

ESE - Actionneur et automatique appliquée

Alexis Martin

alexis.martin@ensea.fr

bureau D216



2022/2023

- 1 Modélisation externe des machines à courant continu
- 2 Asservissement des moteurs à courant continue
- 3 Les moteurs pas à pas
- 4 Les moteurs brushless et les moteurs synchrones
- 5 Commande des machines synchrones

Modélisation externe des machines à courant continu

Hypothèses de travail

- Machine non saturée, à entrefer constant
- Réaction magnétique d'induit négligeable ou parfaitement compensée
- Balais réglés dans l'axe de la ligne neutre.

Nous supposerons souvent que l'excitation est réalisée à l'aide d'aimants permanents.

Equations fondamentales de la machine à courant continu (convention moteur)

- Eq. électrique : $u = e + R.i + L \frac{di}{dt}$
- Eq. mécanique : $J. \frac{d\Omega}{dt} + f.\Omega = \Gamma_m - \Gamma_r$
- Eq. de couplage : $e = k_\phi.\Omega$ et $\Gamma_m = k_\phi.i$
- u : tension aux bornes de l'induit
- i : courant d'induit
- e : force électromotrice d'induction
- Ω : vitesse de rotation
- Γ_m : couple moteur
- Γ_r : couple résistant (couple de charge)
- R : résistance du bobinage d'induit
- L : inductance propre du bobinage d'induit
- J : moment d'inertie de la partie tournante (moteur + charge)
- f : coefficient de frottement visqueux
- k_ϕ : constante de fem (ou constante de couple), $\propto \phi$ créé par l'inducteur

Modèles fréquemment utilisés

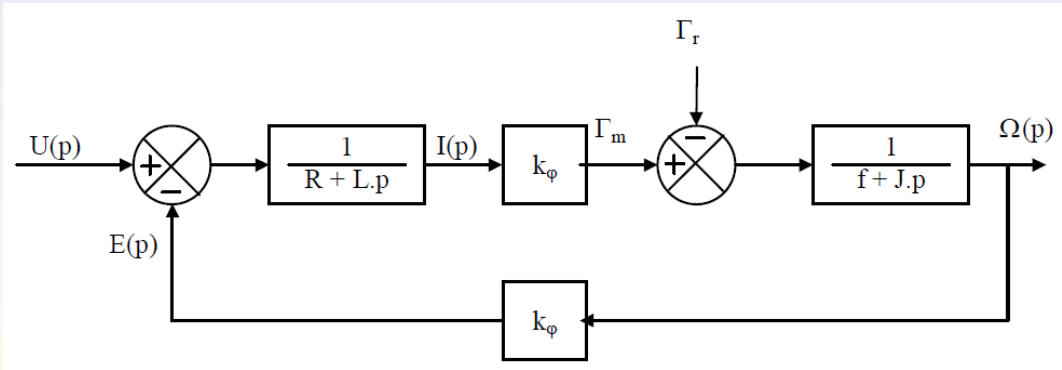


Figure 1 – Modèle de la machine pilotée en tension

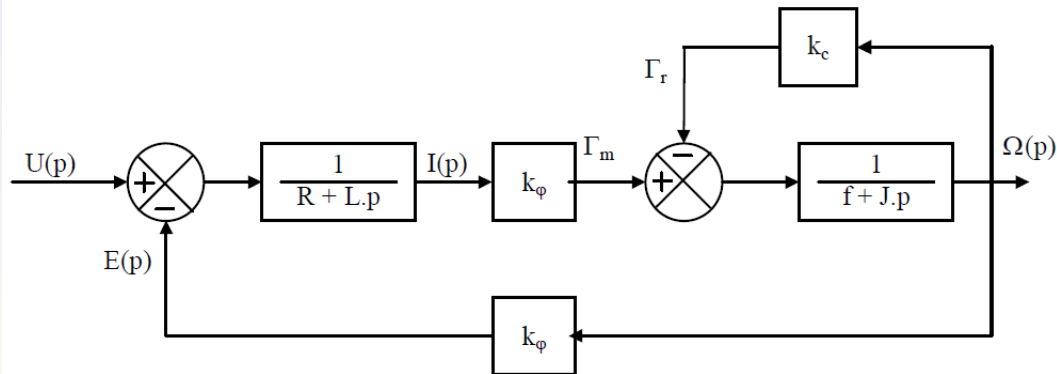


Figure 2 – Modèle de la machine pilotée en tension pour une charge de type $\Gamma_r = k_c.\Omega$

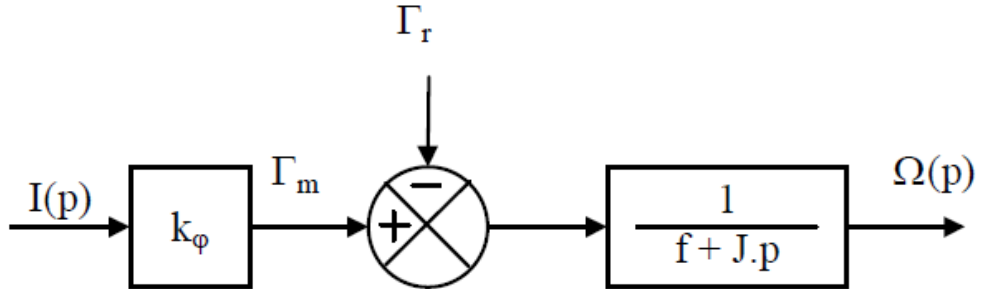
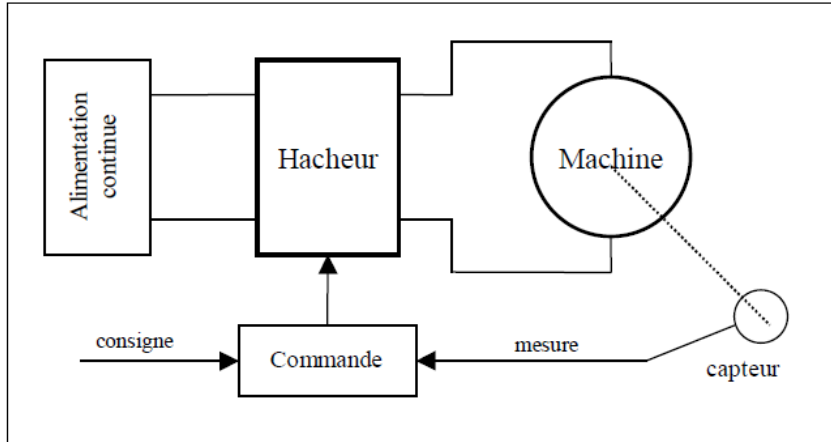


