

- Dans le **quadrant 1**, le couple moteur C_m et sa vitesse sont positifs : la machine fonctionne en moteur tournant dans le sens direct.
- Dans le **quadrant 2**, N est positif mais C_m est négatif : la puissance qui est proportionnelle au produit $N \cdot C_m$ s'est inversée. La machine fonctionne maintenant en génératrice recevant de la puissance mécanique provenant de la charge et la transformant en puissance électrique qui est :
 - soit renvoyée au réseau d'alimentation. C'est le freinage par récupération d'énergie, avec rotation dans le sens direct.
 - soit dissipée par effet Joule par des dispositifs à résistances. C'est le freinage rhéostatique.
- Dans le **quadrant 3**, N et C_m sont tous deux négatifs. La machine fonctionne alors en moteur tournant dans le sens inverse.
- Dans le **quadrant 4**, N est négatif et C_m positif : la machine tournant dans le sens inverse fonctionne en génératrice donc assurant un freinage par récupération d'énergie ou rhéostatique.

Pour tout ensemble convertisseur-moteur, on indique si le fonctionnement est à 1 quadrant (quadrant 1), ou à 2 quadrants (quadrants 1 et 2, parfois 1 et 4) ou à 4 quadrants ce qui est le cas le plus fréquent pour les mouvements principaux des engins de levage.

8.4. Les machines à courant continu

8.4.1. Construction et principe de fonctionnement

8.4.1.1. Description succincte de la machine

Une machine à courant continu est composée des principaux éléments suivants :

- un stator ou inducteur qui porte le bobinage qui crée le flux dans le circuit magnétique formé par le fer du stator et le fer du rotor séparés par l'entrefer.
- un rotor ou induit qui porte à sa surface le bobinage. C'est dans cet enroulement que sont induites les forces électromotrices de la machine.

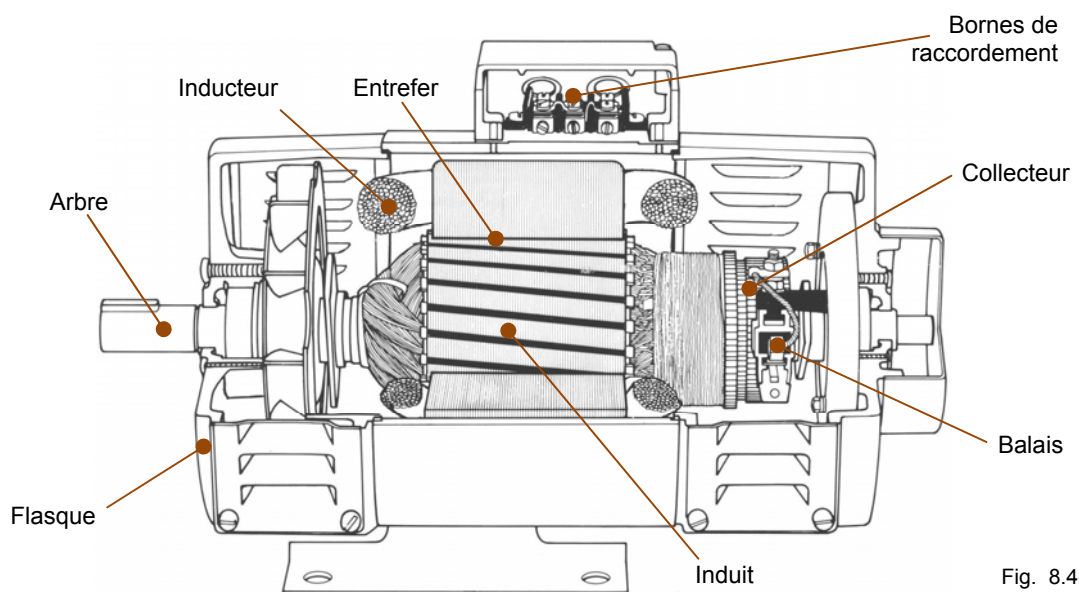


Fig. 8.4-1

Le bobinage de l'induit est alimenté par un commutateur mécanique formé par le collecteur sur lequel appuient des balais. Le collecteur est monté sur le même arbre que l'induit et relié au bobinage de celui-ci. Les balais sont fixes et reliés mécaniquement à la carcasse de la machine par l'intermédiaire d'un dispositif porte-balais. Ils assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante. Pour des machines de forte puissance, la mise en parallèle des balais est souvent nécessaire.

L'ensemble balais-collecteur alimente les conducteurs de l'induit de telle façon que le courant y circule dans un sens quand ils sont sous un pôle Nord, et en sens inverse lorsqu'ils sont sous un pôle Sud.

La figure ci-dessous schématise la coupe perpendiculaire à l'arbre d'une machine bipolaire (2 pôles).

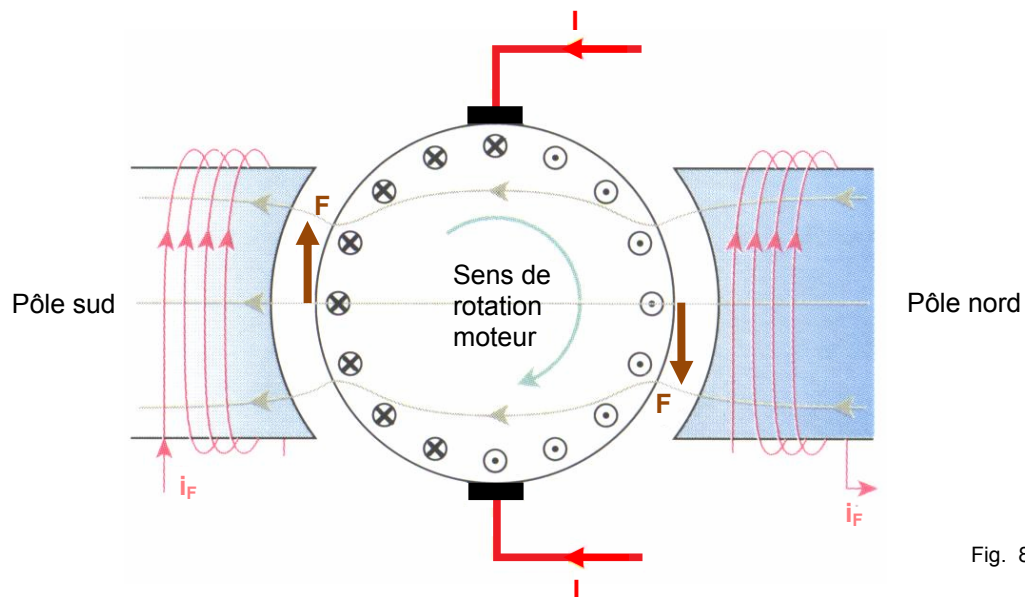


Fig. 8.4-2

On observe que pour le sens de rotation considéré (sens horaire), les courants sont entrants pour les conducteurs situés sous le pôle Sud et sortants pour ceux situés sous le pôle Nord.

8.4.1.2. Le circuit magnétique

Le circuit magnétique comporte les éléments constitutifs suivant :

- **les pôles inducteurs principaux** autour desquelles sont placées les bobines magnétisantes qui sont parcourues par un courant continu appelé courant inducteur ou magnétisant ou d'excitation pour créer le flux inducteur dans la machine. La direction des lignes de champ dépend du signe du courant dans l'enroulement inducteur.
Au niveau de l'entrefer les pôles sont élargis pour augmenter la surface de passage du flux dans l'entrefer.

On distingue deux parties dans un pôle :

- le noyau polaire,
- la pièce ou épanouissement polaire.

Les pôles sont généralement feuilletés car des variations locales d'induction apparaissent consécutives au défilement des encoches du rotor au cours de sa rotation.

- **la culasse** qui ferme le circuit magnétique et assure le retour des lignes de champ ; elle sert de support aux pôles. Elle est généralement réalisée en acier massif pour les machines de petite ou moyenne puissance. Pour les machines de forte puissance alimentées par des variateurs de vitesse électroniques (courant pulsé) et qui doivent répondre à des variations rapides de vitesse et de couple, les stators sont réalisés par un assemblage de tôles disposées perpendiculairement à l'axe de la machine.

