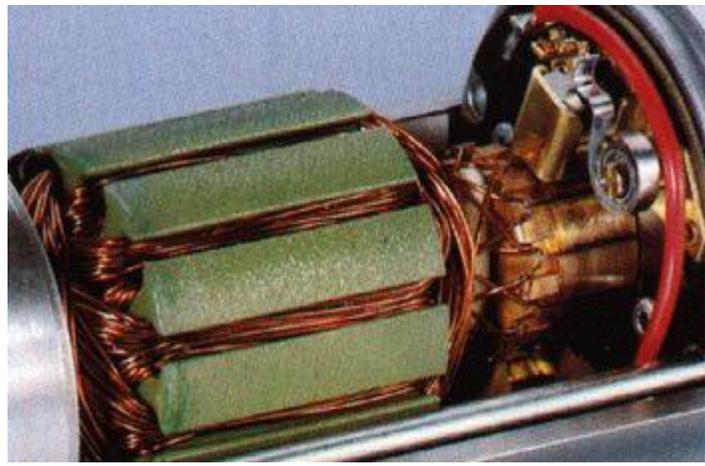


CHAPITRE 2

Année universitaire
2024/2025



Les Machines à courant continu (Le résumé du cours)

Electrotechnique Fondamentale 2

2^{eme} année License tronc commun ST

Filière électrotechnique

Prof. Megherbi Ahmed chaouki
Chargé de Cours

Département de Génie électrique
Université Mohammed Khider Biskra

Contenu du chapitre 3

Ce chapitre couvre les points suivants :

- constitution d'une machine à courant continu principe de fonctionnement génératrice et Moteur à cc
- Caractéristiques à vide et en charge d'une génératrice à cc
- Bilan de puissance et rendement d'une Génératrice à CC
- Fonctionnement Moteur à cc
- Démarrage du moteur à cc
- Bilan de puissance et Bilan de puissance et rendement d'une Moteur à CC
- Rendement d'une Moteur à CC
- Différents types M à CC

Chapitre III Les Machines à Courant continu

III.1. Introduction

Tout machine électrique assurant la conversion de l'énergie mécanique (caractérisé par un couple mécanique à une certaine vitesse) en énergie électrique est appelée génératrice (c'est **un fonctionnement générateur de la machine**), tandis que la machine électrique qui assure une transformation inverse c'est à dire la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique est appelée moteur (**fonctionnement Moteur de la machine**).

La machine à courant continu qui présente deux modes de fonctionnement est dite machine **réversible** (Fig 3.1):

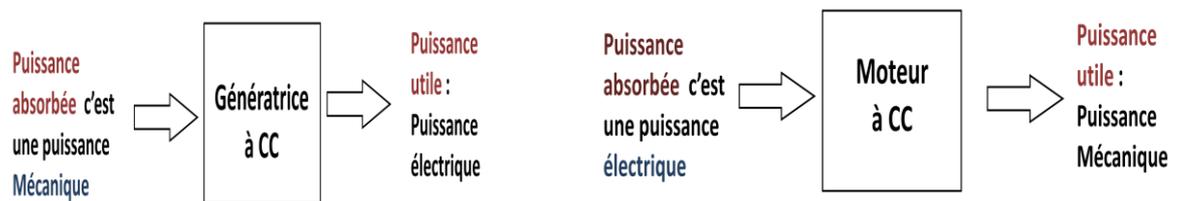


Fig.3.1 Modes de fonctionnement d'une machine à courant continu

III.2. Machine à courant continu

On distingue deux parties mécaniques d'une machine à courant continu : une partie fixe appelée **stator** et une partie en mouvement (mobile) appelée rotor. L'espace qui sépare ces deux parties est appelé l'entrefer (**Fig.3.2**).

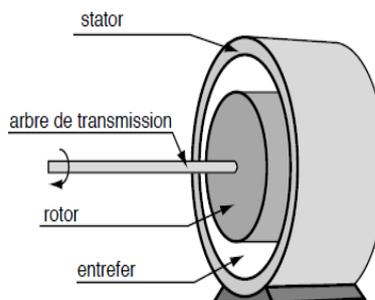


Fig.3.2 Les différentes parties d'une machine à courant continu [1]

Le circuit magnétique est ainsi formé par le stator et le rotor qui sont séparés par un entrefer. De point de vue électrique, La MCC est constituée (Fig3.3) :

1-Circuit électrique **inducteur** (ou excitation) (dans le stator) qui produit le flux magnétique ϕ dans la machine

2-Circuit électrique d'**induit** plongé dans un champ magnétique ou se développe une tension induite appelé fem (cas d'une génératrice).

