

MINISTÈRE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA.



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR.

DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE.

*Commande en Vitesse d'un moteur à
courant continu*

Intitulé :

Spécialité : électrotechnique.

Sous la direction de : Mme.bensiali.

Par :

- **Mekahlia youcef**
- **Nesri adel**

Année universitaire : 2020/2021.

Remerciment

- nous remercions dieu de nous avoir donné la patience nécessaire pour terminer ce travail avec succès.
- En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Mme bensiali**, son précieux conseil et son aide durant toute la période de travail.
- En fin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

• Introduction générale.....	(1)
I- Etude des différentes type de moteur à courant continu	
- Introduction.....	(4)
1- Moteur à excitation indépendante.....	(6)
1-1- Grandeurs caractéristique.....	(7)
A- force contre-électromotrice (f.c.é.m.).....	(7)
B- Equation électrique de l'induit.....	(7)
C- Vitesse de rotation	(7)
D- Fonctionnement du moteur.	(8)
E- Point de fonctionnement.....	(9)
F- Bilan des puissances et rendement.....	(10)
G- Expression des couples.....	(12)
2- Moteur à excitation série.....	(13)
2-1- Equations du moteur.....	(14)
2-2- Caractéristique de la vitesse.....	(14)
2-3- Caractéristiques du couple T(I).....	(15)
2-4- Caractéristiques mécanique (Tn).....	(16)
2-5- Bilan des puissances.....	(17)
2-6- Rendement.....	(17)
3- Moteur à excitation shunt.....	(17)
3-1- Equation du moteur.....	(18)
3-2- Caractéristiques de la vitesse.....	(18)
3-3- Caractéristiques du couple T(I).....	(18)
3-4- Caractéristiques mécanique T(n).....	(19)

3-5-	bilan des puissances et rendement.....	(19)
4-	Moteur à excitation composé.....	(21)
4-1-	Caractéristiques de la vitesse.....	(21)
II- Démarrage et freinage des MCC		
1-	Démarrage des MCC.....	(27)
1-1-	Démarrage des moteurs sans rhéostat.....	(27)
1-2-	Démarrage des moteurs avec rhéostat.....	(31)
1-3-	Démarrage des moteurs à l'aide d'un group spéciale.....	(35)
2-	Freinage des MCC.....	(36)
2-1-	Freinage avec récupération d'énergie.....	(36)
2-2-	Freinage par contre courant.....	(36)
2-3-	Freinagedynamique.....	(37)
III- Modes de réglage de la vitesse des MCC.		
1-	Réglagerhéostatique.....	(39)
2-	Réglage par variation du flux.....	(40)
3-	Réglage par variation de la tension.....	(42)
IV- Asservissement de la vitesse des MCC.		
1-	Définitions.....	(45)
1-1-	Systèmeasservi.....	(45)
1-2-	Systèmecommandé.....	(45)
1-3-	Système bouclé.....	(45)
1-4-	Transducteur.....	(46)
1-5-	Régulateur.....	(46)
2-	Le but de l'asservissement.....	(46)
3-	Modélisation des MCC.....	(47)
A-	Mise enéquation du moteur.....	(47)
B-	Modèle pour l'asservissement de vitesse des MCC.....	(48)
-	Modèled'ordre 1.....	(49)
-	Modèled'ordre 2.....	(50)

4-	Etude de la boucle de vitesse.....	(51)
	A- Identification des blocs.....	(51)
	B- Etude de la boucle sans correction.....	(52)
	C- Etude de la boucle avec correction.....	(52)
5-	Etude de la boucle de courant.....	(53)
	A- Identification des blocs.....	(54)
	B- Etude de la boucle sans correction.....	(54)
	C- Etude de la boucle avec correction.....	(55)
6-	Etude des deux boucles.....	(56)
	• Conclusion.....	(58)

Introduction générale :

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotations précises et variables pour les entraînements industriels, systèmes robotique ...etc. Dans notre étude, on s'intéresse au moteur à courant continu qui est une machine qui transforme l'énergie électrique qui lui est appliquée en une énergie mécanique entraînant une charge mécanique avec les caractéristiques (**vitesse, couple, rendement**) suivantes :

- **Le couple** développé par un moteur à courant continu est proportionnel au courant d'induit et au flux magnétique.
- **La vitesse** de rotation est proportionnelle à la tension d'alimentation et inversement proportionnelle au flux magnétique.
- **Le rendement** est le rapport entre la puissance développée par le moteur ou puissance utile (puissance mécanique) et celle qui lui est appliquée ou puissance Absorbée (puissance électrique).

Comme dans le cas des génératrices, un moteur à courant continu peut être :

- **A excitation indépendante**, caractérisé par sa vitesse qui diminue légèrement lorsque le couple augmente. Si le circuit d'excitation est coupé, le moteur s'emballe.
- **A excitation en dérivation** dont l'avantage réside dans le fait que ce moteur n'exige pas une alimentation séparée pour son circuit d'excitation. Sa caractéristique mécanique (la vitesse en fonction du couple) est sensiblement la même que celle du moteur à excitation indépendante.
- **A excitation série**, caractérisé par un important couple au démarrage.
- **A excitation composé**, l'enroulement série peut être branché de façon à fournir un flux de même sens que celui de l'enroulement en dérivation ou sens inverse.

Introduction générale

- **Principe de fonctionnement** : Une machine à courant continu possède un nombre N de conducteurs actifs, le flux utile sous un pôle créé par l'inducteur est φ exprimé en webers, et n représente la fréquence de rotation de l'arbre du rotor, en tours par seconde.

Deux cas peuvent se présenter :

- Soit un conducteur est à la fois traversé par un courant électrique et plonge à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors soumis à une force électromagnétique.
- Soit un conducteur est à la fois en mouvement de rotation et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors le siège d'une force électromotrice .

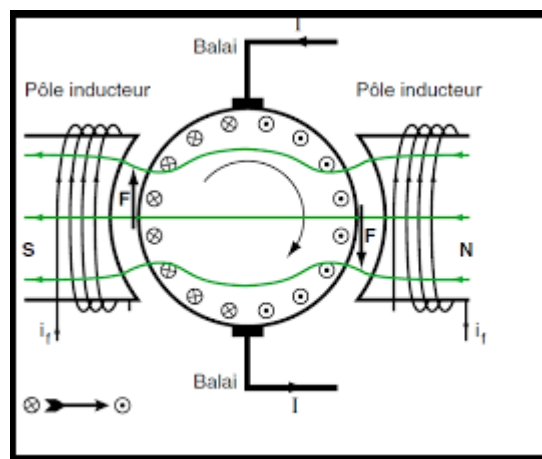


Fig.1

Courant + champ magnétique = force électromagnétique.

Force + champ magnétique = force électromotrice.

La MCC est constituée de deux parties principales:

- Une partie fixe appelée: STATOR.
- Une partie mobile appelée: ROTOR.

Introduction générale

On utilise trois modes pour le démarrage des moteurs à courant continu :

- Branchement direct du moteur sur le réseau (démarrage sans rhéostat).
- Démarrage du moteur à l'aide d'un rhéostat inséré dans le circuit de l'induit.
- Démarrage du moteur à l'aide d'un groupe de démarrage spéciale.

Ainsi pour le freinage des MCC il y a trois type :

- Le freinage avec récupération d'énergie.
- Le freinage par contre courant.
- Le freinage dynamique.

Pour le réglage de la vitesse des moteurs à courant continu on utilise :

- Réglage rhéostatique.
- Réglage par variation du flux.
- Réglage par variation de la tension.

Chapitre I

I-Etude des différentes type de moteur à courant continu :- Introduction :

Les machines électriques tournantes sont des convertisseurs d'énergie. Lorsqu'elles transforment l'énergie électrique en énergie mécanique on dit qu'elles fonctionnent en moteur. En revanche si elles transforment l'énergie mécanique apportée par un autre système en énergie électrique on dit qu'elles fonctionnent en génératrice.

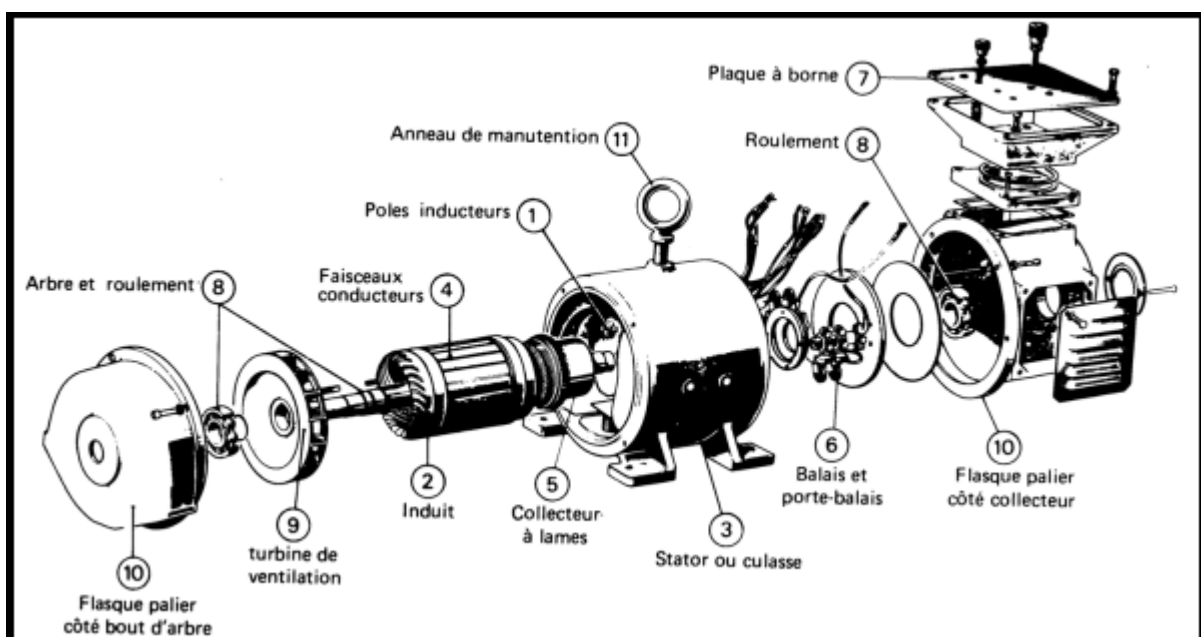


Fig.1 schéma du MCC

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales :

➤ L'inducteur :

C'est un aimant ou un électroaimant (bobinage parcouru par un courant continu). Il est situé sur la partie fixe de la machine (le stator). Il sert à créer un champ magnétique (champ "inducteur") dans le rotor.

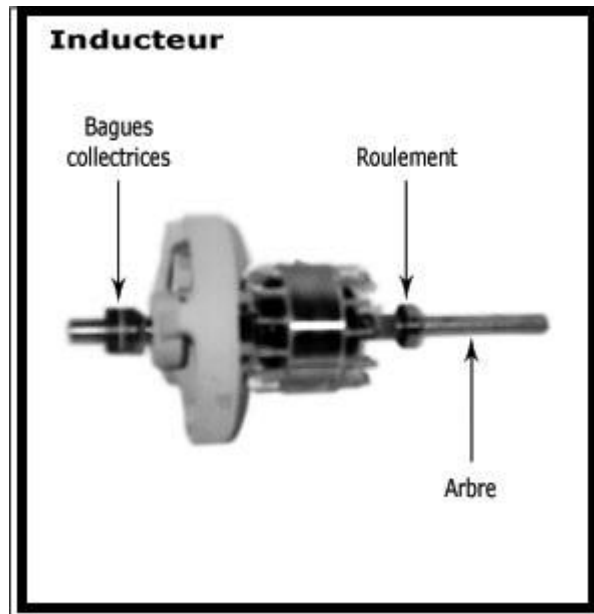


Fig.2

➤ L'induit :

L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine), C'est un bobinage parcouru par un courant continu I (courant d'induit).

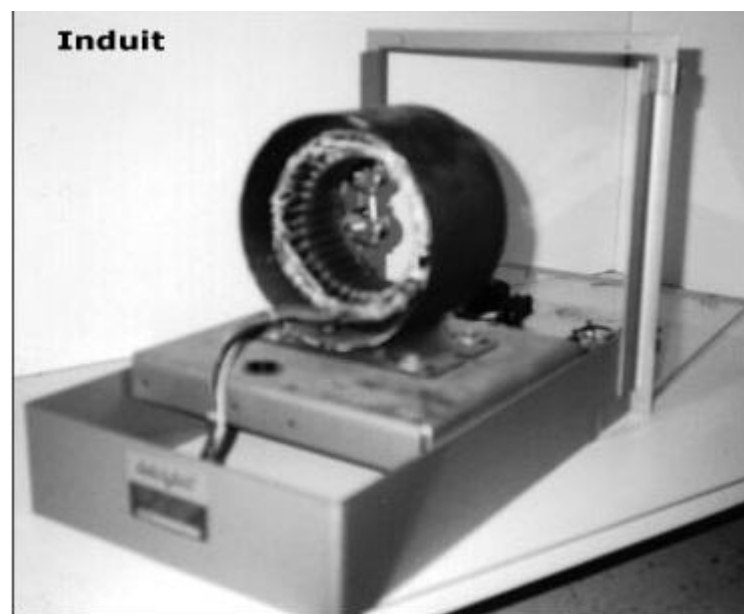


Fig.3

➤ Le collecteur et les balais :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation. Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.



Fig.4 le collecteur et les balais.

il y a quatre types des moteurs à courant continu :

1- moteur à excitation indépendante :

il est représenté dans la fig. 1-1. il faut deux alimentation : une pour l'inducteur et l'autre pour l'induit.

