

LA MACHINE A COURANT CONTINU

*Institut des Science et Technique Appliquées
Université Frères Mentouri Constantine 1*



DRAIDI ABDALLAH

Table des matières



Objectifs	4
I - Exercice : Test de prérequis	5
II - Exercice	6
III - Présentation générale	7
1. Définition	7
2. Conversion d'énergie	7
3. Symbole	7
4. Constitution	8
5. Parties mécaniques	8
6. Plaque signalétique d'un moteur à CC	9
7. Force électromotrice	10
8. Couple électromagnétique	10
9. Puissance électromagnétique	10
10. Exercice	11
11. Exercice	11
12. Bilan des puissances du moteur à c.c.	11
13. Le rendement	12
13.1. Mesure directe	12
13.2. Méthode des pertes séparées	12
IV - Modes d'excitation du moteur à courant continu	13
1. Excitation séparée ou à aimants permanents	13
2. Moteur à excitation série	14
3. Moteur à excitations composée	16
V - Analyse d'un moteur simplifié à aimants permanents	17
1. Modèle équivalent du moteur CC à aimant permanent	17

1.1. Les équations caractéristiques du moteur	17
VI - Commande de vitesse des moteurs à courant continu	19
1. Moteur à excitation séparée et série	19
2. Moteur à aimant permanent	19
VII - Travaux Dirigés	21
1. Exercice : Exercice 1	21
2. Exercice : Exercice 2	21
3. Exercice : Exercice 3	21
4. Exercice : Exercice 4 : Machine à excitation indépendante entraînant un treuil	21
5. Exercice : Exercice 5 :	22
Conclusion	23
Solutions des exercices	24
Références	26

Objectifs

A l'issu de ce cours l'apprenant sera capable de :

- Connaître les principes de la machine à courant continu.
- Différencier entre les modes d'excitation d'un moteur à c.c ainsi que leur commande de vitesse.
- Analyser un moteur simplifié à aimants permanents.
- Appliquer les différents lois et théorème de la machine à c.c. pour résoudre des cas pratiques dans l'industrie.

Prérequis :

1. Électrotechnique 1.
2. Électricité générale.

Exercice : Test de prérequis



[solution n°1 p.24]

le champ magnétique se dirige :

- du sud vers le nord
- du nord vers le sud
- du nord vers le nord
- du sud vers le sud

Exercice



le produit vectoriel de deux vecteurs (V_1) et (V_2) donne un vecteur (V_3) :

- V_3 est dans le même plan que V_1 et V_2
- V_3 est perpendiculaire à V_1 et V_2

Présentation générale

III

1. Définition

Définition

Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique.

2. Conversion d'énergie

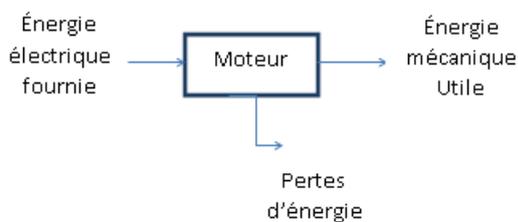


Fig 1 : Conversion électromécanique_moteur

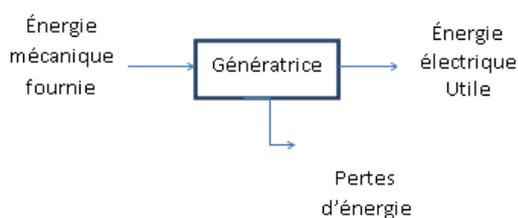


Fig 2 : Conversion électromécanique_génératrice

3. Symbole

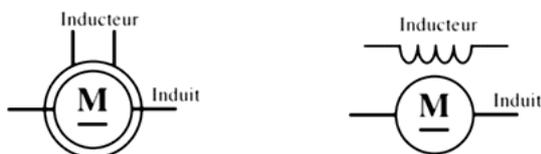


Fig 3 : Symbole de la machine à courant continu

4. Constitution

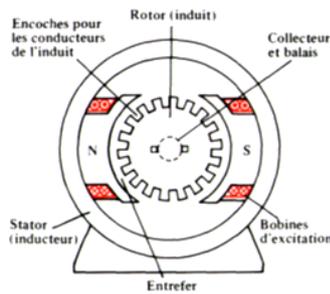


Fig 4 : Constitution du moteur à CC

Le moteur comprend :

