

Chapitre 2

LA MACHINE A COURANT CONTINU

2.1 Construction, principe de fonctionnement

La machine à courant continu (MCC) est une machine qui fournit au réseau ou consomme de celui-ci le courant continu. Le fonctionnement de la MCC comme celui de la machine à courant alternatif est basé sur la loi d'induction électromagnétique. Sa constitution est semblable à celle de la machine synchrone inversée, dans laquelle la partie fixe – l'inducteur – crée le flux magnétique principal Φ_E et dans l'induit s'effectue le processus de transformation électromécanique de l'énergie : électrique en mécanique (moteur) ou au contraire – mécanique en électrique (générateur). Le schéma électromagnétique de la MCC est représenté sur la fig. 2.1.

L'inducteur se compose de pôles principaux (PP), du bâti et de pôles complémentaires (PC) (ceux-ci ne se retrouvent pas dans les micros - machines). Les pôles principaux créent le flux magnétique principal dans la machine, c'est pour cela on y monte soit les aimants permanents (machines électriques à excitation magnétoélectrique) soit des bobines d'excitation, dont les courants créent la valeur exigée du flux magnétique principal de la machine.

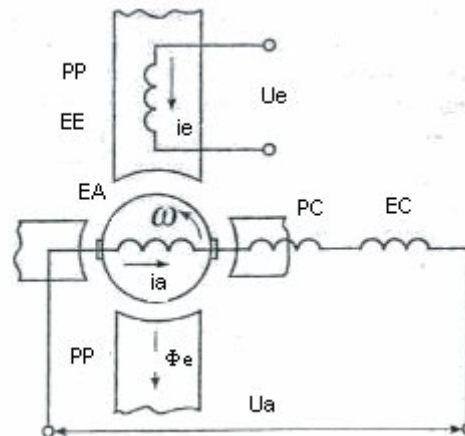


Fig. 2.1 : Schéma électromagnétique de la machine à courant continu

Le nombre de pôles principaux est toujours pair, en plus de cela, les pôles nord et sud sont intercalés. La puissance consommée par les circuits d'excitation est de 0.5 – 3.0% de la puissance nominale de la machine à courant continu. Ainsi avec l'augmentation de la puissance de la machine, la valeur relative des pertes de puissance à l'excitation diminue. Les

circuits magnétiques des pôles sont confectionnés sous forme de paquets de tôles d'acier électrotechnique d'épaisseur 0.5 -1.0 mm.

Comme la MCC est par essence un convertisseur électromécanique d'une forme d'énergie en une autre et fonctionne sur la base de l'induction électromagnétique, il est clair qu'il est nécessaire que le courant alternatif circule au moins dans une partie de ses enroulements. Dans la MCC cette fonction est jouée par l'enroulement de l'induit.

Pour obtenir du courant alternatif dans l'enroulement de l'induit, on place sur l'arbre de la machine un commutateur mécanique - l'ensemble collecteur balaie. L'enroulement de l'induit est lié au collecteur. Ce dernier est un bloc de plaques en cuivre d'épaisseur 3 - 15 mm, isolées les unes des autres par des joints isolants d'épaisseur 1 mm.

Lors de la rotation de l'induit dans le champ magnétique fixe à la vitesse n une f.e.m. est induite dans les sections de son enroulement, la fréquence de celle-ci est déterminée par l'expression

$$f_2 = \frac{pn}{60}$$

Le collecteur transforme la f.e.m. variable (fig. 2.2) induite dans les sections reliées en série de l'enroulement de l'induit en une f.e.m. constante (continue) E entre les balaies A et B du collecteur. A l'aide de ceux-ci l'enroulement de l'induit tournant est relié au circuit extérieur à courant continu. Entre les balaies diamétralement opposées A et B (fig. 2.2 b) une tension alternative est appliquée, le vecteur de celle-ci ne varie pas dans le temps et est égale à la grandeur E pour les branches supérieure et inférieure de l'enroulement de l'induit. Pour diminuer la pulsation de la f.e.m. lors du passage des balaies d'une plaque du collecteur à l'autre, on fait de telle sorte qu'il se passe dans chaque branche parallèle de l'enroulement de l'induit la connexion de pas moins de 16 conducteurs actifs.