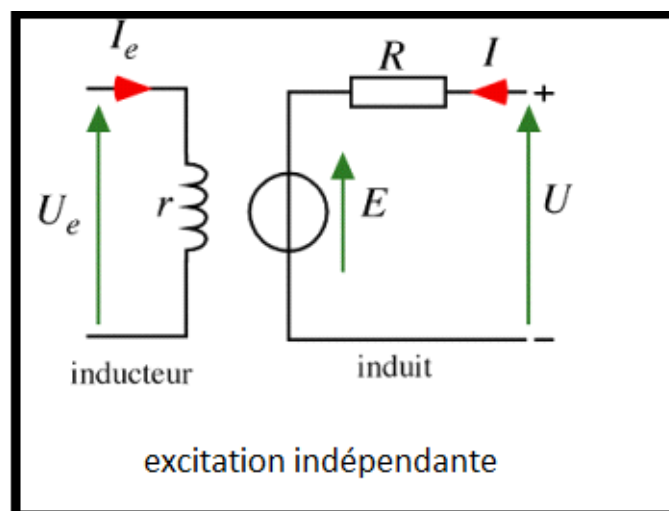


Fig.1-1

1-1 grandeurs caractéristiques :

A-force contre-électromotrice (f.c.é.m.) :

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

Avec :

p: Nombre de paire de pôles de l'inducteur.

a : Nombre de paire de voies de l'enroulement d'induit.

N: Nombre total de brins actifs de l'induit .

φ : Flux utile par pôle (Weber).

Ω : Vitesse de rotation (rd/s).

E': Force contre-électromotrice en Volts.

Le facteur $\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi}$ est constant. Posons : $\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} = K$

D'où : $E' = K \cdot \Omega \cdot \varphi$.

B- Equation électrique de l'induit :

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E'$$

Soit en régime permanent :

$$U_a = R_a \cdot I_a + E'$$

C- Vitesse de rotation :

l'expression de la vitesse s'écrit sous la forme :

$$\Omega = \frac{E'}{N\varphi}$$

$$\Omega = \frac{Ua - Ra \cdot Ia}{N\phi}$$

D- Fonctionnement du moteur :

- à vide :

Un moteur est dit fonctionnant à vide lorsqu'il n'entraîne aucune charge sur son arbre, A vide la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes. La puissance utile est nulle.

La vitesse à vide se règle en fonction de la tension d'alimentation ou du flux inducteur ϕ .

$$\Omega = \frac{Ua}{K\phi}$$

- fonctionnement à flux constant :

$$\Omega = \frac{U - R \cdot I_0}{K\phi} = \frac{U}{K\phi} = K_2 \cdot U$$

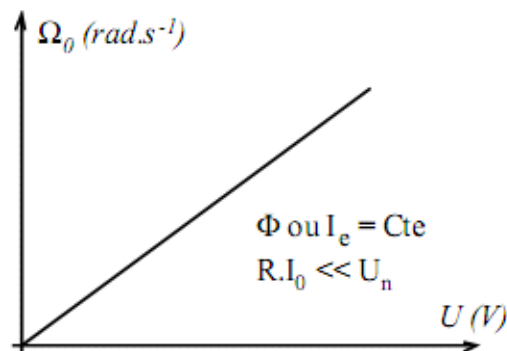


Fig.1-2

La caractéristique passe approximativement par zéro.

- Fonctionnement en charge :

Exprimons la vitesse de rotation en fonction de la tension d'alimentation :

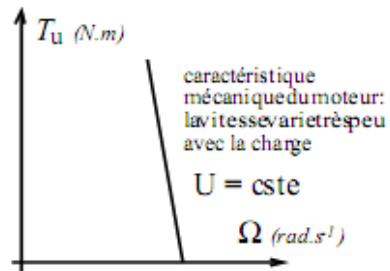


Fig1.3

La vitesse dépend de :

- -la tension d'alimentation U ;
- l'intensité du courant I imposée par le moment du couple résistant

U reste tout de même grand devant $R.I$. En conséquence la vitesse de rotation est essentiellement fixée par la tension d'alimentation U et varie très peu en fonction du courant, c'est-à-dire de la charge.

E- Point de fonctionnement :

Une charge oppose au moteur un couple résistant T_r .

Pour que le moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile T_u de telle sorte que : $T_u \approx T_r$

Avec :

T_u : caractéristique mécanique du moteur.

T_r : caractéristique mécanique de la charge.

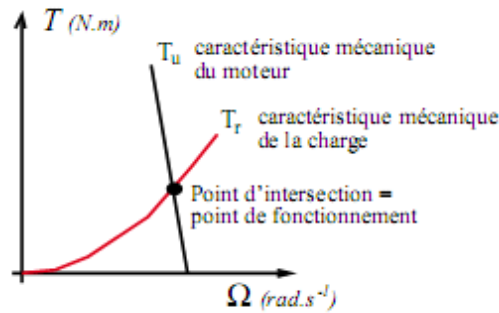


Fig.1.4

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.

F- Bilan des puissances et rendement :

* Définition :

le bilan des puissance décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécanique qu'électriques, et enfin une puissance sera étudié tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance électrique à la puissance mécanique.

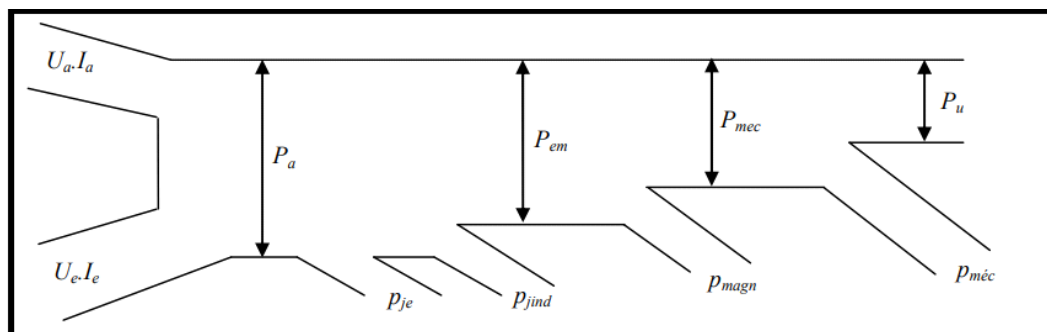


Fig.1.5 : Bilan des puissances d'un moteur à courant continu à excitation séparée.

Avec :

- P_a : la puissance absorbée (W) :

$$P_a = U_a \cdot I_a + U_e \cdot I_e$$

- P_{je} : Pertes joule excitation en W :

$$P_{je} = U_e \cdot I_e$$

- P_{jind} : pertes joule d'induit en W :

$$P_{jind} = R_a \cdot I_a^2$$

D'où : $P_j = P_{je} + P_{jind}$

- P_{em} : puissance électromagnétique (W) :

$$P_{em} = P_a - P_j$$

- $P_{méc}$: puissance mécanique (W) :

$$P_{méc} = P_{em} - P_{mag}$$

Avec :

P_{mag} : étant les pertes magnétiques définies par la somme des pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

- P_u : puissance utile (W) :

$$P_u = P_{méc} - (P_{frot} + P_{ven})$$

Avec :

- P_{frot} : les pertes de frottement

- P_{ven} : les pertes de ventilation

N.B. : La somme des pertes magnétiques et mécaniques est désignée par pertes constantes (p_c) du fait que leurs valeur est indépendant de l'état de charge du moteur.

- Rendement :
- Définition :

Le rendement correspond à l'énergie motrice sur l'énergie reçue, ou encore à la puissance utile divisée par la puissance absorbée par le système. Concrètement, un moteur en marche va convertir l'énergie électrique reçue en énergie mécanique.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

G- Expression des couples :

- Couple électromagnétique :
- Définition :

C'est le couple qui correspond à la puissance passée de la forme électrique à la forme mécanique. Cela apparait clairement dans le bilan des puissances du moteur.

On a la relation :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

La puissance qui passe de la forme électrique à la forme mécanique est P_{em} (Puissance électromagnétique). Exprimons cette puissance :

$$P_{em} = P_a - P_j$$

Ce qui donne : $P_{em} = (U_a - R_a \cdot I_a) \cdot I_a$

Soit en utilisant l'équation électrique de l'induit :

$$P_{em} = E \cdot I_a$$

On obtient :

$$C_{em} = \frac{E' \cdot I_a}{\Omega} = \frac{K \cdot \Omega \cdot \varphi \cdot I_a}{\Omega} = K \cdot \varphi \cdot I_a$$

➤ Couple utile :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_{em} - P_c}{\Omega} = C_{em} - C_p$$

Avec : C_p : couples des pertes.

En pratique le couple de pertes qui dépend de la vitesse ne dépasse pas quelques pourcents du couple électromagnétique, aussi peut-on le négliger et se permettre ainsi d'écrire :

$$C_u = C_{mec} = C_{em} = C = K \cdot \varphi \cdot I_a$$

N.B : Le couple utile d'un moteur à courant continu est proportionnel au courant induit et au flux inducteur.

2- Moteur à excitation série :

Il est représenté dans la fig.2.1, dans ce cas L'inducteur et l'induit sont reliés en série.

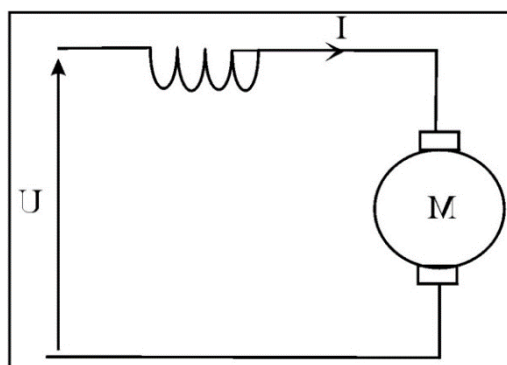


Fig.2.1

Le moteur à excitation série a la particularité d'avoir un inducteur qui est traversé par le même courant que l'induit, donc beaucoup plus important que celui des machines à excitation indépendantes. L'inducteur possède donc une résistance plus faible que celle des autres types de machines.

En raison du courant d'excitation élevé et pour avoir un flux du même ordre que celui dans les autres types de machines, le nombre de spires doit être diminué et la section doit être augmentée. D'où une résistance plus faible.

2-1 Equations du moteur :

Machine en charge :

$$U = E + (R + r).I$$

Avec : $E = K. \varphi. N$: la f.é.m.

Et : φ : le flux magnétique sous un pôle.

Donc :

$$N = \frac{U - (R + r).I}{K. \varphi}$$

A vide : $I \neq 0$

Donc : $\varphi(I)=0$ et N tend vers l'infini.

Un moteur à excitation série ne doit jamais fonctionner à vide sous tension nominale.

2-2 Caractéristique de la vitesse :

Sachant que : $U = E + (R + r).I = K. \varphi. N + Rt.I$

E : représente la f.é.m. en charge.

Rt : la résistance équivalente de l'induit en série avec l'inducteur.

D'après la loi d'Ohm, et compte tenu de la relation:

$$Ech = K. N. \varphi$$

On a :

$$\frac{U - R_t \cdot I}{N} = \frac{E_{ch}(I, Nn)}{Nn}$$

$$N = Nn \cdot \frac{U - R_t \cdot I}{E_{ch}(I, Nn)}$$

Quand I tend vers 0 : $N = \frac{\alpha}{I}$

Le moteur s'emballé .

Quand φ est constant, forte saturation : $N = \beta(U - R_t \cdot I)$.

La caractéristique est linéaire, mais cela n'est observable qu'au dessus du courant nominal.

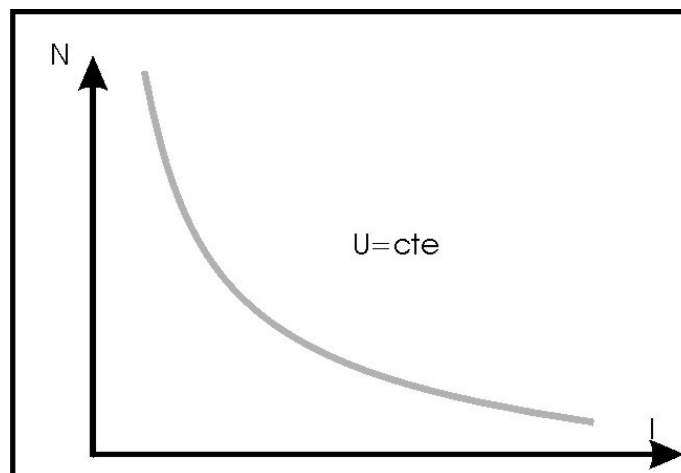


Fig.2.2

2-3 Caractéristiques du couple $T(I)$:

$$P_{em} = T_{em} \cdot \Omega = E \cdot I$$

De même :

$$E = K \cdot \varphi(I) \cdot \Omega$$

Et :

$$T_{em} = K \cdot \phi(I) \cdot I$$

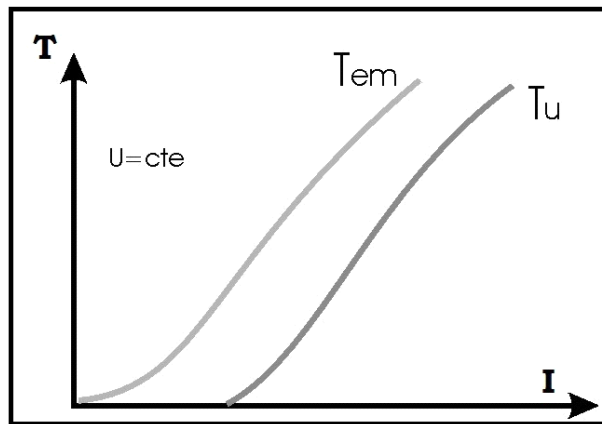


Fig.2.3

2-4 Caractéristiques mécanique (T_n) :

A partir des deux caractéristiques précédentes on déduit celle de $T(n)$.