3-Le **collecteur** et les **balais** (également appelé **charbons**) permettent d'accéder au circuit électrique (bobinage) rotorique.

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivres isolées disposée sur l'extrémité du rotor, les balais frottent sur le collecteur.

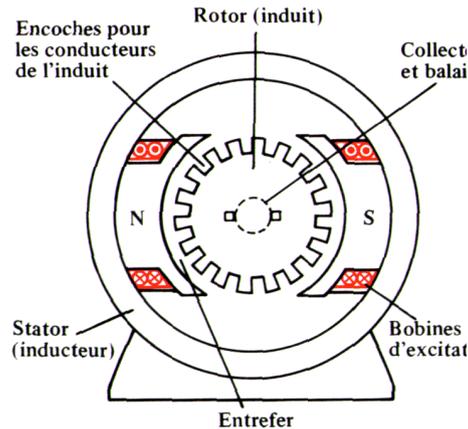


Fig.3.3 Circuit électrique inducteur induit d'une machine à courant continu [2]

III.3. Principe de fonctionnement d'une Génératrice à courant continu

Pour l'obtention de la puissance électrique (mode de fonctionnement en génératrice), il faut assurer deux conditions :

- le bobinage de l'inducteur doit être alimenté par une tension continue (sauf les cas des aimants permanents). En vue de créer un flux magnétique dans la machine.

- Le rotor de cette machine doit être entraîné à une vitesse de rotation n (par exemple à l'aide d'un moteur auxiliaire) c'est-à-dire lui fournir de la puissance mécanique.

III.4. La force électromotrice (f.e.m) E

Un enroulement rotorique en rotation dans un champ magnétique voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) selon la loi de Faraday.

La force électromotrice E induite dans les N spires de l'enroulement rotorique (circuit de l'induit) est exprimée en fonction de la vitesse angulaire Ω et à l'excitation du moteur (le flux ϕ) par la relation suivante :

$$E = k. \phi. \Omega \quad (\text{III.1})$$

Où,

k représente une constante liée à des paramètres de la machine à courant continu (tels que le nombre de conducteurs du bobinage de l'induit ; nombre de paires de pôle ; ...).

Ω = la vitesse de rotation de la machine exprimée en [rad/s].

φ = le flux magnétique créé par le circuit inducteur [weber].

Remarque : on voit, qu'à excitation constante (flux constant), la force contre-électromotrice E est proportionnelle à la vitesse de rotation.

III.5. Modèle équivalent d'une machine à courant continu

Fonctionnement génératrice

Le modèle équivalent d'une génératrice est représenté dans la figure ci-dessous (Fig3.4) :

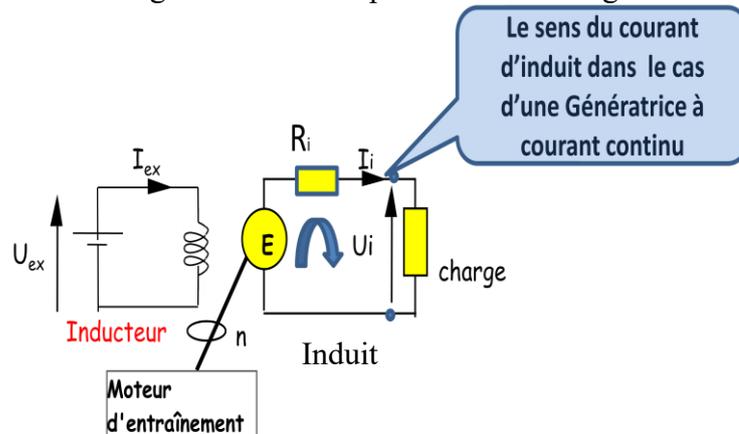


Fig. 3.4. Modèle équivalent de l'induit et de l'inducteur d'une Génératrice à CC

Le rotor de la machine est entraîné par un moteur auxiliaire à une vitesse n (tours/min).

Ou :

R_i est la résistance de l'enroulement (bobinage) de l'induit

R_{ex} est la résistance du bobinage inducteur (circuit d'excitation).

