

Technologie des Asservissements

Edouard Laroche (laroche@lsiit.u-strasbg.fr)
Bernard Bayle (bernard@eavr.u-strasbg.fr)
Jacques Gangloff (jacques@eavr.u-strasbg.fr)
<http://eavr.u-strasbg.fr/perso/edouard/Student/>



05/10/2005

Université Louis Pasteur,
ENSPS Option ISAV
Master ISTI-AR



1

Objectifs

- Connaître les différents systèmes électriques d'actionnement (moteur + électronique de puissance)
- Connaître les différents types de commande d'actionneur électrique.
- Être capable de choisir et de mettre en œuvre une solution moteur + variateur

2

Bibliographie 1

- **Electrotechnique industrielle**, Guy Séguier et Francis Notelet, Tech et Doc, 1994
- **L'Electronique de puissance**, Guy Séguier, Dunod, 1990
- **Modélisation et commande de la machine asynchrone**, J.P. Caron et J.P. Hautier, Technip, 1995
- **Control of Electrical Drives**, W. Leonard, Springer-Verlag, 1996

3

Bibliographie 2

- **Vector control of AC machines**, Peter Vas, Oxford university press, 1990
- **Commande des machines à vitesse variable**, Techniques de l'ingénieur, vol D3.III, n°3611, 1996
- **Actionneurs électriques**, Guy Grellet et Guy Clerc, Eyrolles, 1997
- **Modélisation contrôle vectoriel et DTC**, sous la direction de C. Canudas de Wit, Hermes, 2000

4

Plan

1. **Introduction à l'Électrotechnique (E.L.)**
2. **Les actionneurs électriques (E.L.)**
3. **Les convertisseurs statiques (E.L.)**
4. **Les variateurs (B.B.)**
5. **Architecture de la commande (J.G.)**

5

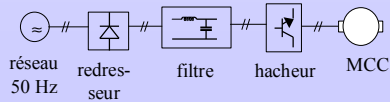
ch 1. Introduction à l'électrotechnique

- Exemple d'ensemble moteur + convertisseur
- Grandeurs électriques
- Lois des circuits électriques
- Lois de la magnétostatique

6

1.1. Les chaînes d'alimentation des moteurs (1)

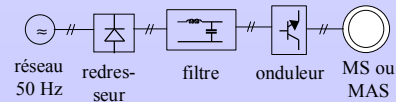
- moteur à courant continu : redresseur, filtre et hacheur



7

Alimentation des moteurs (2)

- moteurs à courant alternatif (synchrone et asynchrone) : redresseur, filtre et onduleur



8

1.2. Lois des circuits électriques

- éléments de base
- conventions
- puissance
- régime sinusoïdal
- régime alternatif non sinusoïdal, harmoniques
- systèmes triphasés équilibrés
- systèmes triphasés déséquilibrés

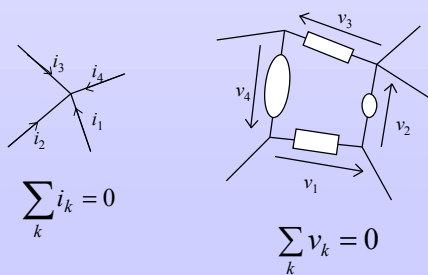
9

Éléments de base de l'électricité

- Source de tension continue: $v(t)=E$
- Source de tension sinusoïdale: $v(t)=E\sqrt{2}\cos(\omega t)$
- Source de courant continu: $i(t)=I$
- Source de courant alternatif: $i(t)=I\sqrt{2}\cos(\omega t-\delta)$
- Résistance (Ohm, Ω): $v(t)=Ri(t)$
- Inductance (Henry, H): $v(t)=Ldi(t)/dt$
- Condensateur (Farad, F): $i(t)=Cdv(t)/dt$

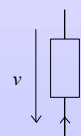
10

Loi des nœuds, loi des mailles

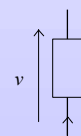


11

Convention des dipôles électriques



convention récepteur: on compte la puissance absorbée par le dipôle



convention générateur: on compte la puissance fournie par le dipôle

12

Valeur moyenne, valeur efficace

- valeur moyenne: $\langle v(t) \rangle = \frac{1}{T_r} \int v(t) dt$
- valeur efficace: $V = \sqrt{\langle v^2(t) \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T_r} \int v^2(t) dt}$
- définition: un signal périodique est **alternatif** si sa valeur moyenne est nulle

13

Puissance électrique

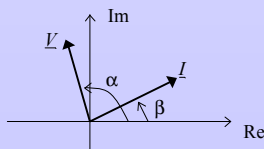
- puissance instantanée: $p(t) = v(t)i(t)$, (Watt, W)
- puissance active = puissance moyenne: $P = \langle p(t) \rangle$
- puissance apparente: $S = VI$ (produit des valeurs efficaces, VA)
- facteur de puissance $F_p = P/S$

14

Régime sinusoïdal: grandeurs de Fresnel

$$v(t) = V\sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha) \rightarrow \underline{V} = V \exp(j\alpha)$$

$$i(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \beta) \rightarrow \underline{I} = I \exp(j\beta)$$



15

Puissance en régime sinusoïdal

$$v(t) = V\sqrt{2} \cos(\omega t)$$

$$i(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi)$$

$$P = VI \cos(\varphi)$$

$$Q = VI \sin(\varphi)$$

$$S = VI$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

puissance
réactive
(var)

16

Impédance et puissance complexes: définitions

- dipôle passif: $\underline{V} = \underline{Z} \underline{I}$

$$\underline{Z}_R = R$$

$$\underline{Z}_L = jL\omega$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{jC\omega}$$

$$\underline{S} = \underline{V} \underline{I}^*$$

$$P = \text{Re}(\underline{S})$$

$$Q = \text{Im}(\underline{S})$$

$$S = |\underline{S}|$$

17

Impédance et puissance complexes: calculs

$$\underline{V} = \underline{Z} \underline{I}$$

$$\underline{S} = I^2 \underline{Z} = \frac{V^2}{\underline{Z}^*}$$

$$P = I^2 \text{Re}(\underline{Z}) = V^2 \text{Re}\left(\frac{1}{\underline{Z}^*}\right)$$

$$Q = I^2 \text{Im}(\underline{Z}) = V^2 \text{Im}\left(\frac{1}{\underline{Z}^*}\right)$$

$$S = I^2 |\underline{Z}| = \frac{V^2}{|\underline{Z}|}$$

18

Admittance et puissance complexes: calculs

$$\underline{I} = \underline{YU}$$

$$\underline{S} = U^2 \underline{Y}^* = \frac{I^2}{\underline{Y}}$$

$$P = V^2 \operatorname{Re}(\underline{Y}) = I^2 \operatorname{Re}\left(\frac{1}{\underline{Y}}\right)$$

$$Q = -V^2 \operatorname{Im}(\underline{Y}) = I^2 \operatorname{Im}\left(\frac{1}{\underline{Y}}\right)$$

$$S = V^2 |\underline{Y}| = \frac{I^2}{|\underline{Y}|}$$

19

Signal alternatif non sinusoïdal

$$x(t) = \sum_k X_k \sqrt{2} \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad \text{— signal périodique de période } 2\pi/\omega$$

$$x_1(t) = X_1 \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha_1) \quad \text{— fondamental}$$

$$d = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} X_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} X_k^2}} \quad \text{— Le taux de distorsion } d \text{ est le rapport des valeurs efficaces de la partie déformante du signal et du signal total}$$

