $(\omega_s-\omega_r)_{/\mathit{Rotor}})$
  - $\Rightarrow$  Courant rotorique (  $(\omega_s \omega_r)_{/Rotor}$ )
  - $\Rightarrow$  Moment magnétique (  $(\omega_s \omega_r)_{/Rotor}$ )
  - $\Leftrightarrow$  Moment magnétique (  $(\omega_s)_{/Stator}$ )
  - ⇒ Couple électromagnétique.



#### Mise en équations (1) :

Champs statoriques :

$$\overrightarrow{B} = \begin{bmatrix} -B_0 \sin(\omega_s t) \\ B_0 \cos(\omega_s t) \end{bmatrix}$$

→ Flux Rotorique:

$$\Phi = \overrightarrow{B} \cdot \overrightarrow{S} = \begin{bmatrix} -B_0 \sin(\omega_s t) \\ B_0 \cos(\omega_s t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S \cos(\omega_r t) \\ S \sin(\omega_r t) \end{bmatrix}$$
$$= B_0 S \sin((\omega_s - \omega_r)t)$$

#### Mise en équations (2) :

⇒ Force électromotrice :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -B_0 S (\omega_s - \omega_r) \cos(\omega_s - \omega_r) t$$

⇒ Courant rotorique :

$$E = Ri + L\frac{di}{dt}$$

$$\Rightarrow \underline{E} = [R + \jmath L(\omega_s - \omega_r)] \underline{i}$$

$$\Rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{E}}{R^2 + L^2(\omega_s - \omega_r)^2} (R + \jmath L(\omega_s - \omega_r))$$

$$\Rightarrow I = \frac{E}{R^2 + L^2(\omega_s - \omega_r)^2} (R\cos(\omega_s - \omega_r)t - L(\omega_s - \omega_r)\sin(\omega_s - \omega_r)t)$$

#### Mise en équations (3) :

■ ⇒ Moment magnétique :

$$\overrightarrow{M} = SI \begin{bmatrix} \cos(\omega_r t) \\ \sin(\omega_r t) \end{bmatrix}$$

⇒ Couple électromagnétique :

$$\overrightarrow{C} = \overrightarrow{M} \wedge \overrightarrow{B} = SI B_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega_r t) \\ \sin(\omega_r t) \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} -\sin(\omega_s t) \\ \cos(\omega_s t) \end{bmatrix}$$

$$= SI B_0 \cos(\omega_s - \omega_r) t \overrightarrow{e_z}$$

$$= \frac{S^2 B_0^2 (\omega_s - \omega_r)}{R^2 + L^2 (\omega_s - \omega_r)^2} \times$$

$$[R \cos^2(\omega_s - \omega_r) t - L(\omega_s - \omega_r) \sin(\omega_s - \omega_r) t \cos(\omega_s - \omega_r) t]$$

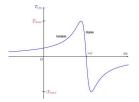
#### Mise en équations (4) :

ullet  $\Rightarrow$  Couple Moyen :

$$< C> = rac{S^2 B_0^2 (\omega_s - \omega_r)}{R^2 + L^2 (\omega_s - \omega_r)^2} \left[rac{R}{2}
ight]$$

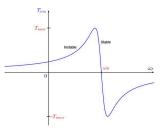
Définition du glissement :  $g = \frac{\omega_{\mathrm{S}} - \omega_{\mathrm{f}}}{\omega_{\mathrm{S}}}$ 

• Couple en fonction de  $g : < C > = \frac{S^2 B_0^2 R \ g \omega_s}{2(R^2 + L^2 g^2 \omega_s^2)}$ 



#### Propriétés:

- Couple nul au synchronisme  $(g = 0) \Rightarrow$  asynchronisme
- Couple élevé ⇒ glissement élevé



Décrochage si C > C<sub>max</sub>

## Machine asynchrone: Comparatif

#### Avantages:

- Faible coût (y compris pour des fortes puissances).
- Très robuste (pas de pièce de contact)
- Bon rendement.

#### Inconvénients:

- Couple démarrage faible.
- $\omega_r \neq \omega_s \Rightarrow$  asynchronisme
- Loi de commande en vitesse non linéaire ⇒ commande vectorielle.

Utilisée dans l'industrie pour son faible coût à la construction et à l'usage.



## Machine asynchrone: Commande

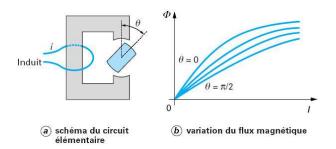
- On souhaite une **commande simple** de type  $\Omega = KU$  comme pour la machine à courant continu.
- On a une machine dont la vitesse de rotation n'est pas directement liée à la fréquence d'alimentation
- On a une machine dont le couple est faible au démarrage.