U_i la tension aux bornes de l'induit.

I_i le courant d'induit.

En appliquant la loi des mailles au circuit d'induit on obtient :

$$E = U_i + R_i I_i \quad (\text{III.2})$$

Au niveau du circuit inducteur (excitation) on a :

$$U_{ex} = R_{ex} I_{ex}$$

U_{ex} La tension aux bornes du circuit d'excitation.

I_{ex} Le courant inducteur.

III.6. Caractéristiques de la génératrice à courant continu :

III.6.1. Caractéristique à vide de la génératrice à courant continu

Une génératrice fonctionnant à vide : le courant d'induit $I_i = 0$ (la génératrice n'alimente aucune charge).

La génératrice étant entraînée à une vitesse constante $\Omega = c^{te}$ par un moteur auxiliaire.

Ainsi selon l'équation (III.2) et suite à la valeur nulle du courant d'induit $I_i = 0$ La tension mesurée aux bornes de l'induit n'est que la valeur de la fem E (la chute de tension aux bornes de la résistance du bobinage de l'induit est nulle, on a :

$$U_0 = E_0 \quad (\text{III.3})$$

En variant le courant inducteur (le flux) tout en prélevant la tension U_0 (c.à.d. E_0) mesurée à l'aide d'un voltmètre en gardant la vitesse de rotation constante on obtient la caractéristique interne d'une génératrice à CC comme elle est indiquée dans la figure 3.5.

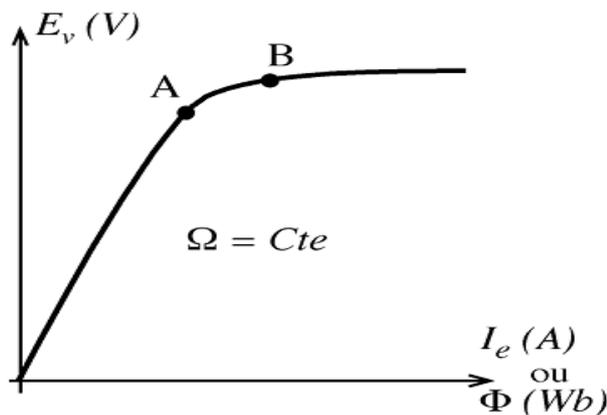


Fig. 3.5. Caractéristique à vide $E(I_e)$ de la génératrice à courant continu

On constate que dans le graphe $E(I_e)$:

Du point O au point A la courbe $E(I_e)$ est une droite (linéaire) :

$$E = k' \varphi \quad \text{avec} \quad k' = k \Omega$$

Du point A au point B le matériau ferromagnétique du circuit magnétique de la machine à CC commence à se saturer.

Au-delà du point B c'est la zone de saturation du matériau ainsi la variation de la fem est insignifiante.

III.6.2. Caractéristique à vitesse constante de la génératrice à courant continu

On fixe la valeur du courant inducteur (excitation) $I_i = C^{st}$: fonctionnement à flux constant ($\varphi = C^{st}$)

$$E = k'' \Omega \quad \text{avec} \quad k'' = k \varphi$$

La caractéristique $E(\Omega)$ (fig 3.6) est linéaire

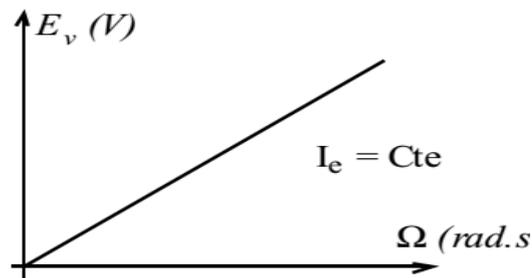


Fig. 3.6 Caractéristique $E(\Omega)$ de la génératrice à courant continu

III.6.3. Caractéristique en charge de la génératrice à courant continu

Un moteur auxiliaire entraîne une génératrice à une vitesse Ω constante, l'induit alimente une résistance variable (un rhéostat de charge) $I_i = I$. La caractéristique en charge $U = f(I)$ est représentée dans la fig 3.8. pour un courant d'excitation constant.

