

La commande électronique des machines

CAHIERS TECHNIQUES

> > EN **65** FICHES-OUTILS < <

Michel Pinard

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Maquette intérieure : Belle Page

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2013

ISBN 978-2-10-059355-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Les cahiers techniques, mode d'emploi	6
---	---

Dossier 1 Le flux magnétique dans les machines 8

Fiche 1 Magnétisme : système à un seul bobinage.....	12
Fiche 2 Magnétisme : système à deux bobinages	18
Fiche 3 Sources à courant continu.....	22
Fiche 4 Sources à courant alternatif monophasé.....	24
Fiche 5 Source à courant alternatif triphasé.....	27
Fiche 6 Théorème de Ferraris. Transformations.....	31
Fiche 7 Transformation de Park.....	38

Dossier 2 Convertisseurs de Puissance 44

Fiche 8 Les hacheurs (<i>Choppers</i>)	48
Fiche 9 Le hacheur en utilisation pratique.....	51
Fiche 10 Les redresseurs à diodes (<i>Rectifiers</i>).....	57
Fiche 11 Redresseur à thyristors (<i>Thyristor-based rectifier bridge</i>).....	60
Fiche 12 Les Onduleurs monophasés (<i>Single phase inverters</i>).....	67
Fiche 13 Les Gradateurs monophasés (<i>The power dimmers</i>).....	74
Fiche 14 Les Onduleurs autonomes triphasés (<i>The three phase inverters</i>).....	78
Fiche 15 L'Onduleur triphasé à modulation de largeur d'impulsion vectorielle (<i>The SVPWM inverter</i>)	84
Fiche 16 L'onduleur assisté (<i>The load-controlled inverter</i>)....	90

Dossier 3 Utilisation du moteur à courant continu 93

Fiche 17 Le moteur à courant continu en régime stationnaire (<i>DC motor</i>).....	96
Fiche 18 Le moteur à courant continu : alimentation par hacheur	105
Fiche 19 Le moteur à courant continu : régime dynamique.....	110
Fiche 20 Le moteur à courant continu : étude de cas....	118
Fiche 21 Le moteur à courant continu : modèle d'état..	123
Fiche 22 Moteur à courant continu. Utilisation en robotique	131
Fiche 23 Commande d'un moteur à courant continu : freinage	139

Dossier 4	Utilisation du moteur à courant alternatif ...	145
Fiche 24	Moteur série universel	148
Fiche 25	Moteur asynchrone monophasé et moteur diphasé.....	154
Fiche 26	Machine synchrone à pôles lisses en régime stationnaire linéaire	159
Fiche 27	Machine synchrone à pôles saillants en régime stationnaire linéaire	165
Fiche 28	Machine synchrone en régime stationnaire non-linéaire	169
Fiche 29	Machine synchrone en régime dynamique	175
Fiche 30	Machine synchrone : utilisation de la Transformée de Park	183
Fiche 31	Machine asynchrone en régime stationnaire : modélisation.....	192
Fiche 31 (suite)	Machine asynchrone en régime stationnaire : Couple. Essais expérimentaux	198
Fiche 32	Moteur asynchrone en régime dynamique	206
Fiche 33	Détermination expérimentale des éléments du modèle de la machine asynchrone	216
Dossier 5	Contrôle asservissement commande	223
Fiche 34	Contrôle en vitesse d'un moteur	226
Fiche 35	Commande en couple d'un moteur électrique	232
Fiche 36	Les Capteurs	238
Fiche 37	Méthodes de Strejc, Broïda et Ziegler-Nichols	246
Fiche 38	Systèmes bouclés analogiques	250
Fiche 39	Les avantages de la commande numérique	255
Fiche 40	Correction des systèmes analogiques et numériques	263
Fiche 41	Simulation d'une régulation de vitesse à moteur à courant continu	273
Dossier 6	Machine synchrone : commande	283
Fiche 42	Couplage d'une machine synchrone sur le réseau.....	287
Fiche 43	Couplage d'un moteur synchrone sur le réseau.....	299
Fiche 44	Autopilotage d'un moteur synchrone	306
Fiche 45	Pilotage d'une machine synchrone par DSP ou FPGA	316
Fiche 46	Moteurs à réluctance variable.....	324
Fiche 47	Moteurs pas à pas	332

Dossier 7	Machine asynchrone : commande	333
	Fiche 48 Couplage sur le réseau d'une machine asynchrone	336
	Fiche 49 Commande en vitesse du moteur asynchrone.....	341
	Fiche 50 Commande en boucle ouverte du moteur asynchrone	348
	Fiche 51 Autopilotage scalaire du moteur asynchrone...	356
	Fiche 52 Contrôle vectoriel du moteur asynchrone.....	359
	Fiche 53 Commande à flux orienté du moteur asynchrone	369
	Fiche 54 Pilotage par processeur : commande directe du couple par DSP ou FPGA	377
 Dossier 8	 Le moteur électrique en milieu industriel	 381
	Fiche 55 Les systèmes industriels	385
	Fiche 56 Le moteur électrique dans l'environnement industriel	390
	Fiche 57 Utilisation d'un moteur à courant continu	391
	Fiche 58 Utilisation d'un moteur synchrone autopiloté.....	392
	Fiche 59 Le moteur asynchrone dans les systèmes industriels	399
	Fiche 60 Commandes d'axes	405
	Fiche 61 Choix entre les divers moteurs et leur commande	413
	 Annexes	 414
	Index	415