Figure 3 – Modèle de la machine pilotée en courant

Mesure des paramètres :

- En génératrice à vide : mesure de la fem à vide en fonction de la vitesse $\rightarrow k_\phi$
- A l'arrêt et à température de fonctionnement : mesure de R en DC + alimentation en créneau pour mesure de L via τ_e ($U - e = R.i + L.\frac{di}{dt}$)
- En moteur à vide : mesure de i en fonction de la vitesse Ω : $k_\phi.i = f\Omega + \Gamma_0$
- essai de ralentissement : on coupe l'alimentation lorsque le moteur tourne $\rightarrow J$ via τ_m ($J\frac{d\Omega}{dt} + f.\Omega = -\Gamma_0$)

Asservissement des moteurs à courant continu



Hypothèses :

- Excitation de la MCC maintenue constante
- Hacheur 4 quadrants (réversible) alimenté par une source de tension DC constante et réversible
- Capteurs parfaits

Rappels hacheur 4 quadrants

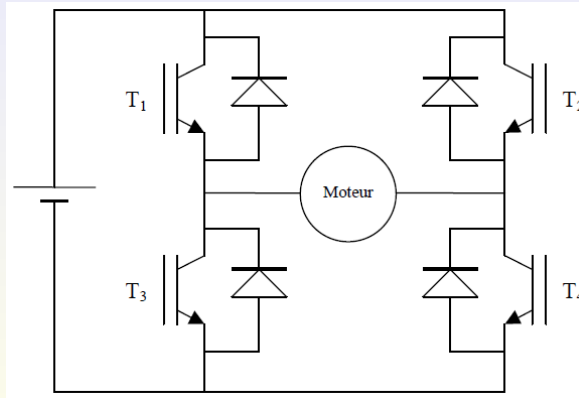


Figure 4 – Hacheur 4 quadrants

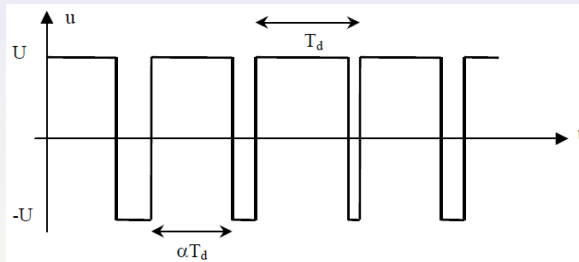


Figure 5 – Commande complémentaire synchrone

$$\langle u \rangle = (2\alpha - 1) \cdot V_{DC}$$

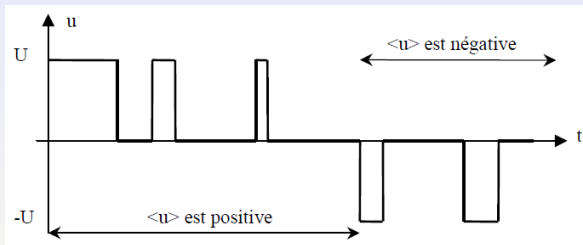


Figure 6 – Commande complémentaire décalée ou commande 3 états

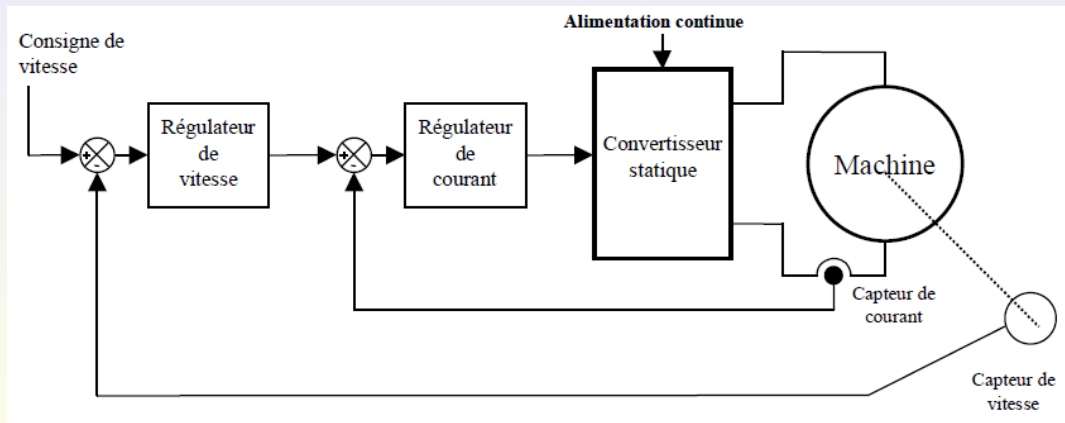
$$\langle u \rangle = (2\alpha - 1) \cdot V_{DC}$$

Fréquence de la tension de sortie :

- f_d en commande 3 états
- $2 * f_d$ en complémentaire décalée

- Fonction de transfert : $G_h(p) = \frac{U}{V_c} \cdot e^{-\frac{T_d}{2} \cdot p}$
- Linéarisation : $G_h(p) = \frac{G_0}{1 + \tau_h \cdot p}$
 - $G_0 = \frac{U}{V_c}$
 - $\tau_h = \frac{T_d}{2}$

Régulation par boucles imbriquées



Cahier des charges correcteurs :

- Précision
- Stabilité
- Marge de gain et de phase
- Bande passante (rapidité)
- ...