#### ⇒ Autopilotage

- Contrôle scalaire: Contrôle du couple par la mesure de la vitesse réelle de rotation et par asservissement des courants par rapport à des consignes sinusoïdales.
- Contrôle vectoriel : pilotage du couple et de la vitesse par asservissement sur des consignes constantes après transformation vectorielle.



Variation de flux magnétique en fonction de la position du rotor :



#### Énergie, coénergie et couple :

Tension dans un enroulement :

$$U = RI + \frac{d}{dt}\Phi$$

Puissance électrique :

$$P = UI = RI^2 + i\frac{d}{dt}\Phi$$

Cette puissance se répartit comme suit :

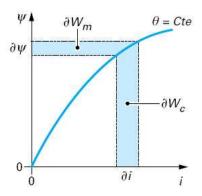
$$P = \underbrace{Ri^2}_{P_{Joule}} + \underbrace{C\Omega}_{P_{Meca}} + \underbrace{\frac{dW_m}{dt}}_{P_{Magan}}$$



On en déduit (théorème des travaux virtuels) :

$$C \delta(\theta) = i \delta(\Phi) - \delta(W_m)$$

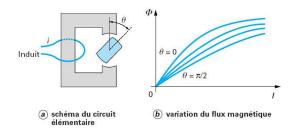
- A  $\Phi$  constant, on a :  $C = \frac{\partial W_m}{\partial \theta}$ .  $W_m$  est l'énergie magnétique.
- A i constant, on a :  $C = \frac{\partial W_c}{\partial \theta}$ , avec  $W_c = i\Phi W_m$ .  $W_c$  est la coénergie magnétique.



Pour un matériau non-saturé :  $\Phi = Li$ . On a donc :

$$W_m = W_c = \frac{1}{2}Li^2$$





Dans une machine à réluctance variable, L dépend de  $\theta$ :

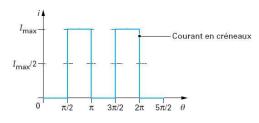
$$L = L_0 + L_1 cos(2\theta) + \dots$$

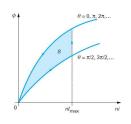
On crée un **couple moteur en synchronisant** l'évolution des **courants** et celle de  $L(\theta)$ .



# Moteur à réluctance variable : principe de fonctionnement

## Alimentation avec un courant en créneau :





Couple moyen durant un déplacement de  $\theta$  d'une valeur de  $\pi$  :

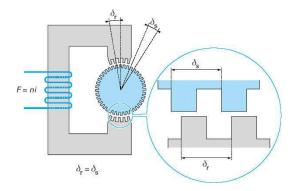
$$C = \frac{S}{\pi} = \frac{L_1 I_{max}^2}{\pi}$$

en limitant au premier harmonique le développement de L.



# Moteur à réluctance variable : principe de fonctionnement

Machine à réluctance variable monophasée (à double saillance) :



# Moteur à réluctance variable : Comparatif

### Avantages:

- Faible coût (y compris pour des fortes puissances).
- Très robuste (pas de pièce de contact).

#### Inconvénients:

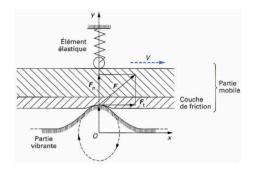
- Nécessite d'un autopilotage en courant (comme pour la machine synchrone).
- Rapport encombrement-couple assez faible.

Utilisé dans l'industrie pour son faible coût.

# Moteur piézoélectrique : principe de fonctionnement

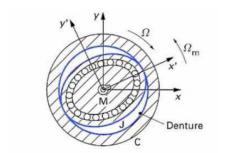
## Principe de fonctionnement :

- Piézoélectricité : Tension ⇒ Déformation mécanique.
- Déformation mécanique ⇒ entraîne le rotor par friction.



## Moteur piézoélectrique : exemple

## Moto-réducteur elliptique



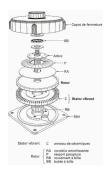
- M moyeu générant la déformation elliptique J jante flexible immobilisée en rotation
- C couronne rigide
- Intérêt : moteur et réducteur intégré

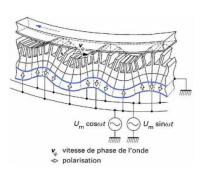


## Moteur piézoélectrique : exemple

## Moteur annulaire à onde progressive.

Utilisé pour le réglage des autofocus (Canon USM).