LES CAHIERS TECHNIQUES, MODE D'EMPLOI

Les fiches sont
classées par dossier

MACHINE ASYNCHRONES : COMMANDE

7

DOSSIER

Importance du réseau

On a vu dans le dossier 6 que l'on peut considérer un réseau comme théoriquement « infiniment puissant ». Il peut fournir ou recevoir autant de puissance active ou réactive que l'échange énergétique avec une machine peut permettre. La forme d'onde est sinusoïdale et la valeur efficace de la tension et celle de la fréquence sont imposées constantes.

Pour gérer un réseau, on « injecte » toutes les puissances actives et réactives fournies par les générateurs, et on contrôle ces fournitures de puissance en fonction des charges (encore appelées Récepteurs), qui sont très souvent des moteurs asynchrones (voir la figure 7.1 bis).

Si l'équilibre n'est pas obtenu en temps réel, c'est-à-dire à tout instant t , il y a un risque de décrochage des génératrices du réseau. Il peut se produire :

- la baisse ou la hausse excessive de la tension U du réseau,
- la baisse ou la hausse excessive de la fréquence f du réseau.

Le moteur asynchrone est assez sensible aux fluctuations de la tension car son couple est proportionnel à U^2 . La vitesse du champ tournant dépend de la fréquence. Cependant, une légère fluctuation de la fréquence modifie peu la vitesse car il y a déjà un glissement du rotor par rapport au champ tournant.

L'alimentation des moteurs par onduleur triphasé

L'avantage essentiel de l'onduleur est qu'il se comporte comme une source triphasée de tension ou de courant à fréquence réglables, de manière à faire varier la vitesse du champ tournant.

➤ Il est alors possible de faire varier la vitesse d'un **moteur asynchrone** dans ces conditions, puisque la vitesse du champ tournant dépend directement de la fréquence f et du nombre de paires de pôles p ; mais le rotor reste en « glissement » avec le champ tournant. Il faut donc imposer une commande électronique de l'onduleur qui tienne compte de la position relative du rotor.

➤ On cherche, comme pour le moteur synchrone, à obtenir une commande *autopilote*, et qu'il se comporte alors comme un moteur à courant continu « sans balai » (ou *brushless*). Divers modes de commande sont possibles et sont en vente commerciale (cf. fiches 51, 52, 53 et 54). Ces modes s'appellent contrôle scalaire, vectoriel, à flux orienté, à commande directe du couple.

➤ Quel que soit le mode de commande, le but recherché est toujours une optimisation de la valeur du couple électromagnétique T_e , que ce soit à basse vitesse ou à vitesse élevée, et ceci dans des limites de fonctionnement acceptables par la machine (en courant, en tension) et par la charge mécanique (en couple, en vitesse).

7

DOSSIER

LES FICHES

Fiche 48 : Couplage sur le réseau d'une machine asynchrone	336
Fiche 49 : Commande en vitesse du moteur asynchrone	341
Fiche 50 : Commande en boucle ouverte du moteur asynchrone	348
Fiche 51 : Autopilotage scalaire du moteur asynchrone	356
Fiche 52 : Commande vectorielle du moteur asynchrone	359
Fiche 53 : Commande à flux orienté du moteur asynchrone	369
Fiche 54 : Pilotage par processeur : commande directe du couple par DSP ou FPGA	377

Une introduction reprenant
les grandes thématiques
du dossier

Un menu déroulant des
fiches du dossier

Une signalétique claire

FICHE 3 SOURCES À COURANT CONTINU

Mise en avant de l'objectif de la fiche

Objectifs

- introduire la notion de puissance fournie par une source à courant continu.
- Définir la convention récepteur d'un dipôle.
- Présenter les différents types de sources.
- Présenter l'usage possible de ces sources dans des applications courantes.

REPÈRES

Une partie Repères pour définir les bases

La valeur de la tension U et du courant I sont On appelle puissance p la quantité $P = U \cdot I$. Par convention, la puissance est positive lorsqu'elle est reçue par le récepteur.

Pour tester le fonctionnement de certains systèmes, il faut souvent utiliser des sources de tension continue réglables. Dans la pratique, l'expérimentateur se sert :

- Soit d'alimentations (électroniques) stabilisées ; la tension est rigoureusement constante en fonction du temps et réglable de manière très souple. (Il n'est guère possible de dépasser 50 V, pour un courant maximal de 5 A, soit une puissance maximale de 250 W).
- Soit d'alimentations (électroniques) à découpage ; la tension est asservie constante en fonction du temps et réglable de manière très souple. (Il n'est guère possible de dépasser 50 V pour un courant maximal de 20 A, soit une puissance maximale de 1000 W). La plupart de ces alimentations sont programmables.
- Soit d'alimentations (électroniques) obtenues par redressement et filtrage ; la tension est réglée soit par un autotransformateur, soit asservie et alors réglable de manière très souple. Selon la puissance de l'alimentation monophasée ou triphasée du redresseur, et selon la taille des composants électroniques (diodes ou thyristors), il est possible d'obtenir des tensions très élevées (jusqu'à 100 kV), de très fortes intensités (plusieurs milliers d'ampères).