- un circuit magnétique comportant une partie fixe, le stator, une partie tournant, le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties.
- une source de champ magnétique nommée l'inducteur (le stator) créée par un bobinage ou des aimants permanents
- un circuit électrique induit (le rotor) subit les effets de ce champ magnétiques
- le collecteur et les balais permettent d'accéder au circuit électrique rotorique

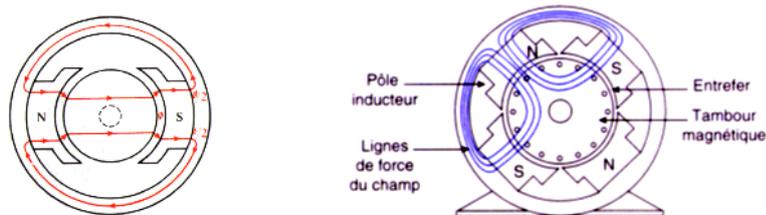


Fig 5 : Circuit magnétique d'un moteur bipolaire (gauche) et tétrapolaire (droite)

5. Parties mécaniques

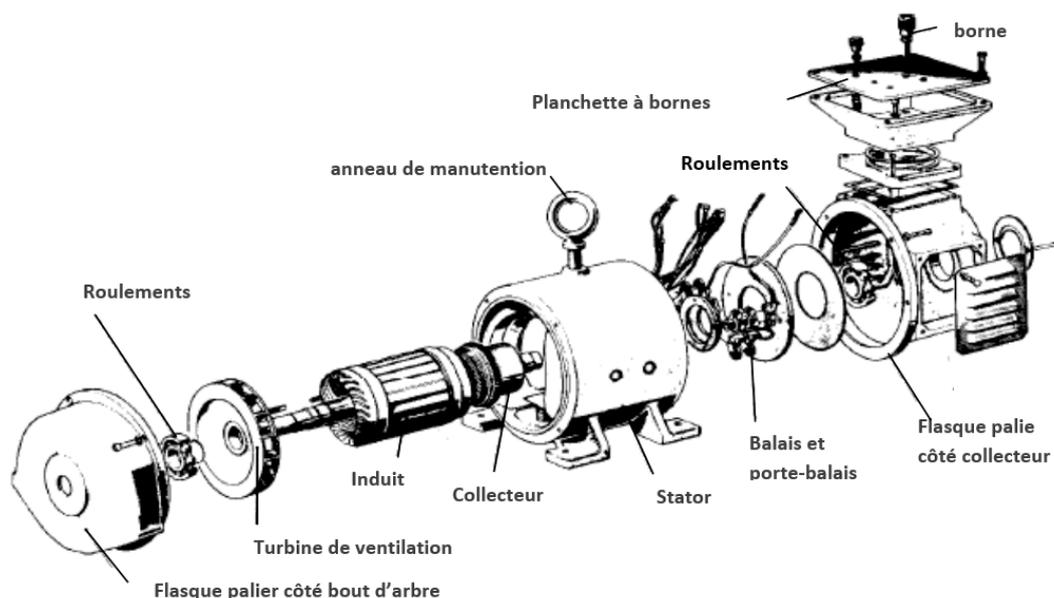


Fig 6 : Vue éclatée d'un moteur à courant continu

6. Plaque signalétique d'un moteur à CC

SP LR 57008		2 102 451 / A				
IEC 34.1.1990		MADE IN FRANCE				
						
MOTEUR A COURANT CONTINU DIRECT CURRENT MOTOR						
TYPE: LSK 1604 S 02		N° 700000/10 9/1992 M 249 kg				
Classe / Ins class H		IM 1001 IP 23S IC 06				
M _{nom} / Rated torque 301 N.m		Altit. 1000 m Temp. 40 °C				
	kW	min⁻¹	V	A	V	A
Norm./Rat.	36,3	1150	440	95,5	360	3
	3,63	115	44	95,5	360	3
	36,3	1720	440	95,5	240	
T	Système peinture: I		Induit / Arm.		Excit. / Field	
○	Service / Duty S1	DE 6312 2RS C3	NDE 6312 2RS C3		○	