 Intérêt : glisse en cas d'action manuelle sur le rotor (retouche du point)

# Moteur piézoélectrique : Comparatif

## Avantages:

- Moteur à friction : pas de casse mécanique en cas de blocage
- Taille très réduite ⇒ micro-systèmes mécatroniques.

#### Inconvénients :

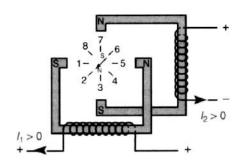
Nécessite d'un autopilotage en tension.

Utilisé dans l'industrie des micro-systèmes mécatroniques (montres, appareils photos...).

# Moteur pas à pas : principe de fonctionnement

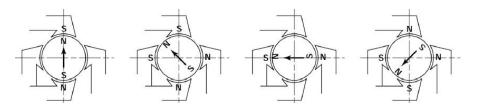
## Principe de fonctionnement :

- Aimant dans un champ  $\overrightarrow{B}$  tournant par incrément d'angle.
- Réluctance variable dans un champ  $\overrightarrow{B}$  tournant par incrément d'angle.



# Moteur pas à pas : principe de fonctionnement

## Séquence de pilotage en mode demi-pas



 Intérêt : le mode demi-pas permet de positionner le rotor entre deux enroulements ⇒ mouvement plus fluide.

## Moteur pas à pas : principe de fonctionnement

#### Modes de fonctionnement :





- Fonctionnement par à-coups : oscillations dues au démarrage et à l'arrêt du rotor à chaque pas ⇒ énergétiquement inefficace + vibrations.
- Fonctionnement en continu : mouvement proche de la machine synchrone auto-pilotée.

# Moteur pas à pas : Comparatif

## Avantages:

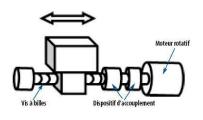
• Pilotage en boucle ouverte : on connaît la position angulaire.

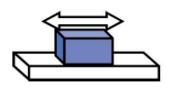
#### Inconvénients :

- Risque de décrochage (perte de pas).
- Faible couple.
- Consommation à l'arrêt.

En perte de vitesse dans l'industrie (jouets, positionnement à couple faible...).

## Actionneurs linéaires





- Intérêt : permet de se passer d'un dispositif mécanique complexe de conversion rotation/translation
  - $\Rightarrow$  précision accrue ( $\simeq 0.5 \mu m$ ).
- Inconvénient : coût assez élevé.

# Actionneurs linéaires : principe de fonctionnement

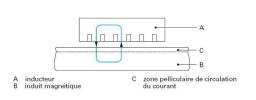
## Principe général : moteur traditionnel déroulé dans le plan

- Partie mobile à enroulements plans ⇒ champ en déplacement transversal.
- Chemin magnétique fixe :
  - avec des aimants (équivalent à la machine synchrone).
  - avec des barres métalliques ou massif (équivalent à la machine asynchrone à cage d'écureuil).
  - à **denture** (équivalent à la machine à réluctance variable).



# Actionneurs linéaires : exemples

**Moteur linéaire à induit massif** (asynchrone) : Aérotrain (ligne expérimentale Paris-Orléans)

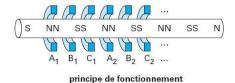




# Actionneurs linéaires : exemples

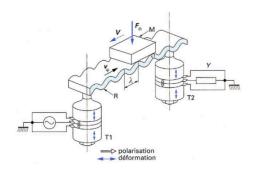
## Moteur linéaire à aimant permanents (synchrone) : Etel





# Actionneurs linéaires : exemple

## Moteur linéaire piézoélectrique à onde progressive



# Actionneurs linéaires : Comparatif

## Avantages:

- Excellente précision en translation.
- Vitesse en fonctionnement précis (5 m/s au lieu de 1.5 m/s avec une vis à bille).
- Faible inertie (par rapport à un système avec vis sans fin).
- Maintenance réduite (pas de graissage de la vis).

#### Inconvénients:

- Coût de l'actionneur (encore assez peu diffusé).
- Coût du chemin magnétique (en particulier dans le cas d'un chemin à aimants permanents).

Actionneur émergent dans l'industrie.



# Bibliographie

- Convertisseurs statiques. Modélisation et commande de la machine asynchrone.
   Caron Hautier. (Technip)
- Introduction à l'electrotechnique approfondie. Séguier, Notelet et Lesenne (Tec et Doc).
- Convertisseurs de l'électronique de puissance (Tomes 1, 2, 3, 4). Séguier (Tec et Doc).
- Techniques de l'ingénieur (http://www.techniques-ingenieur.fr)
- Commande électronique des moteurs électriques. M. Pinard (Dunod).

## Questions?

- Questions
- Contact : vgies@hotmail.com