22

FICHE 3

Sources à courant continu

Une partie Savoir-faire qui détaille la mise en œuvre

Utilisation d'une source à valeur moyenne de tension non nulle

Dans la pratique, l'expérimentateur se sert :

- Soit d'alimentations (électroniques) de puissance ; les valeurs moyenne et efficace de la tension sont réglables de manière très souple ;
- Soit d'une alimentation obtenue par une dynamo ; la valeur moyenne de la tension est réglée par le courant d'excitation et par la vitesse de rotation, de manière très souple. Les puissances utilisables dépendent essentiellement de la puissance nominale de la machine et du moteur d'entraînement ;
- Soit d'alimentations obtenues par un alternateur ; la valeur moyenne de la tension est réglée en faisant varier le courant continu circulant dans la roue polaire de l'alternateur. La tension continue est obtenue après redressement à diodes ou à thyristors. Sa valeur dépend du régime de l'alternateur, de l'entraînement, et éventuellement, de la commande.

EN PRATIQUE

Valeur moyenne d'une grandeur périodique

On appelle puissance instantanée la quantité $p(t) = v(t) \cdot i(t)$. Par définition, la puissance active reçue par un dipôle, en convention récepteur, (cf. figure 3.1) est donnée par :

$$P_{\text{moy}} = \langle p \rangle = P = \left(\frac{1}{T} \right) \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt$$

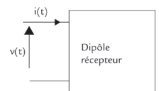


Figure 3.1 Convention récepteur d'un dipôle

La puissance active est la valeur moyenne de $p(t)$, et s'exprime en Watts (W). Si le terme obtenu est négatif, le dipôle est générateur.

Des compléments d'information pour aller plus loin

Conseils

Les sources « électroniques » (alimentations stabilisées, à découpage...) sont protégées contre les surintensités. Il est parfois possible de les utiliser avec une limitation de courant » pour simuler une source de courant.

DOSSIER 1 : LE FLUX MAGNÉTIQUE DANS LES MACHINES

23

FICHE 10

Les redresseurs à diodes (Rectifiers)



SAVOIR-FAIRE

Remarque : Si V et I sont imposés, il n'est pas possible de régler la puissance fournie P .

Tableau 10.1 Formulaires des ponts redresseurs à diodes

	$\langle u_m \rangle = U'$ fixe	P	I_D	I_{eff}
PD2 monophasé	$U_{D2} = V \frac{2\sqrt{2}}{\pi}$	$U_{D2} I = V \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I$	$I_{D2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I$	I
PD3 triphasé	$U_{D3} = V \frac{3\sqrt{6}}{\pi}$	$V \frac{3\sqrt{6}}{\pi} I = U_{D3} I$	$I_{D3} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I$	$I \sqrt{\frac{2}{3}}$
	S	f_c	D	
PD2 monophasé	f/V	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9$	$V \sqrt{1 - \frac{8}{\pi^2}} I$	
PD3 triphasé	$V \sqrt{6}$	$\frac{2}{\pi} = 0,955$	$V \sqrt{6 \left(1 - \frac{9}{\pi^2} \right)} I$	

Une partie En pratique pour une application terrain

EN PRATIQUE

La figure 10.1 ci-dessous indique les montages redresseurs à diodes :

- PD2 ou Pont de Graëh monophasé,
- PD3 ou Pont de Graëh triphasé.

La tension de sortie est notée u_m . Dans le tableau 10.1, on s'intéresse à sa valeur moyenne $\langle u_m \rangle$ en fonction de la valeur efficace V de la tension d'entrée. Le courant d'entrée est noté i_m . Dans le tableau 10.1, on s'intéresse à sa valeur efficace I_{eff} en fonction de la valeur I du courant de sortie. Il est assimilé ici à une source de courant.

58

Les redresseurs à diodes (Rectifiers)

FICHE 10

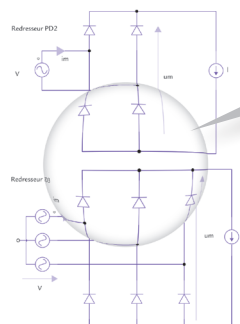


Figure 10.1 Montages de redresseurs à diodes PD2 et PD3

Des schémas clairs et complets

Conseils

Les diodes doivent être parfois surdimensionnées dans le cas où la charge n'est pas à courant I imposé, mais sur condensateur. Dans ce cas, il y a des « pointes » de courant qui peuvent endommager les diodes. Si V est la tension efficace de la source alternative monophasée, il est souhaitable que chaque diode ait une tension maximale à l'état bloquée supérieure à $2V\sqrt{2}$.

Si V est la tension efficace phase-neutre de la source alternative triphasée, il est souhaitable que chaque diode ait une tension maximale à l'état bloquée supérieure à $2V\sqrt{3}\sqrt{2} = 2V\sqrt{6}$.