20

Régime périodique alternatif: tension alternative

$$v(t) = V\sqrt{2} \cos(\omega t) \quad P = VI_1 \cos(\varphi_1)$$

$$i(t) = \sum_k I_k \sqrt{2} \cos(k\omega t - \varphi_k) \quad Q = VI_1 \sin(\varphi_1)$$

$$I^2 = \sum_k I_k^2$$

$$S = VI = V \sqrt{\sum_k I_k^2}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

puissance déformante (VA)

$$D = V \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}$$

21

Régime périodique alternatif:

$$v(t) = \sum_k V_k \sqrt{2} \cos(k\omega t + \alpha_k)$$

$$i(t) = \sum_k I_k \sqrt{2} \cos(k\omega t + \alpha_k - \varphi_k)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\varphi_1)$$

$$P = \sum_k V_k I_k \cos(\varphi_k)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\varphi_1)$$

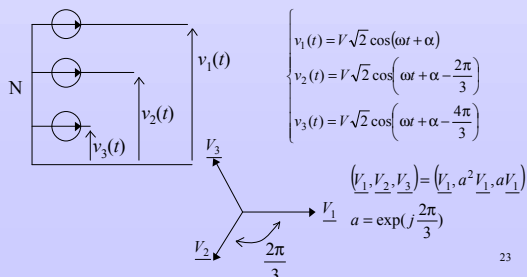
$$Q = \sum_k V_k I_k \sin(\varphi_k)$$

$$S = VI = \sqrt{\sum_k V_k^2} \sqrt{\sum_k I_k^2}$$

22

Système triphasé équilibré 1

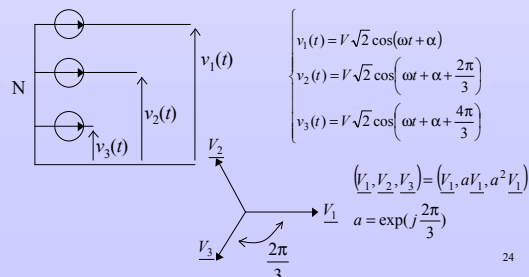
- système triphasé équilibré **direct** (de tensions sinusoïdales):



23

Système triphasé équilibré 2

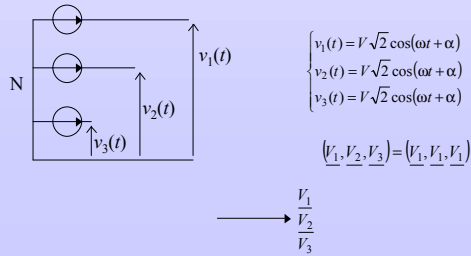
- système triphasé équilibré **inverse** (de tensions sinusoïdales):



24

Système triphasé équilibré 3

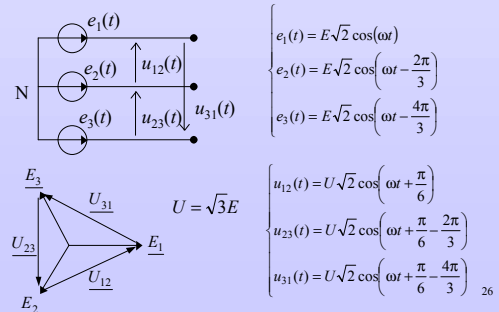
- système triphasé équilibré **homopolaire** (de tensions sinusoïdales):



25

Système triphasé équilibré 4

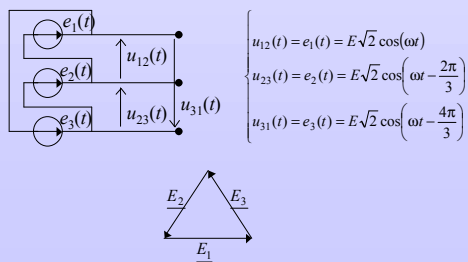
- couplage étoile:



26

Système triphasé équilibré 5

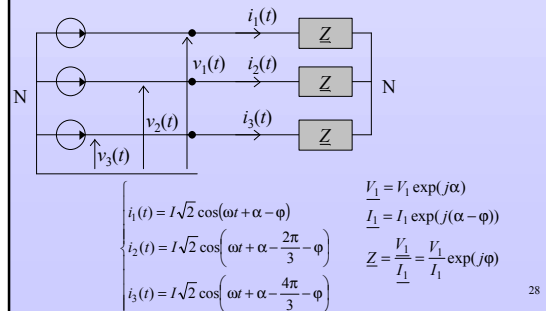
- couplage triangle:



27

Système triphasé équilibré 6

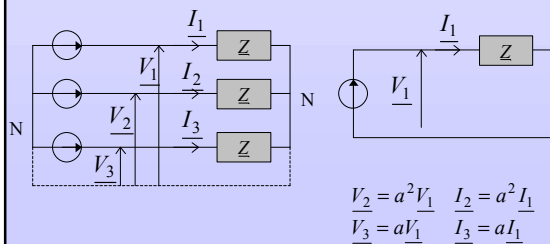
- couplage étoile/étoile (1):



28

Système triphasé équilibré 7

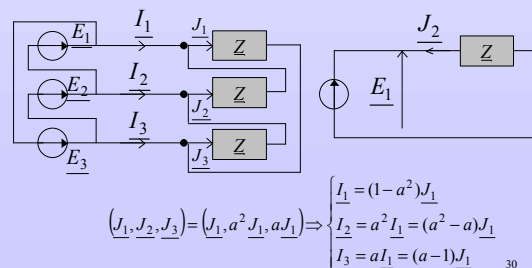
- couplage étoile/étoile (2): schéma monophasé équivalent



29

Système triphasé équilibré 8

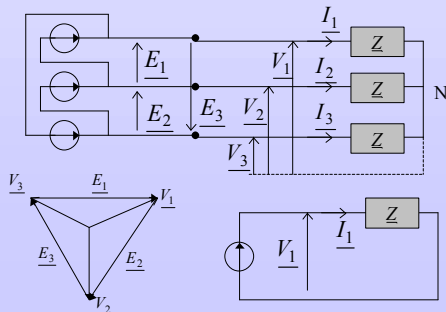
- couplage triangle/triangle: schéma monophasé équivalent



30

Système triphasé équilibré 9

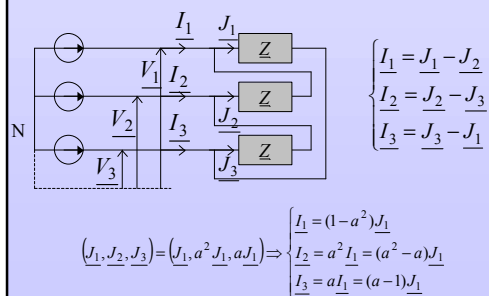
- couplage triangle/étoile: source étoile équivalente



31

Système triphasé équilibré 10

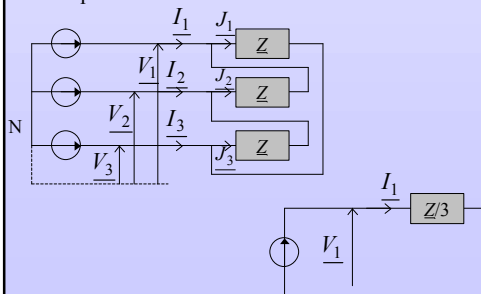
- couplage étoile/triangle (1)