- **l'entrefer**, qui sépare le circuit magnétique inducteur et le circuit magnétique induit.
- **l'armature rotorique** est un cylindre constitué par un empilage de tôles ferromagnétiques. Ces tôles sont prédécoupées avant empilage pour obtenir la succession des dents et encoches qui contiennent le bobinage de l'induit. Par ailleurs, ces disques sont pourvus d'un trou central permettant le passage de l'arbre moteur et éventuellement d'autres ouvertures réparties de façon à créer des canaux de ventilation dans le cas où celle-ci est axiale.

La figure 8.4-3 ci-dessous illustre le circuit magnétique d'une machine à courant continu bipolaire.

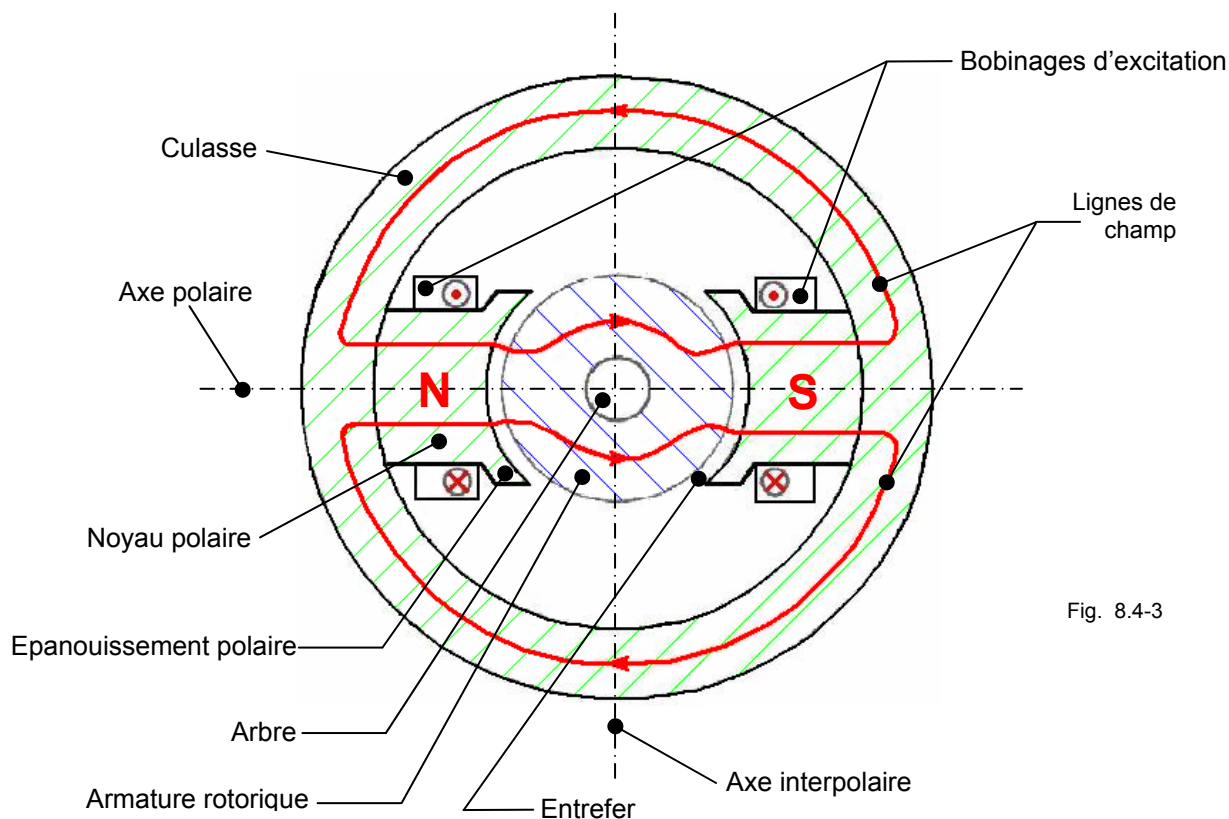


Fig. 8.4-3

Le flux est constant dans la partie portant les pôles inducteurs (culasse) et dans les pôles inducteurs eux-mêmes (hachures ///).

Le flux inducteur traverse le rotor avec des lignes de champ fixe (hachures \\\) circulant entre deux pôles inducteurs ; la topographie du champ magnétique n'est pratiquement pas modifiée par la rotation de l'armature.

Exemples de réalisation

Rotor (induit)

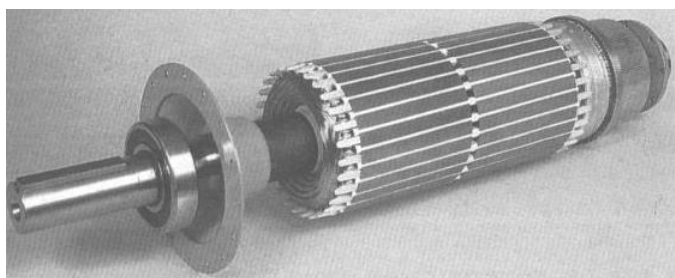
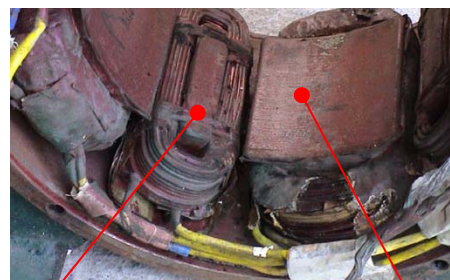


Fig. 8.4-4a

Pôles inducteurs



Pôle
auxiliaire

Fig. 8.4-4b

Pôle
principal

8.4.1.3. L'induit

Description

Le bobinage de l'induit est formé de bobines d'une ou plusieurs spires, appelées sections. Chaque section comporte deux parties actives (faisceaux) :

- un faisceau profond situé dans le fond d'une encoche
- un faisceau périphérique situé dans la moitié supérieure d'une autre encoche, près de l'entrefer

L'écart entre ces deux encoches est égal à la distance angulaire entre deux pôles inducteurs de telle sorte que lorsque les conducteurs d'un faisceau de la section sont sous un pôle Nord, ceux de l'autre faisceau se trouvent alors sous un pôle Sud.

Les sections sont bobinées sur gabarit, puis enrubannées (recouverte d'un ruban isolant), imprégnées d'un isolant (vernis) et enfin disposées dans les encoches rotoriques.

L'enroulement est maintenu dans les rainures par des cales de fermeture des encoches. Des dispositifs de fretage empêchent l'ensemble de se disloquer sous l'action de la force centrifuge.

Les sections sont connectées en série et à la sortie de la dernière est réunie à l'entrée de la première pour que l'enroulement soit fermé et sans point singulier.

A chaque passage d'une section à l'autre, le fil de sortie d'une section et le fil d'entrée d'une autre section sont soudés à une même lame du collecteur.

La distribution du courant par le collecteur

Le collecteur est un cylindre centré sur l'axe et placé devant l'une des faces de l'armature. Il est formé par une succession de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles isolantes à base de mica.

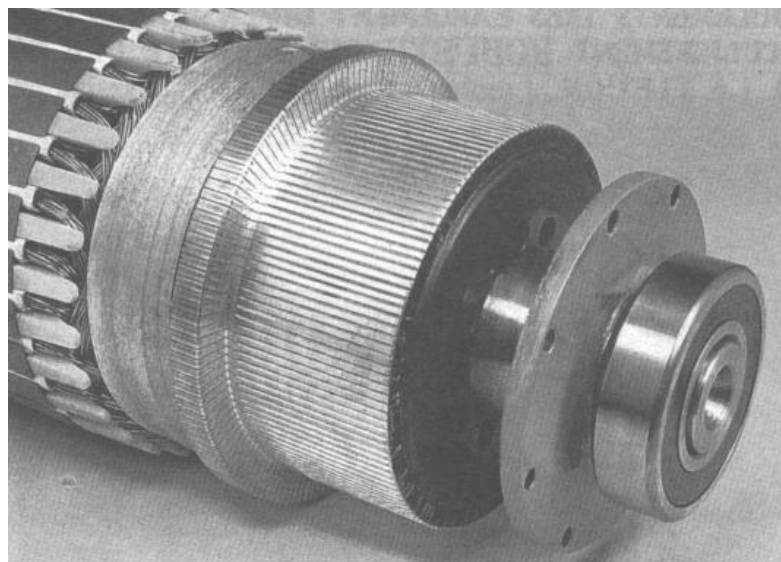


Fig. 8.4-5

Chacune de ces lames porte une ailette sur laquelle sont soudées :

- l'entrée d'une section
- la sortie de la section précédente

Pour expliquer le fonctionnement de l'ensemble balai-collecteur, nous avons représenté sur la figure 8.4-6 suivante le schéma panoramique de l'enroulement d'une machine bipolaire.