DOSSIER 2 : CONVERTISSEURS DE PUISSANCE

59

LE FLUX MAGNÉTIQUE DANS LES MACHINES

Cas général

Comment obtient-on un couple moteur dans un convertisseur (ou machine) électromécanique ?

D'une manière générale, toute machine (moteur ou génératrice) associée à une charge mécanique peut être considérée comme un système où les grandeurs **physiques d'entrée** sont :

- un « vecteur tension » $[V]$ comportant une ou plusieurs composantes,
- le couple résistant de la charge, noté T_r , en N. m.

La grandeur interne essentielle est le « vecteur » flux magnétique $[\Phi]$.

Les grandeurs **physiques de sortie** sont :

- un « vecteur courant » $[I]$ comportant une ou plusieurs composantes,
- la vitesse angulaire de la machine Ω , en rad/s.
- la position angulaire de la machine θ du rotor, en rad.



Figure 1.1 Principe de la conversion électromécanique

En utilisant le logiciel VisSim

La démarche des concepteurs de ce logiciel est similaire à ce qui est présenté ci-dessus :

Les grandeurs **physiques d'entrée** sont alors (cf. figure 1.2) :

- un « vecteur tension » $[V]$ comportant deux composantes, l'une positive, l'autre négative,
- le couple résistant de la charge (*Load Reaction Torque Vector*).

Les grandeurs **physiques de sortie** sont (cf. figure 1.2) :

- le déplacement angulaire θ (*Rotor Displacement*) exprimé en rad,

- › la vitesse angulaire $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$ (*Rotor Angular Velocity*) exprimé en rad/sec,
- › l'intensité du courant d'induit (*Rotor Displacement*) exprimé en A.

→ Motor + (volts)	Basic DC Motor (Permanent Magnet)	Rotor Displacement (rad)	—
→ Motor - (volts)		Rotor Angular Velocity (rad/sec)	—
→ Load Reaction Torque Vector		Motor Current (amps)	—

Figure 1.2 Logiciel VisSim : cas du moteur à courant continu à aimant permanent

Équation des flux

Les divers flux d'une machine

D'une manière générale, les n bobinages d'une machine sont en couplage magnétique mutuel et on considère le flux « élémentaire » d'une spire φ_p du bobinage (ou enroulement) c pour la spire p .

On a $\varphi_p = \varphi_{cp} + \sum_{d=1}^n \varphi_{cdp}$ avec $d \neq c$ où φ_{cp} est le flux propre (ou d'auto-induction) et φ_{cdp} est le flux (de mutuelle induction) créé à travers la spire p par les $(n-1)$ autres circuits.

Considérons le flux total pour l'enroulement c comportant N_c spires :

$$\Phi_c = \sum_{p=1}^{N_c} \varphi_{cp} + \sum_{p=1}^{N_c} \sum_{d=1}^n \varphi_{cdp} \quad \text{avec } d \neq c.$$

Le premier terme $\sum_{p=1}^{N_c} \varphi_{cp}$ est égal au flux total propre Φ_{cc} et le deuxième terme

$\Phi_{cd} = \sum_{p=1}^{N_c} \varphi_{cdp}$ est le flux du couplage mutuel des circuits c et d .

Le flux total propre Φ_{cc} se décompose en deux termes :

- › le flux total de fuites Φ_{fc} qui correspond à la somme des flux des lignes de champ passant dans les spires de l'enroulement c et ne traversant aucune spire des $n-1$ autres circuits ;
- › le flux total de magnétisation Φ_{mc} qui correspond à la somme des flux des lignes de champ passant les spires de l'enroulement c et traversant au moins une spire des $n-1$ autres circuits. Alors $\Phi_{cc} = \Phi_{fc} + \Phi_{mc}$.

Matrice inductance

On désigne sous les termes suivants les inductances :

- › de magnétisation $L_{mc} = \frac{\Phi_{mc}}{i_c}$;
- › de fuites $l_f = \frac{\Phi_{fc}}{i_c}$;

› propre $L_c = \frac{\Phi_{cc}}{i_c} = L_{mc} + l_f$;

› mutuelle $M_{cd} = \frac{\Phi_{cd}}{i_d}$.

Les inductances mutuelles sont symétriques : donc $M_{cd} = M_{dc} = \frac{\Phi_{dc}}{i_c}$.

Mise sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_c \\ \Phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \vdots & M_{1c} & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & \vdots & M_{2c} & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{c1} & M_{c2} & \vdots & L_c & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \vdots & \vdots & L_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_c \\ i_n \end{bmatrix}$$

Coefficients de couplage et de dispersion entre deux bobinages c et d :

Considérons l'expression :

$$K_{cd} = \sqrt{\left| \frac{\Phi_{cd}}{\Phi_{dd}} \right| \left| \frac{\Phi_{dc}}{\Phi_{cc}} \right|} = \frac{|M_{cd}|}{\sqrt{L_c L_d}}$$

Par définition, K_{cd} est le coefficient de couplage entre les circuits c et d ($0 < K_{cd} < 1$).