32

Système triphasé équilibré 11

- couplage étoile/triangle (2): charge étoile équivalente



33

Système triphasé déséquilibré 1

- système triphasé déséquilibré de tensions:

$$\begin{cases} v_1(t) = V_1 \sqrt{2} \cos(\omega t) \\ v_2(t) = V_2 \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \delta_2\right) \\ v_3(t) = V_3 \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \delta_3\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_1 = V_d + V_i + V_o \\ V_2 = a^2 V_d + a V_i + V_o \\ V_3 = a V_d + a^2 V_i + V_o \end{cases}$$

34

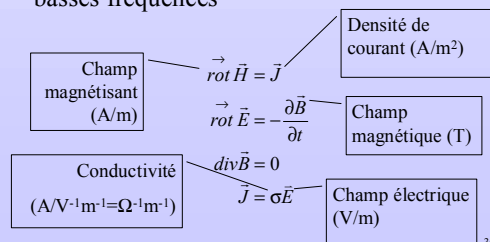
1.3. Lois de la magnétostatique

- Lois de Maxwell
- Théorème d'Ampère
- Conservation du flux magnétique
- Lois de comportement des matériaux
- Modélisation des bobines à noyau de fer et des transformateurs
- Production de couple

35

Électrocinétique 1

- Lois de Maxwell simplifiées dans le cas des basses fréquences



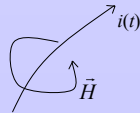
36

Électrocinétique 2

- Théorème d'Ampère : l'intégrale du champ magnétisant le long d'un contour fermé est égal au courant total traversant la surface définie par le contour

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \vec{J} d\vec{S}$$

- Sens du champ: règle de la main droite

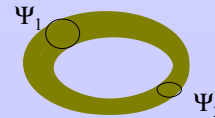


37

Électrocinétique 3

- Flux Ψ (Wb) $\Psi = \iint_S \vec{B} d\vec{S}$

- Conservation du flux: $\Psi_1 = \Psi_2$



38

Électrocinétique 4

- Loi de Lenz: la variation du flux donne lieu à une fem qui tend à s'opposer à la cause des variations
- Loi de Faraday: force électromotrice (V)

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

39

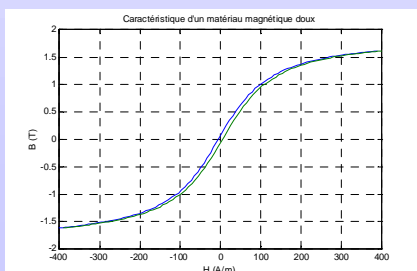
Loi de comportement magnétique des matériaux (caractéristique)

- Vide: $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$
 $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m: perméabilité du vide
- Matériau magnétique linéaire: $\vec{B} = \mu \vec{H}$
avec $\mu = \mu_0 \mu_r > \mu_0$
 μ_r : perméabilité relative
($\mu_r > 1$, ex: $\mu_r \approx 10000$ pour un 'bon' matériau magnétique)

40

Loi de comportement 2

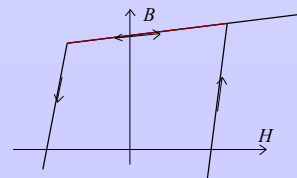
- Matériau magnétique doux : tôles utilisées pour réaliser les circuits magnétiques (transformateurs et moteurs)



41

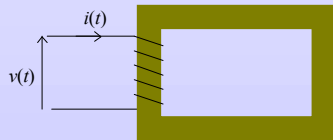
Loi de comportement 3

- Matériau magnétique dur : aimants permanents (excitation des MCC et MS de petites puissances)
- $B = \mu_0(H_c + H) = M + \mu_0 H$



42

Bobine à noyau de fer



- circuit magnétique homogène composé d'un matériau magnétique linéaire de section uniforme S , de longueur l avec $\mu_r \gg 1$
- circuit électrique composé de n spires enroulées autour du circuit magnétique

43

Bobine à noyau de fer 2

- Pour un courant positif, déterminez le sens et l'amplitude du champ magnétisant
- Déterminez le flux vu du circuit électrique
- Déterminez l'inductance L de la bobine
- Donnez l'équation différentielle liant $v(t)$ et $i(t)$

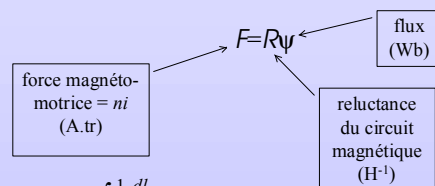
44

Méthode de résolution

- Théorème d'Ampère $\rightarrow H$
- Loi de comportement $\rightarrow B$
- Intégration sur la surface $\rightarrow \Phi$ (flux dans le matériau)
- Multiplication par $n \rightarrow \varphi$ (flux vu par la bobine)
- Loi de Faraday $\rightarrow \text{fem}$
- Prise en compte de la résistance et du flux de fuite \rightarrow équation de détermination de la tension

45

Loi d'Hopkinson



$$R = \int \frac{1}{\mu} \frac{dl}{S}$$

$$R = \frac{l}{\mu S} \quad \text{dans le cas d'une section } S \text{ et d'une perméabilité } \mu \text{ uniformes}$$

$$L = \frac{n^2}{R}$$

46

Transformateur 1



- circuit magnétique (μ_r) de section S et de longueur l
- circuit électrique primaire de n_1 spires de résistance R_1 ; circuit électrique secondaire de n_2 spires de résistance R_2 ;

47

Transformateur 2

- On suppose les circuits électriques primaire et secondaire respectivement parcourus par les courants i_1 et i_2 positifs
- Déterminez l'amplitude du champ magnétisant
- Déterminez le flux vu des circuits électriques primaires et secondaires
- Déterminez les inductances propres L_1 et L_2 du primaire et du secondaire ainsi que la mutuelle inductance M
- En tenant compte des chutes de tensions ohmiques, donnez les équations différentielles liant $u_1(t)$, $u_2(t)$, $i_1(t)$ et $i_2(t)$

48

Bobine avec entrefer 1

- circuit magnétique homogène composé de matériau magnétique linéaire de section uniforme S , de longueur l avec $\mu_r \gg 1$
- le circuit est interrompu sur une longueur $e \ll l$.
- circuit électrique composé de n spires enroulées autour du circuit magnétique

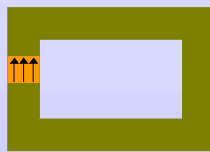
49

Bobine avec entrefer 2

- Donnez l'expression de l'inductance
- Généralement, on néglige la réluctance du fer devant celle de l'entrefer

50

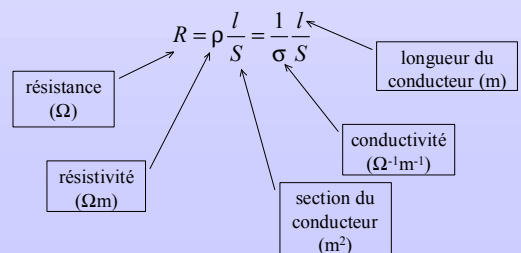
Circuit magnétique avec aimant



- circuit magnétique composé d'un matériau magnétique linéaire de section uniforme S , de longueur l_f avec $\mu_r \gg 1$ et d'un aimant de même surface et de longueur l_a produisant un champ à vide M (T)
- Calculez le flux traversant le circuit magnétique