Une machine bipolaire comporte 8 encoches, 8 lames de collecteur et 2 lignes de balais.

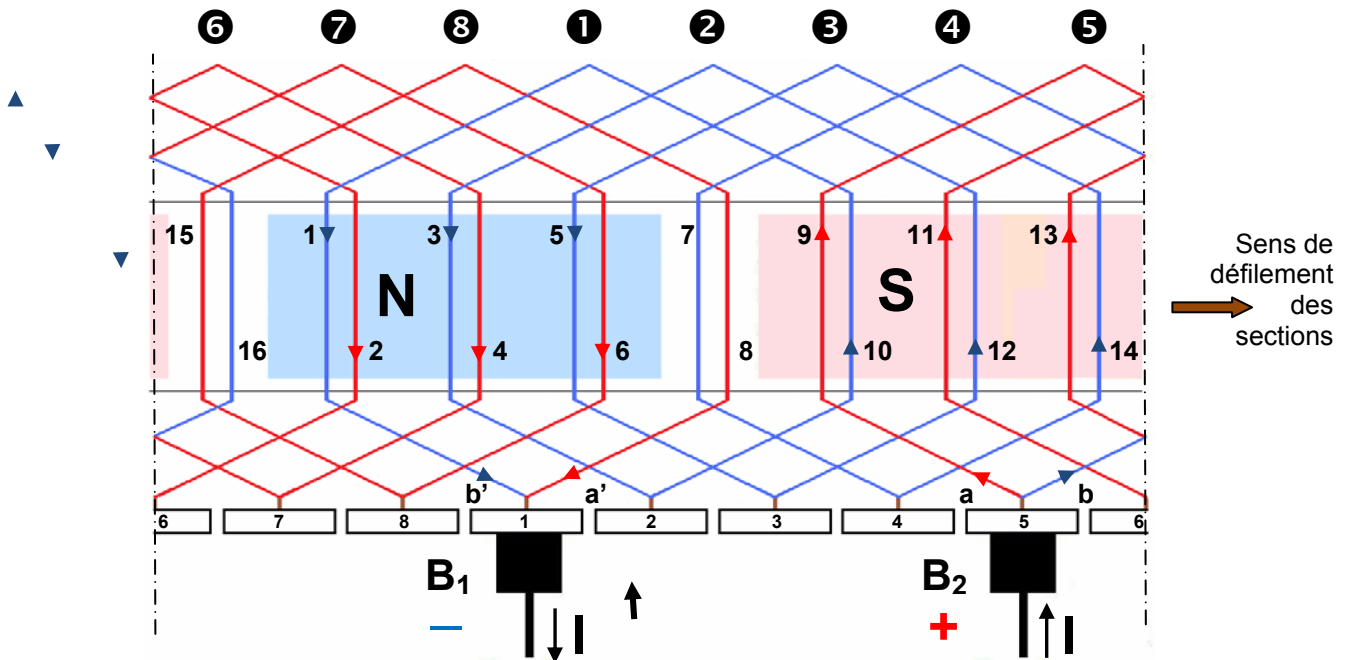


Fig. 8.4-6

La figure 8.4-6 met en évidence le principe du bobinage :

- la section **1** constituée des faisceaux 1 et 10 a son entrée soudée à la lame 1 et sa sortie soudée à la lame 2 du collecteur.
- la section **2** constituée des faisceaux 3 et 12 a son entrée soudée à la lame 2 et sa sortie soudée à la lame 3 du collecteur.
- la section **8** constituée des faisceaux 15 et 8 a son entrée soudée à la lame 8 et sa sortie soudée à la lame 1 du collecteur

Sur un tel schéma, les sections apparaissent imbriquées les unes dans les autres d'où l'appellation courante *enroulement imbriqué* de ce type de bobinage.

Le courant **I** fourni à l'induit entre par le balai **B₂** et en ressort par le balai **B₁**. A l'instant représenté, il se partage dans le bobinage en deux voies : l'une va de a vers a' (tracé rouge) et l'autre de b vers b' (tracé bleu).

Ces deux voies sont identiques car les faisceaux les composants sont dans des positions analogues par rapport aux pôles. On vérifie que le courant est bien dans un sens pour les conducteurs situés sous le pôle Nord, en sens inverse pour ceux situés sous le pôle Sud.

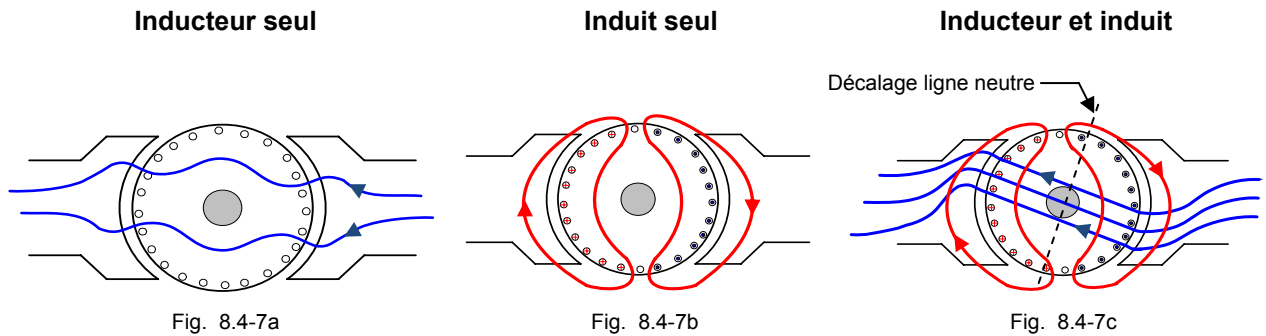
La fréquence des courants dans les conducteurs de l'induit est égale au nombre de leurs passages sous un pôle Nord par seconde soit :

$$f_r = p \cdot N$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{p} \text{ le nombre de paires de pôles de la machine,} \\ \mathbf{N} \text{ le nombre de tours par seconde du rotor.} \end{array} \right.$

Enroulement de compensation magnétique d'induit

Le passage du courant dans les enroulements d'induit crée un flux appelé flux de réaction d'induit. Les lignes de champ de ce flux traversent les pièces polaires de l'inducteur perpendiculairement à leurs axes, c'est pourquoi on dit que la réaction d'induit est transversale. Elles ont pour conséquence de déformer les lignes de champs dans la machine.



Ce phénomène, est très gênant car il entraîne une diminution du flux total. Il provoque :

- la saturation d'une partie des pièces polaires et la diminution du flux créé par les bobines inductrices,
- la création d'un flux dans la zone où se trouvent les faisceaux des sections en commutation et rendant ainsi celle-ci plus difficile,
- l'existence d'une inductance du bobinage de l'induit qui s'oppose aux variations rapides du courant dans ce bobinage.

Pour réduire ce phénomène, on place, dans les pôles inducteurs des machines de moyenne et forte puissance, des enroulements de compensation parcourus par le courant d'induit, ayant pour rôle de créer un champ antagoniste au champ transversal d'induit.

Cet enroulement de compensation est parcouru par le même courant que celui de l'induit. Il crée une force magnétomotrice égale et de sens opposé à celle créée par l'induit face aux pièces polaires (figure ci-dessous).

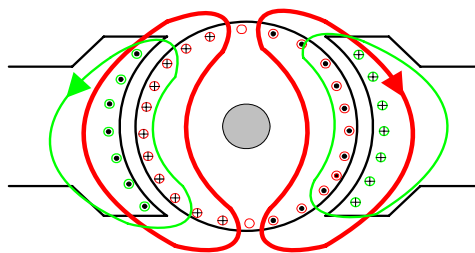


Fig. 8.4-8

Le phénomène de commutation

Nous avons montré que lorsqu'une section (ensemble de conducteurs logés dans des encoches distantes d'un pas polaire : $360^\circ / \text{nombre de paires de pôles}$) passe dans le plan neutre (endroit où la polarité magnétique change de signe dans l'entrefer), le courant doit s'inverser. Pendant ce passage, la section est mise en court-circuit par une ligne de balais et on peut écrire la relation :

$$r \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} = 0$$

avec

{	r	la résistance de la section en phase de commutation
	L	l'inductance de la section

On appelle commutation ce passage d'une section du bobinage de l'induit d'une voie à la suivante. L'inversion du sens de circulation du courant dans la section est d'autant moins facile que son induction, qui s'oppose à la variation du courant donc à son inversion, est grande. Si l'inversion du courant n'est pas terminée à la fin de la commutation, il y a apparition d'étincelles entre les lames du collecteur qui quittent les balais et ces derniers.