› Si $K_{cd} = 1$, le couplage est parfait ;

› si $K_{cd} = 0$, le couplage est nul, par exemple, pour deux bobinages dont les axes sont en quadrature (sauf cas particuliers).

On appelle coefficient de dispersion de Blondel la quantité :

$$\sigma_{cd} = 1 - \frac{M_{cd}^2}{L_c L_d} = 1 - K_{cd}^2$$

LES FICHES

Fiche 1 : Magnétisme : système à un seul bobinage	12
Fiche 2 : Magnétisme : système à deux bobinages	18
Fiche 3 : Sources à courant continu	22
Fiche 4 : Sources à courant alternatif monophasé	24
Fiche 5 : Source à courant alternatif triphasé	27
Fiche 6 : Théorème de Ferraris. Transformations	31
Fiche 7 : Transformation de Park	38

Objectifs

- ✓ La formulation du couple d'un moteur élémentaire peut être obtenue à partir de l'énergie emmagasinée ou de la coénergie.
- ✓ Introduction de la notion d'inductance variable en fonction de la position θ du rotor.
- ✓ Expression de l'équation mécanique et de l'équation électrique d'un moteur élémentaire à un seul bobinage.



REPÈRES

Bilan des énergies mises en jeu

On considère un système électromécanique élémentaire qui ne comporte qu'un seul bobinage. Son étude permet l'établissement d'une relation simple pour exprimer le couple. Les énergies mises en jeu sont les suivantes :

- W_{fe} = énergie fournie par la source ;
- W_{pe} = énergie perdue en pertes électriques ;
- ΔW_s = énergie emmagasinée dans le convertisseur ;
- W_m = énergie mécanique ;
- W_{pm} = énergie perdue sous forme mécanique ;
- ΔW_{sm} = énergie cinétique ;
- W_{um} = énergie utilisable.

Ce qui donne en bilan de l'énergie mécanique :

$$W_m = W_{pm} + W_{um} + \Delta W_{sm}$$

Par la suite, on se place dans le cas particulier où *le convertisseur est conservatif* : il y a conservation de la puissance mécanique. Il n'y a donc ni pertes, ni accumulation d'énergie mécanique. Désignons alors par $W_e = W_{fe} - W_{pe}$ l'énergie électrique appliquée au système. Alors on aboutit à la relation fondamentale :

$$W_e = \Delta W_s + W_m$$

ou, sous forme différentielle (utilisée par la suite) :

$$dW_e = dW_s + dW_m$$

avec :

- dW_e : énergie électrique appliquée ;
- dW_s : énergie emmagasinée ;
- dW_m : énergie mécanique engendrée.



SAVOIR-FAIRE

Énergie magnétique emmagasinée et coénergie

Le flux d'un système à un seul bobinage comportant N spires parcouru par un courant i est donné par la caractéristique de magnétisme de la figure 1.1. On désigne par force magnéto-motrice la quantité $\varepsilon = Ni$.

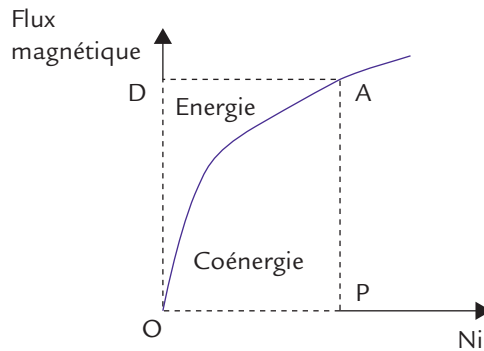


Figure 1.1 Caractéristique du flux

L'énergie emmagasinée (ou stockée) W_s correspond à l'aire du triangle curviligne OAD.

Par définition, la *coénergie* W_{co} correspond à l'aire du triangle curviligne OAP.

Ainsi, on obtient la relation :

$$W_s + W_{co} = i \Phi = \varepsilon \varphi$$

Ce qui permet d'écrire pour la coénergie :

$$W_{co} = \int_0^i \Phi \, di = \int_0^\varepsilon \varphi \, d\varepsilon$$

L'énergie emmagasinée et la coénergie sont des fonctions d'état (au sens thermodynamique du terme) du système conservatif.

Expression du couple

D'une manière générale, pour un système à un seul bobinage, l'énergie dépend du courant, du flux et de la position angulaire θ . Il est possible d'écrire que $W_s = f(\Phi, \theta)$ avec :

$$dW_s = \frac{\partial W_s}{\partial \Phi} d\Phi + \frac{\partial W_s}{\partial \theta} d\theta = i d\Phi - T_e d\theta$$

Pour la coénergie, il est possible d'écrire que $W_{co} = g(i, \theta)$ avec :

$$dW_{co} = \frac{\partial W_{co}}{\partial i} di + \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta} d\theta = \Phi di + T_e d\theta$$

Comme $W_s + W_{co} = i \Phi$ on obtient $dW_s + dW_{co} = i d\Phi + \Phi di$

Cas où il y a linéarité entre le flux et le courant : le circuit magnétique est non saturé et de perméabilité constante.