51

Résistance du circuit électrique



52

Fuites du circuit magnétique

- Une partie du flux qui traverse le primaire n'arrive pas au secondaire mais se boucle sur lui-même

$$\Psi_1 = \Psi_{f1} + \Psi_{12} = l_{f1} i_1 + n_1 \Psi_m$$

$$\Psi_2 = \Psi_{f2} + \Psi_{21} = l_{f2} i_2 + n_2 \Psi_m$$

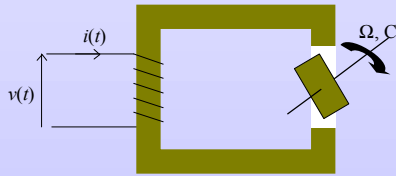
53

Pertes dans les matériaux magnétiques

- Pertes par hystérésis $\propto \hat{B}^2 \omega$
- Pertes par courant de Foucault $\propto \hat{B}^2 \omega^2$
→ feuilletage des circuits magnétiques

54

Système électro-mécanique



- La partie électrique reçoit la puissance $p=v \cdot i$
- La partie mécanique fournit la puissance $\Omega \cdot C$
- La partie magnétique couple les parties électriques et mécaniques et stocke une partie de l'énergie

55

Détermination du couple (1)

- Bilan d'énergie

$$\delta W_e = dW_{mag} + \delta W_{méca} \quad \delta W_e = v \cdot i \cdot dt = i \cdot d\phi$$

$$\delta W_{méca} = C \cdot d\theta$$

$$dW_{mag} = i \cdot d\phi - C d\theta$$

$$= \left. \frac{\partial W_{mag}}{\partial \phi} \right|_{\theta=cste} \cdot d\phi + \left. \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta} \right|_{\phi=cste} \cdot d\theta \Rightarrow \begin{cases} \left. \frac{\partial W_{mag}}{\partial \phi} \right|_{\theta=cste} = i \\ C = - \left. \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta} \right|_{\phi=cste} \end{cases}$$

56

Détermination du couple (2)

- Énergie magnétique – coénergie magnétique

$$W_{mag} = \int_0^\phi i \cdot d\phi$$

$$\tilde{W}_{mag} = \int_0^i \phi \cdot di$$

$$dW_{mag} + d\tilde{W}_{mag} = i \cdot d\phi + \phi \cdot di$$

$$W_{mag} + \tilde{W}_{mag} = i \cdot \phi$$

$$d\tilde{W}_{mag} = \phi \cdot di + C d\theta$$

$$= \left. \frac{\partial \tilde{W}_{mag}}{\partial i} \right|_{\theta=cste} \cdot di + \left. \frac{\partial \tilde{W}_{mag}}{\partial \theta} \right|_{i=cste} \cdot d\theta \Rightarrow C = \left. \frac{\partial \tilde{W}_{mag}}{\partial \theta} \right|_{i=cste}$$

57

Détermination du couple (3)

- Cas linéaire (non saturé) : $C = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\theta} i^2$
- Cas linéaire multivariable:

$$C = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{dL_{kl}}{d\theta} i_k i_l = \frac{1}{2} i^T \frac{dL}{d\theta} i$$

$$i = \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} L_{11} & \cdots & L_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ L_{n1} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix}$$

58

ch 2. Les convertisseurs statiques

- 4.1. Les composants (interrupteurs)
- 4.2. Les redresseurs à Diodes (*rectifier*)
- 4.3. Les hacheurs (*chopper*)
- 4.4. L'onduleur (*inverter*)

59

2.1. Les composants de l'électronique de puissance

- Diode
- Thyristor
- Transistor, Thyristor GTO
- Transistor et Diode en antiparallèle
- Plages de tension et courant

60

Diode

- interrupteur passif monodirectionnel en courant et en tension
- condition de mise en conduction: $v_D \geq 0$
- condition de blocage: $i_D \leq 0$
- 2 technologies: diodes de redressement (50 Hz) et diodes rapides (diodes shotky) pour hacheurs et onduleurs

61

Thyristor

- diode commandable à la mise en conduction
- interrupteur passif monodirectionnel en courant et bidirectionnel en tension
- condition de mise en conduction: $v_T \geq 0$ et un courant dans la gachette
- condition de blocage: $i_T \leq 0$

62

Transistor et thyristor GTO

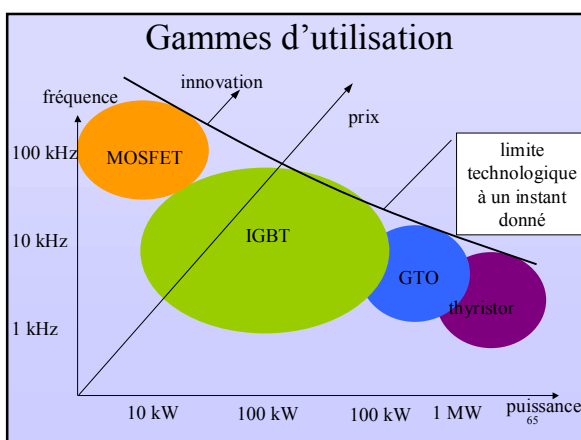
- interrupteur passif monodirectionnel en courant et bidirectionnel en tension
- commandable à la mise en conduction et au blocage
- condition de mise en conduction: $v_T \geq 0$ et un courant dans la gachette
- condition de blocage: $i_T \leq 0$
- techno: bipolaire, mosfet, IGBT, GTO

63

Association transistor et diode

- interrupteur bidirectionnel en courant
- commandable à la mise en conduction et au blocage dans le sens $i_T > 0$
- mise en conduction et blocage automatiques dans le sens $i_T < 0$

64



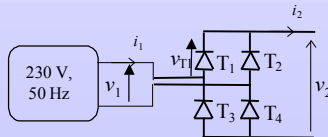
2.2. Les redresseurs à Diodes

- Redresseur monophasé
- Conduction discontinue
- Redresseur triphasé
- Modélisation fine

66

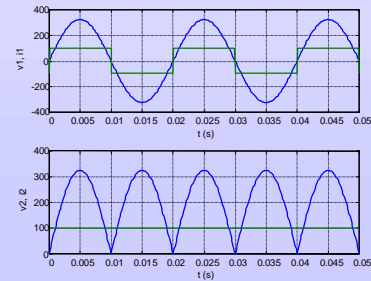
Redresseur monophasé

- Structure



67

monophasé (2) : formes d'onde (2)



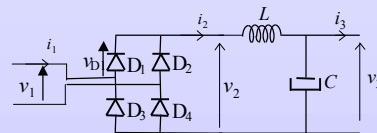
68

Monophasé (3) : Étude et modélisation

- *hypothèse : Conduction continue* ($i_2 > 0$)
- Cas T1 et T4 passants, T2 et T3 bloqués
 - $v_2 = v_1$, $i_1 = i_2$
 - condition : $v_1 > 0$
- Cas T1 et T4 bloqués, T2 et T3 passants
 - $v_2 = -v_1$, $i_1 = -i_2$
 - condition : $v_1 < 0$

69

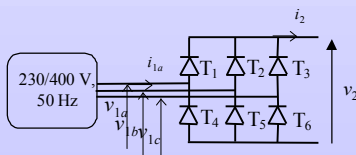
Conduction discontinue



- blocage de toutes les diodes si $i_2 < 0$,
- alors
 - le circuit amont est coupé du circuit aval
 - $i_1 = i_2 = 0$, $v_2 = v_3$,
- Fin de la séquence de blocage si $v_{2th} > v_2$ où
 - $v_{2th} = |v_1|$ est la tension que délivrerait le redresseur seul
 - $v_2 = v_3$ est imposé par le circuit aval.

