

Chapitre III Machines à Courant continu

III.1.Introduction

Les machines électriques assurant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique sont appelées générateurs, les machines électriques destinées pour la transformation inverse la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique sont appelées moteurs.

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

- Fonctionnement génératrice
- Fonctionnement moteur



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

III.2. Constitution d'une Machine à courant continu

Une machine à courant continu est constituée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie mobile appelée rotor. L'espace qui sépare les deux parties est l'entrefer (Fig.3.1).

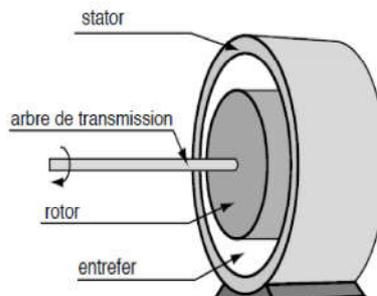


Fig.3.1 Constitution d'une machine à courant continu [1]

Le circuit magnétique est ainsi formé par le stator le rotor séparé 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 dans la machine

2-Circuit électrique **induit** qui subit les effets de ce champ magnétique et ce développe une tension induite appeler 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.

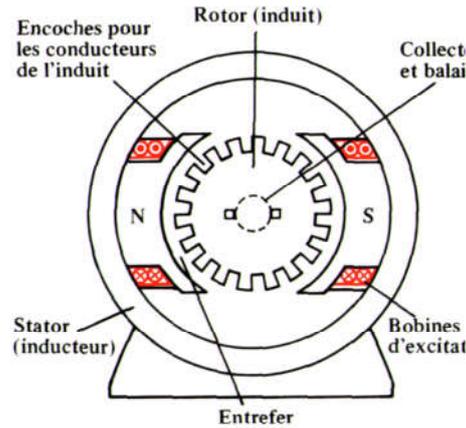


Fig.3.3 Circuit électrique inducteur induit d'une machine à courant continu [2]

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 deux conditions :

- La machine doit être entraînée 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.
- l'inducteur doit être alimenté par une tension continue (sauf les cas des aimants permanents). Pour la création d'un champ magnétique dans la machine.

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

Une bobine en rotation dans un champ magnétique voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday.

la force électromotrice f.e.m résultante de l'ensemble de ces N spires de l'enroulement de l'induit est liée à la vitesse et à l'excitation du moteur (le flux) par la relation suivante :

$$E = k. \varphi. \Omega$$

Où,

k = constante propre à la machine (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit ; nombre de paires de pôle ;...).

Ω = la vitesse angulaire de l'induit [rad/s].

Φ = le flux de l'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) :

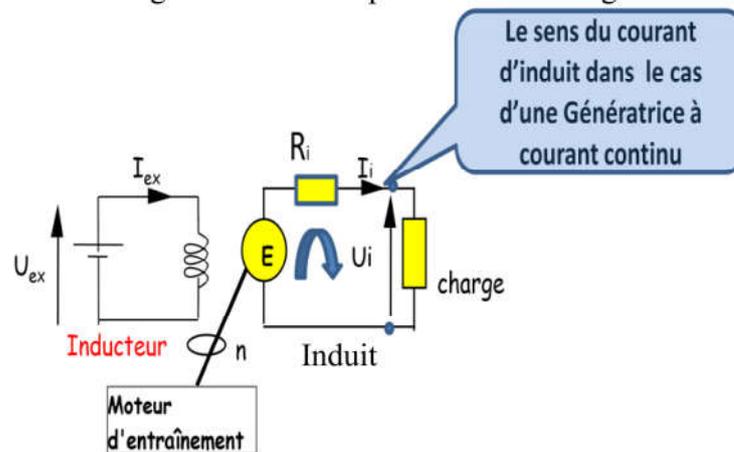


Fig. 3.4. Modèle équivalent de l'induit et de l'inducteur d'une Génératrice à CC

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

Ou :

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

R_{ex} est la résistance de l'enroulement (bobinage) de l'inducteur (excitation).

U_i la tension au bornes de l'induit.

I_i le courant de l'induit.