Fig 7 : Plaque signalétique d'un moteur à courant continu

Définition des informations contenues sur la plaque signalétique de la machine (de gauche à droite et de bas en haut)

<i>Symbole</i>	<i>désignation</i>
36,3 kW	Puissance
1150 min ⁻¹	Nombre de tours par minute
440 V	Tension d'induit
95,5 A	Intensité d'induit
360 V	Tension d'excitation
3 A	Intensité d'excitation
4	Polarité
N° 700000	N° série moteur
M 249 kg	Masse
Classe H	Classe d'isolation
IM 1001	Position de fonctionnement
IP 23S	Indice de protection
Temp. 40 °C	Température maximale ambiante de fonctionnement

7. Force électromotrice

Nous savons qu'une bobine en mouvement dans un champ magnétique voit apparaître à ses bornes une force électro-motrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday :

$$e = \frac{-\partial \varphi}{\partial t}$$

Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = \frac{p \cdot N \Phi \Omega}{2 \pi a}$$

avec:

p le nombre de paires de pôles

a le nombre de paires de voies d'enroulement

N le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)

Φ flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)

Ω vitesse de rotation (en rad/s)

Finalement

$$E = K \Phi \Omega \text{ avec } K = \frac{pN}{2 \pi a}$$

8. Couple électromagnétique

pour une spire : les deux brins d'une spire placés dans un champ magnétique

subissent des forces de Laplace \vec{F}_1 et \vec{F}_2 formant un couple de force

pour une spire : $C = 2rF = 2rIb = SBi = \Phi I$

couple électromagnétique : $C_{em} = K \Phi I$ en Newtons mètres (N.M)

K est la même constante que dans la formule de la f.é.m : $E = K \Phi \Omega$

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$$

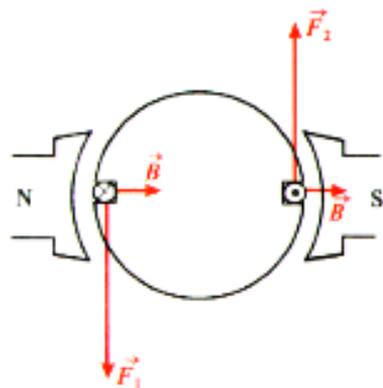


Fig 8 : le couple électromagnétique

9. Puissance électromagnétique

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I , il reçoit une puissance électromagnétique $P_{em} = E \cdot I$. D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique. $P_{em} = C_{em} \cdot \Omega = E \cdot I [W]$ On retrouve la relation $C_{em} = K \Phi I$

10. Exercice

[solution n°3 p.24]

Une machine à courant continu est une :

- machine électrique
- machine mécanique
- convertisseur électromécanique

11. Exercice

[solution n°4 p.24]

le moteur électrique convertit :

- l'énergie électrique en énergie mécanique
- l'énergie mécanique en énergie électrique

12. Bilan des puissances du moteur à c.c.

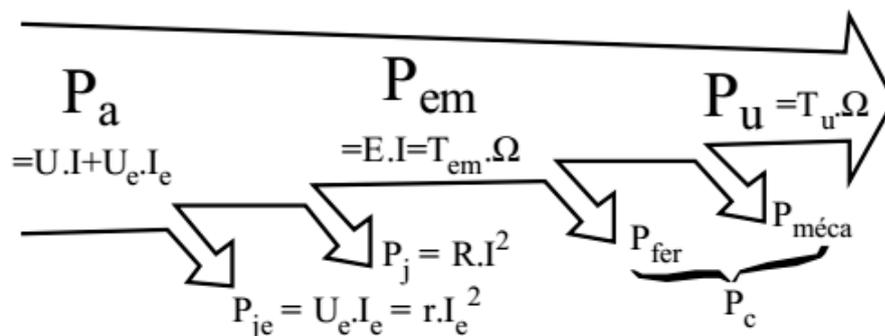


Fig 9 : Bilan de puissance du moteur c.c.

tel que:

P_a : la puissance absorbée (W) ;

U_e : la tension de l'inducteur (V) ;

I_e : le courant d'inducteur (A) ;

P_{em} : la puissance électromagnétique (W) ;

P_u : la puissance utile (W);

Modes d'excitation du moteur à courant continu

IV

Un moteur à courant continu comporte donc deux parties distinctes :

- l'une qui ne sert qu'à magnétiser (inducteur) ;
- l'autre qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (induit).