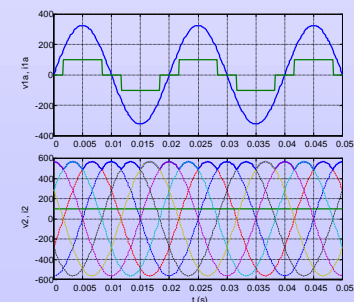
70

Le redresseur triphasé



71

Le redresseur triphasé : formes d'ondes



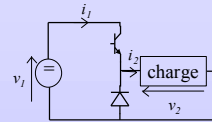
72

2.3. Le Hacheur

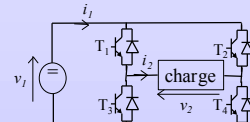
- Structure
- Formes d'onde
- Commande

73

Hacheur : les structures



mono-directionnel en
tension et en courant



bi-directionnel en
tension et en courant

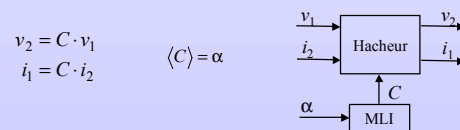
74

Hacheur 4Q : formes d'ondes (1)

- Commande alternée: sur une période T , T_1 et T_4 sont mis en conduction pendant αT (T_2 et T_3 sont alors ouverts); T_2 et T_3 sont mis en conduction pendant $(1-\alpha)T$ (T_1 et T_4 sont alors ouverts);
- α est appelé rapport-cyclique ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- des temps morts sont appliqués à la mise en conduction afin d'éviter un court-circuit de la source à travers un bras de pont.

75

Hacheur 1Q : modèle



- C : signal de commutation
 - $C = 1$: le transistor conduit ($v_2 = v_1$; $i_1 = i_2$)
 - $C = 0$: le transistor est bloqué ($v_2 = 0$; $i_1 = 0$)

76

Hacheur 4Q : modèle

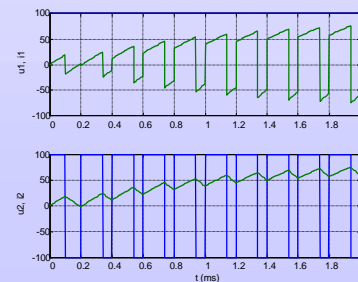
$$\begin{aligned} v_2 &= (2C - 1) \cdot v_1 \\ i_1 &= (2C - 1) \cdot i_2 \end{aligned} \quad \langle C \rangle = \alpha$$

- C : signal de commutation
 - $C = 1$: le transistor conduit ($v_2 = v_1$; $i_1 = i_2$)
 - $C = 0$: le transistor est bloqué ($v_2 = -v_1$; $i_1 = -i_2$)

77

Hacheur 4Q : formes d'ondes (2)

charge RL; $\alpha=0,7$; $f_H=10$ kHz



78

Hacheurs : commande

- Hacheur 1Q ($v_2 \in \{v_1, 0\}$)

$$\langle v_2 \rangle_T = \alpha v_1 \Rightarrow \alpha = \frac{v_2}{v_1}$$

valeur de référence

valeur estimée de v_1

- Hacheur 4Q ($v_2 \in \{v_1, -v_1\}$)

$$\langle v_2 \rangle_T = (2\alpha - 1) \cdot v_1 \Rightarrow \alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2^*}{v_1} \right)$$

- Limiter de α entre 0 et 1 (ou ϵ et $1 - \epsilon$; $\epsilon = \text{qqe \%}$)

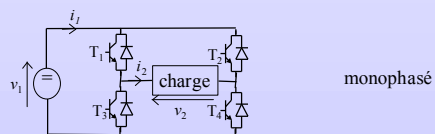
79

2.4. L'onduleur

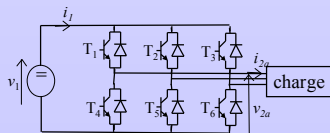
- Structures
- onduleur monophasé : structure et formes d'ondes
- onduleur triphasé : structure et formes d'ondes

80

L'onduleur : structures



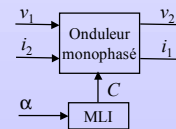
monophasé



triphasé

81

Onduleur monophasé : modèle



- Idem au hacheur 4Q

82

L'onduleur monophasé : commande

Comme pour le hacheur 4Q, on a:

$$\langle v_2 \rangle_T = (2\alpha - 1) \cdot v_1$$

Pour réaliser une tension v^* quelconque, il suffit de choisir:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v^*}{v_1} \right)$$

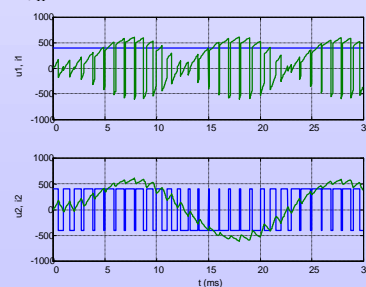
avec:

$$v^* = V \sqrt{2} \cos(\omega t)$$

83

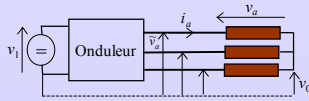
L'onduleur monophasé : formes d'ondes

charge RL; $f_H = 1 \text{ kHz}$; $V = 230 \text{ V}$



84

L'onduleur triphasé : modèle (1)



On a :
$$\begin{cases} v_a = \tilde{v}_a - v_0 \\ v_b = \tilde{v}_b - v_0 \\ v_c = \tilde{v}_c - v_0 \end{cases} \quad \text{avec:} \quad \begin{cases} \tilde{v}_a = C_a v_1 \\ \tilde{v}_b = C_b v_1 \\ \tilde{v}_c = C_c v_1 \end{cases}$$

Neutre non-connecté $\Rightarrow i_a + i_b + i_c = 0$

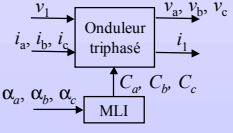
$$v_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt}$$

Charge équilibrée :
$$\begin{aligned} v_b &= R i_b + L \frac{di_b}{dt} \Rightarrow v_a + v_b + v_c = 0 \\ v_c &= R i_c + L \frac{di_c}{dt} \Rightarrow v_0 = \frac{1}{3} (C_a + C_b + C_c) \cdot v_1 \end{aligned}$$

85

L'onduleur triphasé : modèle (2)

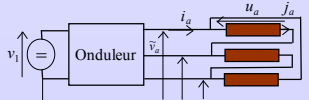
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = v_1 \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix}$$



$$i_1 = C_a \cdot i_a + C_b \cdot i_b + C_c \cdot i_c = \begin{bmatrix} C_a & C_b & C_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

86

L'onduleur triphasé : modèle (3)



On a :
$$\begin{cases} u_a = \tilde{v}_a - \tilde{v}_b \\ u_b = \tilde{v}_b - \tilde{v}_c \\ u_c = \tilde{v}_c - \tilde{v}_a \end{cases} \quad \text{avec:} \quad \begin{cases} \tilde{v}_a = C_a v_1 \\ \tilde{v}_b = C_b v_1 \\ \tilde{v}_c = C_c v_1 \end{cases}$$

et
$$\begin{cases} i_a = j_a - j_b \\ i_b = j_b - j_c \\ i_c = j_c - j_a \end{cases}$$

avec
$$i_1 = C_a \cdot i_a + C_b \cdot i_b + C_c \cdot i_c = \begin{bmatrix} C_a & C_b & C_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