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

$$E = U_i + R_i I_i$$

Au niveau du circuit inducteur (excitation) on a :

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

U_{ex} La tension d'alimentation du circuit inducteur.

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

La génératrice fonctionne à vide lorsqu'elle ne débite aucun courant : $I_l = 0$ (la génératrice n'alimente aucune charge).

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

La tension U_0 mesurée directement sur l'induit de la génératrice est exactement égale à la f.e.m E_0 de la machine car l'intensité du courant est nulle, il n'y a donc pas de chute de tension due à la résistance de l'induit : $U_0 = E_0$

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.

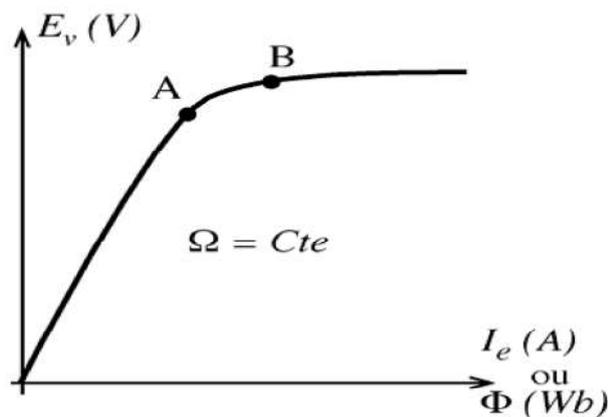


Fig. 3.4. Caractéristique à vide $E(I_{ex})$ de la génératrice à courant continu

On constate que dans le graphe $E(I_{ex})$:

Du point O au point A la caractéristique est linéaire :

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

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 le matériau est saturé ainsi la fem n'augmente pas.

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

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

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

La caractéristique $E(\Omega)$ est linéaire

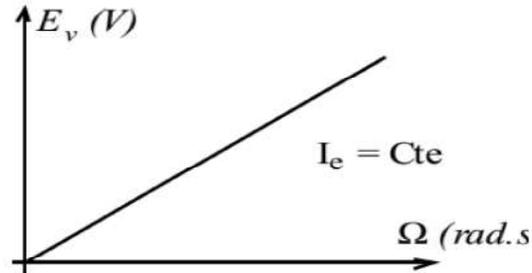


Fig. 3.5. Caractéristique $E(\Omega)$ de la génératrice à courant continu

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

La génératrice est entraînée par un moteur auxiliaire, elle débite un courant d'intensité I dans un rhéostat de charge.

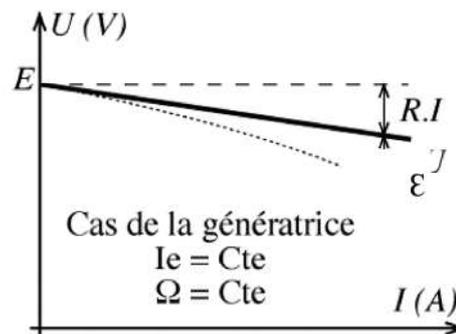


Fig. 3.6. Caractéristique en charge $U(I)$ de la génératrice à courant continu

$$U_i = E - R_i I_i - \varepsilon_i$$

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

La génératrice reçoit une puissance P_a (puissance mécanique), un 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 :