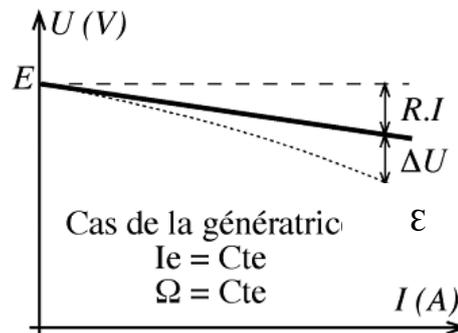


Fig. 3.8. Caractéristique en charge $U(I)$ de la génératrice à courant continu

$$U_i = E - R_i I_i - \varepsilon_i \quad (\text{III.4})$$

La résistance de l'enroulement R_i d'induit provoque une chute de tension dans le circuit d'induit.

III.6.3.1. La réaction magnétique de l'induit

La circulation du courant d'induit dans le bobinage de l'induit crée un flux qui va diminuer le flux produit à vide : ce qui conduit à l'apparition d'une chute de tension ε_i due à la **réaction magnétique de l'induit**.

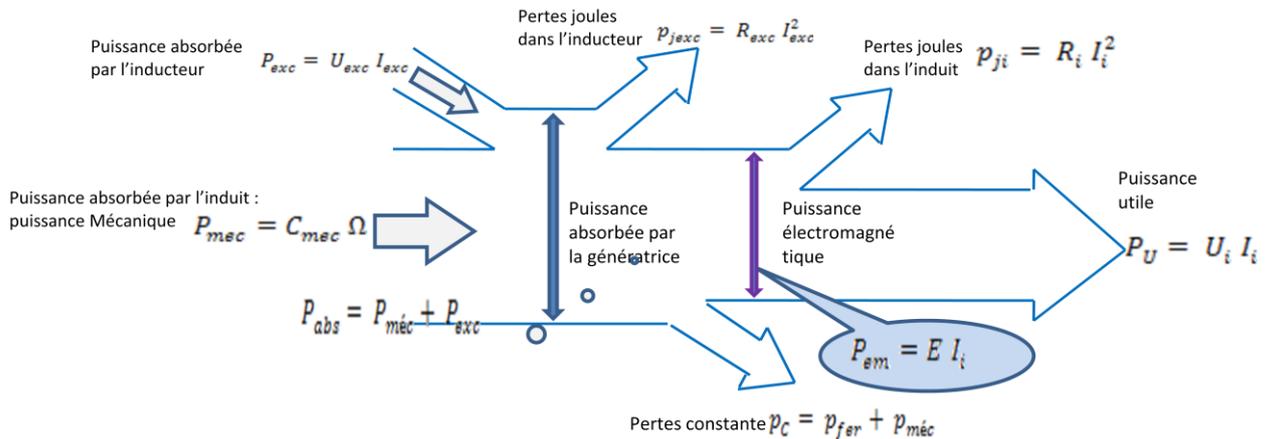
Afin d'annuler l'effet de cette réaction magnétique la machine à cc dispose d'un enroulement de compensation parcouru par le courant d'induit.

III.7. Le bilan de puissance d'une génératrice à courant continu

Le bilan des puissances montre toutes les puissances et les pertes dans une génératrice, depuis la puissance absorbée à la puissance utile de nature électrique fournit à la charge (fig 3.9)

La génératrice reçoit une puissance P_a (puissance mécanique + puissance électrique pour l'inducteur). Le couple mécanique provenant d'un système (moteur) auxiliaire l'entraînant à la vitesse angulaire Ω .

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :



$$P_{abs} = P_U + p_{jexc} + p_{jind} + p_c$$

Fig. 3.9. Le bilan de puissance de la génératrice à courant continu

Selon le bilan de puissance de la fig III.9 Les différentes puissances peuvent être déterminé en utilisant Les relations suivantes :

- La puissance **absorbée** P_{abs} :

$$P_{abs} = P_{Mec} + P_{exc} = P_u + \sum p_{perdes}$$

- La puissance **utile** est une puissance électrique dans le mode de fonctionnement génératrice : c'est la puissance électrique fournit à la charge.

$$P_u = U_i I_i$$

- La **somme** ($\sum p_{perdes}$) des pertes regroupe :

Les **pertes joules dans l'inducteur** $p_{jexc} = R_{exc} I_{exc}^2$

Ou R_{exc} est la résistance de l'enroulement inducteur

Les pertes joules dans l'induit

$$p_{ji} = R_i I_i^2$$

Ou R_i est la résistance de l'enroulement induit

Les **pertes fer** dans le circuit magnétique : p_{fer}

Les pertes **mécaniques** p_{mec} dues aux frottements des parties mécaniques tournantes de la génératrice (exemple roulements...)