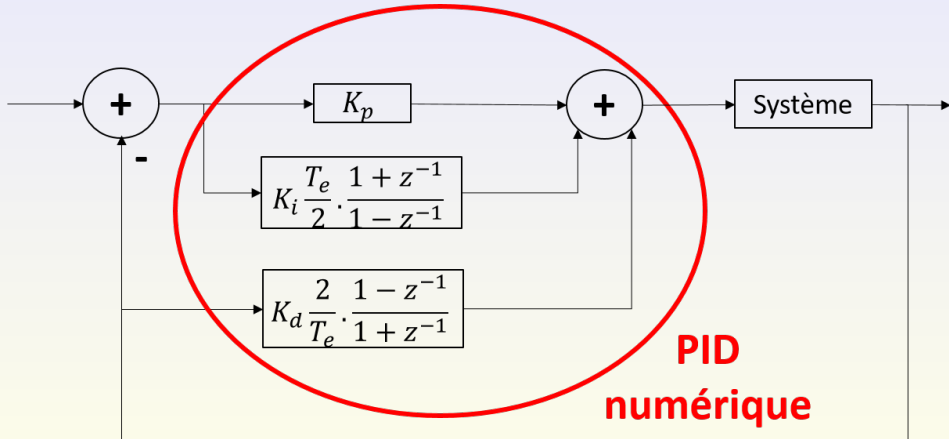
Correcteurs PID :

- Méthode Broida
- Méthode de Strejc

- Correcteur numérique : Transformation bilinéaire

$$p = \frac{2}{T_{ech}} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

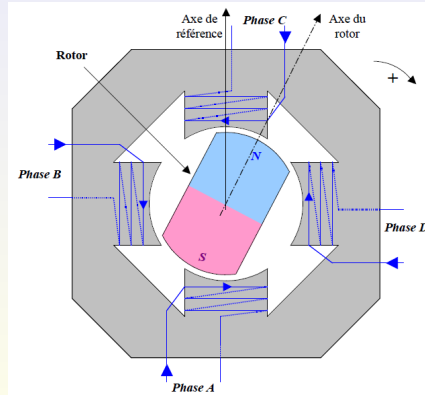
- Attention : souvent, pas la même fréquence d'échantillonnage pour le courant et la vitesse !



Les moteurs pas à pas

- 1 Les moteurs à aimants permanents
- 2 Les moteurs à réluctance variable
- 3 Les moteurs hybrides (ou réluctants polarisés)

Moteurs pas à pas à aimants permanents



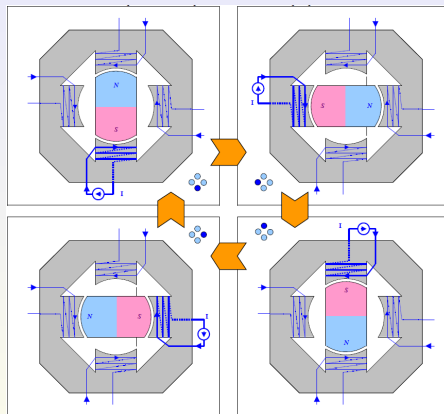


Figure 7 – Séquence d'alimentation d'un moteur pas à pas bipolaire

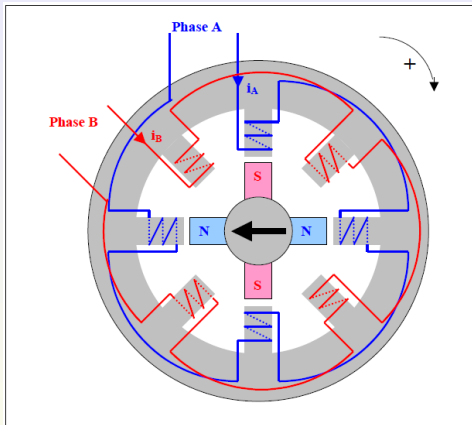


Figure 8 – Moteur pas à pas avec 2 phases au stator et 4 pôles au rotor

Nombre de phases	Nombre de pôles	Valeur du pas
2 phases	2	90°
	4	45°
	8	22.5°
	24	7.5°
4 phases	2	45°
	4	22.5°
	12	7.5°
	24	3.75°

$$N = 2.p.q$$

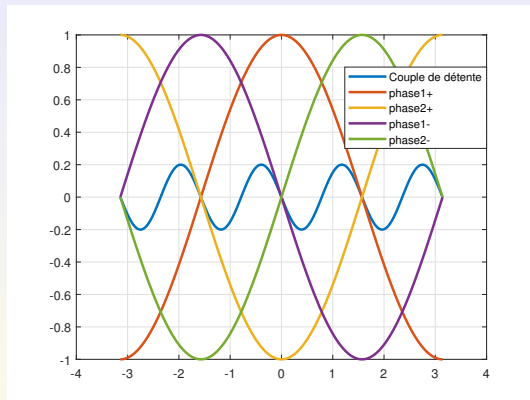


Figure 9 – Couples pour un moteur pas à pas ($p=1, q=2$)

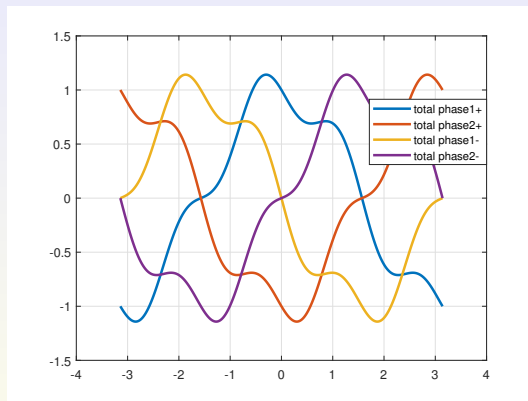


Figure 10 – Couples totaux pour un moteur pas à pas ($p=1, q=2$)