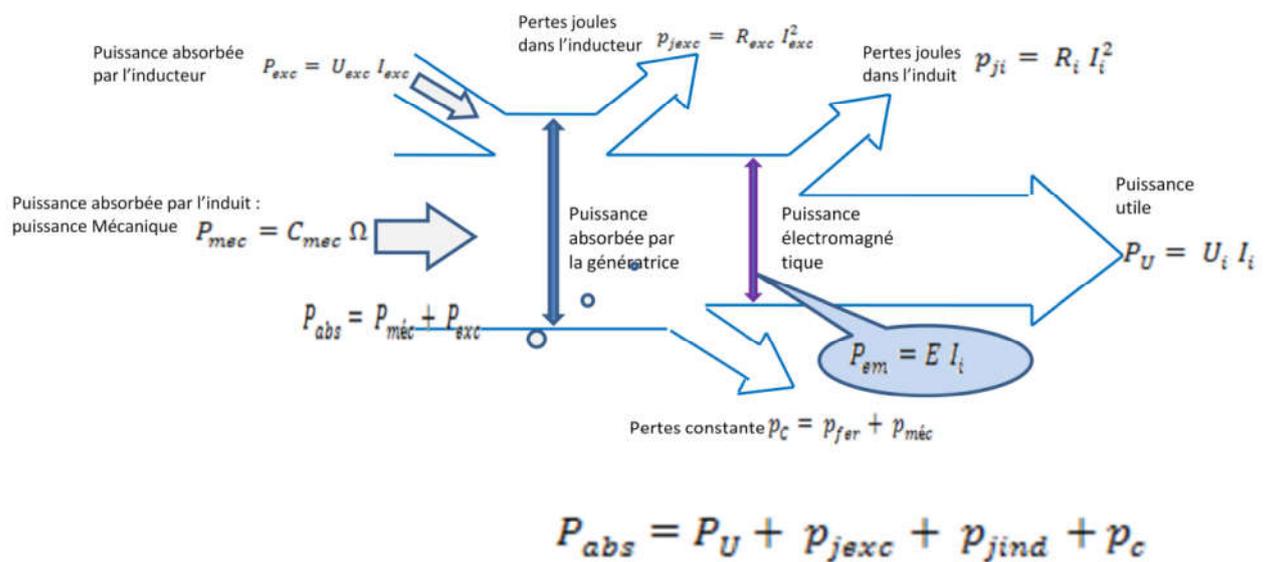


Fig. 3.7. Le bilan de puissance de la génératrice à courant continu

Les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être déterminé en utilisant Les relations suivantes :

La puissance absorbée P_{abs} :

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

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 ($\sum pertes$) 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

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

Où R_i est la résistance de l'enroulement induit

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

Les pertes mécaniques p_{mec}

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

$$P_{em} = E \cdot I_{ind} = P_u + p_{ji}$$

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.

$$P_{exc} = U_{exc} I_{exc} = R_{exc} I_{exc}^2$$

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

$$p_c = p_{fer} + p_{mec}$$

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.

III.8. Le Rendement d'une génératrice

Le rendement est le rapport entre la puissance utile (puissance utile) et la puissance absorbée

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

Le rendement de la génératrice complète tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur, P_{exc} , dans la mesure où celui-ci est alimenté électriquement.

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

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

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

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 3.8

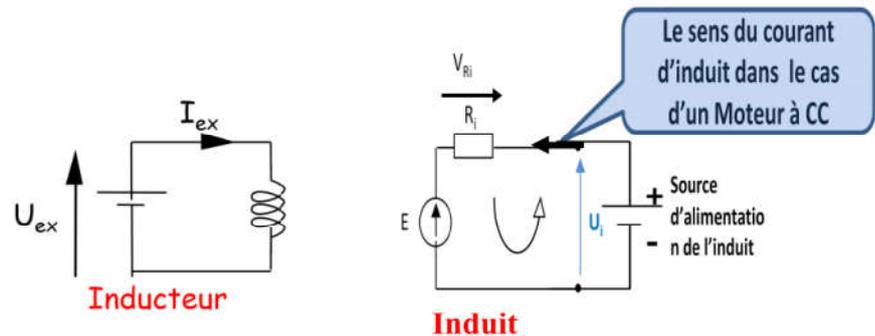


Fig. 3.8 le schéma équivalent fonctionnement moteur

Le moteur absorbe une puissance électrique et restitue une puissance mécanique, sous forme d'un moment du couple utile à une vitesse de rotation n .