A partir de ce bilan on peut déduire que La **puissance électromagnétique**

$$P_{em} = E \cdot I_{ind} = P_u + p_{ji} \quad (III.5)$$

Remarques

1-Toute puissance absorbée au niveau du circuit inducteur est dissipée par effet joule. Ainsi on peut omettre l'inducteur dans le bilan de puissance.

$$P_{exc} = U_{exc} I_{exc} = R_{exc} I_{exc}^2 \quad (III.6)$$

2-La somme des pertes fer et pertes mécanique (sont des pertes indissociables) sont appelées pertes collectives ou pertes constantes.

$$p_c = p_{fer} + p_{mec} \quad (III.7)$$

3- Si la Machines à courant continu est à aimants permanents (absence d'enroulement inducteur) : alors U_{exc} ; I_{exc} ; et p_{jexc} n'existent pas : $P_{ex}=0$

III.8. Le Rendement d'une génératrice

Le rendement est généralement exprimé en pourcentage est définit par le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}}$$

Le rendement de la génératrice tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur,

$$P_{exc}=U_{exc} \cdot I_{exc},$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_{Mec}+P_{exc}} \quad (III.8)$$

Pour une génératrice à courant continu à aiment permanant ($P_{exc}=0$) Le rendement est donc :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{Mec}}$$

III.9. Fonctionnement en mode Moteur à courant continu d'une machine à CC.

Dans le cas de fonctionnement moteur, l'enroulement d'induit doit être alimenté par une seconde source de tension continue indépendante de celle de l'inducteur, il entraîne donc une charge mécanique à tourner à une vitesse de rotation Ω .

Ainsi le schéma équivalent fonctionnement moteur est le même que celui d'une génératrice seulement le sens du courant d'induit est entrant comme il est illustré dans la figure 3.10

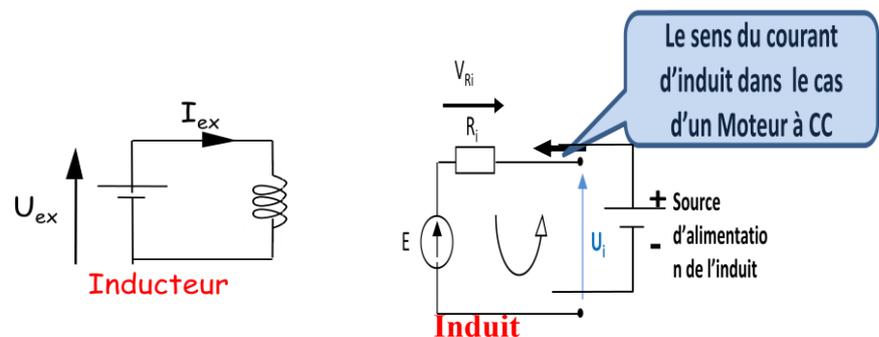


Fig. 3.10. Le schéma équivalent d'une MCC en fonctionnement moteur

Le moteur consomme ainsi une puissance électrique au niveau des circuits inducteur et induit et fournit une puissance mécanique à la charge qu'il l'entraîne, sous forme d'un moment du couple utile à une vitesse de rotation Ω exprimé en rad/seconde.

La Loi des mailles dans le modèle équivalent de l'induit du moteur à CC de la fig.3.10 :

$$\sum U_i = 0$$

$$U_i - V_{Ri} - E = 0$$

$$U_i = E + V_{Ri}$$

$$U_i = E + R_i I_i$$

Ou bien

$$E = U_i - R_i I_i \quad (\text{III.9})$$

Ainsi dans le cas de fonctionnement moteur on a :

$$E < U_i$$

3.10. La vitesse de rotation d'un moteur à courant continu

la vitesse d'un moteur à courant continu Ω peut être déterminée et exprimée à partir de l'équation (3.9) :

$$E = U_i - R_i I_i$$

Avec $E = k \varphi \Omega$

$$\text{On obtient : } \Omega = \frac{U_i - R_i I_i}{k\varphi} \quad (\text{III.10})$$

D'après cette expression la vitesse dépend :