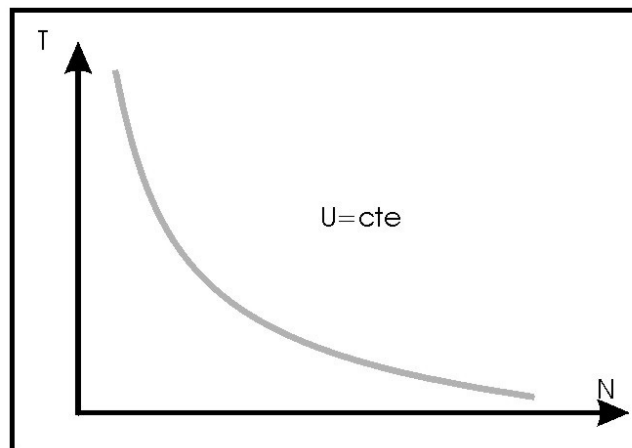


Fig.2.4

2-5 Bilan des puissances :

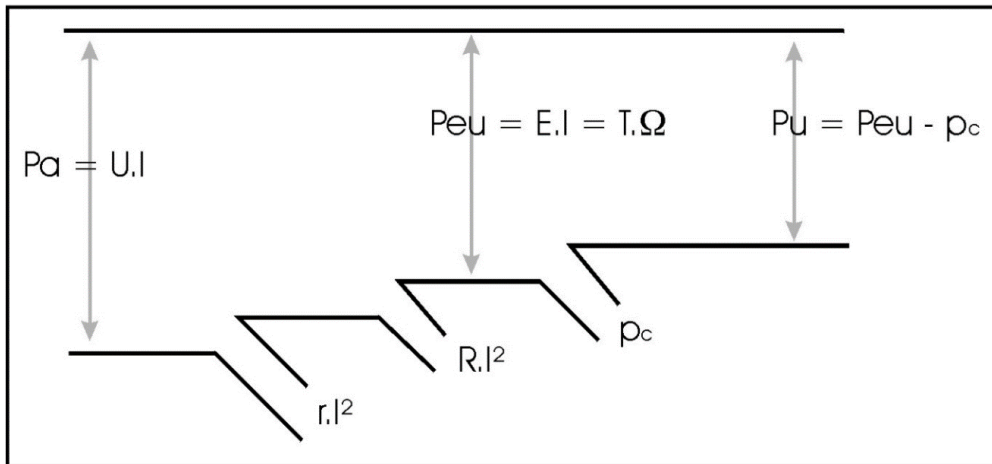


Fig.2.5

- Puissance absorbée: $P_a = U.I = (E + R_t.)I$
- Pertes par effet joule: $R_t.I^2$
- Pertes collectives: p_c
- Puissance électrique utile: $P_{uu} = E.I$
- Puissance utile: $P_u = U.I - R_t.I^2 - P_c = E.I - P_c$

2-6 Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{E.I - P_c}{U.I}$$

3 Moteur à excitation shunt :

Dans un moteur shunt le stator est monté en parallèle avec le rotor, donc la tension aux bornes du rotor est la même qu'elle celle aux bornes du stator $U_a = U_{ex} = U$

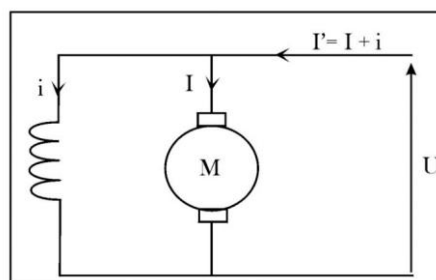


Fig.3.1

3-1 Equation du moteur :

Machine en charge :

$$U = E + R.I$$

Avec : $E = K. \varphi(I, i). N$: la f.é.m. en charge et φ le flux magnétique sous un pôle.

$$E = E_0 - \epsilon(I)$$

3-2 Caractéristiques de la vitesse :

Sachant que : $U = E + R.I = K\varphi(I, i)N + R.I$

Si la machine est compensée, $\epsilon = 0$, le flux est constant, $\varphi = \varphi_0$ à vide. Dans ce cas

la vitesse a pour expression: $N = \frac{U - R.I}{K\varphi(I, i)}$.

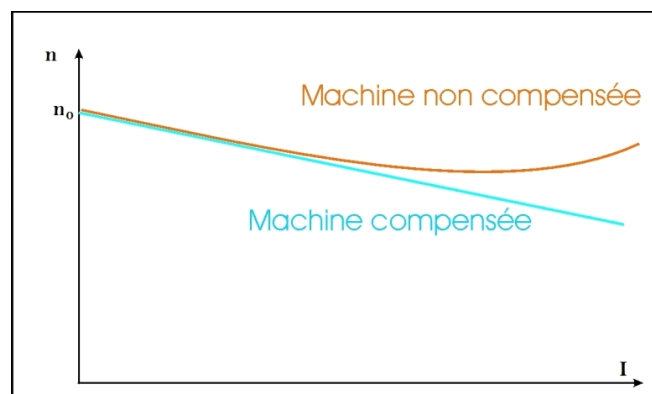


Fig3.2

3-3 Caractéristiques du couple T(I) :

$$P_{em} = T_{em}.\Omega = E.I = U.I - R.I^2$$

De même :

$$E = K\varphi.\Omega$$

Et : $T_{em} = K\varphi(I, i).I$

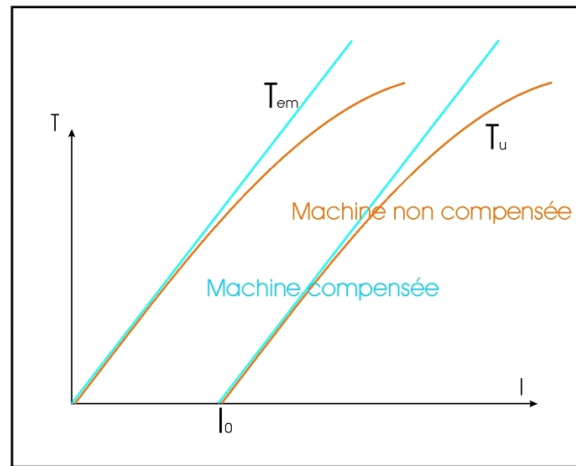


Fig.3.3

$$T_u = T_{em} - T_p$$

3-4 Caractéristiques mécanique $T(n)$:

A partir des deux caractéristiques précédentes on déduit celle de $T(n)$.

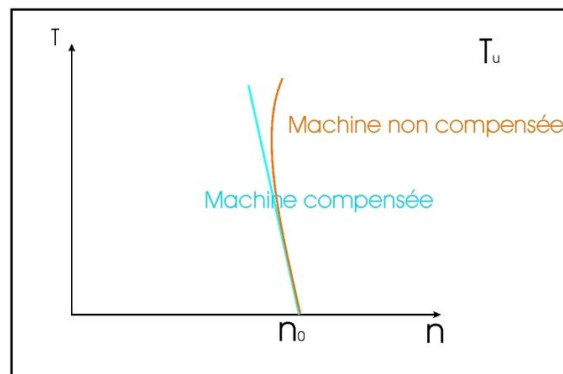


Fig3.4

3-5 bilan des puissances et rendement :

Une seule source de tension fournit les deux courants, le courant total est :

$$I' = I + i$$

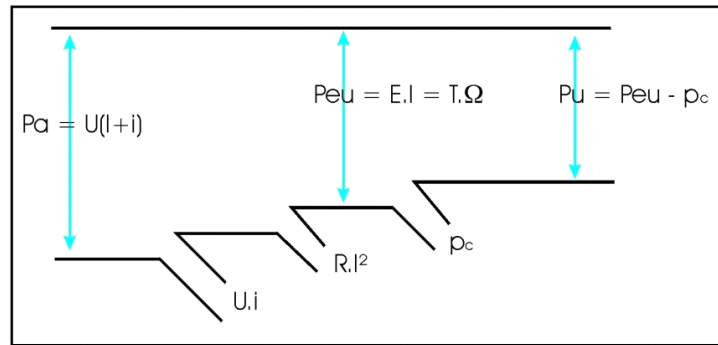


Fig.3.5

Puissance absorbée: $P_a = U.I' = U.I + U.i$

Pertes :

-effet Joule dans l'induit : $P_{jr} = R.I^2$

-effet Joule dans l'inducteur: $P_e = U.i$

-pertes collectives: P_c

puissance électrique utile : $P_u = E.I$

Puissance utile (sous forme mécanique):

$$P_u = P_a - \text{perts}$$

$$P_u = (U.I + U.i) - (R.I^2 + U.I + P_c)$$

$$D'où : P_u = U.I - R.I^2 - P_c = E.I - P_c$$

➤ Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{E.I - P_c}{U.I + U.i}$$

4 Moteur à excitation composé :

Il est représenté dans la figure 4.1 :

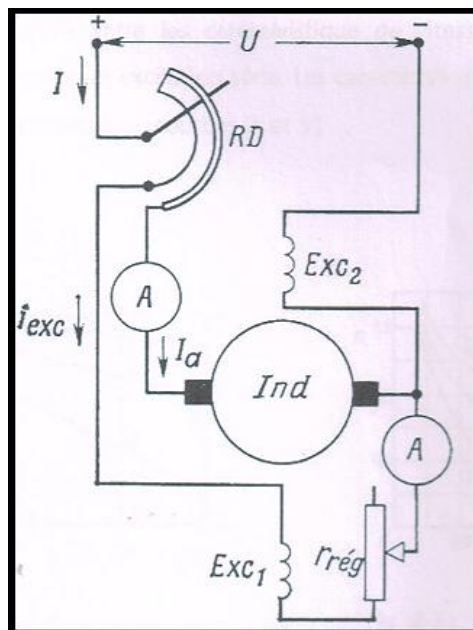


Fig.4.1

4-1 Caractéristique de la vitesse :

Lorsque les enroulements d'excitation sont branchés de façon à fournir des flux de même sens leurs f.é.m. s'ajoutent, donc au flux (ϕ_1), créé par l'enroulement en dérivation, s'ajoutent la valeur ϕ_2 .

Pour cette raison l'expression :

$$n = \frac{U - R_a \cdot I_a}{C_e \cdot \phi}$$

Pour la vitesse de rotation du moteur prend la forme suivante :

$$n = \frac{U - R_a \cdot I_a}{C_e (\phi_1 + \phi_2)}$$

Lorsque le courant passant par l'induit I_a augmente, le flux résultant du moteur commence à augmenter mais moins vite que dans un moteur série, pour cette raison selon le rapport des flux ϕ_1 et ϕ_2 les caractéristiques de vitesse du

moteur à excitation composé peuvent avoir la forme des courbes 2 ou 3 (fig.4.2 et fig.4.4) dans qui occupent la position intermédiaire entre les caractéristiques de vitesse 1 et 4 des moteurs à excitation en dérivation et excitation série, les caractéristiques du couple occupent la même position intermédiaire .

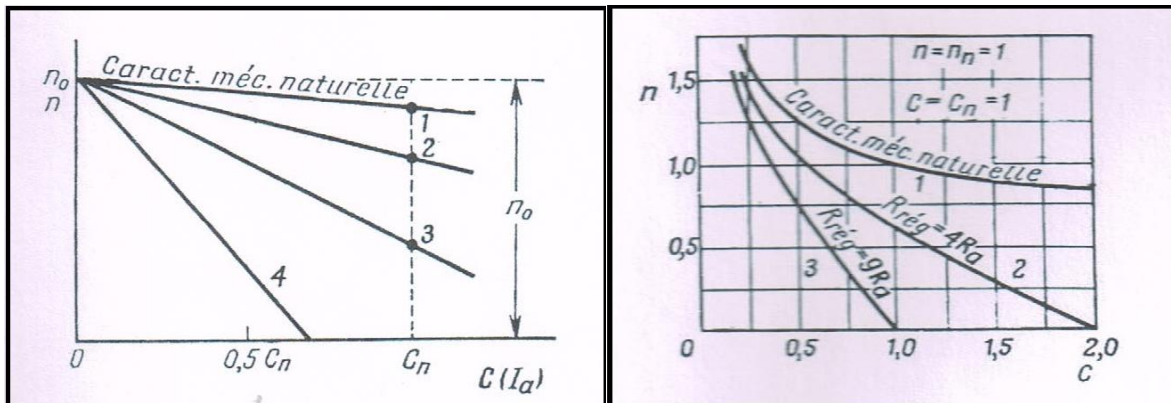


Fig.4.2

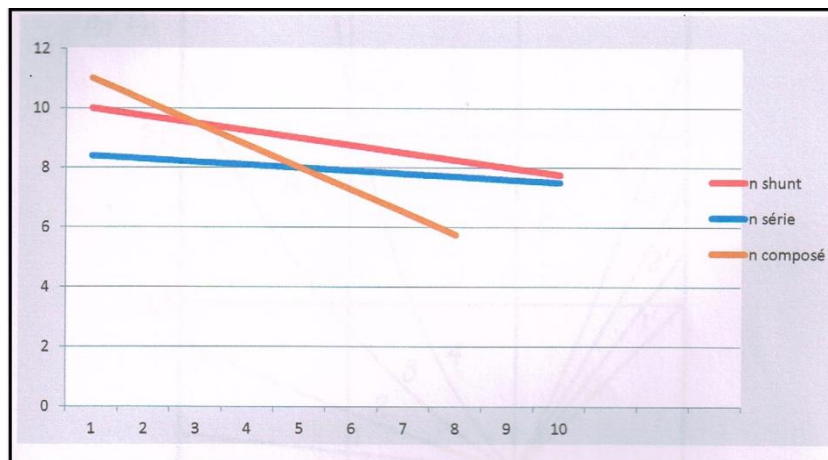


Fig4.3 caractéristiques mécaniques

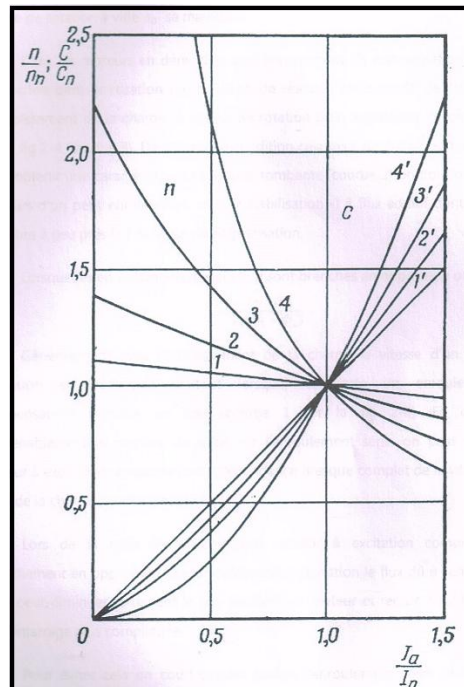


Fig4.4 caractéristiques de la vitesse et du couple d'un moteur à excitation composé

Pour une caractéristique de vitesse fortement tombante (courbes 3) l'enroulement en dérivation de la charge, car dans ce cas le flux ϕ_1 , qui détermine la vitesse de rotation à vide n_0 se maintient.