Les moteurs à réluctance variable

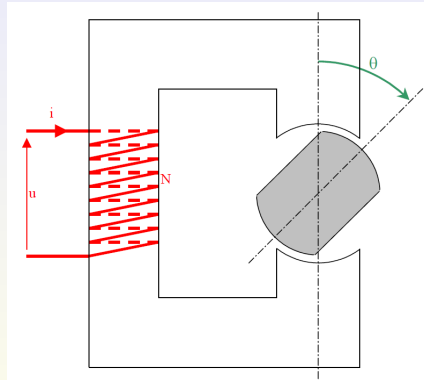


Figure 11 – Moteur à réluctance variable monophasé bipolaire

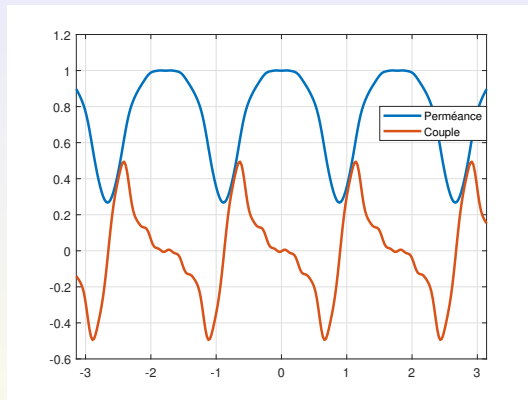


Figure 12 – Perméance et couple d'un moteur à réluctance variable

Moteur à réluctance polyphasé

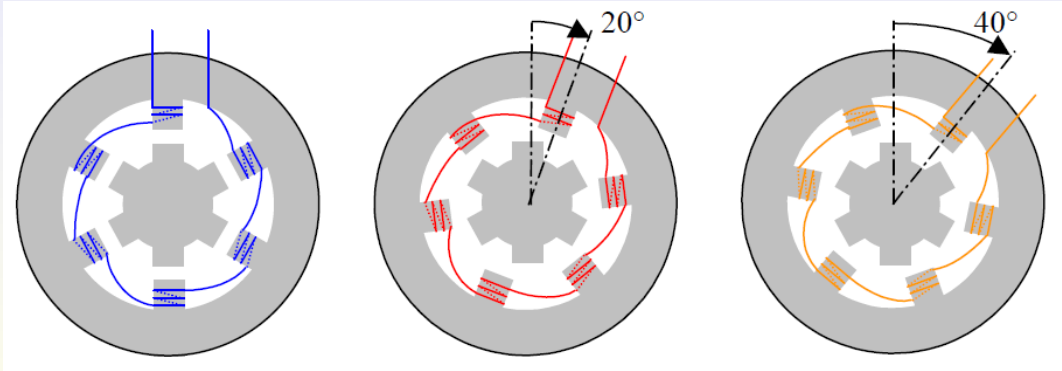
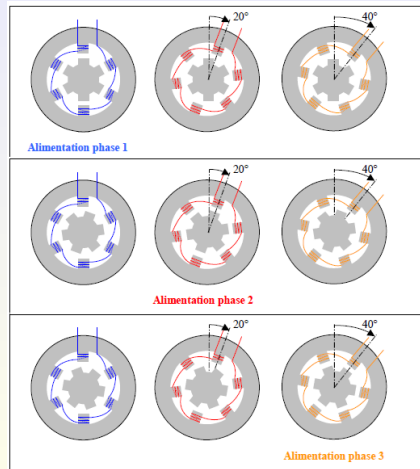
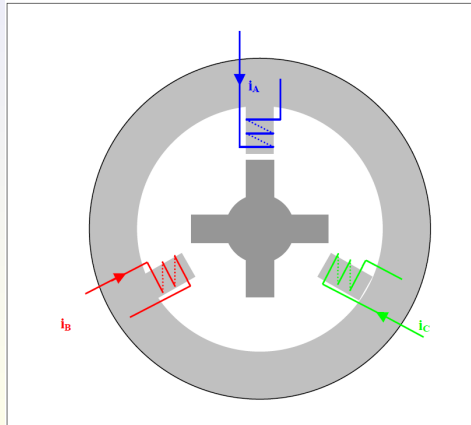


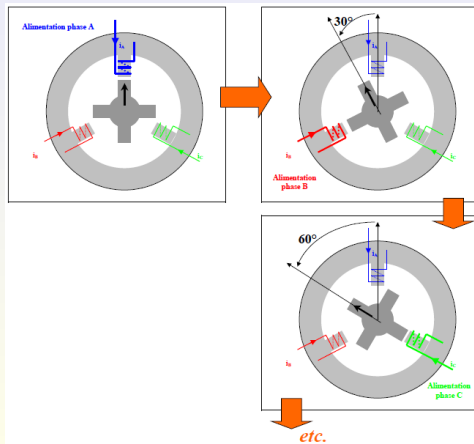
Figure 13 – MRV triphasé (attention, les 3 stators représentés sont superposés)






Moteurs à réluctance monophasés à effet Vernier



Moteurs à réluctance monophasés à effet Vernier



Bibliographie moteurs pas à pas :

-  A. MAILFERT, F.M. SARGOS, *Machines à réluctance variable (MRV) Principes des MRV. Machines à commutation.* Editions T.I., 2004
-  A. MAILFERT, F.M. SARGOS, *Machines à réluctance variable (MRV) - Machines polyphasées. Machines excitées.* Editions T.I., 2004
-  M. ABIGNOLI, C. GOELDEL *Moteurs pas à pas*, Editions T.I., 1991

Les moteurs brushless

D'un point de vue extérieur, un moteur brushless se comporte comme un moteur à courant continu. On peut donc utiliser les mêmes méthodes d'identification et d'asservissement pour le commander.

D'un point de vue interne, un moteur brushless est moteur synchrone avec un convertisseur statique intégré ("onduleur"). Il est généralement composé d'un rotor à aimant permanent et d'un stator triphasé. C'est donc une MCC "à l'envers", avec un système balais-collecteur électronique réalisé avec un onduleur intégré au moteur.

Pour réaliser la commutation des phases, une mesure de la position peut être réalisée avec un capteur à effet hall, codeur incrémental etc ... La position peut aussi être estimée via la mesure de la tension induite dans la phase du stator non alimentée ("back EMF measurement").