- La tension d'alimentation de l'induit
- Du courant de l'induit (c'est-à-dire de la charge qu'il entraîne)
- Du flux ϕ

Remarque

Le sens de rotation du moteur à courant continu peut être inversé :

- en inversant la polarité de l'alimentation du circuit inducteur c'est-à-dire inverser le sens du courant d'excitation I_{ex} (sens du vecteur B)

- en inversant la polarité de l'alimentation du circuit d'induit (inverser le sens du courant d'induit I)

3.11. Fonctionnement à vide d'un moteur à CC

Un moteur à courant continu qui n'entraîne aucune charge sur son arbre on dit qu'il fonctionne à vide, donc cela se traduit par une puissance utile nulle. $P_u=0$

Sa vitesse de rotation est légèrement supérieure à sa vitesse de rotation nominale, l'intensité du courant dans l'induit I_o est très faible devant sa valeur nominale ($I_o \ll I_{in}$) et la tension d'alimentation U_{i0} de l'induit est réglée à sa valeur nominale ($R I_o \ll U_{i0}$).

L'expression de la vitesse à vide Ω_0 s'écrit :

$$\Omega_0 = \frac{U_{i0} - R_i I_{i0}}{k\varphi} \approx \frac{U_{i0}}{k\varphi} \quad (\text{III.11})$$

La vitesse à vide Ω_0 se règle en fonction de la tension d'alimentation ou du flux inducteur ϕ .

3.11.1. Emballement du moteur à CC

Lorsque l'induit est sous tension ; le moteur tourne à vide, si on élimine le courant inducteur : Φ tend vers zéro alors d'après l'expression (III.11) la vitesse tend vers l'infini.

$I_{ex} \rightarrow 0$ alors $\Omega \rightarrow \infty$ on dit que le moteur s'emballé. La machine s'arrêtera.

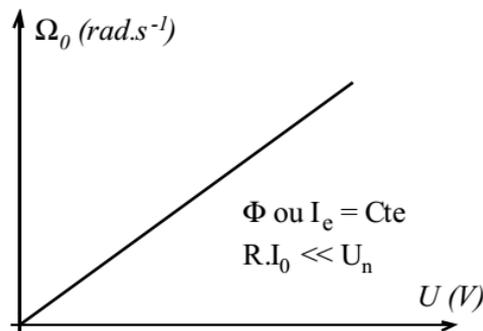
Ainsi à vide, il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation I_{ex} lorsque l'induit est sous tension.

3.11.2. Fonctionnement à flux constant

A vide pour un fonctionnement à flux constant (on fixe la valeur du courant inducteur à une valeur constante) on a donc $k' = \frac{1}{k\phi}$ est constant ainsi l'expression de la vitesse (III.11) devient :

$$\Omega_0 \approx \frac{U_{i0}}{k\phi} = k' \cdot U_{i0}$$

Si on trace la caractéristique $\Omega_0=f(U_i)$ on obtient une droite qui passe par l'origine



3.12. Démarrage du moteur à CC

A l'instant de démarrage du moteur à cc sous tension nominale ; il fait appel à un courant de démarrage très important :

$$I_{id} \gg I_{in}$$

Le problème qui apparaît est la surintensité du courant de démarrage lors l'alimentation de l'induit directement par la tension nominale.

Ainsi l'instant de démarrage le moteur étant immobile $\Omega = 0 \Leftrightarrow E = 0$

L'équation (*) devient :

$$U_{id} = R_i I_{id}$$

Dès que le moteur commence à tourner, E augmente et I_d diminue jusqu'à I_n .

Pour limiter le courant de démarrage on a deux procédés :

On utilise des rhéostats de démarrage R_h , qui va être inséré en série avec l'enroulement d'induit. A l'instant de démarrage R_h est à sa valeur maximale. Une fois le moteur commence à tourner la résistance R_h va être diminué et éliminé après que le moteur atteint sa vitesse nominale.

On démarre sous une tension d'alimentation réduite : l'induit est alimenté avec une tension réduite $U_{id} \ll U_{in}$ dès que le moteur commence à tourner on augmente la tension d'induit progressivement jusqu'à atteindre la tension nominale.

3.13. Fonctionnement en charge d'un moteur à CC

A flux constant l'expression de la vitesse s'écrit :

$$\Omega = k'(U_i - R_i I_i)$$

La vitesse d'un moteur à courant continu dépend :

- La tension d'alimentation de l'induit.
- L'intensité du courant d'induit imposée par la charge que le moteur à cc entraîne.