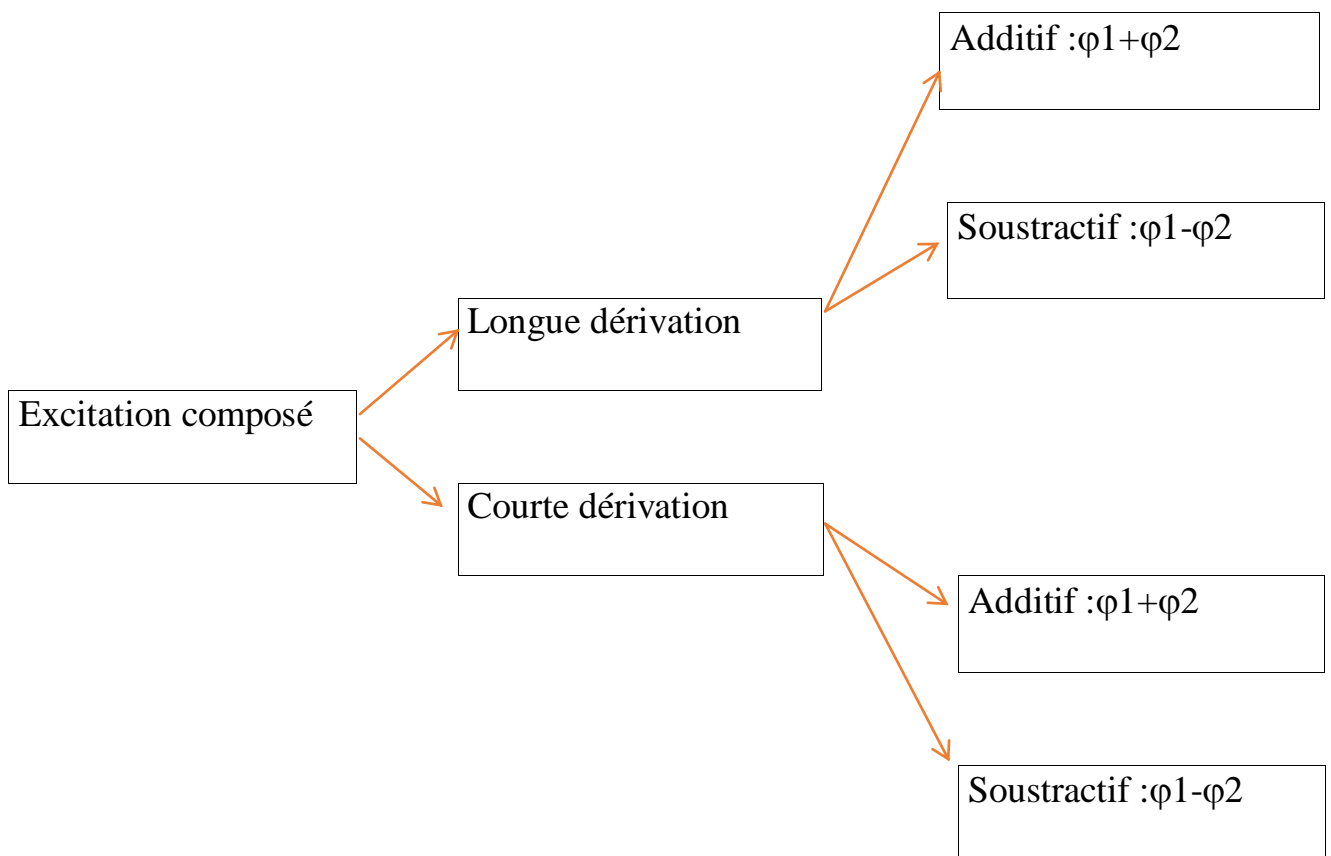
Dans les moteurs en dérivation sans enroulement de compensation, par suite de l'action démagnétisation de la F.M.M. de réaction transversale de induit, avec l'accroissement de la charge la vitesse de rotation peut augmenter comme indiqué sur (courbe 3). Dans certaine condition cela peut rendre le moteur instable. Pour obtenir une caractéristique de vitesse tombante (courbe 1) on dote souvent ces moteurs d'un petit enroulement série («stabilisation») à flux additif dont la F.M.M. équilibre à peu près la F.M.M. de démagnétisation.

Lorsque les enroulements d'excitation sont branchés en opposition on a :

$$n = \frac{U - Ra \cdot Ia}{Ce(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

Généralement avec l'accroissement de la charge la vitesse d'un moteur excitation en dérivation (surtout lorsqu'il comporte un enroulement de compensation) diminue un peu . En choisissant convenablement le nombre de spires de l'enroulement série, on peut obtenir le moteur à excitation composée une indépendance presque complète de la vitesse n vis à-vis de la charge.

Lors de la mise en marche d'un moteur à excitation composé avec branchement en opposition des enroulements d'excitation le flux dû à l'enroulement série peut diminuer fortement le flux résultent du moteur et rendre ainsi l'opération de démarrage plus compliquée. Pour éviter cela on court-circuite parfois l'enroulement série de ce moteur pendant le démarrage.



➤ Additif :

$$n = \frac{U - Ra \cdot Ia}{Ce(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

$$n = \frac{U}{Ce(\varphi_1 + \varphi_2)} - \frac{RaIa}{Ce(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

$$Cem = C + \varphi \cdot Ia \Rightarrow Ia = \frac{Cem}{C\varphi}$$

$$n = \frac{U}{\underbrace{Ce(\varphi_1 + \varphi_2)}} - \frac{Cem \cdot Ra}{K\varphi(\varphi_1 + \varphi_2)}$$

n0

$$\sin = 0 \Rightarrow \frac{CdRa}{K\varphi(\varphi_1 + \varphi_2)} = \frac{U}{Ce(\varphi_1 + \varphi_2)} \Rightarrow Cd = \frac{U}{K(\varphi_1 + \varphi_2)Ra} \text{ toujours } \varphi_2 < \varphi_1.$$

➤ Soustractif :

$$n = \frac{U - Ra \cdot Ia}{Ce(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$n = \frac{U}{Ce(\varphi_1 - \varphi_2)} - \frac{RaIa}{Ce(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

$$Cem = C + \varphi \cdot Ia \Rightarrow Ia = \frac{Cem}{C\varphi}$$

$$n = \frac{U}{\underbrace{Ce(\varphi_1 - \varphi_2)}} - \frac{Cem \cdot Ra}{K\varphi(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

n0

$$\sin = 0 \Rightarrow \frac{CdRa}{K\varphi(\varphi_1 - \varphi_2)} = \frac{U}{Ce(\varphi_1 - \varphi_2)} \Rightarrow Cd = \frac{U}{K(\varphi_1 - \varphi_2)Ra} \text{ toujours } \varphi_2 < \varphi_1.$$

Chapitre II

II- Démarrage et freinage des Mcc:

1- Démarrage des Mcc :

On utilise trois modes de démarrage :

- ✓ Branchement direct du moteur sur le réseau (démarrage sans rhéostat).
- ✓ Démarrage du moteur à l'aide d'un rhéostat inséré dans le circuit de l'induit.
- ✓ Démarrage du moteur à l'aide d'un groupe de démarrage spéciale.

2-4- Démarrage des moteurs sans rhéostat :

Comparé aux autres modes de démarrage, le démarrage d'un moteur sans rhéostat est le plus simple au point de vue appareillage.

Mais dans ce cas apparaît un fort appel de courant durant la période initiale du démarrage. De plus:

A- des étincelles plus ou moins fortes peuvent apparaître au collecteur qui peuvent dans certains cas dégénérer en flash.

B- le fonctionnement du système de protection et de mesure dans le circuit d'induit devient plus compliqué.

C- le réseau alimentant le moteur doit être convenablement calculé car autrement apparaît une forte chute de tension.

D- sur l'arbre du moteur apparaît un grand couple dynamique que doit supporter le mécanisme d'accouplement de la machine entraînée, car autrement celui-ci peut être endommagé.

E- Nous examinerons le cas le plus simple de démarrage sans rhéostat d'un

F- Moteur à excitation en dérivation branché sans charge sur le réseau .

Pour simplifier l'analyse nous admettrons :

- ✓ La tension du réseau $U = \text{constante}$.
- ✓ Le moteur est préalablement excité.
- ✓ La réaction d'induit ne fait pas changer.

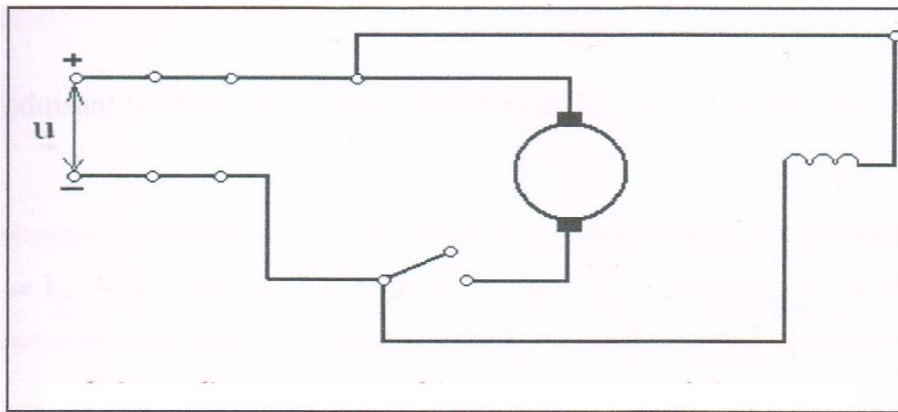


Fig.1.1 schéma d'un moteur démarré sans rhéostat.

Le flux magnétique du moteur φ , autrement dit que le démarrage a lieu à $\varphi = \text{constant}$.

-qu'on peut négliger le couple à vide C_0 et aux pertes dans le moteur, donc $C_s = 0$, si ω est la vitesse angulaire de l'induit, on a $e_a = K_1 \cdot \omega \cdot \varphi$, et les équations des F.E.M. et des couples peuvent prendre la forme suivante :

$$U = L \frac{di_a}{dt} + i_a R_a + K_1 \omega \varphi$$

Et :

$$C = K_1 \cdot i_a \cdot \varphi$$

$$Cj = j \frac{d\omega}{dt}$$

De la dernière équation on tire :

$$\omega = \int K1 \cdot \frac{Ia \varphi}{j} dt = K1 \frac{\varphi}{j} \int Ia \cdot dt$$

En introduisant la valeur de ω dans l'équation de la F.E.M. on trouve :

$$U = La + \frac{dIa}{dt} + RaIa + \frac{K1^2 \varphi^2}{j} \int Ia \cdot dt = La + \frac{dIa}{dt} + RaIa + \frac{1}{Ca} \int Ia \cdot dt$$

L'équation précédente correspond au branchement d'un circuit à paramètres Ra , La , Ca .