On obtient alors : $\Phi = L i$ et $W_s = W_{co} = \frac{1}{2} L i^2$. D'où la relation donnant le couple :

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

Un système à seul bobinage ne permet pas d'obtenir une *valeur moyenne non nulle du couple*. En effet, l'inductance $L(\theta)$ est nécessairement une fonction périodique de l'angle θ . On utilise fréquemment l'approximation suivante : $L(\theta) = L_0 + L_\Delta \cos(p\theta)$ où L_0 et L_Δ sont des constantes ($L_0 > L_\Delta$), et p dépend de la géométrie du rotor. Par exemple, $p = 2$ si, pour une rotation minimale de π , la configuration magnétique de la machine est la même.

Ici, l'expression du couple est $T_e(\theta) = -\left(\frac{p}{2}\right) L_\Delta i \sin(p\theta)$. Si le rotor de la machine tourne, alors $\theta = \Omega t$. La valeur moyenne du couple pour une période de rotation est nulle.

Équation dynamique d'un système linéaire à un seul bobinage

Le moment du couple agit généralement sur un système du deuxième ordre du type (les notations des dérivées sont celles qui sont utilisées en mécanique :

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \text{ et } \ddot{\theta} = \frac{d^2\theta}{dt^2}) :$$

$$T_e = C(\theta - \theta_0) + f\dot{\theta} + J\ddot{\theta} + T_0 \text{ (équation mécanique)}$$

T_e est le couple électromagnétique.

C est le coefficient d'élasticité.

f est le coefficient de frottement visqueux.

J est le moment d'inertie.

T_0 est le couple de frottement sec.

D'autre part, en régime linéaire :

$$E = Ri + \frac{d}{dt}[L(\theta) \times i] = Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + i \frac{d[L(\theta)]}{d\theta} \dot{\theta} \text{ (équation électrique)}$$

$$\text{Le couple du système est : } T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{d[L(\theta)]}{d\theta}$$

Ce qui permet de connaître l'interaction entre l'équation mécanique et l'équation électrique.



EN PRATIQUE

Étude d'un circuit magnétique en saturation à l'aide du logiciel PSIM

Présentation

Il est possible de tester expérimentalement ou en simulation le comportement d'un circuit magnétique soumis à une tension sinusoïdale, par exemple celui d'une machine tournante, qui comporte alors nécessairement un entrefer.

Un exemple de circuit magnétique est présenté à la figure 1.2a. Il s'agit d'un circuit saturable soumis à une tension efficace de 230 V, à la fréquence 50 Hz. Cette tension est appliquée avec une phase nulle à $t = 0$.

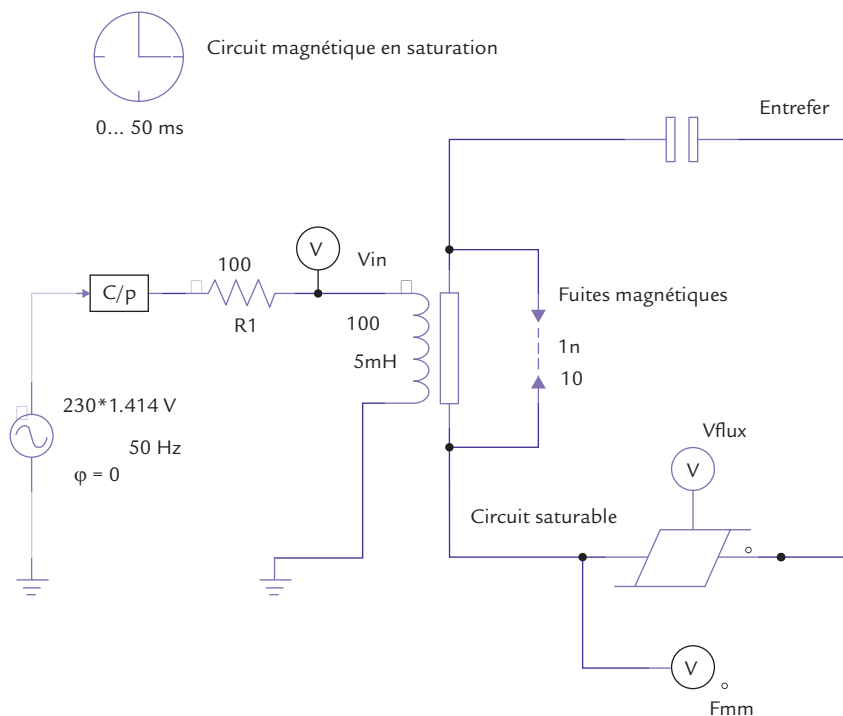


Figure 1.2a Circuit magnétique à un seul bobinage en saturation

La bobine comporte 100 spires. On a simulé (cf. la figure 1.2b) des fuites magnétiques et un entrefer. Aux bornes du circuit saturable, on mesure la force magnétomotrice ε en A.t et le flux en Wb. La résistance R1 égale à 100 ohms sert à limiter le courant fourni par la source de tension.

Simulation

Les résultats sont présentés à la figure ci-dessous.