Plusieurs possibilités de connexions électriques existent entre l'inducteur et l'induit tels que l'excitation séparée (à aimants permanents), l'excitation série, l'excitation parallèle ou l'excitation composée.

1. Excitation séparée ou à aimants permanents

Dans un moteur à excitation séparée, l'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources distinctes. Les cas fréquents où la tension d'excitation est constante sont équivalents à ceux des moteurs à aimants permanents, dont le flux est constant.

La figure 10 présente le principe de l'excitation séparée.

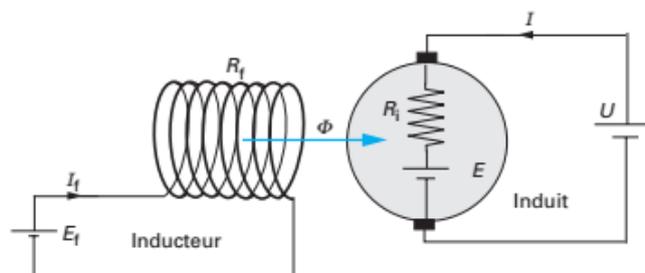


Fig 10 : Moteur à excitation séparée

La droite de couple étant souvent quasiment verticale (fig 11), nous en déduisons que la vitesse de rotation est imposée par la tension d'alimentation et par le flux. Une augmentation de ce premier paramètre entraîne un accroissement proportionnel de la vitesse, tandis qu'il faut une diminution de l'excitation pour obtenir le même effet. Ce sera donc le couple requis par la charge mécanique qui imposera le courant appelé par le moteur à la source de tension.

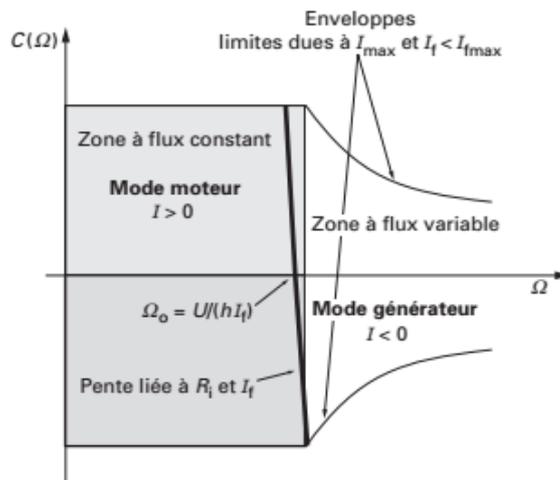


fig 11: Caractéristique couple-vitesse de la machine à excitation séparée

La machine peut fonctionner dans les quatre quadrants comme illustré sur la figure 11. Le passage d'un quadrant à un autre sans changement du signe de la vitesse sera imposé par la charge. Tandis que les transitions horizontales entre quadrants seront obtenues par une inversion de l'excitation.

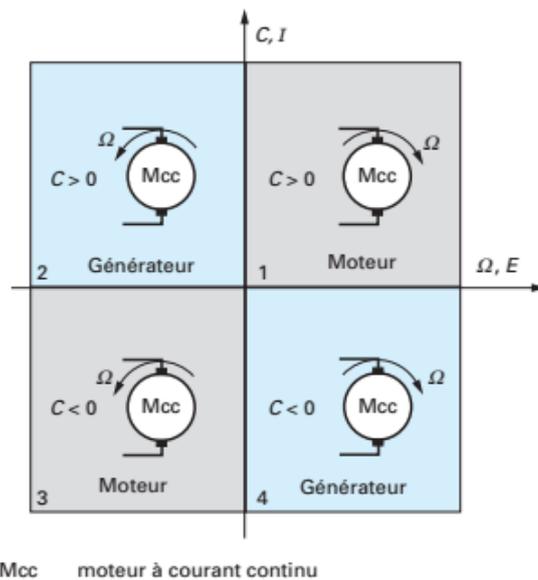


Fig 12: Quadrants de fonctionnement en excitation séparée

Ce moteur est caractérisé par une vitesse réglable par tension et indépendante de la charge. En association avec un convertisseur statique (hacheur) fournissant une tension réglable, la vitesse peut varier sur un large domaine. Il fournit un couple important à faible vitesse (machines-outils, levage). En petite puissance, il est souvent utilisé en asservissement avec une régulation de vitesse.