Modélisation des moteurs synchrones

Equation magnétique : $\Phi_{3s} = [L_s].I_{3s} + [L_{sr}].\Phi_{3s}$

Equation électrique : $V_{3s} = [R_s].I_{3s} + \frac{d\Phi_{3s}}{dt}$

Equation du couple : $\Gamma_e = \frac{1}{2} \cdot \mathcal{E}^t \cdot \left[\frac{d\mathcal{P}}{d\theta} \right] \cdot \mathcal{E}$

$$\mathcal{E} = \begin{bmatrix} N_s \cdot i_{3s} \\ \varepsilon_a \end{bmatrix} \quad \mathcal{P} = \begin{bmatrix} P_s & P_{sr} \\ P_{rs} & P_s \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2p\theta) & M_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2(p\theta - \frac{4\pi}{3})) & M_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2(p\theta - \frac{2\pi}{3})) \\ M_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2(p\theta - \frac{4\pi}{3})) & L_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2(p\theta - \frac{2\pi}{3})) & M_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2p\theta) \\ M_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2(p\theta - \frac{2\pi}{3})) & M_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2p\theta) & L_{s0} + L_{s1} \cdot \cos(2(p\theta - \frac{4\pi}{3})) \end{bmatrix}$$

θ : position du rotor par rapport à l'axe de la phase « a » statorique

p : nombre de paires de pôles

$$[L_{sr}] = M_{af} \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(p\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Système diphasé équivalent

- Transformation de Concordia : (couplage étoile et neutre non relié)

$$X_{\alpha\beta} = [T_{32}]^t \cdot X_{3s} \quad \text{avec} \quad T_{32} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix}$$

- Transformation de Park : (matrice de rotation d'un angle $p\theta$)

$$X_{ps} = P(-p\theta) \cdot X_{\alpha\beta}$$

$$P(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

- $V_{ps} = P(-p\theta).[T_{32}]^t.V_{3s}$
- $I_{ps} = P(-p\theta).[T_{32}]^t.I_{3s}$
- $\phi_{ps} = P(-p\theta).[T_{32}]^t.\phi_{3s}$

- $\Phi_d = L_d.i_d + \phi_f$

- $\Phi_q = L_q.i_q$

- $v_d = R_s.i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - p\dot{\theta}.\phi_q$

- $v_q = R_s.i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + p\dot{\theta}.\phi_d$

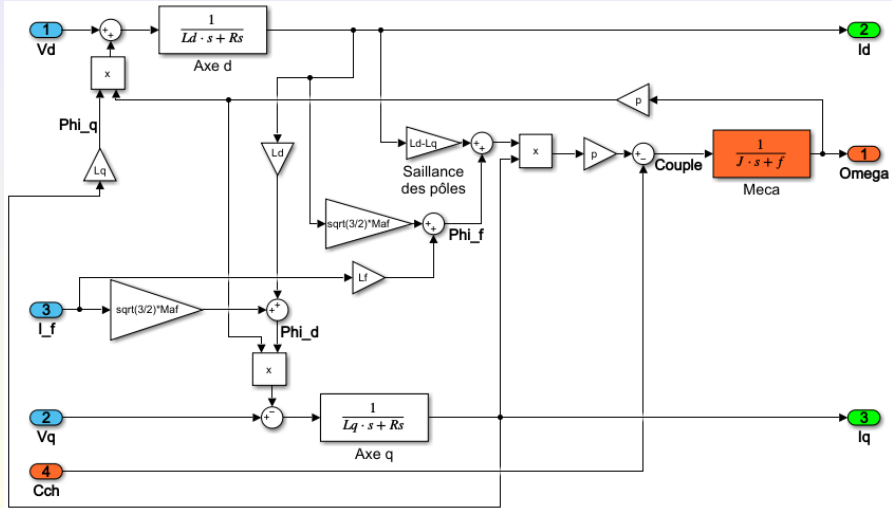
$$L_d = L_c + \frac{3}{2}L_{s1}$$

$$L_q = L_c - \frac{3}{2}L_{s1}$$

$$\phi_f = \sqrt{\frac{3}{2}}.M_{af}.I_r$$

- $v_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\dot{\theta} \cdot L_q \cdot i_q$
- $v_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\dot{\theta} \cdot L_d \cdot i_d + p\dot{\theta} \cdot \phi_f$
- $\Gamma = p \cdot \phi_f \cdot i_q + p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q$

Commande du couple via i_q , en maintenant $i_d = 0$: $\Gamma = p \cdot \phi_f \cdot i_q$



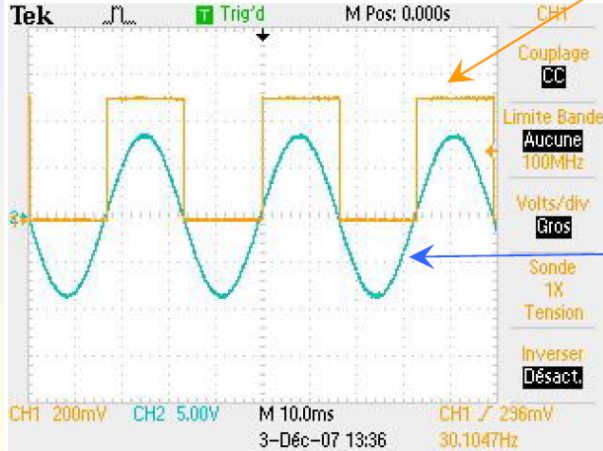
Commandes de la machine synchrone

Commande séquentielle ("*Aiguillage des courants*")

$$\Gamma = \frac{i_a \cdot e_a + i_b \cdot e_b + i_c \cdot e_c}{\Omega}$$

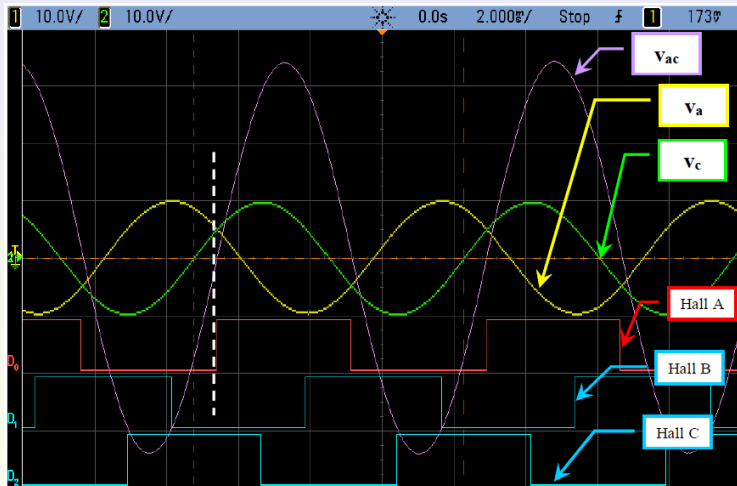
Principe :