La caractéristique mécanique d'un moteur à cc le couple utile en fonction de la vitesse

$C_u = f(n)$ est représentée dans la figure

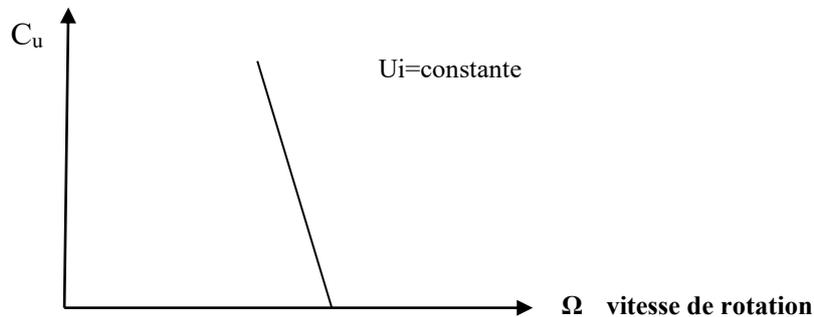


Fig. 3.11. Caractéristique mécanique $C_u = f(\Omega)$ d'un moteur à courant continu

3.13.1. Point de fonctionnement

Pour un fonctionnement en charge en régime permanent tournant à une vitesse Ω , le moment du couple résistant C_r qu'oppose la charge au couple mécanique développé par le moteur sont égaux (fig.III.12)

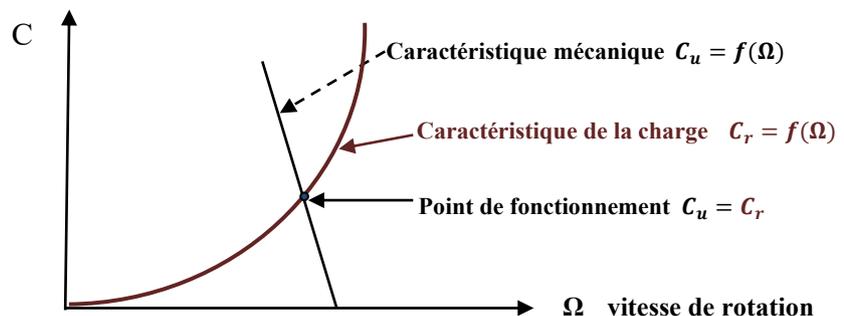


Fig. 3.12. Point de fonctionnement mécanique d'un moteur à courant continu

Le point d'intersection de la caractéristique mécanique et la caractéristique de la charge (le couple résistant) constitue le point de fonctionnement du moteur :

$$C_u = C_r$$

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.