La Loi des mailles dans le modèle équivalent de l'induit du moteur à CC de la fig.3.8 :

$$\sum U_i = 0$$

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

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

$$U_i = E + R_i I_i$$

Ou bien

$$E = U_i - R_i I_i \quad (*)$$

Ainsi dans le cas de fonctionnement moteur on a :

$$E < U_i$$

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

L'expression de la vitesse d'un moteur à courant continu peut être déterminé à partir de l'équation (*) :

$$E = U_i - R_i I_i$$

Avec $E = k \varphi \Omega$

On obtient :

$$\Omega = \frac{U_i - R_i I_i}{k\varphi}$$

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

Il reste à signaler que le sens de rotation dépend :

- du sens du flux, donc du sens du courant d'excitation I_e ;
- du sens du courant d'induit I .

3.11. Fonctionnement à vide d'un moteur à CC

On dit que le moteur fonctionne à vide s'il n'entraîne aucune charge sur son arbre.

La puissance utile est donc 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 ($I_{i0} \ll I_{in}$) et la tension d'alimentation U_{i0} de l'induit est réglée à sa valeur nominale ($R I_{i0} \ll U_{i0}$).

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

$$\Omega_0 = \frac{U_{i0} - R_i I_{i0}}{k\varphi} \approx \frac{U_{i0}}{k\varphi} \quad (**)$$

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 (**) la vitesse tend vers l'infini.

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

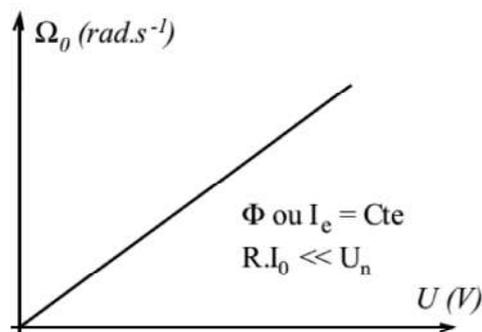
Ainsi à vide, il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation I_{ex} lorsque l'induit est sous tension.

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 (**) 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 apparait 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

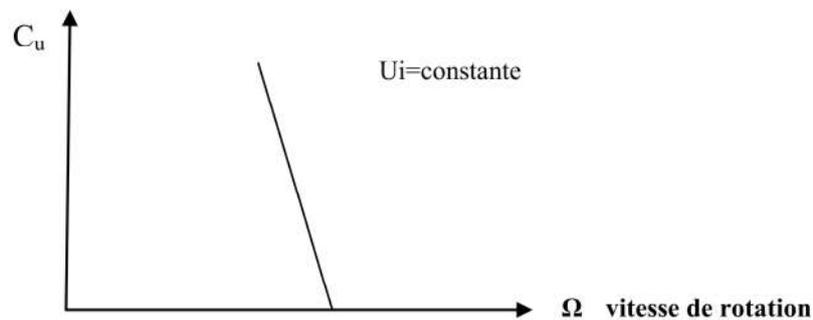


Fig. 3.9. Caractéristique mécanique $C_u = f(\Omega)$ d'un moteur à courant continu

3.13.1. Point de fonctionnement

En régime établi, le moment du couple utile délivré par le moteur est égal au moment du couple résistant C_r que lui oppose la charge mécanique.