Ceci justifie le soin tout particulier apporté par les constructeurs des machines à courant continu pour :

- soit à réduire les f.e.m. qui sont en cause en multipliant le nombre de lames du collecteur (moins de spires par section et diminution de l'inductance L de chaque section).
- soit à réduire le courant de court-circuit de la section par un accroissement de la résistance de contact balai-collecteur (choix convenable du nombre et de la qualité des balais)

Différentes technologies de balais existent : les balais au charbon dur, les graphitiques, les électro-graphitiques, et les métallo-graphitiques.

Exemple de réalisation balais et porte balais

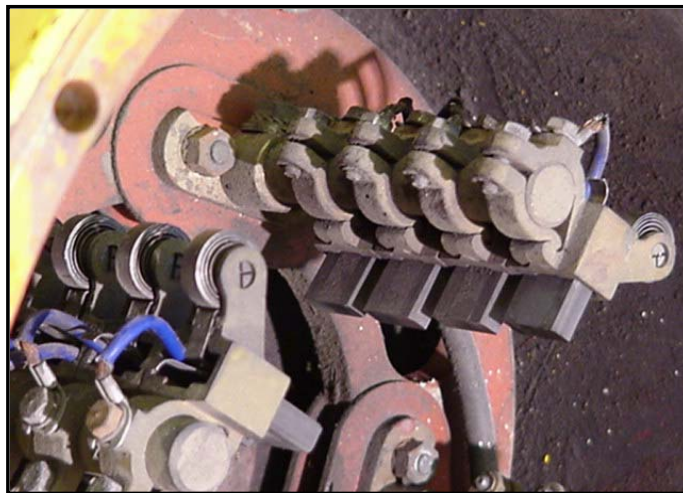


Fig. 8.4-9

On rencontre fréquemment des balais graphitiques car :

- le graphite s'use beaucoup plus vite que le cuivre (il est beaucoup plus facile et moins coûteux de remplacer les balais que de réusinier le collecteur),
- la chute de tension au contact balai-cuivre n'est pas négligeable et varie avec la densité de courant au contact, ce qui a un effet bénéfique sur la commutation,
- l'arc entre le cuivre et le graphite présente une résistance négative ce qui a pour conséquence à une extinction naturelle des étincelles.

On peut considérer que dans un contact glissant les pertes sont de nature mécanique à 35% et de nature électrique à 65%.

Si les propriétés particulières de l'association balai-cuivre sont suffisantes pour assurer une commutation correcte des machines de petite puissance, ceci est différent pour les machines de moyenne et forte puissance surtout lorsqu'elles sont destinées à avoir une grande durée de vie.

Il est alors nécessaire de générer une force électromotrice extérieure (pôles de commutation), pour faciliter l'inversion du courant dans la section en commutation.

On peut considérer que tous les moteurs à courant continu utilisés dans les applications de levage sont munis de ces pôles auxiliaires.

Les pôles de commutation sont placés entre les pôles principaux, c'est-à-dire sur une ligne neutre de la machine en face des sections en commutation. Destinés à n'agir que sur celles-ci, ils sont beaucoup moins larges que les pôles principaux, comme la montre la figure 8.4-10.

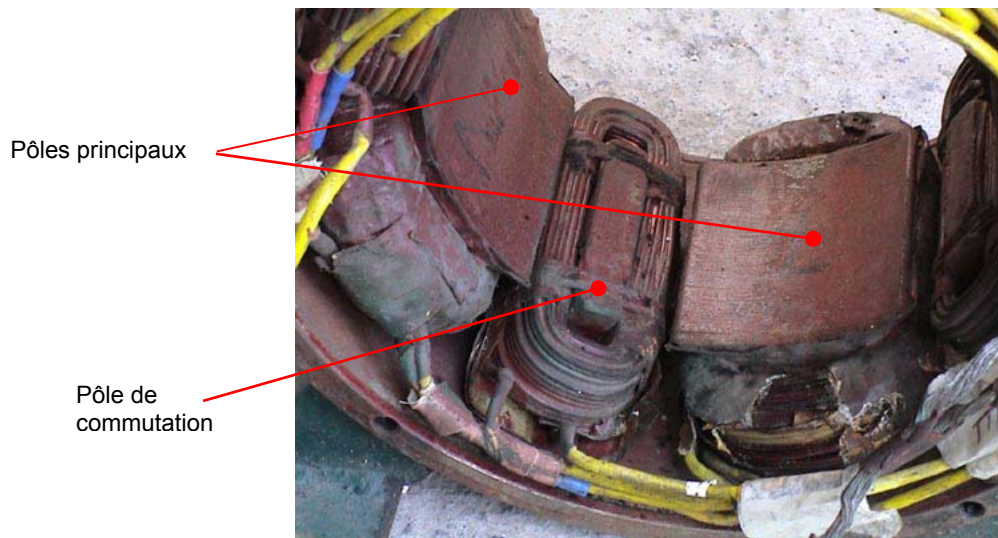


Fig. 8.4-10

Leurs enroulements sont parcourus par le même courant que l'induit. Leurs forces magnétomotrices sont calculées :

- pour générer dans les sections mises en court-circuit par les balais une force électromotrice qui assure l'inversion du courant,
- pour compenser la partie de la réaction induit non compensée par l'enroulement de compensation magnétique d'induit

Finalement, au stator de la majorité des machines à courant continu, on trouve en plus du bobinage inducteur parcouru par le courant d'excitation, l'enroulement de compensation et celui des pôles auxiliaires parcourus par le courant de l'induit.

Remarque

Les **étincelles de commutation des machines électriques** désignent l'apparition d'arcs électriques au niveau du collecteur d'une machine électrique.

Dans les machines à courant continu, nous avons vu que ce sont les **balais**, (charbons) qui permettent d'alimenter le collecteur (en fonctionnement moteur) ou de récupérer le courant venant du collecteur (en fonctionnement générateur). Ces balais permettent le contact à la partie mobile de la machine, le rotor. En raison de la vitesse de rotation relativement élevée, pendant le court instant où il y peut y avoir isolation galvanique des balais, des claquages peuvent alors survenir, visibles sous forme d'arcs électriques.

Comme la zone neutre se déplace en charge, au moment du changement de direction du courant (commutation), la tension d'induit n'est pas nulle. Ces différents phénomènes entraînent l'apparition d'étincelles de rupture, appelées étincelles de commutation. De plus les balais entrent un court instant en contact avec deux lamelles du collecteur simultanément, provoquant ainsi un court-circuit, qui à son tour entraîne l'apparition d'étincelles. Il en résulte un encrassement des lamelles et l'usure des balais.

Une machine électrique bien conçue doit avoir une commutation « noire », c'est-à-dire sans étincelles au niveau de l'ensemble collecteur-balais.

En annexe A8.2. vous retrouverez quelques exemples de photos montrant les états de surfaces de collecteurs de machines à courant continu (couleur, rayures, usure, etc.) que l'on peut rencontrer en utilisation industrielle.

L'examen de ces différents aspects, permet de mieux apprécier le bon usage d'une machine à courant continu et ainsi de mieux garantir sa longévité.

8.4.2. Relations fondamentales

8.4.2.1. Force électromotrice

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

Sur ce même principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.e.m. interne E .

Celle-ci apparaît aux bornes de l'induit et sa valeur est la somme des f.e.m. engendrées dans l'ensemble des spires divisée par le nombre de voies en parallèles, d'où la relation fondamentale :

$$E = \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi \cdot N$$

avec

{	n	le nombre de conducteurs de l'induit,
	p	le nombre de paires de pôles,
	a	le nombre de paires voies d'enroulement en parallèle dans l'induit,
	Φ	le flux inducteur par pôle,
	U	la tension aux bornes du circuit d'induit,
	N	la vitesse de rotation de la machine en tours par seconde.

Finalement :

$$E = K \cdot \Phi \cdot N \quad (1)$$

avec $K = \frac{p}{a} \cdot n \quad \Longrightarrow \quad K \text{ est une constante de construction de la machine}$

Lorsque la machine fonctionne à flux constant, l'équation se résume à l'expression suivante :

$$E = K' \cdot N$$

avec $K' = K \cdot \Phi$

En régime établi, l'énergie emmagasinée dans le champ magnétique de l'induit est constante. Toute la puissance UI fournie au circuit de l'induit est transformée soit :

- en puissance mécanique
- en pertes joules

Or, la force électromotrice d'un appareil est le quotient par le courant de la puissance qu'il transforme de la forme électrique en mécanique ou inversement.