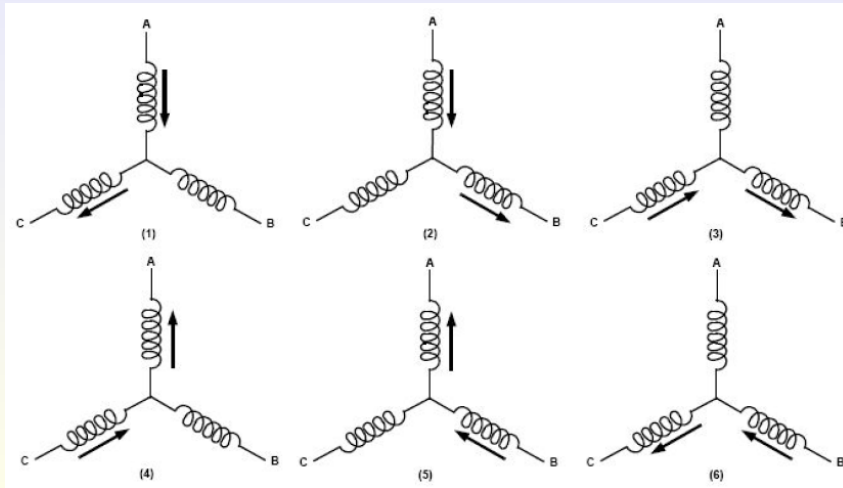
- "Aiguiller" les courants statoriques afin d'avoir les f.e.m. et les courants en phase
- Utilisation d'un capteur à effet Hall afin de déterminer la position du rotor "par secteur" de $\pi/3$
- Le capteur à effet Hall permet de déterminer le passage par 0 des f.e.m.
- Attention : commande de l'onduleur en "pleine onde", les signaux ne sont pas sinusoïdaux mais rectangulaires → utilisation du premier harmonique



Hall
voie A

$V_a - V_c$





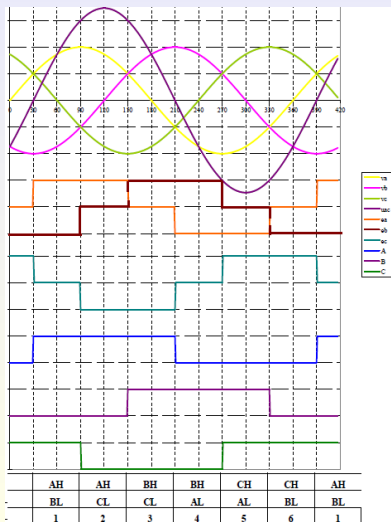
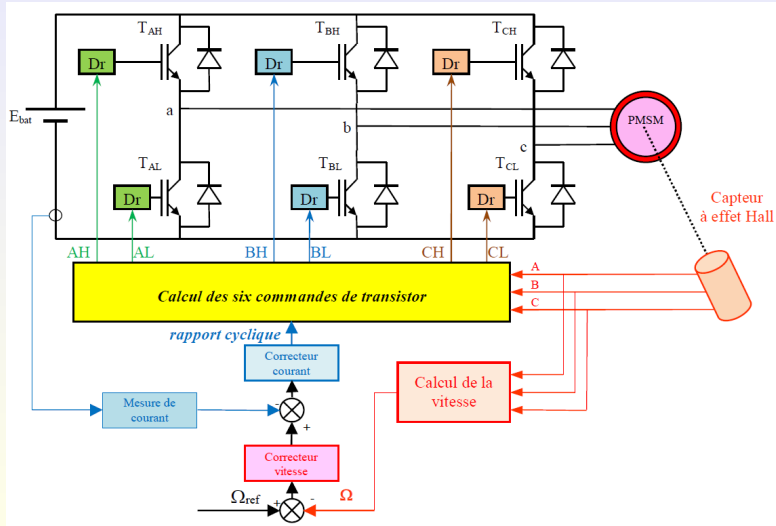
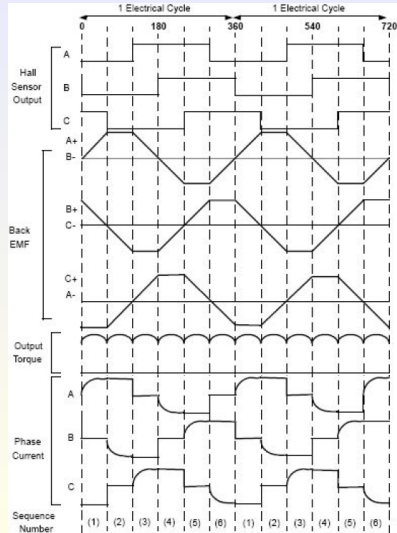


Table de commande de l'onduleur :

A	B	C	(n)	AH	AL	BH	BL	CH	CL
1	0	1	(1)	ON	off	off	ON	off	off
1	0	0	(2)	ON	off	off	off	off	ON
1	1	0	(3)	off	off	ON	off	off	ON
0	1	0	(4)	off	off	ON	off	ON	off
0	1	1	(5)	off	ON	off	off	ON	off
0	0	1	(6)	off	ON	off	ON	off	off

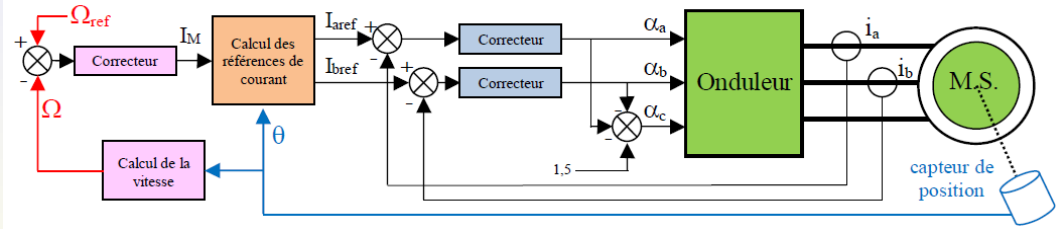




Commande scalaire de type "a,b,c" : autopilotage

Principe :