Sur une tension constante U : $Ca = \frac{j}{K1^2 \varphi^2}$

Représente la capacité équivalente de l'induit aux bornes duquel agit la F.E.M

En différentiant par rapport au temps on a :

$$La \cdot \frac{d^2 Ia}{dt^2} + Ra \cdot \frac{dIa}{dt} + \frac{1}{Ca} \cdot Ia = 0$$

L'équation caractéristique a la forme :

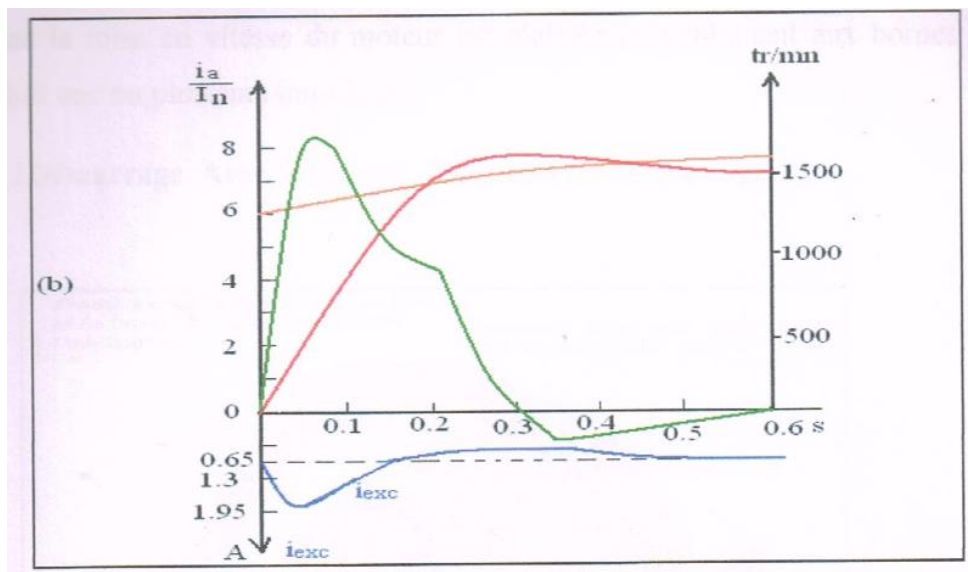
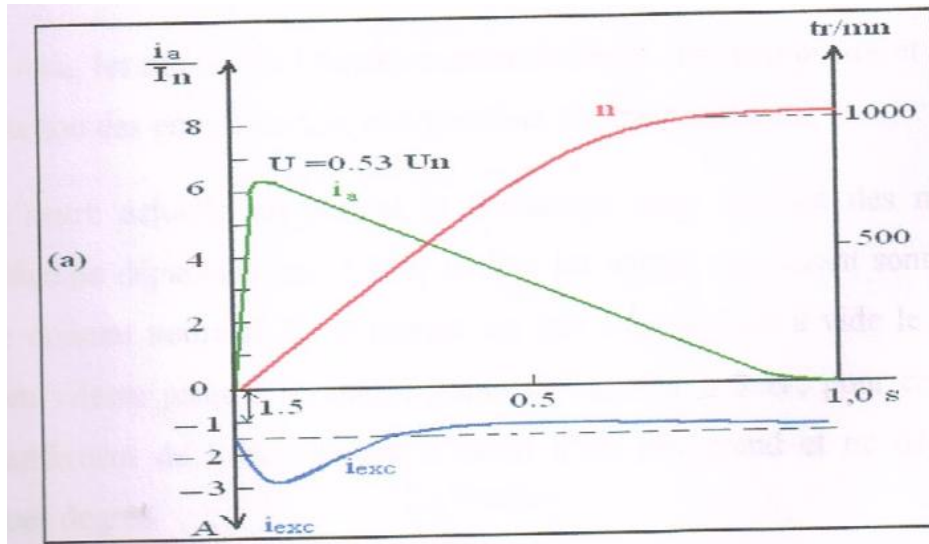
$$La \cdot \nu^2 + Ra \cdot \nu + \frac{1}{Ca} = 0$$

Ses racines sont :

$$\nu(1,2) = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

Avec : $\delta = \frac{Ra}{2La} = \frac{1}{2Ta}$ et $\omega_0^2 = \frac{1}{LaCa}$

Au cas $\delta > \omega 0$, les racines de l'équation caractéristique sont réelles et on obtient un régime apériodique de variation des grandeurs I_a , e_a et n , on obtient la même chose dans le cas limite ou $\delta = \omega 0$.



(a)- Régime apériodique (b)-régime oscillatoire

Fig.1.2 oscillogrammes obtenus pour le démarrage sans rhéostat d'un MCC

Si $\delta < \omega 0$, les racines de l'équation caractéristique sont complexes et le régime de variation des grandeurs I_a , e_a , et n prend un régime oscillatoire.

A l'heure actuelle on permet le démarrage sans rhéostat des moteurs a puissance ne dépassant pas 6 kW, et dont les appels de courant sont de 6 à 8 fois le courant nominal. Si le moteur est mis sous tension à vide le temps de mise en vitesse jusqu'à la vitesse nominale $t_d=0.1$ à $0.3s$; pour cette raison l'échauffement de l'enroulement d'induit n'est pas grand et ne dépasse pas quelques degrés.

On peut élargir la plage de démarrage sans rhéostat en utilisant un disjoncteur rapide qui coupe le circuit d'induit lorsque le courant atteint une certaine valeur limite préétablie et ferme de nouveau ce circuit lorsque le courant diminue. dans Aa ce cas la mise en vitesse du moteur est réalisée en appliquant aux bornes de l'induit une ou plusieurs impulsion.

1-2 Démarrage des moteurs avec rhéostat :

Pour réduire l'appel de courant on insère dans le circuit d'induit du moteur un rhéostat de démarrage. Suivant la destination et les conditions de fonctionnement, les rhéostats sont de construction différente et sont fabriqués en divers matériaux.

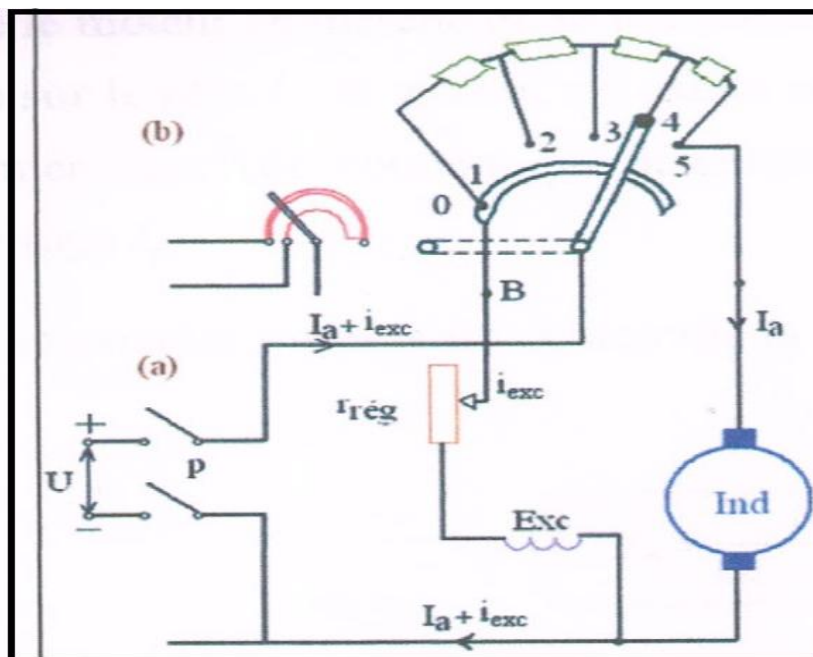


Fig.2.1 schéma de branchement d'un rhéostat de démarrage dans le circuit du moteur.

Pour le démarrage des moteurs à courant continu on utilise des rhéostats métalliques à refroidissement par air ou par huile, à deux ou trois bornes, Simples ou combinés, à commande manuelle; automatique ou semi-automatique, etc.

Examinons l'opération de démarrage d'un moteur à excitation en dérivation dans le circuit d'induit duquel est inséré un rhéostat à trois bornes comprenant quatre sections (figure 2.1).la représentation conventionnelle du rhéostat est donnée sur la (figure 2.2) Le rhéostat est muni de six plots dont le premier est mort, quatre sont des plots intermédiaires et le dernier est le plot de travail. De plus, le rhéostat est doté d'un arc en cuivre A auquel par la borne B est Connectée une extrémité du circuit d'excitation. Avant le démarrage du moteur l'interrupteur P doit être ouvert et la manette du rhéostat mise sur le point mort 0.

Pour mettre le moteur en marche on ferme l'interrupteur à couteaux P et on place la manette sur le plot 1, le moteur est excité dans le circuit de l'induit apparait le premier appel de courant qui détermine la limite supérieure du courant de démarrage I_{d1} .

Etant donné qu'au premier instante du démarrage la F.E.M. du moteur

$$E_a = C_e . n . \varphi = 0$$

On a :

$$I_{d1} = \frac{U}{R_a + \sum R_d}$$

Avec : $\sum R_d$: la somme des résistances de toutes les sections du rhéostat.

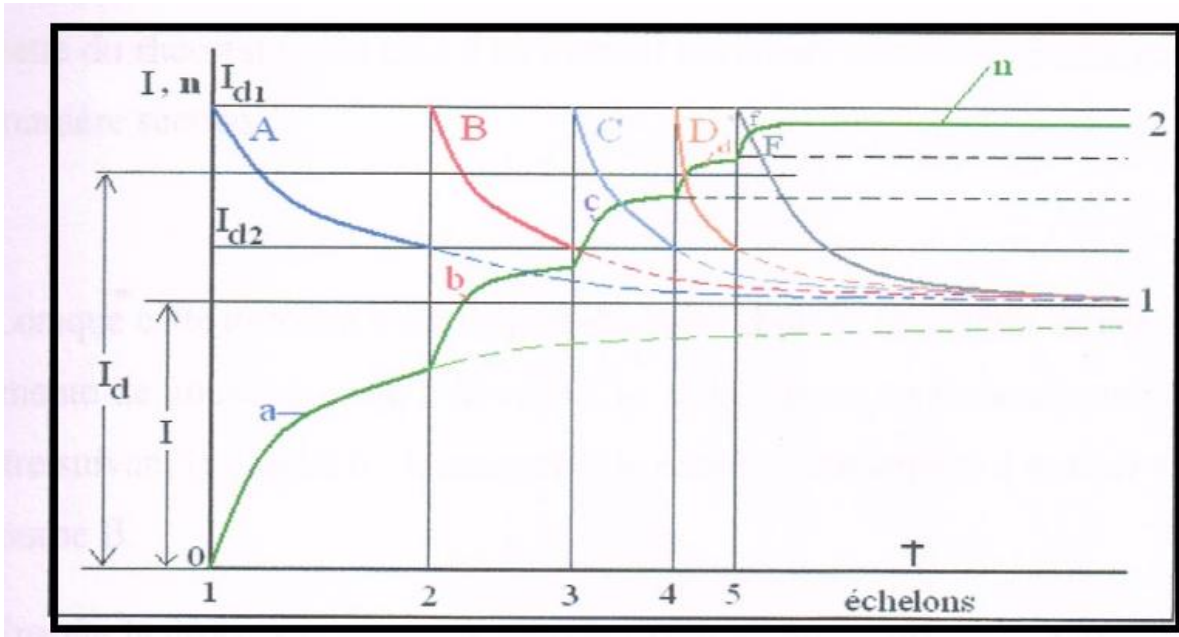


Fig.2.2 schéma du démarrage d'un moteur à l'aide d'un rheostat

Nous admettrons que la réaction d'induit n'influe pas sur le flux magnétique du moteur, c'est-à-dire que le démarrage a lieu à $\varphi = \text{constant}$. Etant donné que la résistance du rhéostat de démarrage est relativement grande, l'inductance du Circuit d'induit a une importance secondaire; pour cette raison dans l'équation de F.È.M

Nous négligerons le terme $La \cdot \frac{dI_a}{dt}$ au courant initial I_{d1} correspond un couple initial $C_{d1} = C_m \cdot I_{d1} \cdot \varphi$.

Si ce couple est supérieur au couple statique C_s le moteur démarre avec une certaine accélération et développe une force contre-électromotrice proportionnelle à n courbes.

A de la (fig.2.2) le courant de démarrage et le couple de démarrage qui lui est proportionnel diminueront en proportion suivant la courbe A représentée sur la même figure.

Lorsque le courant de démarrage diminue jusqu' à la valeur I_{d2} on place la manette du rhéostat sur le plot 2 en mettant ainsi hors circuit la résistance R_1 de la première section.

Lorsque cette dernière a été convenablement choisie, le courant de démarrage augmente de nouveau jusqu'à la valeur I_{d1} et la vitesse du moteur commence à Croître suivant la courbe b, le courant et le couple commencent à tomber suivant la courbe B.

Ensuite le processus continue dans le même ordre (courbes a-b-c-d-f et A-B-CD-F sur la (fig. 2.2) jusqu' au moment ou le rhéostat entier sera hors circuit. à ce moment le moteur fonctionnera en régime permanent à courant et à vitesse de rotation n .

Si on laissait pendant un temps prolongé la manette du rhéostat de démarrage Sur un plot intermédiaire quelconque ; pour $C_s = \text{Constant}$ les processus de variation de la vitesse et du courant seraient déterminés par des lignes en pointillé qui sont le prolongement des traits continus correspondants.

Il faut avoir en vue que les rhéostats de démarrage ne sont pas prévus pour un travail prolongé dans le circuit d'induit. Pour régler la vitesse de rotation d'un moteur on insère dans le circuit d'induit des rhéostats de réglage spéciaux.

Etant donné que les conditions identique le couple de démarrage est proportionnel au flux ϕ , pour faciliter le démarrage on court-circuite généralement le rhéostat de réglage de l'excitation ($R_{\text{rég}}=0$), donc pour une valeur d'excitation maximum et un flux maximum.

Pour les mêmes raisons il faut brancher le circuit d'excitation de façon que le courant d'excitation ne dépende pas du courant dans le circuit de l'induit et en particulier de la manipulation du rhéostat de démarrage.

Les limites supérieure et inférieure du courant de démarrage sont choisies : la première en partant des conditions de limitation du courant de démarrage et d'une bonne commutation et la seconde en partant de la nécessité de créer sur l'arbre du moteur un couple dynamique déterminé.

Généralement $I_{d1} = (1,75 \text{ à } 1,5) I_n$ et $I_{d2} = (1,3 \text{ à } 1,1) I_n$.par le courant de démarrage on entend sa valeur moyenne $I = (1,5 \text{ à } 1,3) I_n$. Le nombre de démarrage léger mais l'opération est à échelons très accusés.

Lors du débranchement du moteur du réseau il faut que le circuit d'excitation ne soit pas coupé, car la réserve d'énergie électromagnétique que possède l'enroulement d'excitation peut provoquer la formation d'un arc et l'apparition d'un accroissement important de la tension dans le circuit coupé. Pour éviter cela on réunit électriquement le plot 1 du rhéostat de démarrage à l'arc en cuivre A; dans ce cas à l'ouverture de l'interrupteur P le circuit d'excitation se trouve fermé sur le rhéostat de démarrage et l'induit du moteur.