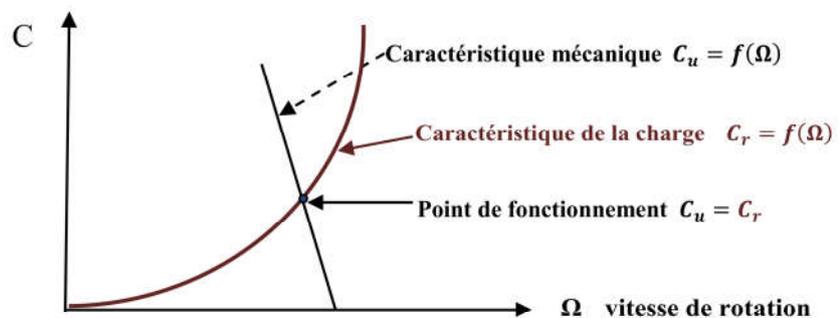


Fig. 3.10. Point de fonctionnement mécanique d'un moteur à courant continu

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 cc

Le bilan de puissance d'un moteur à cc peut être schématisé dans la figure 3.10

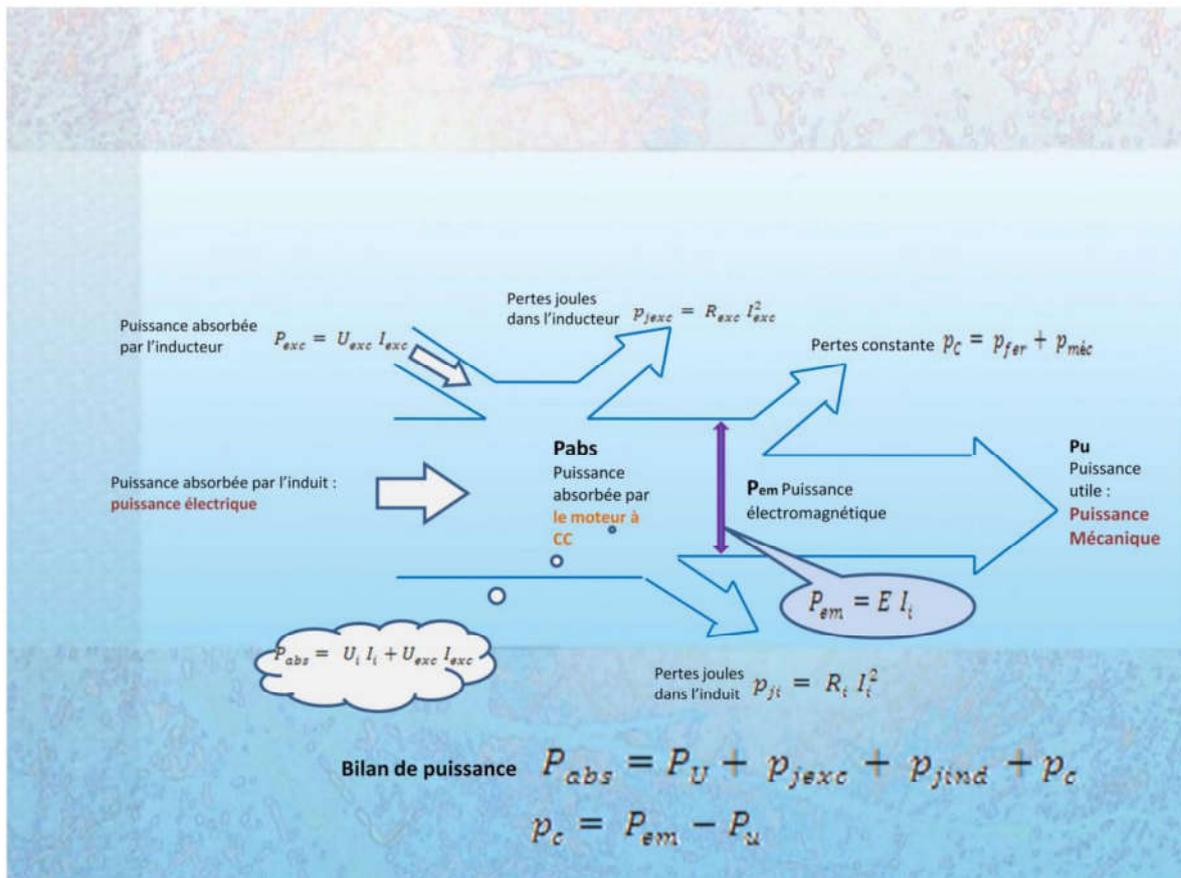


Fig. 3.11. Le bilan de puissance du moteur à courant continu

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

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

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

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

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

Couple utile

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

Couple de pertes C_p

p_c représente la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans le moteur.

$$p_c = P_{em} - P_u$$

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 différents types de machines à courant continu [(détails) voir séance présentiel du cours]

Selon le type de raccordement possibles entre les enroulements rotoriques et statoriques on obtient les différents types existants, on peut distinguer cinq modes d'excitation des moteurs à courant continu :

- excitation indépendante ;
- excitation en dérivation ;
- excitation en série ;
- excitation composée ;
- excitation par aimants permanents.