2. Moteur à excitation série

Un moteur à excitation série a son inducteur connecté en série avec l'induit (voir fig 13); le flux d'excitation y est donc implicitement asservi au couple fourni. Le bobinage inducteur comporte, dans ce cas, peu de spires, mais il est réalisé avec du fil de gros diamètre. Cette conception lui procure une très bonne robustesse face aux vibrations et lui a valu un succès inégalé en traction ferroviaire.

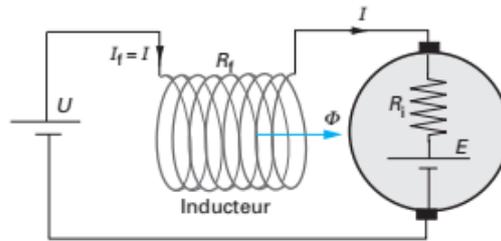


Fig 13 : Moteur à excitation série

La loi d'Ohm appliquée à la maille définie par l'induit et l'inducteur permet d'écrire :

$$U = (R_i + R_f) I + E \text{ la tension d'induit vaut : } E = h \Omega I$$

la relation du couple dans ce cas vaut:

$$C = h \times I^2$$

avec h : constante qui dépend de la géométrie du moteur et qui prend en charge la saturation du circuit magnétique de l'inducteur.

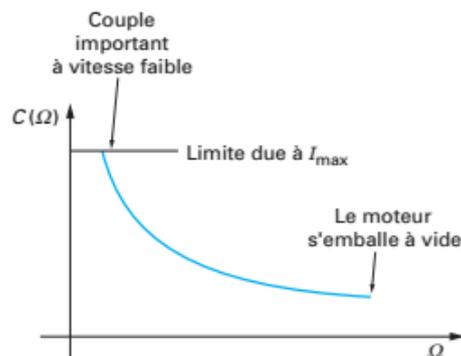


Fig 14: Caractéristiques Couple-Vitesse du moteur série

Les équations ci-dessus permettent de montrer que les moteurs à excitation série peuvent développer un très fort couple en particulier à basse vitesse, celui-ci étant proportionnel au carré du courant. C'est pourquoi ils ont été utilisés pour réaliser des moteurs de traction de locomotives jusque dans les années 1980.

Ce type de machine présente toutefois, du fait de ses caractéristiques, un risque de survitesse et d'emballement à vide (fig 14).

Aujourd'hui, les principales applications sont :

- les démarreurs d'automobiles ;
- les moteurs universels (perceuses, outillage à main, etc.)

on remarque également que le couple fourni par un moteur à excitation série sera toujours de même signe (I^2).

3. Moteur à excitations composée

Dans le mode composé illustré sur la figure 14, l'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle.

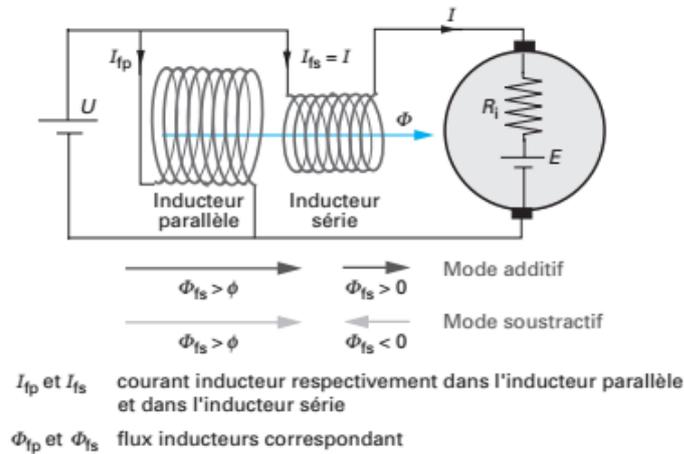


Fig 15: excitation composée

Ce mode d'excitation permet de compenser l'influence de la résistance d'induit et de la réaction d'induit. En mode moteur, l'inducteur série est connecté de façon à diminuer le flux lorsque le courant d'induit augmente. Cet effet démagnétisant accélère l'arbre, en opposition avec l'effet de la résistance d'induit.