87

L'onduleur triphasé : commande (1)

On a :
$$\begin{cases} \langle v_a \rangle = \alpha_a \cdot v_1 - v_0 \\ \langle v_b \rangle = \alpha_b \cdot v_1 - v_0 \\ \langle v_c \rangle = \alpha_c \cdot v_1 - v_0 \end{cases} \quad \text{avec:} \quad v_0 = \frac{1}{3} (\alpha_a + \alpha_b + \alpha_c) E$$

d'où
$$\begin{bmatrix} \langle v_a \rangle \\ \langle v_b \rangle \\ \langle v_c \rangle \end{bmatrix} = v_1 \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix}}_M \begin{bmatrix} \alpha_a \\ \alpha_b \\ \alpha_c \end{bmatrix}$$

88

L'onduleur triphasé : commande (2)

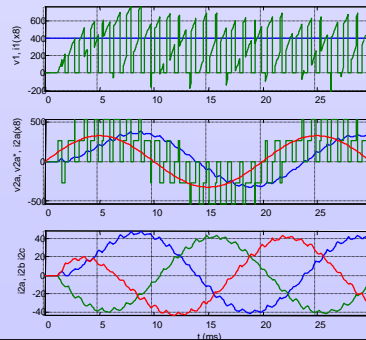
Pour réaliser les tensions v_a^* , v_b^* , v_c^* , il suffit de choisir:

$$\begin{cases} \alpha_a = \alpha_0 + \frac{v_a^*}{v_1} \\ \alpha_b = \alpha_0 + \frac{v_b^*}{v_1} \\ \alpha_c = \alpha_0 + \frac{v_c^*}{v_1} \end{cases} \quad \text{avec:} \quad \begin{cases} v_a^* = V \sqrt{2} \cos(\omega t) \\ v_b^* = V \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_c^* = V \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

89

L'onduleur triphasé : formes d'ondes

charge RL; $f_H = 1 \text{ kHz}$; $V = 230 \text{ V}$



90

ch. 3. Les actionneurs électriques

- Généralités
- Moteur à courant continu
- Moteur synchrone
- Moteur asynchrone
- Autres moteurs : MRV, pas-à-pas et piézo-électrique

91

3.1. Généralités

- Nomenclature
- Technologies
- Terminologie
- Principe général

92

Nomenclature

- Type de mouvement: linéaire / rotatif
- Type d'Alimentation: courant continu / courant alternatif
- Dynamique: vitesse constante / vitesse variable

93

Technologies des actionneurs

- Alimentation à courant continu (DC motor)
 - moteur à courant continu
- Alimentation à courant alternatif (AC motor)
 - moteur synchrone (DC brushless)
 - moteur asynchrone (induction motor)
- Universel
 - moteur à courant continu à excitation série
- Autres types
 - moteur pas-à-pas (step motor)
 - moteur à réluctance variable (MRV)
 - moteur piézo-électrique

94

Terminologie

- Stator : partie statique
- Rotor : partie mobile
- Entrefer : interface entre le stator et le rotor généralement occupée par de l'air
- machine = moteur ou générateur (réversibilité)

95

Principe général

- Le stator produit un champ à $2p$ pôles de la forme : $B_s(\xi) = B_s^{\max} \cos(p\xi - \alpha_s)$
- Le rotor produit un champ à $2p$ pôles de la forme : $B_r(\xi) = B_r^{\max} \cos(p\xi - \alpha_r)$
- L'interaction entre les deux donne un couple de la forme $C = C^{\max} \sin(\alpha_s - \alpha_r)$
- On cherche à imposer $\alpha_s = \alpha_r + \frac{\pi}{2}$

96

3.2. Le moteur à courant continu

- Principe
- Modélisation

97

Principe

- Stator : champ d'excitation fixe
- Rotor : champ induit fixe grâce au collecteur

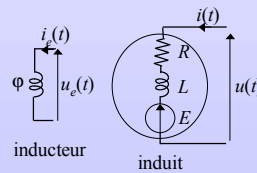
98

MCC: technologies

- excitation (stator): matériau magnétique (fer) +
 - aimants
 - bobinage
 - excitation indépendante
 - excitation série (en série avec l'induit)
 - excitation parallèle (en parallèle avec l'induit)
- induit (rotor): bobinage
 - avec fer (cas classique)
 - sans fer (moteurs spéciaux à faible inertie)

99

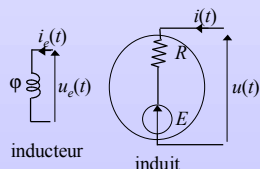
MCC à excitation séparée : équations



$$\begin{aligned}
 E(t) &= k\phi\Omega(t) \\
 C_m(t) &= k\phi i(t) \\
 u(t) &= E(t) + Ri(t) + L \frac{di}{dt} \\
 u_e(t) &= R_e i_e(t) + \frac{d\phi}{dt} \\
 J \frac{d\Omega}{dt} &= C_m(t) - C_r(t)
 \end{aligned}$$

E (V) : fem ; Ω (rad/s) : vitesse de rotation ; k : constante de fem ou de couple ; C_m (N) : couple moteur ; u (V) : tension d'induit ; i (A) : courant d'induit ; ϕ (G) : flux inducteur ; u_e (V) : tension inducteur ; i_e : courant inducteur ; R (Ω) : résistance d'induit ; L (H) : inductance d'induit ; J (kg.m^2) : inertie ; C_r (N) : couple résistant

MCC à excitation séparée : équations simplifiées

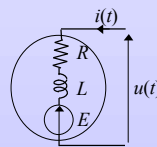


$$\begin{aligned}
 E(t) &= k\phi\Omega(t) \\
 C_m(t) &= k\phi i(t) \\
 u(t) &= E(t) + Ri(t) \\
 J \frac{d\Omega}{dt} &= C_m(t) - C_r(t)
 \end{aligned}$$

Vu la dynamique de la partie mécanique, on peut considérer le courant d'induit comme égal à sa valeur moyenne

On considère le flux comme étant réglable de manière indépendante

MCC à aimants : équations

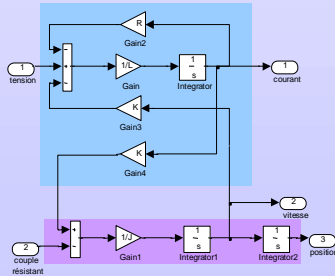


$$\begin{aligned}
 E(t) &= K\Omega(t) \\
 C_m(t) &= Ki(t) \\
 u(t) &= E(t) + Ri(t) + L \frac{di}{dt} \\
 J \frac{d\Omega}{dt} &= C_m(t) - C_r(t)
 \end{aligned}$$

E (V) : fem ; Ω (rad/s) : vitesse de rotation ; K (N.s ou N.m.A^{-1}) : constante de fem ou de couple ; C_m (N) : couple moteur ; u (V) : tension d'induit ; i (A) : courant d'induit ; R (Ω) : résistance d'induit ; L (H) : inductance d'induit ; J (kg.m^2) : inertie ; C_r (N) : couple résistant