Le démarrage des moteurs à excitation série et à excitation composée se fait pratiquement de la même façon que le démarrage des moteurs à excitation en dérivation .

1-3 Démarrage des moteurs à l'aide d'un group spéciale :

Dans les installations de grande puissance le rhéostat de démarrage est encombrant et provoque des pertes considérables d'énergie, surtout lorsque les démarrages sont fréquents. Pour cette raison dans de nombreuses installations on emploie le démarrage sans rhéostat par variation de la tension appliquée au moteur lors de la mise en marche. Indiquons le démarrage à l'aide d'un survolteur et un démarrage.

suyant le montage génératrice-moteur. Il faut classer dans la même catégorie démarrage des moteurs alimentés par une batterie d'accumulateurs, par vision de

la tension de cette dernière en plusieurs parties ainsi que par la connexion en série de deux ou de plusieurs moteurs, par exemple, dans les Systèmes de traction .on utilise très largement le système génératrice- moteur. Nous l'examinerons plus loin, car ce système est destiné non seulement au lancement d'un moteur mais aussi au réglage de sa Vitesse.

3- Freinage des MCC :

Dans les nombreuses installation les régimes de freinage des moteurs on une grande importance. On distingue :

- ✓ Le freinage avec récupération d'énergie.
- ✓ Le freinage par contre courant.
- ✓ Le freinage dynamique.

2-1 Freinage avec récupération d'énergie :

Il consiste à transformer la f.é.m. du moteur de de génératrice ou ($E_m < U$ et $U < E_G$) On a :

$$E = U - Ra.Ia$$

Dans ces conditions le courant change de sens (change le signe), le couple électromagnétique change le sens et il devient un couple résistant vue que le sens de rotation n'a pas changé, et il commence à freiné la machine.

2-2- Freinage par contre courant :

Un tel régime peut être réalisé de deux façons:

Lorsque le mécanisme commandé fait tourner la machine dans le sens oppose a celui dont lequel agit le couple développé par cette machine. Lors de

commutation de sens de rotation par variation de sens de courant l'induit du moteur.

Lors du branchement d'une résistance de réglage suffisamment grande dans le Circuit d'induction du moteur admettent que la résistance reste constante, si a l'instant de branchement le courant d'induit et limite le couple ($C=K\phi Ia$) et devient inférieur au couple résistant. Sur l'arbre du moteur apparaît un couple dynamique Inférieur à zéro, et la vitesse du moteur commence à diminuer donc la f.é.m. diminue et le courant d'induit augmente ou la $\frac{U-Ea}{Ra+Rrh}$ ainsi que le couple augmente aussi. On aperçoit un tel phénomène de la diminution de la vitesse et l'accroissement simultané du couple jusqu'à ce que: $C=C_r$, la variation de la vitesse suffisamment grande donc le moteur en ralentissant peut s'arrêter au point (B) de la caractéristique en suite commence à tourner dans le sens inverse, la vitesse continu a descente, et le moteur fonctionne en en génératrice.

2-3 Freinage dynamique :

ce type de freinage est obtenu par la fermeture du circuit d'induit sur une résistance R en limitant la tension du réseau, ce principe permet d'écrire :

$$n = \frac{Ia \cdot Ra}{K\phi} = \frac{(-Ia)Ra}{K\phi \cdot U} = 0$$

Puisque le couple $C = Ia$ donc l'induit en débitant sur R fonctionne en régime générateur crée un couple $C = K\phi Ia$ opposé au sens de rotation de l'induit, ce qui permet de freiner l'induit.

Chapitre III

III- Modes de réglage de la vitesse des MCC :

Il y a trois type de réglage de la variation de vitesse d'un moteur à courant continu :

- ✓ Réglage rhéostatique.
- ✓ Réglage par variation du flux.
- ✓ Réglage par variation de la tension.

1- Réglage rhéostatique :

Ce mode de réglage est basé sur la variation de la résistance totale de l'induit. On peut diminuer la vitesse en augmentant la résistance d'induit avec un rhéostat branchée en série avec l'induit.

On a en paramétriques les relations suivantes :

$$\begin{cases} C = k' \cdot I_a \\ \Omega = \frac{U_a - (R_a + R_h) \cdot I_a}{k'} \end{cases}$$

Pour :

$$C = 0; I_a = 0 \rightarrow \Omega = \frac{U_a}{k'}$$

Cette vitesse ne dépend pas de R_h , donc le point correspondant est immuable.

Pour:

$$\Omega = 0; I_a = \frac{U_a}{R_h + R_a} \rightarrow C = k' \frac{U_a}{R_a + R_h}$$

Lorsqu'on augmente R_h , le couple C diminue.

Ce mode de réglage est simple à réaliser mais sur le plan technique et économique est également mauvais car le rhéostat consomme autant d'énergie que le moteur.

Dans la pratique, ce procédé de réglage n'est utilisé que pour le démarrage ou le freinage.

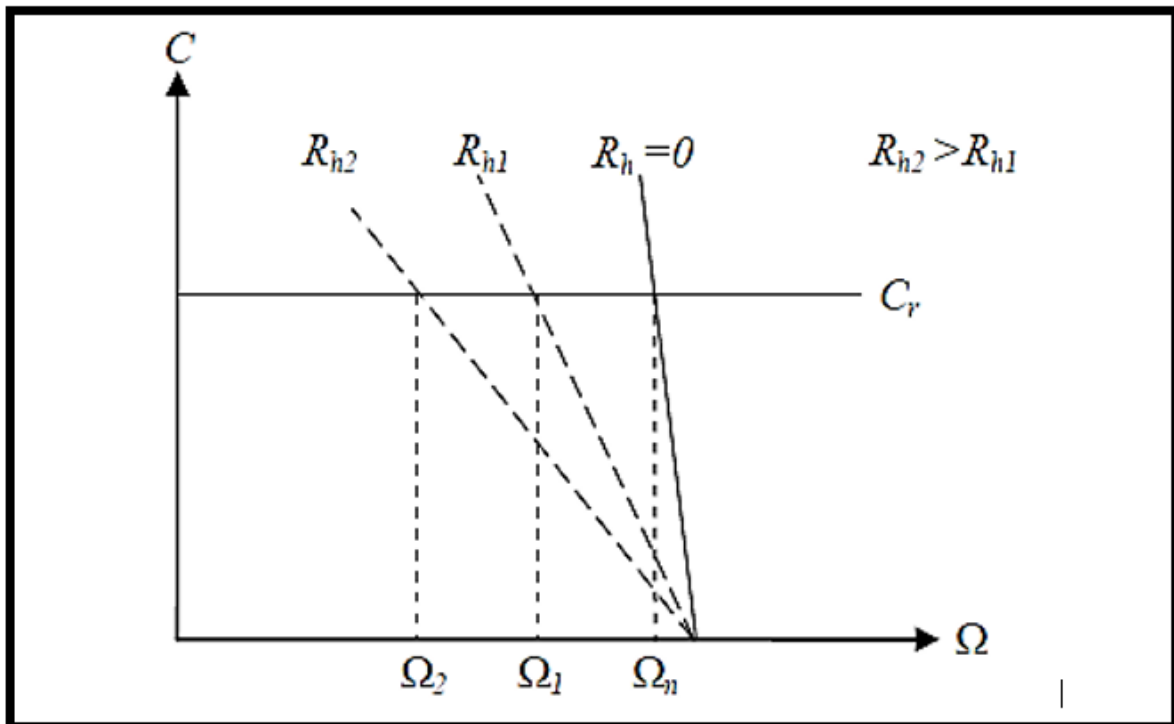


Fig1.1 Caractéristiques de réglage rhéostatique

2- Réglage par variation du flux :

Il est important de noter, qu'en vertu de la relation du couple ($C = k \cdot \Phi \cdot I_a$), on a toujours intérêt à appliquer le flux maximal lors du démarrage pour permettre au moteur de porter à la vitesse nominale toutes les masses qui sont initialement au repos. Par ailleurs, du fait de la saturation du fer de la machine, cette valeur du flux ne peut pas être augmentée davantage.

Il en résulte donc d'après la relation qui donnant la vitesse du moteur ; que le réglage est obtenu par augmentation de la vitesse par rapport à la vitesse nominale en réduisant la valeur du flux (courant d'excitation). Cela se réalise par l'introduction d'un rhéostat de champ dans le circuit d'excitation.

On a les relations suivantes :

$$\begin{cases} \Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k\Phi} \\ C_m = k \cdot \Phi \cdot I_a \end{cases}$$

Pour:

$$C = 0; I_a = 0 \rightarrow \Omega = \frac{U_a}{k\Phi}$$

Lorsqu'on réduit la valeur de Φ , la vitesse augmente.

Pour:

$$\Omega = 0; I_a = \frac{U_a}{R_a} \rightarrow C = k \cdot \Phi \cdot \frac{U_a}{R_a}$$

Lorsqu'on réduit la valeur de Φ , le couple diminue.

Ce réglage est mauvais du point de vue technique ; les caractéristiques étant concourantes. Il est bon du point de vue économique car la puissance dissipée dans l'inducteur étant très faible par rapport à la puissance absorbée ; le rendement du moteur ne sera pas modifié.

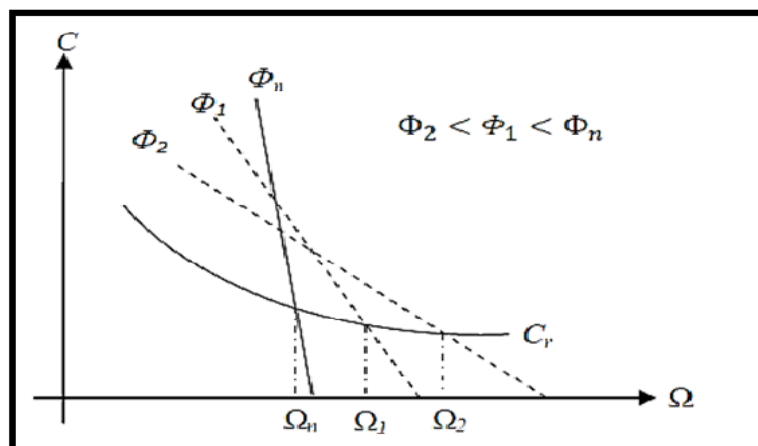


Fig.2.1 Caractéristique de réglage par le flux

N.B :

- Avec ce procédé, on ne peut qu'augmenter la vitesse du moteur par rapport à sa vitesse nominale.
- Si le couple résistant est constant ($C_m = k \cdot \Phi \cdot I_a = cte$), l'intensité augmentera quand on diminuera le flux et le moteur risquera de chauffer. Dans ces conditions, on doit dimensionner le moteur en conséquence. Il est à noter que cet inconvénient n'a pas lieu si l'entraînement est à puissance constante car en vertu de la relation $P = U \cdot I_a = cte$, comme la tension U est constante, l'intensité I_a demeurera constante.

3- Réglage par variation de la tension :

Le flux d'excitation étant fixé à sa valeur nominale, le réglage est obtenu par réduction de la vitesse par rapport à la vitesse nominale en réduisant la valeur de la tension d'alimentation.

En vertu des relations:

$$\begin{cases} \Omega = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{k'} \\ C_m = k' \cdot I_a \end{cases}$$

Pour :

$$C = 0; I_a = 0 \rightarrow \Omega = \frac{U_a}{k} \rightarrow \Delta\Omega = \frac{\Delta U_a}{k'}$$

Lorsqu'on réduit la tension U_a , la vitesse diminue.

Pour:

$$\Omega = 0; I_a = \frac{U_a}{R_a} \rightarrow C = k' \cdot \frac{U_a}{R_a} \rightarrow \Delta C = k' \frac{\Delta U_a}{R_a}$$

Lorsqu'on réduit la valeur de la tension, le couple diminue.

Chapitre III Modes de réglage de la vitesse des MCC

Calculons la pente ($\Delta C/\Delta\Omega$) :

$$\frac{\Delta C}{\Delta\Omega} = \frac{k'^2}{R_a} = \text{constante}$$

Les caractéristiques se déplacent parallèlement par rapport à la caractéristique d'origine, comme le montre la figure suivante :

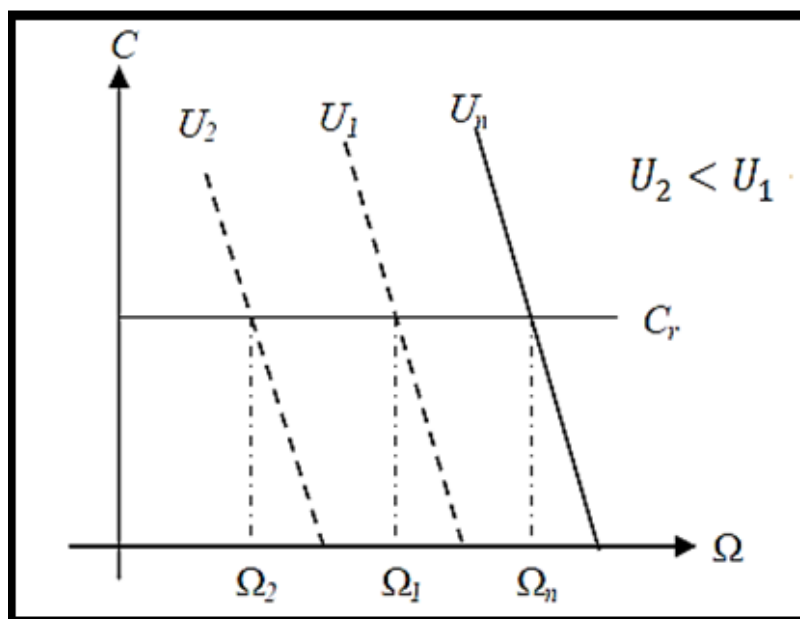


Fig3.1 Caractéristique de réglage par la tension d'induit.