L'excitation parallèle n'est utilisée que pour les génératrices, car le moteur, démagnétisé à l'arrêt, ne peut pas démarrer. Le schéma de branchement se déduit du précédent (figure 15), en retirant l'inducteur série.

Analyse d'un moteur simplifié à aimants permanents

V

Nous avons vu que dans un moteur à courant continu le champ magnétique est produit par un courant d'excitation circulant dans les bobines excitatrices. L'énergie dépensée, la chaleur dégagée et l'espace relativement important occupé par ces bobines constituent parfois des inconvénients du moteur à CC conventionnel. On peut éviter ces inconvénients en remplaçant les bobines par des aimants permanents. Il en résulte un moteur plus petit et qui ne risque pas de s'emballer à cause d'une défaillance du champ.

Les moteurs à aimant permanent sont particulièrement utiles dans la gamme des puissances inférieures à 5 kW. les aimants utilisés sont en céramique (ferrite) ou en alliage de terre rares et de cobalt.

1. Modèle équivalent du moteur CC à aimant permanent

Le moteur se comporte comme une résistance en série avec un générateur de tension (fem : force électromotrice)(voir fig 16)

I : courant consommé par le moteur

U : Tension d'alimentation du moteur

E : force électromotrice

R : résistance interne du bobinage

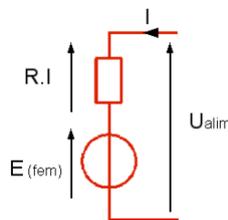


Fig 16: Schéma équivalent du moteur à courant continu

1.1. Les équations caractéristiques du moteur

Cette équation découle directement du schéma équivalent de la figure 16:

$$U = E + R \cdot I$$

d'où : U est l'alimentation en Volts, E est la f.e.m en [Volt], R est la résistance interne en [Ohm] et I est le courant en [Ampère].

La tension f.e.m est proportionnelle à la vitesse angulaire :

$$E = K \cdot \Omega$$

Avec E : f.e.m en [Volt]

K : constante du moteur

Ω : vitesse angulaire du moteur en [rad/s]

Le courant consommé par le moteur est directement lié au couple résistant sur l'arbre :

$$C = K \cdot I$$

avec C : couple en [N.m] , K : constante du moteur et I courant en [Ampère]

On peut en déduire que :

Pour faire varier la fréquence de rotation, il faut faire varier E et donc la tension d'alimentation U .

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser E et donc la tension d'alimentation à ses bornes.

Le courant varie avec le couple, on peut aussi limiter le courant pour limiter le couple.

Commande de vitesse des moteurs à courant continu

VI

Longtemps le moteur à courant continu a été le seul apte à la vitesse variable. De nombreuses solutions furent alors imaginées, en partant de résistances jusqu'aux variateurs électroniques modernes.

1. Moteur à excitation séparée et série

Nous avons vu que la caractéristique de couple de la figure 11 était presque verticale. En négligeant la chute de tension résistive de l'induit ($R_i \approx 0$), nous pouvons écrire :

$$U = E = h I \Omega$$

ou encore

$$\Omega = \frac{U}{h I}$$

donc, la vitesse de rotation peut être augmentée par une action sur l'induit (U) ou sur l'inducteur (If).

Traditionnellement, la stratégie de commande suivante est adoptée :

- si la vitesse de rotation est inférieure à la vitesse nominale, le flux est maintenu à sa valeur nominale, la variation de vitesse est alors réglée par la tension d'induit;
- si la vitesse de rotation est supérieure à la vitesse nominale, la tension d'induit reste constante (imposée par la source), la vitesse est augmentée en baissant le courant d'excitation (défluxage).

La puissance instantanée fournie dans la première zone (flux constant) augmente avec la vitesse, tandis qu'elle reste constante dans la deuxième (défluxage).