102

MCC à aimants : schéma



103

Moteur universel

- Il s'agit d'un MCC à excitation série
- En notant $\varphi = Li$ et $k\varphi = kLi = k_1 i$:
- $C_m = k\varphi i = k_1 i^2$
- Le couple est positif quelque soit le signe de i
- Alimentation à partir d'un gradateur monophasé
- Solution faible coût (ex.: perceuse)

104

3.3. La machine synchrone

- Principe
- Technologie
- Modèle

105

Principe

- L'excitation du rotor et les courants alternatifs du stator produisent deux champs tournants qui s'attirent.
- En fonctionnement normal, les deux champs sont synchrones.
- Pour alimenter correctement le stator, il est nécessaire de connaître la position du rotor (auto-pilotage)

106

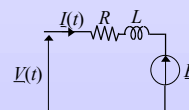
Technologies

- Stator = induit : bobinage triphasé placé dans des encoches réalisées au sein d'un matériau magnétique feuilleté. Il réalise dans l'entrefer un champ tournant à la vitesse ω/p où ω est la pulsation des courants et p le nombre de paires de pôles du bobinage
- Rotor = inducteur = excitation : roue polaire à p paires de pôles produisant un champ tournant synchrone avec sa position. On distingue des rotors:
 - à pôles lisses ou à pôles saillants
 - à aimants permanents (PMSM) ou bobinés.

107

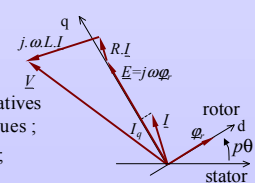
Modèle

schéma électrique équivalent par phase



$$\underline{E} = j\omega\varphi_r$$

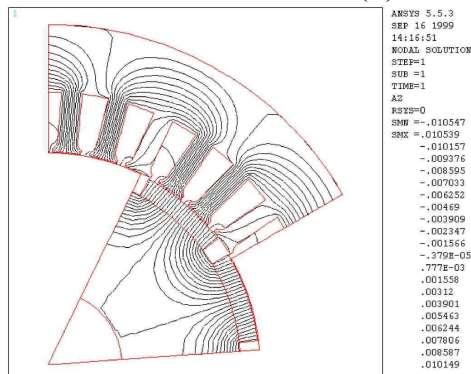
$$\underline{V} = \underline{E} + R_s \cdot \underline{I} + j \cdot L \cdot \omega \cdot \underline{I}$$



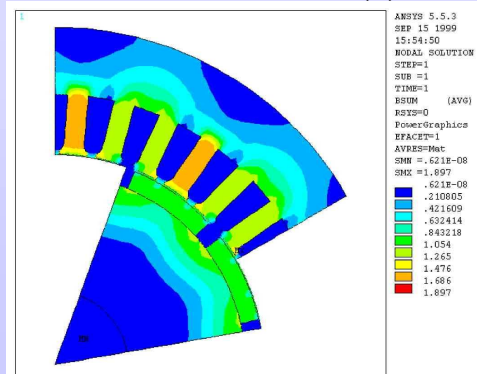
- \underline{I} et \underline{V} sont les grandeurs représentatives du courant et de la tension statoriques ;
- φ_r (Wb) : flux produit par le rotor ;
- E (V) : fem à vide ;
- R (Ω) : résistance statorique ;
- L (H) : inductance synchrone+fuites

108

MS : structure (2)



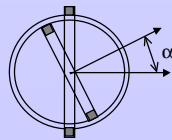
MS : structure (3)



Inductance de deux circuits

- deux enroulements au stator ou au rotor décalés d'un angle α
- l'inductance mutuelle est de la forme:

$$M_{12} = M \cos(\alpha)$$



111

Flux du stator sur lui-même

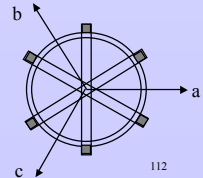
- 3 circuits (a, b et c) décalés de $2\pi/3p$

$$\begin{cases} \Phi_{sa} = L_s i_a + M_s i_b + M_s i_c \\ \Phi_{sb} = M_s i_a + L_s i_b + M_s i_c \\ \Phi_{sc} = M_s i_a + M_s i_b + L_s i_c \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_s = L_{f0} + L_{s0} \\ M_s = -\frac{1}{2} L_{s0} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

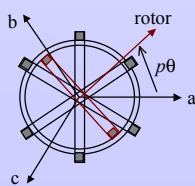
L_{s0} : inductance correspondant au flux principal ;
 L_{f0} : inductance correspondant au flux de fuite



112

Flux mutuel entre le stator et le rotor

- le rotor est à la position θ par rapport au stator
- cela correspond à la position $p\theta$ en angle électrique (période $2\pi/p$ ramenée à 2π)



$$\begin{cases} \Phi_{ra} = M_r i_f \cos(p\theta) \\ \Phi_{rb} = M_r i_f \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \Phi_{rc} = M_r i_f \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = M_r \cdot \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

113

Équations du modèle triphasé

$$\begin{cases} \Phi_a = \Phi_{sa} + \Phi_{ra} \\ \Phi_b = \Phi_{sb} + \Phi_{rb} \\ \Phi_c = \Phi_{sc} + \Phi_{rc} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \mathcal{M}_s \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \Phi_f \cdot \begin{bmatrix} \cos(p\theta) \\ \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} v_a = R_s i_a + \frac{d\Phi_a}{dt} \\ v_b = R_s i_b + \frac{d\Phi_b}{dt} \\ v_c = R_s i_c + \frac{d\Phi_c}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}$$

114

Expression du couple (1)

$$C = \frac{1}{2} \cdot i^T \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot i = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}^T \cdot \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}$$

$$C = -\frac{p \cdot \Phi_f}{2} \cdot \left[i_a \cdot \sin(p\theta) + i_b \cdot \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cdot \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$= -\frac{p \cdot \Phi_f}{2} \cdot \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(p\theta) \\ \sin\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(p\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

115

3.4. Le moteur asynchrone triphasé

- Structure
- Technologie
- Principe
- Fonctionnement sur réseau alternatif

116

Structure de la MAS

- stator identique à celui du moteur synchrone (enroulement triphasé à $2p$ pôles)
- rotor :
 - à cage (le plus courant) : système de barres reliées par un anneau de court-circuit et placé dans un empilement de tôles magnétiques
 - bobiné : système d'enroulements triphasés à $2p$ pôles (court-circuités en fonctionnement normal)
 - massif, composé d'un seul matériau avec un compromis entre la conductivité et la perméabilité

117

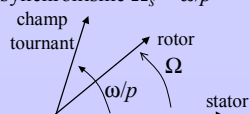
Technologie

- stator : identique à celui du MS (enroulement triphasé à $2p$ pôles parcourus par des courants à la pulsation ω produisant un champ tournant à la vitesse ω/p).
- rotor : partie passive permettant la circulation de courants et perméable au champ magnétique.
 - rotor à cage : une cage formée de barres et d'anneaux de court-circuit forme le circuit électrique qui est plongé dans un empilement de tôles magnétiques (le plus répandu)
 - rotor bobiné : bobinage similaire à celui du stator, généralement court-circuité
 - rotor massif (appli: frein à courant de Foucault)

118

MAS : principe

- Un champ de vitesse ω/p est créé au stator
- Le rotor tournant à la vitesse Ω voit le champ tourner à la vitesse $\omega/p - \Omega$
- Ce champ induit donc au rotor des courants à la pulsation $\omega_r = \omega - p\Omega$
- Ce champ induit au rotor entraîne la production d'un couple qui tend à faire tourner le rotor à la vitesse de synchronisme $\Omega_s = \omega/p$