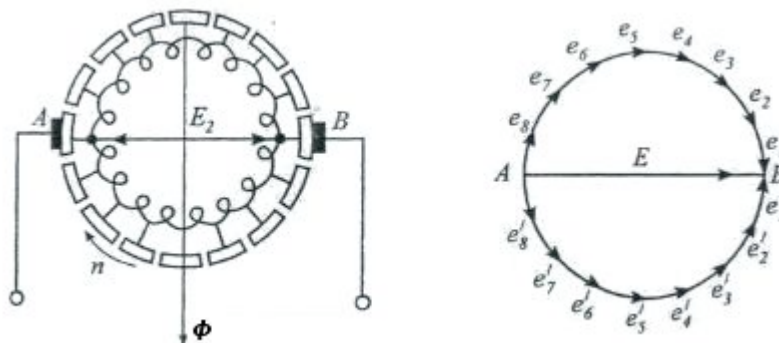


Fig. 2.2 : Formation de la f.e.m. de l'induit

2.2 Force électromotrice de rotation et couple de la machine à courant continu

La fig. 2.2 b montre, qu'avec les mêmes paramètres des branches supérieure et inférieure et un circuit extérieur ouvert le courant dans toutes les deux branches est égal à zéro, car les forces électromotrices qui se forment dans les deux branches, sont de sens opposés. La valeur de la f.e.m. est maximale, si les balais sont placés sur la ligne géométrique neutre (ligne qui passe par le centre de l'induit et perpendiculaire à l'axe des pôles principaux). Sur cette ligne on place généralement les balais A et B. Lors de la rotation de l'induit de la machine le vecteur f.e.m. E reste invariant, son module est déterminé par :

$$E = \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} e_i = v_a l_a \sum_{i=1}^{\frac{N}{2a}} B_x = c_e \omega \Phi, \quad (2.1)$$

où Φ - le flux magnétique ;

v_a - la vitesse circulaire de l'induit ;

l_a - la longueur de la partie du conducteur plongée dans le champ magnétique ;

B_x - l'induction magnétique au point x de l'entrefer de la machine ;

N - le nombre de conducteurs actifs de l'enroulement de l'induit ;

a - le nombre de branches parallèles ;

$c_e = \frac{pN}{60a}$ - le coefficient de construction qui est déterminé par les paramètres de la machine à

courant continu et ne dépend pas du régime de son fonctionnement.

La grandeur du moment électromagnétique de la machine à courant continu M peut être déterminée par la formule :

$$M = c_M \Phi i_i, \quad (2.2)$$

où i_i - le courant dans le circuit de l'induit ;

c_M - coefficient de construction de la machine.

Comme le sens du courant de l'induit dépend du régime de fonctionnement (générateur ou moteur), alors le couple du moteur sera soit un couple de freinage (régime de générateur), soit moteur (régime de moteur).

2.3 Réaction de l'induit de la machine à courant continu

Le couple électromagnétique de la MCC est le résultat de l'interaction des forces magnétisantes des enroulements d'excitation et de l'induit. Sous l'influence du champ de l'induit le caractère du champ magnétique résultant dans l'entrefer de la machine se distorde. Ce phénomène est communément appelé la réaction de l'induit. Si le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé, alors la réaction transversale de l'induit distorde seulement la carte du champ magnétique dans l'entrefer, cependant la grandeur du champ magnétique reste pratiquement invariable.

Dans le but d'améliorer les indices de masse et de gabarit des machines à courant continu on augmente l'induction jusqu'à un degré où le point de fonctionnement de la machine sur la courbe de magnétisation soit proche de sa partie saturante. Dans ce cas l'augmentation du flux à l'extrémité des principaux pôles où les champs s'additionnent sera plus petite que sa diminution à l'autre extrémité, où ils se retranchent. Cela s'explique par le fait que la saturation se manifeste dans la majeure des cas dans la partie des pôles principaux où les champs s'additionnent. Comme résultat le flux des PP diminue, ou en d'autres termes, la réaction transversale de l'induit démagnétise la machine.