On obtient donc la relation :

$$U \cdot I = R \cdot I^2 + E \cdot I$$

avec **R** la résistance totale du circuit de l'induit (bobinage rotor, pôles de commutation, enroulement de compensation, contacts balais-collecteur)

D'où l'équation des tensions :

$$U = R \cdot I + E \quad (2)$$

En remplaçant dans cette dernière relation E par son expression (1), on obtient l'équation :

$$U = R \cdot I + K \cdot \Phi \cdot N$$

De cette expression on peut en tirer l'équation de la vitesse :

$$N = \frac{U - R \cdot I}{K \cdot \Phi} \quad (3)$$

La vitesse est proportionnelle à la force électromotrice E, qui en fonctionnement normal diffère peu de la tension U. elle est inversement proportionnelle au flux.

Remarques

- l'étude des diverses façons de réaliser une machine à courant continu (bobinage, nombre de paires de pôles) montre que le rapport p/a n'est pas toujours égal à 1.
- Comme pour toutes les machines électromagnétiques, la force électromotrice est proportionnelle :
 - à la vitesse
 - et au flux
- le moteur étant un récepteur, les forces électromotrices induites dans les divers conducteurs de l'induit sont dirigées en sens inverse du courant qui les traverse.
- les f.e.m. dans les sections de bobinage du rotor sont alternatives, de fréquence f_r égale à $p \cdot N$. L'ensemble balais-collecteur joue le rôle de redresseur des tensions.

8.4.2.2. Couple électromagnétique

Considérons la figure ci-dessous :

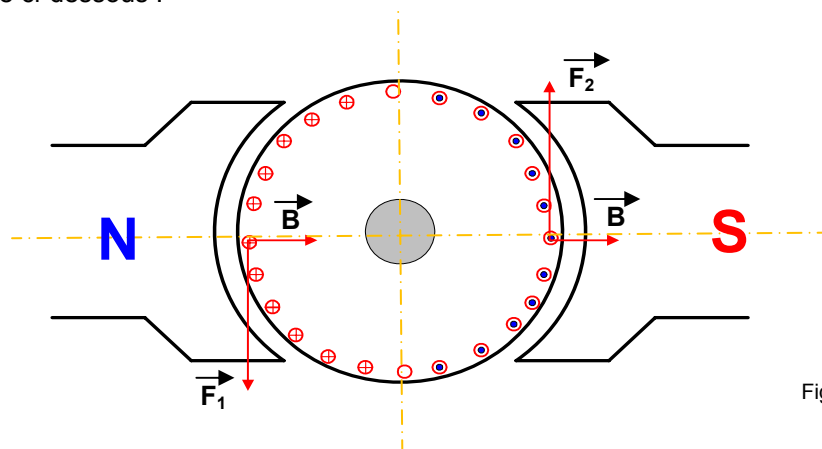


Fig. 8.4-11

Chaque conducteur est le siège d'une force créant un couple sur l'arbre de la machine.

Par exemple, si l'on considère les conducteurs d'une section placée dans le champ magnétique $\vec{B}$, ils subissent les forces de Laplace $\vec{F}_1$ et $\vec{F}_2$ formant un couple de forces qui s'exprime par la relation :

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

Leur somme génère le couple électromagnétique C_{em} .

On obtient ainsi l'expression générale du couple :

$$C_{em} = \frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi}$$

Remarques

Le couple électromagnétique de la machine dépend :

- des paramètres de construction, purement technologiques (p , a et n),
- du paramètre de fonctionnement interne, le flux inducteur sous un pôle Φ ,
- du paramètre de fonctionnement externe, le courant induit I .

On obtient la relation simplifiée :

$$C_{em} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot K \cdot \Phi \cdot I \quad (4)$$

avec $K = \frac{p}{a} \cdot n$ la constante de construction de la machine

A fonctionnement de la machine à flux constant, on exprime le couple de la machine de manière plus condensée par la relation :

$$C_{em} = K_c \cdot I$$

avec K_c la constante de couple de la machine

8.4.2.3. Couple utile

On peut définir le couple utile C_u comme le couple que le moteur transmet par son arbre à la charge entraînée. Il est un peu plus faible que le couple électromagnétique à cause des pertes rotoriques de la machine.

On distingue :

- les pertes mécaniques : p_m

Elles proviennent des frottements d'origine mécaniques dus aux paliers ou roulements de l'arbre moteur, aux contacts des balais sur le collecteur et enfin au frottement de l'air sur les ailettes assurant le refroidissement.

- les pertes dans le fer du rotor : p_f

Ce sont les pertes par hystérésis et courants de Foucault. Elles sont dues aux variations d'induction alternative à la fréquence $p \cdot n$ du fer rotorique. On réduit les courants de Foucault et ainsi l'importance des pertes induites en réalisant le tambour sous forme de disques séparés par un isolant (papier ou film plastique).

Le couple utile C_u a pour expression :

$$C_u = C_{em} - \frac{p_m + p_f}{2\pi \cdot N} \quad (5)$$

8.4.2.4. Rendement

Si on effectue un bilan complet des puissances pour une machine réelle, on observe sur la figure ci-dessous la répartition des puissances utiles et celles qui traduisent les pertes internes mécaniques ou électriques.

Il existe plusieurs types de pertes dans un moteur à courant continu :

- les pertes par effet joule dans l'inducteur : $p_{exci} = r \cdot i_{exc}^2 = \frac{u_{exc}^2}{r} = \frac{u_{exc}}{i_{exc}}$
- pertes par effet Joule dans l'induit (pertes cuivre) : $p_{ji} = R \cdot I^2$
- les pertes dans le fer : p_f
- les pertes mécaniques : p_m

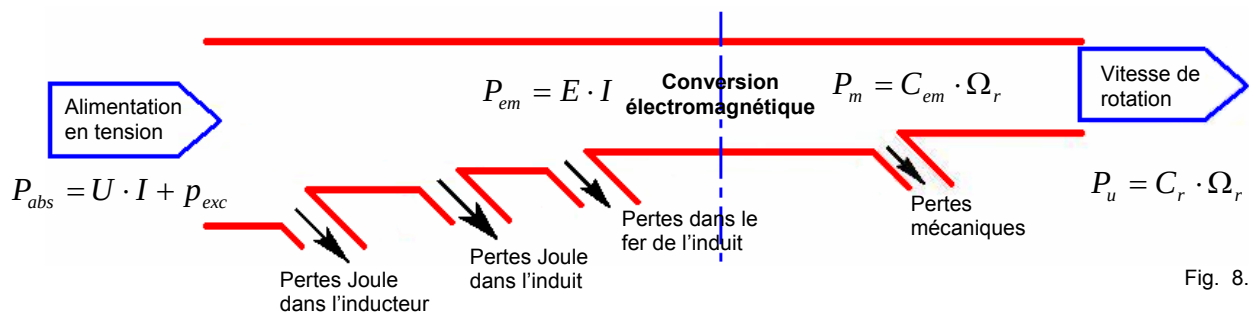


Fig. 8.4-12

Le rendement η d'un moteur à courant continu est le quotient de la puissance utile P_u disponible sur l'arbre par la puissance électrique absorbée en ajoutant à l'induit la puissance du circuit d'excitation. Le rendement, toujours inférieur à un à cause des pertes, est donné par l'équation :

$$\eta = \frac{U \cdot I - R \cdot I^2 - p_m - p_f}{U \cdot I + p_{exc}}$$

8.4.2.5. Réversibilité

Comme toutes les machines électromagnétiques, le moteur à courant continu est réversible. Si on lui fournit de la puissance mécanique sur son arbre au lieu d'en prendre, les forces de Laplace qui s'exercent sur les faisceaux rotoriques deviennent alors résistantes et s'opposent à la rotation du rotor. Il en résulte alors que la machine à courant continu débite de la puissance électrique au lieu d'en consommer : elle fonctionne alors en génératrice.

L'inversion du sens d'écoulement de la puissance ne change pas le signe de la f.e.m., puisque celle-ci ne dépend que du flux inducteur et du sens de rotation.

C'est le *signe du courant* qui lui est inversé : au lieu d'être absorbé, il est débité.