119

MAS : principe - 2

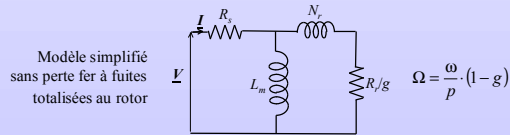
- On note $\omega_r = g\omega$ où g est appelé glissement (slip en anglais)
 - $g = 1$: arrêt
 - $g = 0$: synchronisme
- Alimenté par un réseau 50 Hz, les vitesses de synchronisme possibles sont $\omega/p = 3000, 1500, 1000, 750, 600 \dots$ tours/min

$$\Omega = (1 - g) \frac{\omega}{p}$$

120

MAS : modèle

- Schéma électrique équivalent par phase



R_s, R_r (Ω) : résistance statorique et rotoriques ; L_m (H) : inductance magnétisante ; N_r (H) : inductance des fuites totalisées au rotor ; g (s.u.) : glissement ; ω (rad/s) : pulsation du réseau ; p : nombre de paires de pôles.

121

Moteur asynchrone connecté au réseau

- vitesse de synchronisme ω/p (3000, 1500, 1000, 750, 600... tours/min)
- expression du couple
- rendement approché : $1 - g$
- démarrage étoile-triangle

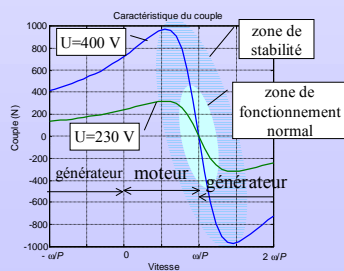
122

Moteur asynchrone connecté au réseau : Couple

$$C = C_{\max} \cdot \frac{2}{\frac{g_s}{g} + \frac{g}{g_s}}$$

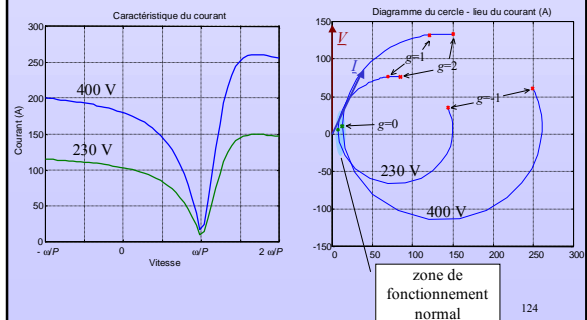
$$C_{\max} = \frac{3 \cdot P \cdot U^2}{2 \cdot N_r \cdot \omega^2}$$

$$g_s = \frac{R_r}{N_r \cdot \omega}$$



123

Moteur asynchrone connecté au réseau : Courant



124

Démarrage sur réseau alternatif

- Démarrage direct
 - faible inertie
 - pic de courant important
- Démarrage étoile-triangle
 - tension et courant abaissés de $\sqrt{3}$ par rapport au démarrage direct
- Démarreur (gradateur triphasé)
 - limitation du courant maximal pendant toute la période du démarrage

125

3.5. Autres moteurs

- Moteur à réluctance variable et moteur pas-à-pas
- Moteur piézo-électrique

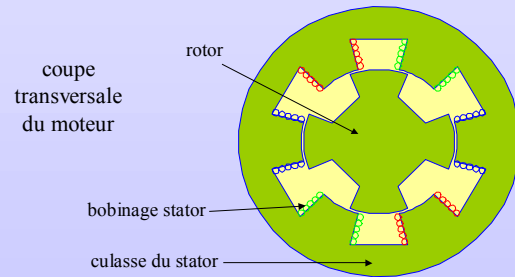
126

3.5.1. Moteur à réluctance variable ou moteur pas-à-pas

- Principe
- Alimentation
- Domaine d'utilisation

127

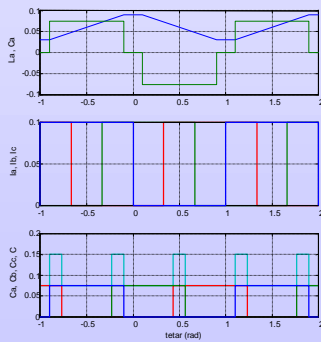
MRV : structure



- moteur triphasé (3 phases au stator)
- moteur 6-4 (6 pôles au stator bobinés et 4 pôles passifs au rotor)

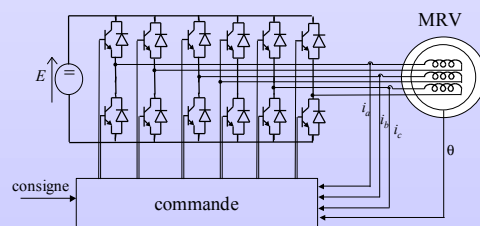
128

MRV : inductance et couple



129

MRV : Alimentation



- Chaque phase du moteur est alimentée indépendamment par un onduleur monophasé
- Le moteur est autopiloté : la position θ du rotor commande la ou les phases à alimenter

130

MRV : Caractéristiques

- Moteur simple et robuste
- Alimentation plus coûteuse que MS et MAS
- Bruit phonique important
- Applications : moyenne puissance pour des applications peu coûteuses (électroménager, automobile), positionnement sans capteur de position (robotique)

131

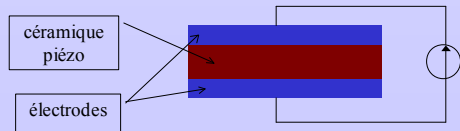
3.5.2. Le Moteur Piézo-électrique

- Principe
- Caractéristiques

132

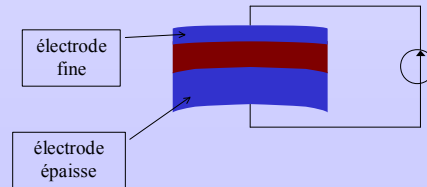
L'effet piézo-électrique

- Céramique qui se déforme sous application d'un champ électrique (effet direct, actionneur piézo)
- Apparition d'un champ électrique lorsqu'on applique une contrainte mécanique (effet inverse, capteur piézo)



133

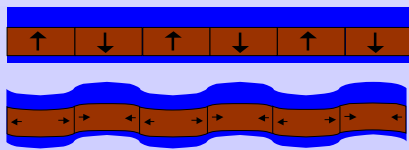
L'effet piézo-électrique (2) : mise en flexion



134

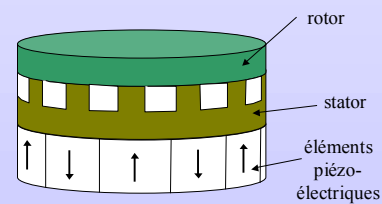
Moteur Piézo : principe

- Principe : ondes de flexion



135

Moteur piézo à onde de flexion



- Le stator se déforme sous l'effet des éléments piézo-électriques
- Cette déformation en onde de flexion entraîne le rotor maintenu en contact avec le stator par une force de maintien

136

Moteur piézo : gamme d'utilisation

- vitesse réglée avec l'amplitude de la tension (excitation à fréquence constante)
- gamme des petites et très petites puissances
- fort couple sans réducteur
- vitesse jusqu'à 1000 tr/min
- couple d'arrêt important

137

ch 4. Les variateurs

138