Dans certains cas, le flux magnétique des PP est affaibli, et l'action de démagnétisation de la réaction transversale de l'induit peut provoquer un basculement du sens du champ (renversement) sous l'une des extrémités du pôle. C'est pour cela que dans les machines à courant continu de puissance, supérieure à 50 KW, la grandeur de l'entrefer est choisie de telle sorte que sous une charge maximale qu'il n'y ait pas de basculement du champ. Pour les machines de grande puissance, on fait de telle sorte que la grandeur de l'entrefer à l'extrémité des PP soit plus grande qu'au centre.

La méthode la plus efficace pour lutter contre les effets négatifs de la réaction de l'induit est l'utilisation de l'enroulement de compensation (EP, fig. 2.1) Cet enroulement est placé dans les encoches des patins (sabots) des PP. La grandeur et le sens du courant dans cet enroulement sont choisis sur la base de la condition de neutralisation de la distorsion de la forme du champ magnétique dans l'entrefer par la réaction de l'induit.

Dans le cas, où le noyau ferromagnétique est confectionné à partir de l'acier moulé, lors des brusques variations du courant de l'induit le champ magnétique de l'enroulement de compensation par suite de l'action d'écran des courants tourbillonnaires sera en retard sur le champ magnétique de la réaction d'induit. C'est pour cela il est utile d'utiliser en qualité de noyau ferromagnétique la tôle en acier électrotechnique.

L'enroulement de compensation exige plus de fils conducteurs et c'est pourquoi il est utilisé seulement dans les cas où la machine est destinée à travailler dans des lourdes conditions d'exploitation.

2.4 Commutation de la machine à collecteur et courant continu

Le processus de la commutation est lié au passage de la section de l'enroulement de l'induit d'une branche parallèle à l'autre et au changement du sens du courant dans cette section. Au début du processus de commutation, la section de l'enroulement de l'induit est court-circuitée, et à la fin, elle est connectée au circuit d'une autre branche de l'enroulement d'induit. La qualité de la commutation détermine essentiellement la capacité de fonctionnement de la machine et sa fiabilité d'exploitation. La commutation provoque des étincelles sous les balais. En dehors des causes électromagnétiques, les causes mécaniques influent beaucoup sur la qualité de la commutation. La lutte contre celles-ci est difficile à cause de toute série de contraintes. Les causes électromagnétiques sont dues au caractère insatisfaisant de la circulation du courant dans la section court-circuitée. On peut considérablement améliorer la commutation de la machine à collecteur en changeant ce caractère.

Dans les machines modernes à courant continu la vitesse moyenne de la variation du courant dans la section en commutation est très grande. C'est pour cela il peut y apparaître une valeur considérable de la f.e.m. due soit à l'action de commutation de la section elle-même, soit de la commutation des sections, qui se trouvent sous les pôles voisins, si les cotés de ces sections possèdent une liaison inductive mutuelle, causée par la disposition des sections en commutation dans des encoches communes.

Généralement on regroupe les f.e.m. d'auto-induction et d'induction mutuelle en une f.e.m. commune, appelée f.e.m. réactive. Dans les machines de puissance 5 KW et plus, cette f.e.m. est considérable. C'est pour cela, sa compensation est effectuée à l'aide de pôles complémentaires (PC) (fig. 2.1), qui créent un champ extérieur d'intensité nécessaire et de sens :

$$e_r + e_c = 0 \quad (2.3)$$

où e_r , e_c - les f.e.m. réactive et de commutation.

Les pôles complémentaires possèdent des noyaux magnétiques étroits fixés à la culasse entre les principaux pôles. L'enroulement des pôles complémentaires est relié en série

avec celui de l'induit, la section transversale du circuit magnétique doit permettre l'absence en son sein de saturation. C'est pour cela avec une charge nominale la valeur de l'induction ne doit pas dépasser 1 T. Les noyaux magnétiques sont confectionnés de façon moulée ou feuilletée.

Les pôles complémentaires sont utilisés dans les machines de puissance de plus de 0.3 KW, leur utilisation permet d'augmenter la charge linéaire de la machine et en même temps améliore son indice masse gabarit et diminue son prix.