Les relations fondamentales en régime de fonctionnement moteur d'une machine à courant continu (f.e.m., tension et couples) sont utilisables pour la marche en générateur, à condition de tenir compte du fait que le courant I est alors négatif.

Le couple électromagnétique C_{em} est maintenant négatif, il s'agit d'un couple de freinage. Pour avoir le couple mécanique que l'on doit fournir à la machine, il faut ajouter à C_{em} le couple correspondant aux pertes mécaniques et aux pertes dans le fer. Le rendement du générateur a pour expression

$$\eta = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + R \cdot I^2 + p_m + p_f + p_{exc}}$$

8.4.2.6. Modèle équivalent de la machine à courant continu

En régime dynamique, le schéma équivalent de l'induit dans la configuration récepteur est le suivant :

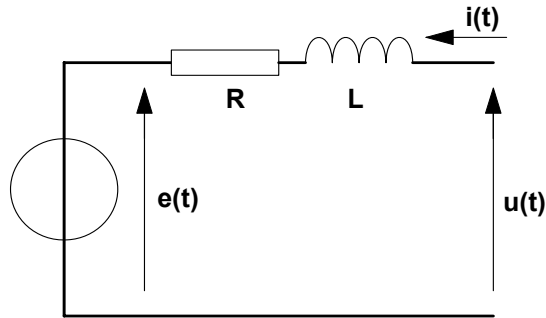


Fig. 8.4-13

avec	{	R	la résistance totale de l'induit
		L	l'inductance totale de l'induit
		e(t)	la force électromotrice
		u(t)	la tension d'alimentation
		i(t)	le courant absorbé

De ce schéma, on en déduit les équations de fonctionnement de la machine à courant continu en régime dynamique :

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u(t) = e(t, \Omega, \Phi_T) + R \cdot i(t) + L \frac{di}{dt} \\ e(t, \Omega, \Phi_T) = K \cdot \Phi_T \cdot \Omega(t) \\ c_e(t) = K \cdot \Phi_T \cdot i(t) \\ c_e(t) - c_r(t, \Omega) = J_T \cdot \frac{d\Omega}{dt} \end{array} \right.$$

Avec Φ_T le flux total dans la machine, C_r l'ensemble des couples résistants incluant les couples de pertes de la machine et J_T l'inertie totale en rotation ramenée à l'arbre moteur.

En supposant le flux d'excitation constant et le couple de perte de la machine $C_p = f \cdot \omega$, ces équations deviennent, en utilisant la variable de Laplace p :

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U(p) = R \cdot \left(1 + \frac{L}{R} \cdot p\right) \cdot I(p) + K \cdot \Omega(p) \\ J_T \cdot p \cdot \Omega(p) = K \cdot I(p) - C_r(p) \\ C_r(p) = C_{ch}(p) + C_p(p) \end{array} \right.$$

Soit :

$$f \left(1 + \frac{J_T}{f} \cdot p\right) \cdot \Omega(p) = K \cdot I(p) - C_{ch}(p)$$

Ce qui permet de construire le schéma fonctionnel ci-dessous :

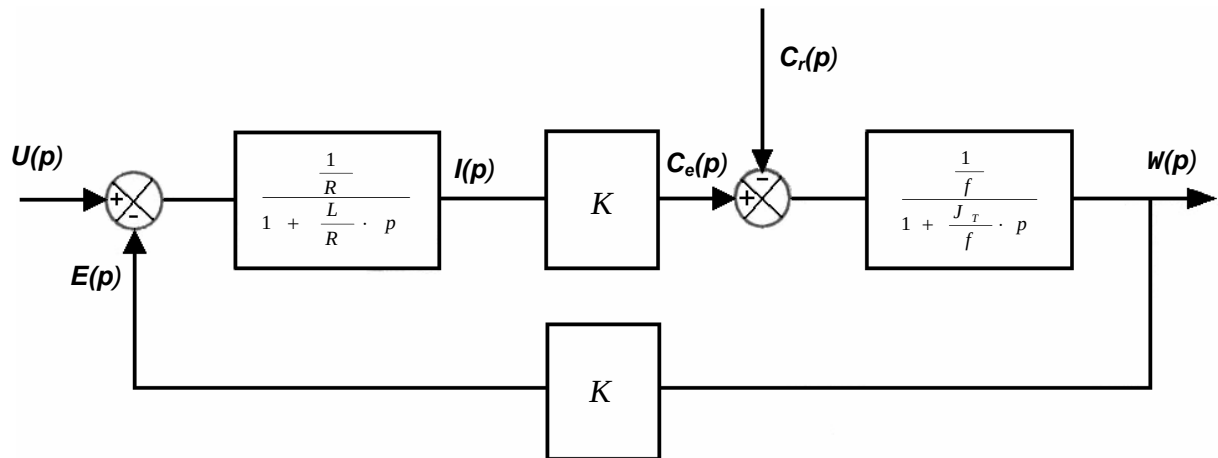


Fig. 8.4-14

8.4.2.7. Représentation schématique de la machine à courant continu

La représentation schématique de la machine à courant continu rappelle les éléments de sa structure, par exemple, la figure 8.4-15 symbolise une MCC à excitation séparée.

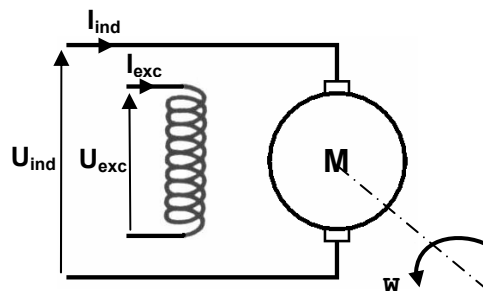


Fig. 8.4-15

On remarque :

- un cercle représentant le rotor,
- les connexions d'induit au travers les balais,
- le symbole de l'inductance pour l'inducteur.

8.4.3. La variation de vitesse du moteur à courant continu

8.4.3.1. Historique

Avant l'emploi des variateurs de vitesse électroniques, si l'on excepte le cas particulier des systèmes Ward-Léonard, l'alimentation des moteurs à courant continu s'effectuait sous tension constante. Lorsque le moteur était à l'arrêt, on ne pouvait pas appliquer brutalement aux bornes de la machine la tension nominale de fonctionnement car l'intensité traversant l'induit aurait atteint une valeur destructrice car limitée uniquement par la résistance du circuit d'induit.

Les techniques de démarrage nécessitaient alors de placer en série avec l'induit une résistance variable de puissance (rhéostat) dont on éliminait progressivement des portions au fur et à mesure de la montée en vitesse. Le démarrage terminé (induit sous pleine tension), si l'application nécessitait de fonctionner au-delà de la vitesse nominale, on diminuait le courant d'excitation en agissant sur un second rhéostat.

Suivant la manière de brancher le circuit inducteur par rapport au circuit d'induit, on distinguait trois types de moteurs :

- le moteur à excitation shunt : l'inducteur est connecté en parallèle avec l'induit,
- le moteur à excitation série : l'inducteur et l'induit sont raccordés en série,
- le moteur à excitation compound : l'inducteur est composé des deux éléments shunt et série

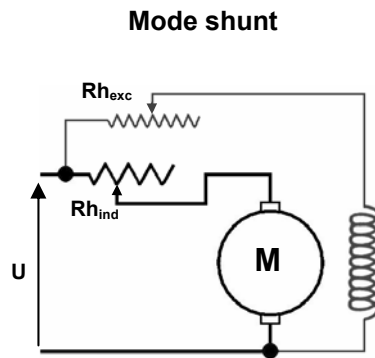


Fig. 8.4-16a

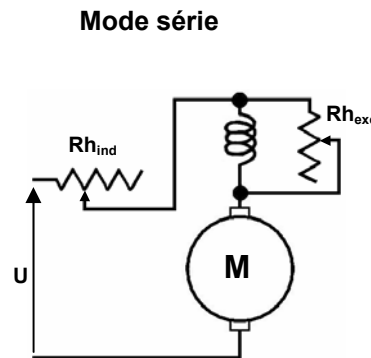


Fig. 8.4-16b

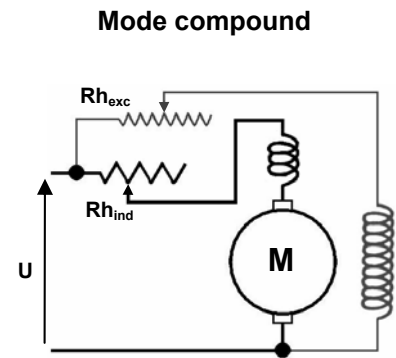


Fig. 8.4-16c

8.4.3.2. La variation de vitesse du moteur continu à excitation indépendante

Introduction

La machine à courant continu a été durant de nombreuses années l'actionneur principalement utilisé dans les applications à vitesse variable nécessitant une parfaite maîtrise de la vitesse et du couple délivré par la machine sur une grande plage de fonctionnement, et cela malgré son principal inconvénient résidant dans une relative complexité liée à la présence du collecteur (environnement, entretien périodique de contrôle des balais et des lames de collecteur).