- Utilisation d'un capteur de position afin de mesurer la position du rotor
- Définition des consignes de courant :
 - $I_{a,ref} = I_M \cdot \sin(p\theta)$
 - $I_{b,ref} = I_M \cdot \sin(p\theta - 2\pi/3)$
 - $I_{c,ref} = I_M \cdot \sin(p\theta - 4\pi/3)$
- Commande complémentaire avec temps morts de chaque bras de pont
- Définition des rapports cycliques :
 - $\alpha_a = 1/2 + K \cdot (I_{a,ref} - i_a)$
 - $\alpha_b = 1/2 + K \cdot (I_{b,ref} - i_b)$
 - $\alpha_c = 3/2 - \alpha_a - \alpha_b$



Commande vectorielle

Principe :

- Utilisation d'un modèle fin de la machine
- Commande de la machine dans le domaine de Park afin d'avoir des consignes qui ne varient pas dans le temps

- $\phi_d = L_d \cdot i_d + \Phi_f$

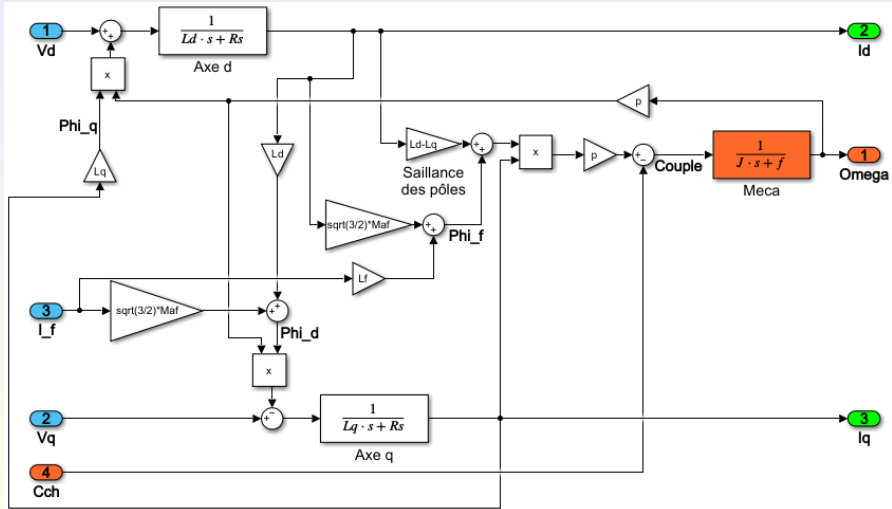
- $\phi_q = L_q \cdot i_q$

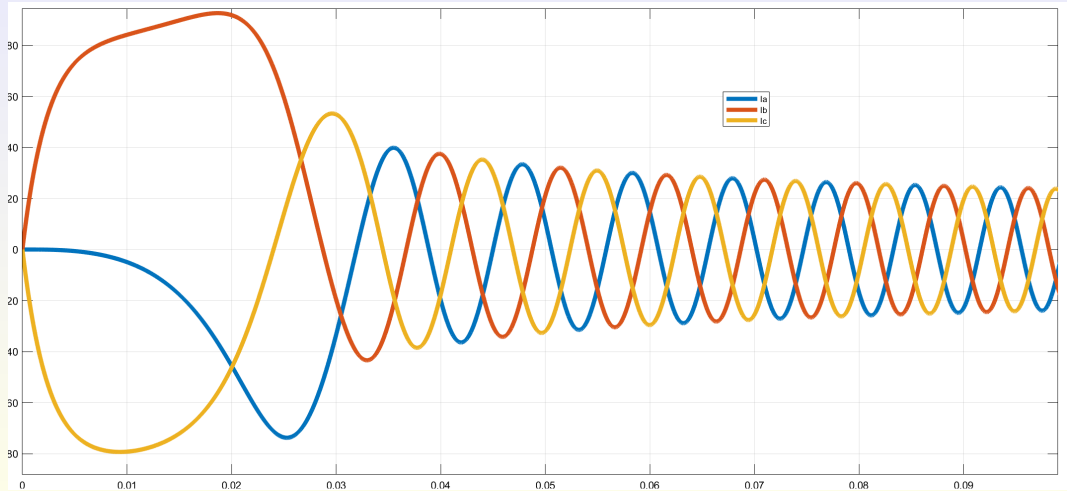
- $v_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - p \cdot \Omega \cdot \phi_q$

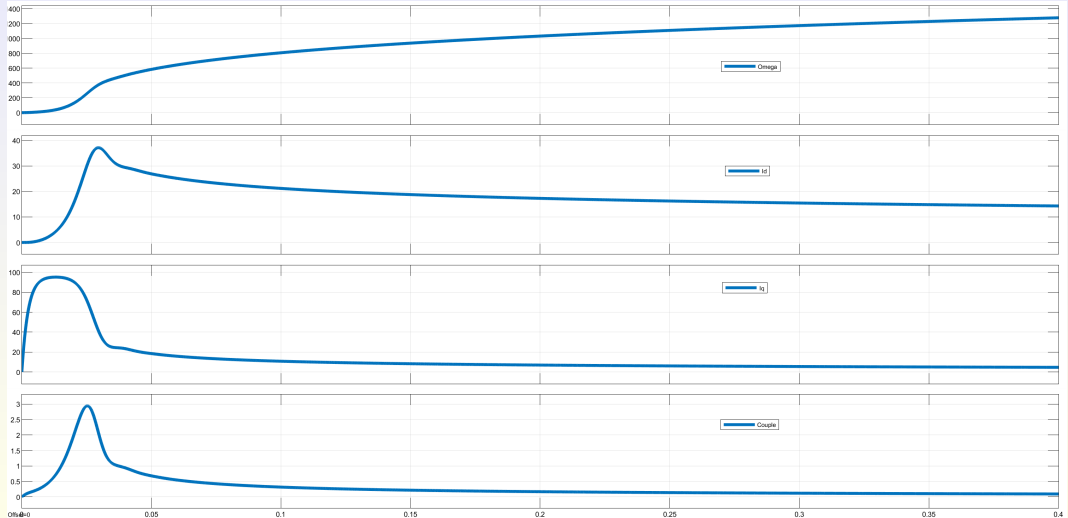
- $v_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + p \cdot \Omega \cdot \phi_d$