Ce mode de réglage est excellent du point de vue technique car les caractéristiques ne sont pas déformées (l'allure shunt est conservée), d'autre part du point de vue économique, aucune énergie n'est gaspillée et le rendement demeure élevé. Cependant, cette solution nécessite l'emploi d'un variateur de vitesse. Ceci a constitué pendant de longues années un réel problème, mais avec le développement de l'électronique de puissance, les convertisseurs électroniques assurent parfaitement cette tâche.

Chapitre IV

IV- Asservissement de la vitesse des MCC :**1- Définitions :****1-1- Système asservi :**

C'est un ensemble d'éléments qui affecte la commande de la régulation des processus technologiques par rapport à certaines conditions données, sans la participation de l'homme dans la réalisation des fonctions. Normalement on a affaire à un système de la commande par rétroaction dans lequel une donnée de référence et une fonction de la variable commande sont utilisées pour fournir un signal d'action, pour l'élément de commande et du système commandé. Le signal d'action une fois amplifié, tend à réduire à zéro la différence entre la donnée de référence ou consigne, et la variable commandée.

1-2- Système commandé :

Dans l'industrie, les machines utilisées, produisent des actions en fonction d'ordres qui leur sont fournis. Ces ordres et ces actions, peuvent être caractérisés par les états que prend un ensemble physique. On désigne des mesures de ces grandeurs par le terme signal.

On distingue les signaux d'entrée qui correspondent aux ordres. C'est-à-dire aux grandeurs de commande et les signaux de sortie qui correspondent aux actions auxquelles on s'intéresse et les signaux parasites qui sont, dues aux perturbations dans le fonctionnement du système et dont on cherche à minimiser l'effet.

1-3- Système bouclé :

Un système régulé est un système asservi dont on ne modifie pas d'une façon non prévisible la grandeur d'entrée. Soit le signal d'entrée reste constant durant

des longues périodes, soit il varie en fonction d'un programme mis en œuvre par un opérateur ou un automatisme.

Lorsque la grandeur d'entrée reste constante, on désire qu'il en soit de même de la grandeur de sortie en dépit des perturbations qui peuvent intervenir. L'étude du signal de sorti d'un système asservi se fait soit en fonction du signal d'entrée, soit en fonction des signaux parasites.

1-4- Transducteur :

On appel transducteur, le dispositif qui fait passer une énergie d'une forme à une autre. C'est par exemple un potentiomètre qui transforme un potentiel mécanique en un potentiel électrique.

Généralement, un transducteur, joue 3 rôles à savoir

- Le captage du signal de sortie
- La mesure du signal
- Ainsi que la transduction du signal.

1-5- Régulateur :

C'est un système asservi dans lequel le signal de référence ou commande d'entrée, demeure constant dans des longues périodes et souvent, pendant toute la durée d'existence du système.

Le régulateur diffère du servomécanisme en ce sens que la fonction essentielle du régulateur consiste généralement à maintenir un grand signal de sortie règle tandis que le but du servomécanisme consiste la plus part de fois à faire suivre le signal de sortie, un signal d'entrée variable.

2- Le but d'asservissement :

L'objectif d'un asservissement est d'assurer le fonctionnement d'un procédé selon des critères prédéfinis par un cahier de charge. Ce cahier des charges définit des critères qualitatifs à imposer qui les plus souvent, sont interprétés par des critères quantitatifs comme par exemple la stabilité, la précision, la rapidité, ou encore certaines lois d'évolutions.

3- Modélisation des MCC :

A- Mise en équation du moteur :

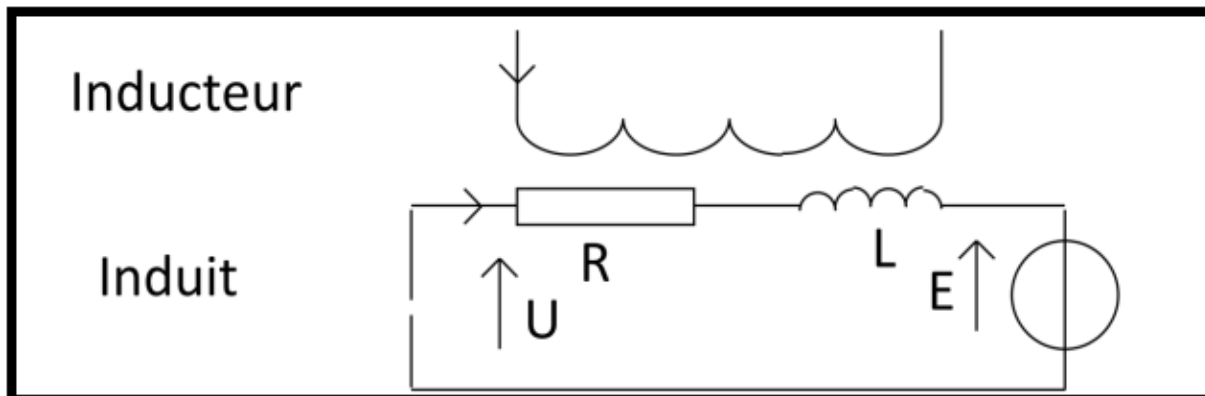


Fig.1.1 schéma équivalent des MCC

L'équation électrique, liant la tension $U(t)$ aux bornes de l'induit (rotor) et le courant d'induit $i(t)$ s'écrit :

$$U(t) = RI(t) + \frac{Ldi(t)}{dt} + e(t)$$

d'où R est la résistance de l'induit du MCC, L son inductance et $e(t)$ la force électromotrice, qui est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor :

$$e(t) = Ke \cdot \Omega(t)$$

L'équation mécanique tenant compte des couples agissant sur le rotor s'écrit :

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f\Omega(t)$$

Où $C_m(t)$ est le couple moteur, $C_r(t)$ est le couple résistant (charge et perturbations), f le coefficient de frottement visqueux et J le moment d'inertie du rotor. Par construction, le couple $C_m(t)$ est proportionnel au courant d'induit $i(t)$:

$$C_m(t) = K_m \cdot I(t)$$

En règle générale les coefficients K_e et K_m sont si proches qu'il est raisonnable de les considérer égaux, négligeant alors les pertes durant la conversion électromécanique de puissance. On pose $K_{em} = K_e = K_m$.

Le MCC peut être vu comme un système à contre-réaction. Pour s'en apercevoir, il faut reprendre les équations précédentes et les représenter sous forme de schéma bloc. On aboutit à la Fig.1.2 :

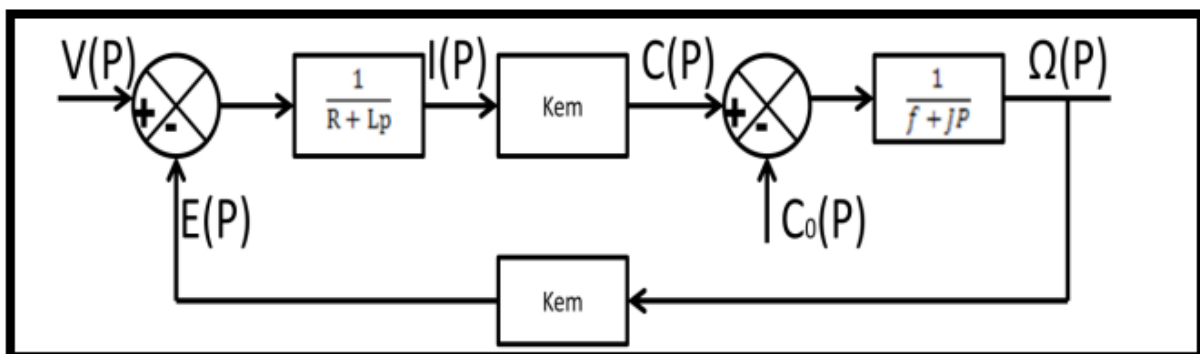


Fig.1.2 schéma bloc des MCC

B- Modèle pour l'asservissement de vitesse des MCC :

On à : $J \frac{d\Omega(t)}{dt} = K_m \cdot I(t) - C_r(t) - f\Omega(t)$

En passant au domaine de LAPLACE, en supposant les conditions initiale nul :
 En supposant $Cr(t) = 0$, l'équation donne :

$$Km \cdot I(p) = f\Omega(p) + JP\Omega(p)$$

En dérivant :

$$Km \cdot PI(p) = fP\Omega(p) + JP^2\Omega(p)$$

En combinant les 2 équation précédentes avec l'équation électrique du moteur on obtient :

$$U(p) = \frac{R}{Km} [f\Omega(p) + JP\Omega(p)] + \frac{L}{Km} [fP\Omega(p) + JP^2\Omega(p)] + Km\Omega(p)$$

- Modèle d'ordre 1 :

On néglige l'influence de l'inductance d'induit. L'équation précédente se simplifie en :

$$U(p) = \frac{Rf + Km^2}{Km} \Omega(p) + \frac{RJ}{Km} p\Omega(p)$$

Soit :

$$\frac{Km^2}{Rf + Km^2} U(p) = \Omega(p) + \frac{RJ}{Rf + Km^2} p\Omega(p)$$

La fonction de transfert reliant la commande en tension du MCC $U(p)$ et sa vitesse $\Omega(p)$ est :

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K}{1 + \tau p}$$

si l'on définit la constante de temps électromécanique du système : $\tau = \frac{RJ}{Rf + Km^2}$

et son gain statique : $K = \frac{Km^2}{Rf + Km^2}$

Le système ainsi modélisé est donc d'ordre un. Il possède un pôle stable :

$$P = -\frac{1}{\tau}$$

- **Modèle d'ordre 2 :**

On lève maintenant l'hypothèse du paragraphe précédent pour obtenir un modèle plus fin du MCC. Deux expressions intéressantes de la fonction de transfert sont alors possibles

En ordonnant l'équation :

$$U(p) = \frac{R}{Km} [f\Omega(p) + JP\Omega(p)] + \frac{L}{Km} [fP\Omega(p) + JP^2\Omega(p)] + Km\Omega(p)$$

de façon à avoir un coefficient de un devant le degré de dérivation le plus élevé il vient :

$$p^2\Omega(p) + \frac{RJ + Lf}{LJ} p\Omega(p) + \frac{Rf + Km^2}{LJ} \Omega(p) = \frac{Km}{LJ} U(p)$$

$$G(p) = \frac{\frac{Km}{LJ}}{p^2 + \frac{RJ + Lf}{LJ} p + \frac{Rf + Km^2}{LJ}}$$

$$G(p) = \frac{\frac{Km}{Rf + Km^2}}{1 + \frac{RJ + Lf}{Rf + Km^2} p + \frac{LJ}{Rf + Km^2} p^2} = \frac{K}{1 + \frac{2z}{\omega_0} p + \frac{1}{\omega_0^2} p^2}$$

Avec :

$$K = \frac{Km}{Rf + Km^2}$$

Et :

$$\frac{1}{\omega_0^2} = \frac{LJ}{Rf + Km^2} \rightarrow \omega_0^2 = \frac{Rf + Km^2}{LJ} \rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{Rf + Km^2}{LJ}}$$

Et :

$$\frac{2z}{\omega_0} = \frac{RJ + Lf}{Rf + Km^2} \rightarrow z = \frac{1}{2} \cdot \frac{RJ + Lf}{Rf + Km^2} \cdot \sqrt{\frac{Rf + Km^2}{LJ}}$$

4- Etude de la boucle de vitesse :

Il s'agit d'étudier la boucle de vitesse sans implémenter la boucle de courant. Cet asservissement a pour schéma bloc (Fig.2.1) :

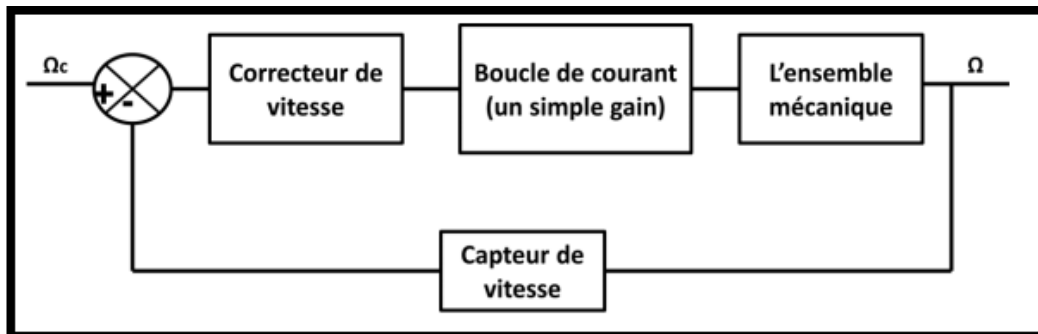


Fig.2.1 schéma bloc de la boucle vitesse

A- Identification des blocs :

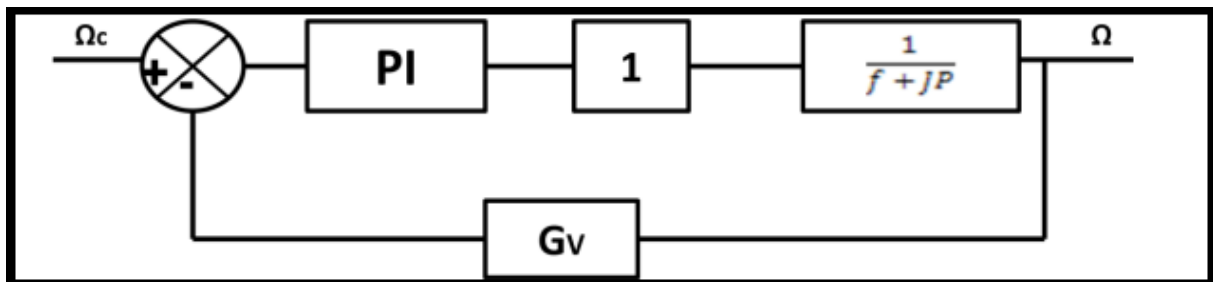


Fig.2.2 schéma bloc de la boucle vitesse identifié

La boucle de courant est remplacée par un gain égal à 1.