En effet, comme cela a été mis en évidence par la relation fondamentale de la vitesse, le contrôle de la vitesse de rotation peut être aisément réalisé en agissant sur la tension U aux bornes de l'induit ou en modifiant le flux inducteur F .

Les moteurs à courant continu utilisés en manutention-levage sont généralement alimentés en excitation indépendante, c'est-à-dire que le dispositif de variation de vitesse comporte deux sources distinctes (asservies ou non), l'une de faible puissance pour alimenter l'inducteur, l'autre de forte puissance pour alimenter l'induit.

Dans ce cas, pour faire varier la vitesse on agit par variation de la tension U appliquée à l'induit, tout en maintenant le flux constant. C'est le domaine de fonctionnement à couple constant.

L'action sur le flux n'est utilisée que :

- soit pour étendre la gamme des vitesses réalisables (fonctionnement couple réduit) lorsque la tension nominale du moteur est atteinte. C'est le domaine de fonctionnement à puissance constante,
- soit pour lorsqu'il ajuster la force contre électromotrice aux bornes des induits lorsque plusieurs moteurs sont alimentés par un générateur unique (équilibre des courants dans les induits).

Caractéristiques en régime permanent

Les caractéristiques en régime permanent sont établies à partir des équations fondamentales de fonctionnement de la machine à courant continu présentées précédemment :

$$E = K \cdot \Phi \cdot N \quad (1)$$

$$U = R \cdot I + E \quad (2)$$

$$N = \frac{U - R \cdot I}{K \cdot \Phi} \quad (3)$$

$$C_{em} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot K \cdot \Phi \cdot I \quad (4)$$

Les caractéristiques obtenues sont des droites paramétrées par la tension d'alimentation d'induit (zone A) jusqu'à la tension d'alimentation maximale. Il est toutefois possible d'envisager une vitesse plus élevée en défluxant la machine (diminution du courant inducteur), si la caractéristique de la charge entraînée le permet car le couple maximal disponible diminue d'autant (zone B).

Puisque la tension U aux bornes de l'induit peut être inversée et que le courant I le traversant peut l'être également, le moteur peut fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse.

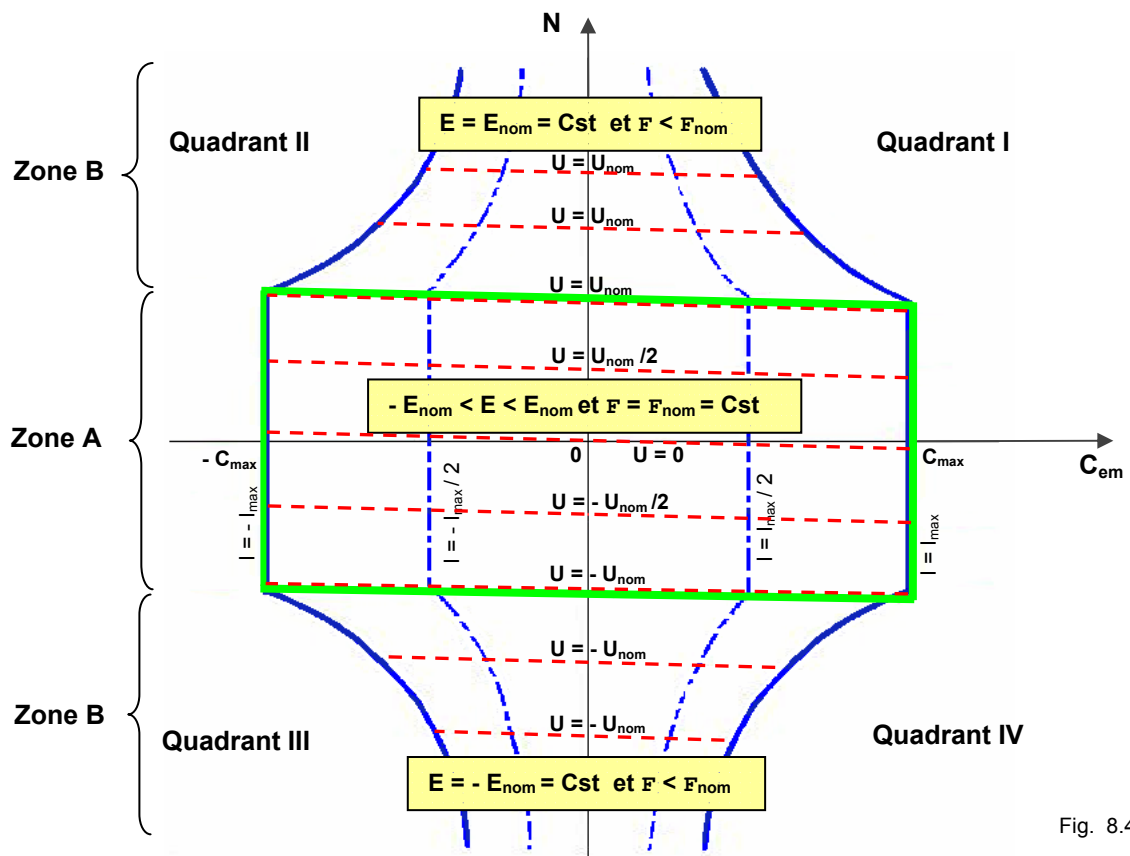


Fig. 8.4-17

On distingue sur la caractéristique ci-dessus 4 zones de fonctionnement dépendant du signe du couple et de la vitesse. Ce sont les quadrants de fonctionnement de la machine.

Les quadrants I et III traduisent un fonctionnement de la machine en moteur dans les deux sens de rotation, alors que les quadrants II et IV traduisent un fonctionnement de la machine en générateur dans les deux sens de rotation.

De même, si l'on se place sur un plan électrique, il est possible de définir, en fonction des signes des grandeurs électriques d'alimentation U et I (quadrant électrique), les signes des grandeurs mécaniques C et N ou W correspondants (quadrant mécanique). Il faut néanmoins remarquer que si l'on tient compte de la résistance d'induit et des frottements secs, les quadrants de fonctionnement électrique et mécanique ne se superposent pas. Le nombre de quadrants de fonctionnement est exclusivement limité par le type de convertisseur alimentant la machine.

Fonctionnement à couple constant (zone A)

Quand la tension U a atteint sa valeur maximale U_n , si on veut étendre la gamme des vitesses possibles, on

Fonctionnement
Dans la zone où on fait varier la vitesse par la tension U d'alimentation de l'induit, on maintient le *flux Φ constant*, en faisant passer dans l'inducteur le courant d'excitation nominal (courant tolérable en régime permanent sans échauffement anormal).

On peut alors développer, à la valeur nominale I_n du courant de l'induit, le couple électromagnétique nominal C_n à toutes les vitesses, d'où le qualificatif de "à couple constant" donné à ce mode de fonctionnement.

Pour caractériser le moteur, on indique :

- sa tension nominale U_n ,
- son courant nominal I_n ,
- sa vitesse nominale N_n .

La tension U_n et le courant I_n nominaux sont les valeurs que la machine peut supporter en régime permanent sans échauffement anormal et avec une bonne commutation au collecteur.

La tension nominale correspond aussi à la valeur maximale de la tension que peut fournir le convertisseur qui alimente la machine.

Pendant les démarrages et les freinages rapides, si le convertisseur peut le débiter, on tolère dans l'induit un courant $I_{\max}$ supérieur à I_n , pour avoir un couple, $C_{\max}$, supérieur au couple nominal C_n .

La vitesse nominale N_n est celle qui correspond à E_n et I_n . On doit indiquer aussi la vitesse maximale $N_{\max}$ que le moteur peut mécaniquement supporter.