2. Moteur à aimant permanent

Pour faire varier la vitesse d'un moteur on peut faire varier la tension d'alimentation à ses bornes mais dans ce cas une partie importante de l'énergie est consommée par le dispositif d'alimentation, on préfère l'alimenter de façon discontinue avec un hacheur et faire ainsi varier la tension moyenne à ses bornes (Fig19).

On parle alors de Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI), ou Pulse Width Modulation (PWM).

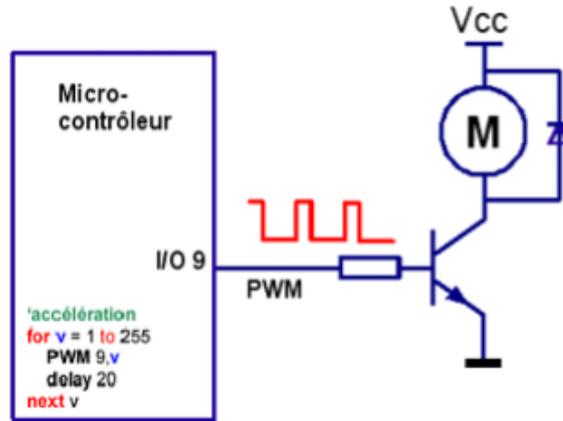


Fig 18 : La sortie PWM du microcontrôleur utilisée pour commander le transistor

Quand le transistor est saturé, le moteur est alimenté à la tension maximale. Le courant est important dans le transistor mais la tension V_{ce} est presque nulle, il n'y a donc pas d'échauffement du transistor.

Quand le transistor est bloqué, le moteur n'est plus alimenté. La tension V_{ce} est maintenant maximale mais il n'y a plus de courant dans le transistor.

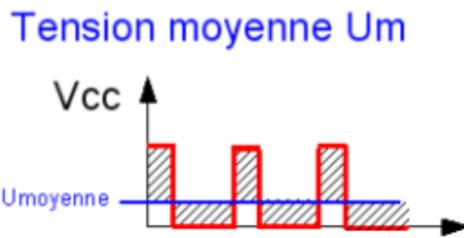


Fig 19: tension créée par le hacheur

Le rendement de ce dispositif d'alimentation est donc très bon.

La fréquence est suffisamment élevée pour avoir une rotation continue et sans bruit du moteur

Travaux Dirigés


 VII

1. Exercice : Exercice 1

L'induit d'un moteur à c.c. de 255 kW, 250 V, 1200 r/min contient 243 bobines et possède une résistance de 0,0094 Ω . L'enroulement est imbriqué et chaque bobine possède 1 spire. L'inducteur comprend 6 poles. lors d'un essai sous charge, on prend les lectures suivantes :

Tension aux bornes de l'induit : 243 V

Courant dans l'induit : 698 A

Vitesse de rotation : 1260 tr/min

On considère que la chute de tension dans les balais est 1 V. Calculer :

- 1) le flux par pôle
- 2) la puissance mécanique développée par le moteur
- 3) le couple développé

réponse

1) $\Phi=23\text{mWb}$ 2) $P=150,6\text{ kW}$ 3) $T=1141\text{ Nm}$

2. Exercice : Exercice 2

Un moteur à c.c. tourne à 1200 tr/min quand l'induit est alimenté par une source de 115 V.

Quelle tension faudrait-il employer pour que la vitesse devienne environ 1500 tr/min ? 100 tr/min ?

réponse

$V_1=173,75\text{ V}$; $V_2=9.6\text{ V}$

3. Exercice : Exercice 3

une machine à papier comprend un moteur à c.c. qui enroule le papier sur un grand rouleau dont le diamètre augmente graduellement de 300 mm à 1000 mm. Le débit de papier est constant et la feuille est maintenue sous une tension fixe. Le moteur développe une puissance de 50 kW et tourne à 600 tr/min lorsque l'on commence le rouleau. Quelles doivent être sa vitesse et sa puissance lorsque le rouleau est terminé ?