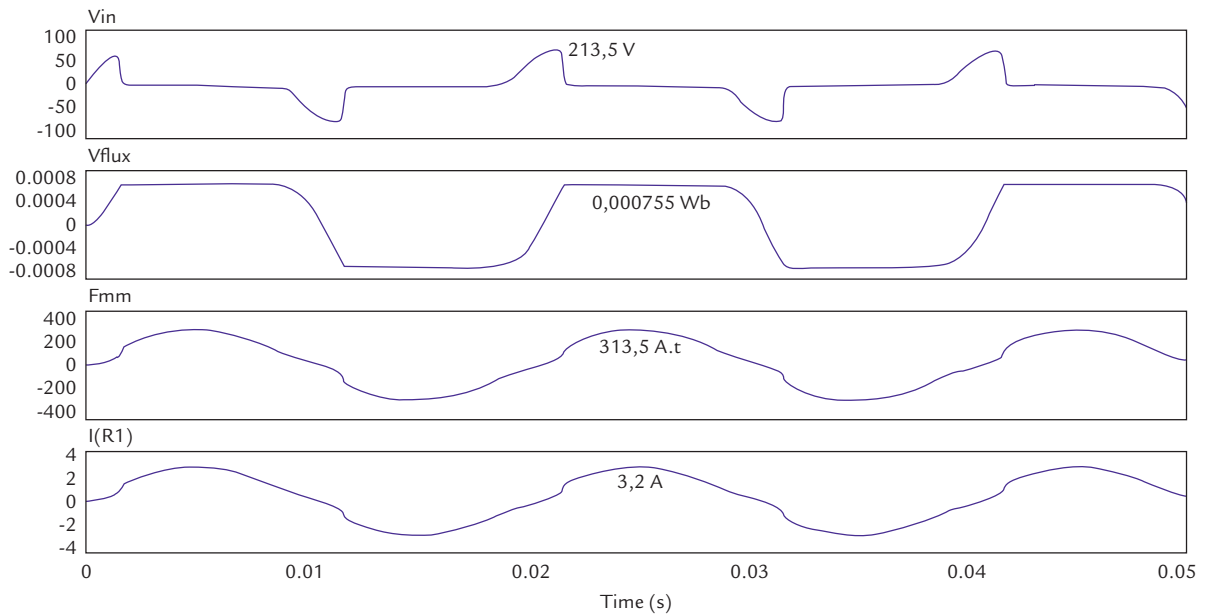


Figure 1.2b Courbes obtenues

On constate que la saturation du flux à 0,000755 Wb (0,755 mWb) provoque une baisse de la tension d'entrée V_{in} et une augmentation brutale de la force magnétomotrice, qui correspond à un courant $I(R1)$ maximal de quelques ampères (3,2 A), autant dans la résistance que dans le bobinage.

Conseils

Le circuit magnétique considéré ici est formé de tôles de fer. Il est possible d'envisager un circuit magnétique constitué de ferrite, qui aurait des propriétés comparables, bien que le flux magnétique obtenu par spire soit plus faible.

Des expériences sur le circuit magnétique à un seul bobinage peuvent être menées sur le bobinage inducteur d'une machine à courant continu ou d'un alternateur.

Objectifs

- ✓ Introduction de la coénergie avec un circuit magnétique comportant deux bobinages afin d'introduire le couple moteur.
- ✓ Application de cette méthode dans le cas simple d'un moteur élémentaire à réluctance variable à deux bobinages.
- ✓ Expression de l'équation mécanique et de l'équation électrique d'un moteur élémentaire à un seul bobinage.



REPÈRES

Bilan des énergies mises en jeu

Pour obtenir un couple de valeur moyenne non nulle pour une période de rotation, il faut disposer au moins de deux bobinages dans la machine. On utilise encore la relation $dW_e = dW_s + dW_m$. Ce qui donne :

$$dW_e = (e_1 i_1 + e_2 i_2) dt = \frac{d\Phi_1}{dt} i_1 dt + \frac{d\Phi_2}{dt} i_2 dt = i_1 d\Phi_1 + i_2 d\Phi_2$$

$$\text{d'où } dW_e = i_1 d\Phi_1 + i_2 d\Phi_2 = dW_s + dW_m$$

$$\text{Si } dW_m = 0, \text{ alors l'énergie emmagasinée est } W_s = \iint_{\Phi_1, \Phi_2} i_1 d\Phi_1 + i_2 d\Phi_2$$

$$\text{Et pour la coénergie } W_{co} = \iint_{i_1, i_2} \Phi_1 di_1 + \Phi_2 di_2 \quad \text{car } W_s + W_{co} = i_1 \Phi_1 + i_2 \Phi_2$$

Il est possible de généraliser pour le cas d'une machine comportant n bobines :

$$W_s = \int_0^{\Phi_1, \dots, \Phi_n} \sum_{k=1}^n i_k d\Phi_k \quad \text{et} \quad W_{co} = \int_0^{i_1, \dots, i_n} \sum_{k=1}^n \Phi_k di_k$$



SAVOIR-FAIRE

Expressions du couple

On a avec deux bobinages : $W_s = f(\Phi_1, \Phi_2, \theta)$ pour l'énergie emmagasinée.