Remarques :

Si le moteur à courant continu peut fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse,

- les quadrants utilisés dépendent de l'application à laquelle est destiné l'entraînement
- les quadrants utilisables sont déterminés par les réversibilités du convertisseur qui alimente le moteur :
 - quadrant 1 : convertisseur non réversible en courant et en tension,
 - quadrant 1 et 2 : convertisseur réversible uniquement en courant,
 - quadrant 1 et 4 : convertisseur réversible uniquement en tension,
 - quadrant 1, 2, 3 et 4 : convertisseur réversible en courant et tension

Fonctionnement à puissance constante (zone B)

Quand la tension U a atteint sa valeur maximale U_n , si on veut étendre la gamme des vitesses possibles, on diminue le flux inducteur Φ . Mais cela se fait au détriment du couple que le moteur peut développer à courant dans l'induit I donné.

Les relations (3) et (4) sont toujours utilisables. Mais maintenant U reste maintenu constant et égal à U_n , c'est Φ qui varie. On obtient le nouveau système d'équations :

$$N = \frac{U_n - R \cdot I}{K \cdot \Phi}$$

et

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot K \cdot \Phi \cdot I$$

La puissance transformée, s'exprime donc par l'égalité suivante :

$$2 \cdot \pi \cdot N \cdot C = U_n \cdot I - R \cdot I^2$$

A courant I donné, on constate que la puissance transformée reste constante. D'où le nom de marche "à puissance constante" donné à ce mode de fonctionnement

Par désexcitation, il est normalement possible d'augmenter la vitesse dans le rapport de 1 à 2,5, pour autant que cette variation de vitesse ait été prévue lors de la construction de la machine.

On peut augmenter cette variation en agissant au niveau de la conception du moteur en adoptant des dispositions constructives spéciales telles que :

- adoption d'un enroulement de compensation,
- augmentation de l'entrefer principal pour diminuer l'influence des ampèretours d'induit,
- surdimensionnement de la machine, dans le même but.

Malgré tout, du fait des problèmes de commutation, la vitesse maximale dépasse rarement 2 à 3 fois la vitesse nominale.

Le rapport $N_{\max} / N_n$ est souvent appelé "coefficient de souplesse".

Toujours à cause de la commutation, il faut réduire le courant maximum tolérable de façon transitoire aux vitesses élevées, ce qui entraîne une réduction supplémentaire du couple.

Le freinage rhéostatique

Si le convertisseur alimentant le moteur n'est pas réversible en courant, il est néanmoins possible de freiner électriquement en connectant l'induit à une résistance R_h selon le schéma de principe ci-dessous.

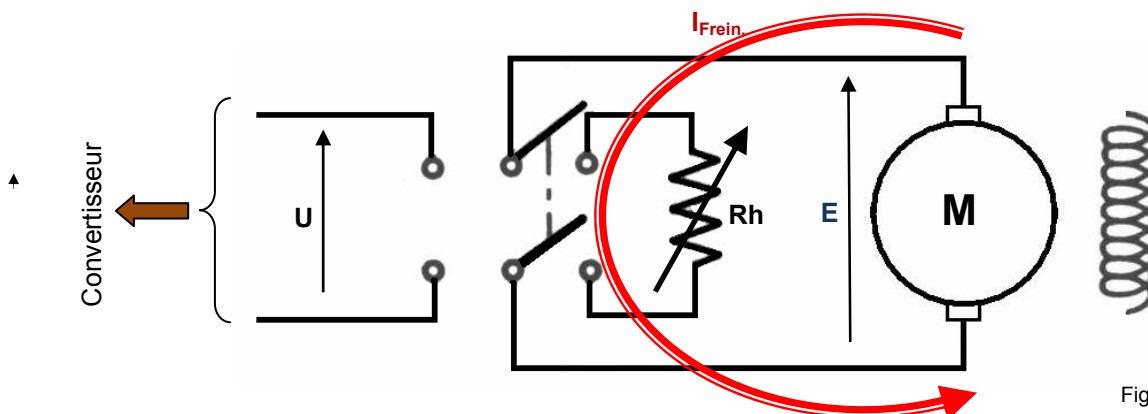


Fig. 8.4-18

Entraînée par la charge qu'elle freine, la machine fonctionne en générateur. Le courant I traversant l'induit s'inverse et devient alors négatif.

Nous avons alors les égalités suivantes :

$$E + R \cdot I = \frac{p}{a} \cdot n \cdot N \cdot \Phi + R \cdot I = -Rh \cdot I$$

On en déduit la relation exprimant la loi de vitesse du moteur

$$N = \frac{-(R + Rh) \cdot I}{\frac{p}{a} \cdot n \cdot \Phi}$$

D'où les caractéristiques N (I) tracées ci-dessous pour diverses valeurs de la résistance de freinage Rh.

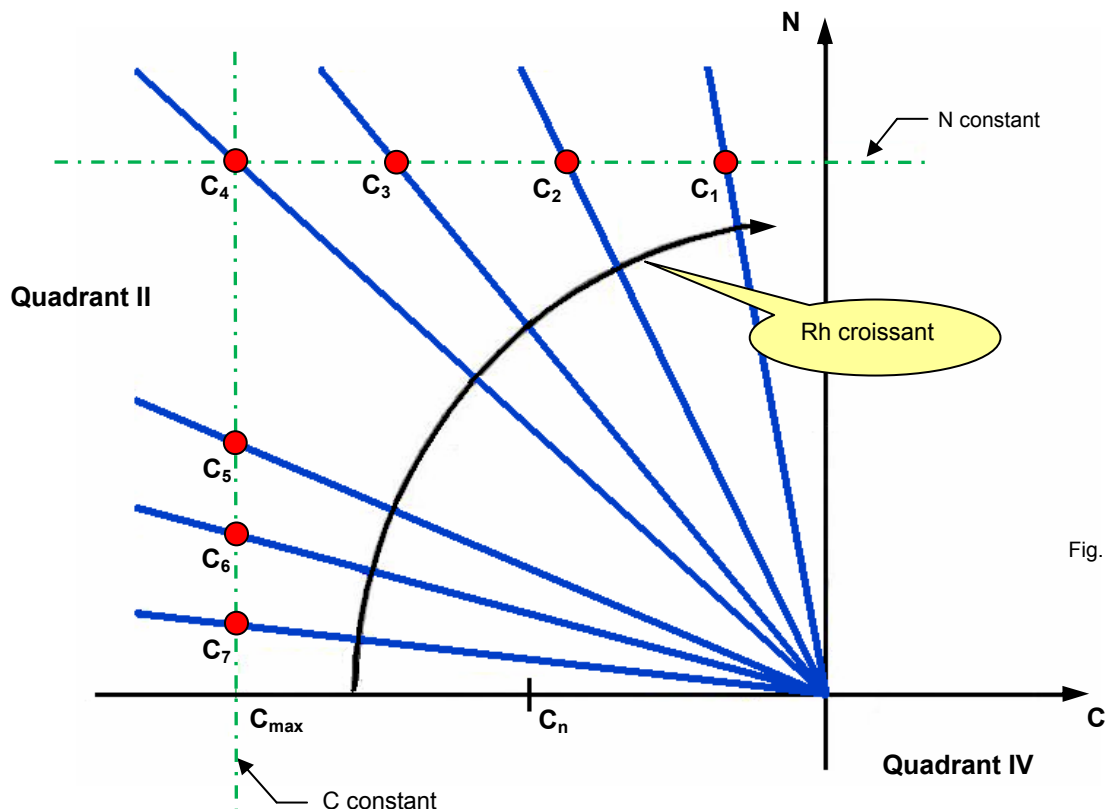


Fig. 8.4-19

Par action sur la valeur de cette résistance, dans laquelle on dissipe l'énergie prise à la charge freinée, on peut faire :

- du freinage à "vitesse constante" (points C₁, C₂, C₃)
- ou
- du freinage à couple constant (points C₄, C₅, C₆) en vue d'un arrêt rapide.

Dans ce cas on est limité au point C₇ qui correspond à la mise en court-circuit de l'induit.

Le fonctionnement est symétrique pour le quadrant de freinage IV

Dans certains cas, il faut prévoir le freinage rhéostatique en secours pour le cas où le freinage par récupération ne peut fonctionner en particulier lorsque le convertisseur de puissance est dans l'incapacité à contrôler le courant de freinage (coupure du réseau d'alimentation, dysfonctionnement du convertisseur, etc.). On rencontre ces dispositifs de freinage d'urgence dans les automatismes de certains engins de transport de personnes tels que les téléphériques et les funiculaires.