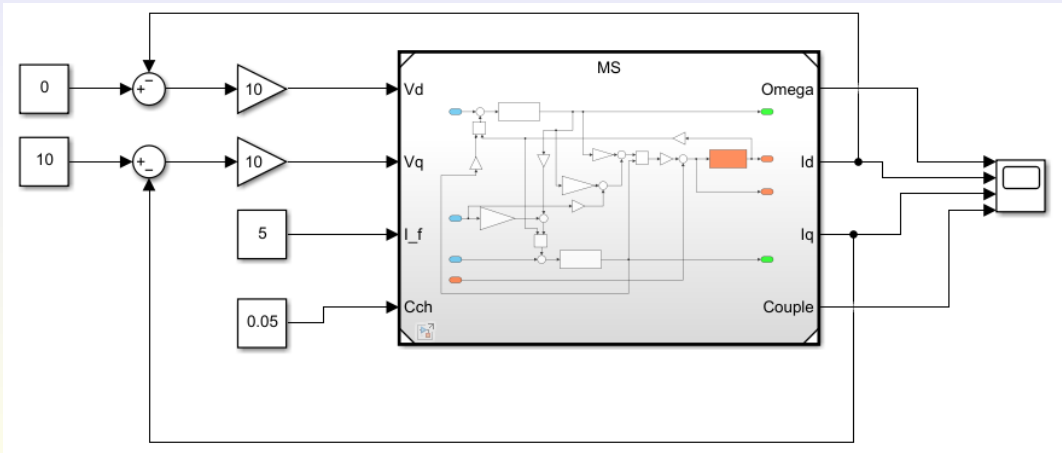
Commande à $i_d = 0$, contrôle du couple via i_q

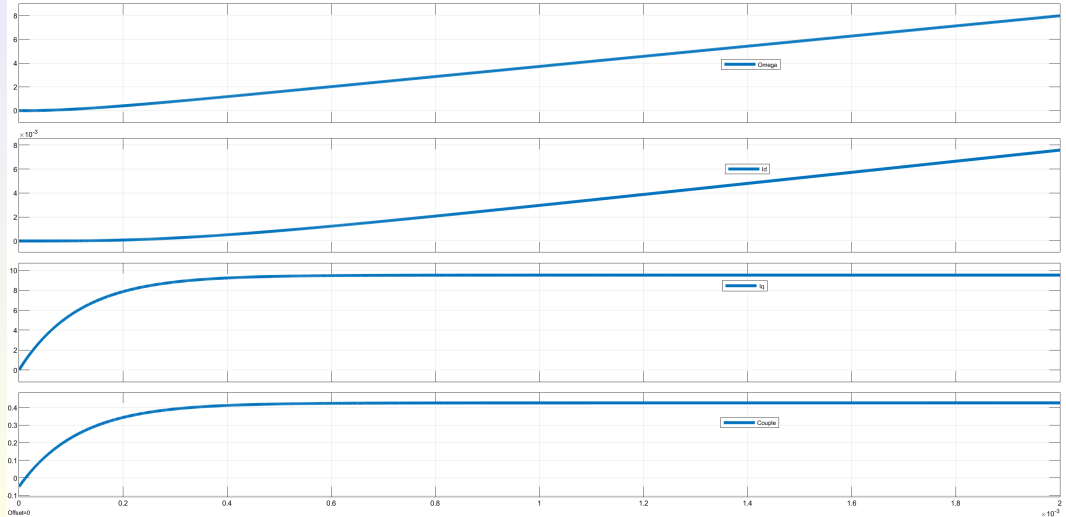
$$\Gamma = p \cdot \phi_f \cdot i_q$$

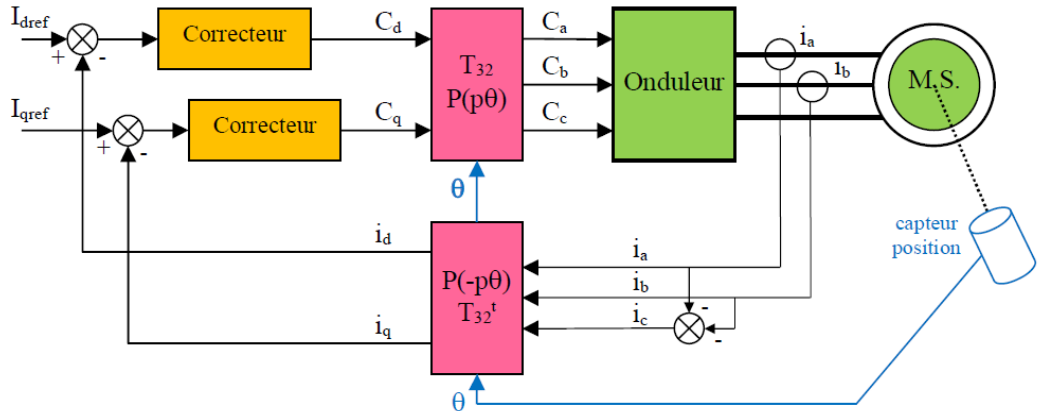












Conclusion sur la commande de machines synchrones

- Commande séquentielle :
 - Complexité faible
 - Capteur de position simple (effet Hall) ou sans capteur de position
 - Ondulations du couple
 - Adaptée aux "faibles" puissances
- Commande scalaire
 - Complexité moyenne
 - Capteur de position nécessaire
 - Correcteurs compliqués à calculer car grandeurs variables à suivre
 - Adaptée aux "moyennes" puissances et dynamiques "moyennes"
- Commande vectorielle
 - Complexité élevée, calculs complexes à réaliser (numérique + DSP souvent nécessaire)
 - Capteur de position nécessaire
 - Correcteurs simples à calculer, grandeurs "constantes" à suivre
 - Adaptée aux "fortes" puissances et dynamiques "rapides"