On identifie les dérivées partielles : $dW_s = \frac{\partial W_s}{\partial \Phi_1} d\Phi_1 + \frac{\partial W_s}{\partial \Phi_2} d\Phi_2 + \frac{\partial W_s}{\partial \theta} d\theta$

On obtient $T_e = - \frac{\partial W_s(\Phi_1, \Phi_2, \theta)}{\partial \theta}$; $i_1 = + \frac{\partial W_s(\Phi_1, \Phi_2, \theta)}{\partial \Phi_1}$ et

$$i_2 = + \frac{\partial W_s(\Phi_1, \Phi_2, \theta)}{\partial \Phi_2}$$

Pour la coénergie $W_{co} = g(i_1, i_2, \theta)$. En procédant comme ci-dessus, on obtient :

$$T_e = + \frac{\partial W_{co}(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta}, \Phi_1 = + \frac{\partial W_{co}(i_1, i_2, \theta)}{\partial i_1} \text{ et } \Phi_2 = + \frac{\partial W_{co}(i_1, i_2, \theta)}{\partial i_2}$$

Généralisation au cas d'une machine comportant n bobinages :

$$T_e = - \frac{\partial W_s(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n, \theta)}{\partial \theta} = + \frac{\partial W_{co}(i_1, i_2, \dots, i_n, \theta)}{\partial \theta}$$

Cas des systèmes linéaires

Les calculs sont plus simples en utilisant la coénergie : $dW_{co} = \Phi_1 di_1 + \Phi_2 di_2$

En introduisant les inductances propres et l'inductance mutuelle :

$dW_{co} = (L_1 i_1 + M i_2) di_1 + (L_2 i_2 + M i_1) di_2$ on obtient :

$$dW_{co} = L_1 i_1 di_1 + M (i_2 di_1 + i_1 di_2) + L_2 i_2 di_2$$

soit :

$$W_{co} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + M i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2$$

ce qui donne sous forme matricielle :

$$[W_{co}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_1 & i_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} [i]_t [L] [i]$$

D'où la formule du couple : $T_e = \frac{\partial [W_{co}]}{\partial \theta} = \frac{1}{2} [i]_t \left\{ \frac{\partial [L]}{\partial \theta} \right\} [i]$

Équation dynamique d'un système linéaire à deux bobinages

En régime linéaire :

$$\Phi_1 = L_1(\theta) i_1 + M(\theta) i_2$$

$$\Phi_2 = L_2(\theta) i_2 + M(\theta) i_1$$

$$T_e = \frac{1}{2} \left(i_1^2 \frac{dL_1}{d\theta} + 2 i_1 i_2 \frac{dM}{d\theta} + i_2^2 \frac{dL_2}{d\theta} \right)$$

$$T_e = C(\theta - \theta_0) + f\dot{\theta} + J\ddot{\theta} + T_0 \quad (\text{équation mécanique})$$

Les équations électriques peuvent se mettre sous la forme :

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \dot{\theta} \left\{ \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

Ce qui correspond aux équations matricielles suivantes :

$$[E] = [R][i] + [L(\theta)] \left\{ \frac{d}{dt} [i] \right\} + \dot{\theta} \left\{ \frac{d}{d\theta} [L(\theta)] \right\} [i]$$

$$\text{et } T_e = \frac{\partial [W_{co}]}{\partial \theta} = \frac{1}{2} [i]_t \left\{ \frac{\partial [L]}{\partial \theta} \right\} [i]$$



EN PRATIQUE

Étude théorique d'un moteur à deux bobinages

On considère le moteur à réluctance variable présenté à la figure 2.1.

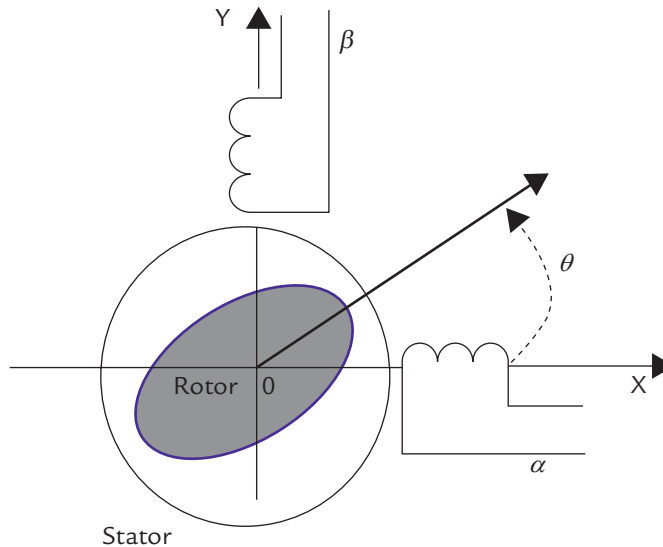


Figure 2.1 Moteur à réluctance variable élémentaire

Le rotor est ovale et les deux bobinages de la machine, notés α et β et placés au stator, sont en quadrature. Le moteur est dit « à réluctance variable » car l'entrefer du circuit magnétique correspondant à chaque enroulement, varie