3.14. Bilan de puissance d'un moteur à courant continu

Le bilan de puissance d'un moteur à cc peut être schématisé dans la figure 3.13

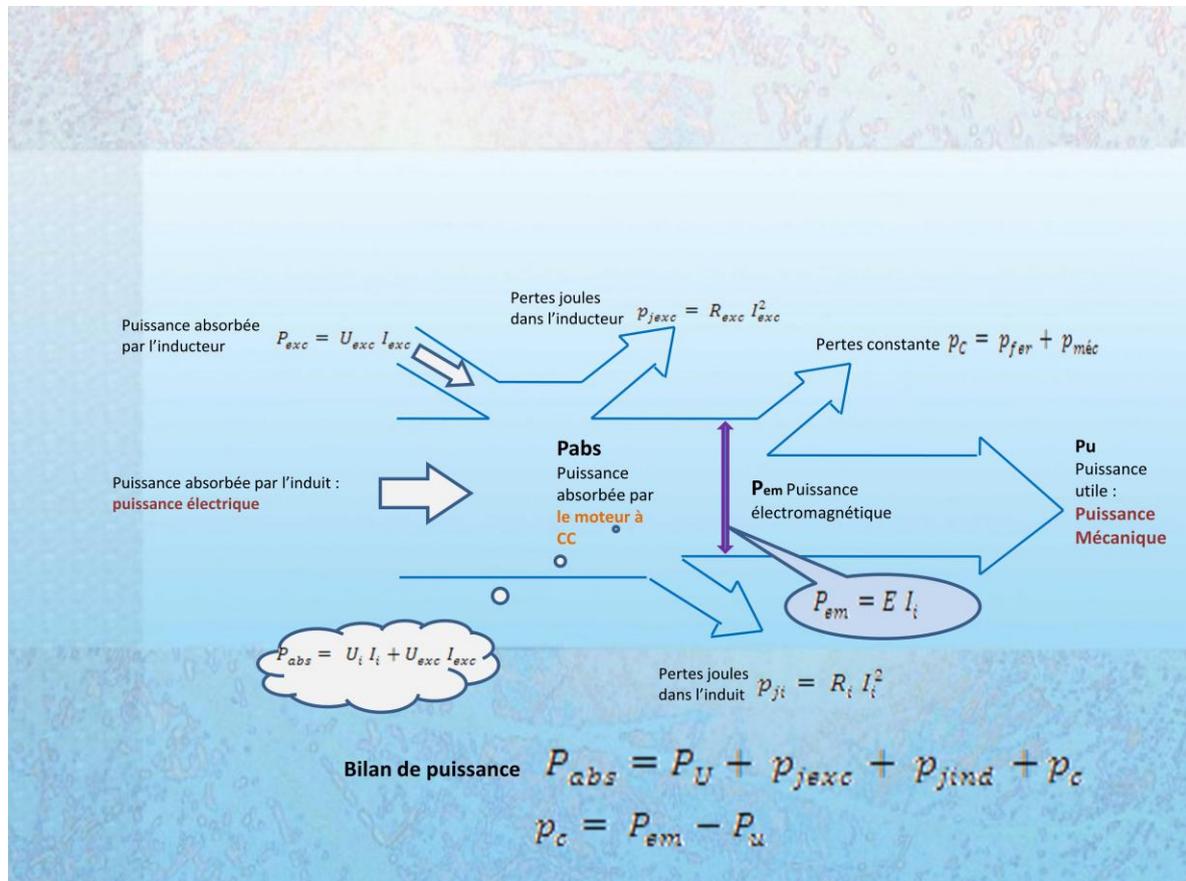


Fig. 3.13. Le bilan de puissance du moteur à courant continu

Dans le mode de fonctionnement moteur d'une machine à courant continu :

La puissance absorbée par le moteur : $P_{abs} = \text{puissance électrique}$

$$P_{abs} = U_i I_i + U_{exc} I_{exc}$$

La puissance utile est une puissance mécanique :

$$P_u = C_u \cdot \Omega$$

D'après ce bilan les pertes constantes $p_c = P_{em} - P_u$

$$P_{em} = P_{abs} - p_{jexc} - p_{ji}$$

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

3.15. Les couples

La relation entre le couple et la puissance est définie par :

$$C = \frac{P}{\Omega}$$

Ω c'est la vitesse de rotation exprimée en rad/s.

A partir du bilan de puissance; on peut définir les couples :

Couple électromagnétique

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

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

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I_i}{\Omega} = \frac{k \cdot \varphi \cdot \Omega \cdot C_{em}}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

$$C_{em} = k \cdot \varphi \cdot I_i$$

Couple utile

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega}$$

Couple de pertes C_p

p_c représente les pertes constantes (ou collectives) : c'est la somme et des pertes joules dues aux pertes dans le matériau du circuit magnétique du moteur (hystérésis et pertes courant de Foucault) dans magnétiques des pertes mécaniques dans le moteur.

$$p_c = p_{fer} + p_{méc} = P_{em} - P_u$$

C_p est le moment du couple de pertes correspondant à cette puissance perdue

$$C_p = \frac{p_c}{\Omega}$$

Ainsi l'équation du couple peut s'écrire aussi :

$$C_p = C_{em} - C_u$$

3.16. Le rendement d'un moteur à cc

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{C_u \cdot \Omega}{U_i I_i + U_{exc} I_{exc}}$$

3.17. Les types des machines à courant continu [(pour les détails de cette partie de cours). L'étudiant doit assister aux séances de cours amphi 7]

Selon le type de connexion possible entre le bobinage du circuit inducteur et celle de l'induit, on peut distinguer cinq modes d'excitation des machines à courant continu ainsi on a:

- les machines à excitation indépendante dite encore séparée ;
- les machines à excitation shunt (ou en dérivation) ;
- les machines à excitation en série ;
- les machines à excitation composée ;
- les machines à excitation par aimants permanents.