4. Exercice : Exercice 4 : Machine à excitation indépendante entraînant un treuil

L'énergie d'un treuil est fournie par un moteur à courant continu à excitation indépendante dont l'induit et l'inducteur sont alimentés sous une tension $U = 230\text{V}$. En charge, le treuil soulevant verticalement une charge à la vitesse de 4 m/s, le moteur tourne à une vitesse de 1200 tr/min et son induit absorbe une puissance

électrique de 17,25 kW. La résistance de l'induit est de $0,1 \Omega$; celle de l'inducteur de 46Ω ; les pertes constantes ont pour valeur 1 kW ; l'accélération de la pesanteur sera prise égale à $g = 10 \text{ m/s}^2$; le rendement du treuil est de 0,75.

1. Calculer les courants absorbés par l'induit et l'inducteur.
2. Calculer la force électromotrice du moteur.
3. Calculer la puissance utile du moteur.
4. Calculer le couple utile du moteur.
5. Calculer le rendement du moteur

5. Exercice : Exercice 5 :

On considère une machine à courant continu utilisée en moteur. Le bobinage inducteur est alimenté par la source de tension de 110 V qui alimente également l'induit, à la différence que le courant inducteur est limité par la résistance R_{e1} .

On donne : Résistance de l'induit $R = 0,5 \Omega$, Résistance de l'inducteur : $R_e = 400 \Omega$

- 1) Le moteur fonctionnant à vide consomme le courant $I = 1,2 \text{ A}$. Calculer alors la valeur des pertes mécaniques P_m . Calculer également la valeur de la force électromotrice interne E .
- 2) Toujours à vide, et pour $R_{e1} = 0$, le moteur tourne à la vitesse de 1 620 tr/min.

Calculer le couple de pertes mécaniques C_m .

- 3) En déduire le coefficient k tel que $C = k \cdot I_e \cdot I$. Vérifier que ce coefficient vérifie également la relation $E = k \cdot I_e \cdot \Omega$.

4) On charge à présent le moteur en le faisant entraîner un dispositif mécanique (treuil, roue, ou autre...) qui représente un couple résistant de 10 Nm s'ajoutant au couple de pertes (supposé constant). Calculer alors le courant absorbé.

- 5) En déduire la valeur de la force électromotrice E et de la vitesse de rotation du moteur N (tr/min).

6) On souhaite que cette charge soit entraînée à 1 800 tr/min. Calculer alors la valeur de la résistance R_{e1} permettant d'obtenir cette vitesse.

Conclusion



Le moteur à courant continu fut le premier moteur électrique créé, il présente des caractéristiques souvent considérées comme parfaites pour la commande de vitesse (excitation séparée) et le couple de démarrage (excitation série et shunt).

A cause de sa complexité de fabrication et de sa nécessité de plus d'entretien et donc son prix élevé par rapport aux moteurs à courant alternatif, l'application des gros moteurs à c.c dans l'industrie tend à disparaître, sauf pour le domaine ferroviaire et du véhicule électrique.

l'électronique numérique moderne permet de commander les petits moteurs à c.c à aimant permanent utilisés pour des application de précision tels que la robotique et de la mécatronique.



Solutions des exercices



> Solution n°1

Exercice p. 5

le champ magnétique se dirige :

- du sud vers le nord
- du nord vers le sud
- du nord vers le nord
- du sud vers le sud

on peut vérifier la direction du champ magnétique en utilisant une boussole

> Solution n°2

Exercice p. 6

le produit vectoriel de deux vecteurs (V_1) et (V_2) donne un vecteur (V_3) :

- V_3 est dans le même plan que V_1 et V_2
- V_3 est perpendiculaire à V_1 et V_2

On peut déterminer le sens du vecteur V_3 à l'aide de la méthode de la main droite

> Solution n°3

Exercice p. 11

Une machine à courant continu est une :

- machine électrique
- machine mécanique
- convertisseur électromécanique

> Solution n°4

Exercice p. 11

le moteur électrique convertit :

- l'énergie électrique en énergie mécanique

l'énergie mécanique en énergie électrique



Références



*Claude Divoux, 1999.
Terminale STI Moteur à
courant continu*

*François BERNOT,
Machines à courant
continu, Constitution et
fonctionnement,
Technique de l'ingénieur.*

*MACHINES À COURANT
CONTINU, Cours et
Problèmes, Claude
CHEVASSU*

*Philippe LE BRUN, Lycée
Louis ARMAND, Florence.
vadee@wanadoo.fr*

*Theodor Wildi,
Électrotechnique
quatrième édition, Juin
2005*