Avec : $\frac{1}{f+Jp}$: l'ensemble mécanique du MCC.

Et : Gv : gain unitaire du capteur de vitesse.

B- Etude de la boucle sans correction:

$$FBO(p) = CD.CR = \frac{Gv}{R + Lp} = \frac{Gv}{f} \cdot \frac{1}{1 + \frac{J}{f}p} = \frac{Gv}{f} \cdot \frac{1}{1 + \tau ep}$$

Avec : $\tau e = \frac{J}{f} = 2.5s$

$$tr5\%BO = 3\tau e = 3 \frac{J}{f} = 3 * 2.5 = 7.5s$$

$$\begin{aligned} FBF(p) &= \frac{CD}{1 + CD.CR} = \frac{\frac{Gv}{f+JP}}{1 + \frac{Gv}{f+JP}} = \frac{Gv}{(f + Gv) + Jp} = \frac{1}{1 + \left(\frac{J}{f+Gv}\right)p} \cdot \frac{Gv}{f + Gv} \\ &= \frac{Kfv}{1 + \tau fvp} \end{aligned}$$

Avec : $Kfv = \frac{1}{f+1}$ et : $\tau f v = \frac{J}{f+1}$ et : $Gv=1$

$$tr5\%BF = 3\tau f v = 3 \cdot \frac{\tau e}{1 + \frac{1}{f}} = \frac{tr5\%BO}{1 + \frac{1}{f}} = 0.071s$$

C- Etude de la boucle avec correction:

La fonction de transfert du correcteur PI est : $Ci(p) = Kp \frac{1+Tip}{Tip}$

$$FBOc(p) = CD.CR = Kp \left(\frac{1 + Tip}{Tip} \right) \cdot \frac{Gv}{f} \cdot \frac{1}{1 + \tau p}$$

La méthode de Zdan consiste à choisir $Ti = \tau$ pour éliminer le dénominateur de la fonction de transfert de l'ensemble électrique.

Donc : $FBOc(p) = \frac{Kp.Gv}{f} \cdot \frac{1}{\tau p}$

$$FBFc(p) = \frac{\frac{Kp.Gv}{f} \cdot \frac{1}{\tau p}}{1 + \frac{Kp.Gv}{f} \cdot \frac{1}{\tau p}} = \frac{\frac{Kp.Gv}{f}}{\frac{Kp.Gv}{f} \cdot (1 + \frac{\tau}{Kp.Gv} p)} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\frac{Kp.Gv}{f}} p} = \frac{1}{1 + \tau f v c \cdot p}$$

Avec :

$$\tau f v c = \frac{\tau}{\frac{Kp}{f}}$$

$$tr5\%BFc = 3\tau f c = 3 \frac{\tau}{\frac{Kp}{f}} = \frac{tr5\%BO}{10}$$

Selon le cahier de charge, on veut que le temps de réponse en boucle fermée corrigée soit rapide 10 fois par rapport à la boucle ouverte non corrigée.

Finalement : $Kp = f * 10$ et : $Ti = \tau = \frac{J}{f}$.

5- Etude de la boucle de courant :

Dans le cas de la machine à courant continu, réaliser un asservissement de couple revient à réaliser un asservissement de courant. Nous allons donc dans un premier temps étudier l'asservissement du courant dans la machine. Cet asservissement a pour schéma bloc:

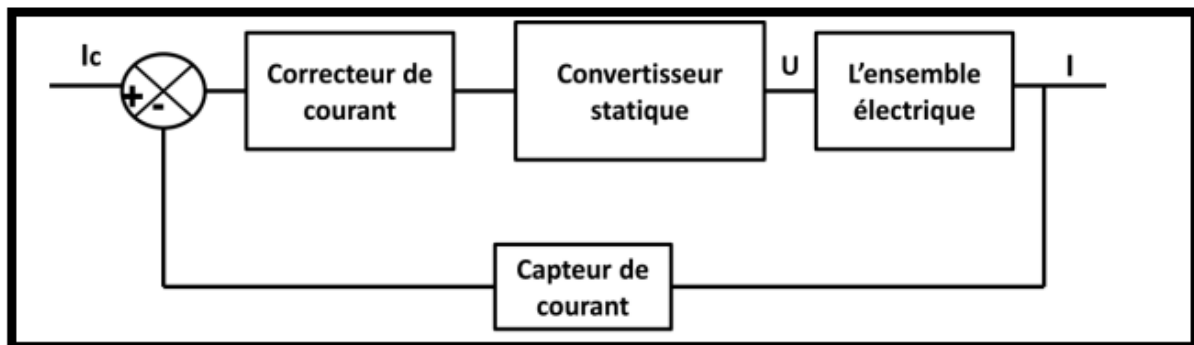


Fig.3.1 schéma bloc de la boucle de courant.

A- Identification des blocs :

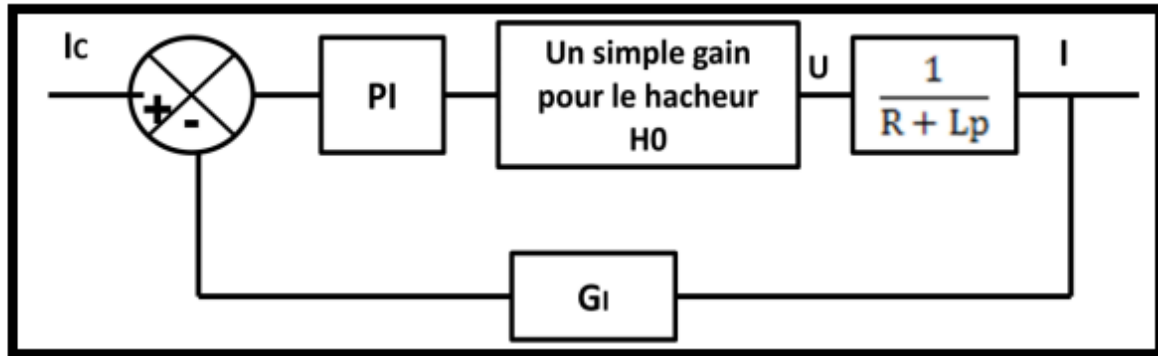


Fig.3.2 schéma bloc de la boucle de courant identifié.

Le hacheur est remplacé par un simple gain égal à 1

Avec : $\frac{1}{R+Lp}$ l'ensemble mécanique du MCC

Et : Gi : gain unitaire du capteur de courant

B- Etude de la boucle sans correction :

$$FBO(p) = CD \cdot CR = \frac{Gi}{R + Lp} = \frac{Gi}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L}{R}p} = \frac{Gi}{R} \cdot \frac{1}{1 + \tau ep}$$

Avec : $\tau e = \frac{L}{R} = 4.86ms$

$$tr_{5\%BO} = 3\tau e = 3 \frac{L}{R} = 3 * 4.86 = 14.58ms$$

$$\begin{aligned}
 FBF(p) &= \frac{CD}{1 + CD \cdot CR} = \frac{\frac{Gi}{R+Lp}}{1 + \frac{Gi}{R+Lp}} = \frac{Gi}{(R + Gi) + Lp} = \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{R+Gi}\right)p} \cdot \frac{Gi}{R + Gi} \\
 &= \frac{Kf}{1 + \tau fp}
 \end{aligned}$$

Avec : $Kf = \frac{1}{R+1}$ et : $\tau f = \frac{L}{R+1}$ et : $Gi=1$

$$tr_{5\%BF} = 3\tau_f = 3 \cdot \frac{\tau_e}{1 + \frac{1}{R}} = \frac{tr_{5\%BO}}{1 + \frac{1}{R}} = 12.15ms$$

C- Etude de la boucle avec correction :

La fonction de transfert du correcteur PI est : $Ci(p) = Kp \frac{1+Tip}{Tip}$

$$FBOc(p) = CD \cdot CR = Kp \left(\frac{1 + Tip}{Tip} \right) \cdot \frac{Gi}{R} \cdot \frac{1}{1 + \tau p}$$

La méthode de Zdan consiste à choisir $Ti = \tau$ pour éliminer le dénominateur de la fonction de transfert de l'ensemble électrique.

Donc : $FBOc(p) = \frac{Kp \cdot Gi}{R} \cdot \frac{1}{\tau p}$

$$FBFc(p) = \frac{\frac{Kp \cdot Gi}{R} \cdot \frac{1}{\tau p}}{1 + \frac{Kp \cdot Gi}{R} \cdot \frac{1}{\tau p}} = \frac{\frac{Kp \cdot Gi}{R}}{\frac{Kp \cdot Gi}{R} \cdot \left(1 + \frac{\tau}{\frac{Kp \cdot Gi}{R}} p \right)} = \frac{1}{1 + \frac{\tau}{\frac{Kp \cdot Gi}{R}} p} = \frac{1}{1 + \tau fc \cdot p}$$

Avec :

$$\tau fc = \frac{\tau}{\frac{Kp}{R}}$$

$$tr_{5\%BF} = 3\tau fc = 3 \frac{\tau}{\frac{Kp}{R}} = \frac{tr_{5\%BO}}{10}$$

Selon le cahier de charge, on veut que le temps de réponse en boucle fermée corrigée soit rapide 10 fois par rapport à la boucle ouverte non corrigée.

Finalement : $Kp = R * 10$ et : $Ti = \tau = \frac{L}{R}$.

6- Etude des deux boucle :

Le schéma bloc de la boucle de vitesse est donné ci-dessous :

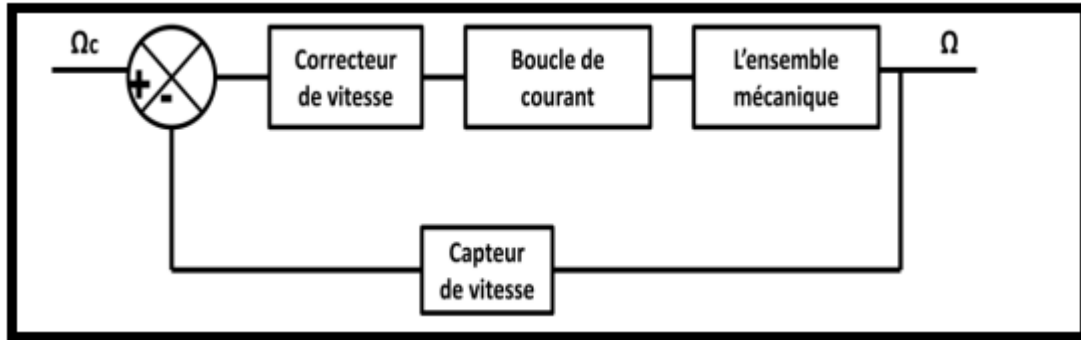


Fig.4.1 schéma bloc de vitesse et courant.

Si la boucle de courant est réglée comme suggéré précédemment, elle a alors une fonction de transfert du premier ordre et il est facile de régler la boucle de vitesse. En toute rigueur, il faudrait réécrire les équations dynamiques du MCC asservi en courant.

En reprenant l'application du principe fondamental de la dynamique, et en prenant le correcteur de type PI, on obtient le schéma bloc suivant :

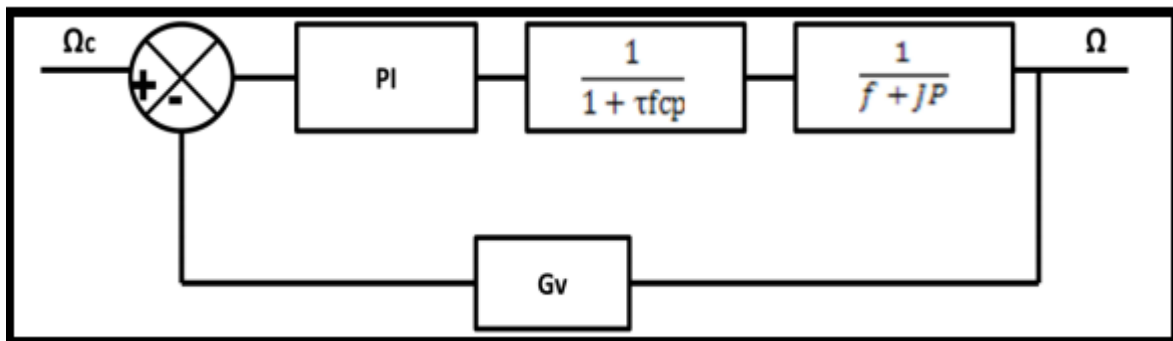


Fig.4.2 schéma bloc de la boucle vitesse et courant identifié.

Avec : $\frac{1}{1+\tau f c . p}$ la fonction de transfert de la boucle de courant corrigée.

Et : $\frac{1}{f+J p}$: l'ensemble mécanique du MCC.

Conclusion :

Le but de ce travail est l'étude de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu.

Le travail effectué nous a permis d'approfondir notre connaissance sur les différents types des MCC ainsi que leurs contrôles et réglages.

Ce travail aussi nous a été très bénéfique, car il nous a permis une initiation au domaine de l'asservissement de la vitesse du moteur à courant continu.

Nous espérons que ce travail sera à tous ceux qui ont à apprendre la MCC et leurs différents domaines.

Bibliographie

<http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/>

COMPR ch1 machine a courant continu.pdf

PLUS Machines à courant continu - Construction.pdf.

Automatique :asservissement de vitesse du MCC.pdf

https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A0_courant_continu

<http://elharzli.com/structureMCC.php>

<http://www.elharzli.com/MCCseparee.php>

MEM cours-MCC.pdf

COMPR ITEEM1_02_mcc.pdf