Dans le but de diminuer l'influence des brouilles radiophoniques dues à la commutation sur l'appareillage extérieur, on procède au centrage du circuit de l'induit de la machine à courant continu, pour cela l'enroulement des pôles complémentaires est divisé en deux parties. Entre la carcasse de la machine et les balaies on installe des condensateurs pour shunter la composante à haute fréquence de la tension aux bornes de la machine.

Les machines à collecteurs ont une série d'inconvénients :

- l'expérience dans l'exploitation des machines à collecteur a montré qu'en moyenne 25% des pannes (et dans les dispositifs de transport 44 – 66%) surviennent à cause du complexe collecteur - balaie
- l'utilisation du contact balaie dans les conditions naturelles à des hauteurs de plus de 20 Km est pratiquement impossible, et l'utilisation du contact balaie dans les milieux agressifs n'est pas recommandée ;
- Les conditions de la commutation n'autorisent pas de dépasser les vitesses linéaires limites au niveau du contact. Cela ne permet pas de réaliser des constructions effectives des convertisseurs électromécaniques, calculés aux charges mécaniques limites et qui possèdent les meilleures caractéristiques de masse gabarit ;
- Le contact à balaie diminue la capacité de fonctionnement de la machine à courant continu.

Tout cela explique l'avènement au cours de ces dix dernières d'une grande quantité de machines électriques à commutateurs semi-conducteurs.

2.5 Pertes de puissance dans les machines électriques à courant continu

Les pertes dans les machines électriques se divisent en pertes principales et complémentaires. Les premières sont déterminées par le caractère et l'intensité des processus mécaniques et électromagnétiques. Les secondes sont dues aux différents phénomènes secondaires lors du fonctionnement de la machine électrique en charge.

Les principales pertes sont divisées en pertes mécaniques, magnétiques et électriques (dans les fils conducteurs des enroulements, la résistance transitoire des contacts balaies). Les pertes mécaniques à leur tour sont divisées en pertes dans les roulements, frottement des balaies, et ventilation de la machine elle-même. Dans la machine électrique à courant continu les pertes mécaniques dépendent seulement de la vitesse de rotation de l'arbre de sortie de la machine et ne dépendent pas de sa charge. Dans les machines de puissance allant de 10 à 100 KW les pertes mécaniques sont de l'ordre de 0.5 – 2.0% de la puissance nominale (les valeurs inférieures correspondent aux machines de grande puissance).

Les pertes magnétiques sont dues aux actions de l'inversion magnétique variable et tournante des différentes parties de la machine à courant continu. La première forme de pertes concernent les dents de l'induit, et la seconde – le noyau de l'induit de la machine à courant continu. Dans les deux cas les pertes magnétiques sont composées de pertes d'hystérésis et de courants de Foucault et peuvent être déterminées par les formules :

$$P_{mag} = P_{dsa} + P_{dta} ; \quad (2.4)$$

$$P_{dsa} = (2.4 - 4) p_{1.0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_a^2 G_{dsa} ; \quad (2.5)$$

$$P_{dta} = (1.7 - 2) p_{1.0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_{dtmoy}^2 G_{dta} , \quad (2.6)$$

où

P_{dsa} ; P_{dta} - pertes dans le dos et dans les dents de l'induit ;

$p_{1.0/50}$ - pertes spécifiques avec $B=1$ T et $f=50$ Hertz,

f – fréquence d'inversion magnétique dans l'acier ;

B_a , B_{dtmoy} - induction dans le dos de l'induit et l'induction moyenne dans une dent ;

(2.4 - 4), (1.7 - 2) – coefficients, qui prennent en compte l'augmentation de la somme des pertes dans le dos et dent de l'induit ;

G_{dsa} , G_{dta} - masse des dos et dents de l'induit;

$\beta = 1.2 - 1.5$.

Les pertes électriques dans chacun des enroulements (d'excitation et de l'induit) sont déterminées par la formule, qui est le produit du carré du courant efficace par la somme des résistances de l'enroulement. Selon la norme, les résistances des enroulements avec différentes classes d'isolation doivent correspondre à la température de ces enroulements quand la machine fonctionne en régime nominal.

Les pertes dans les résistances transitoires des contacts balaies sont déterminées par l'expression

$$P_{el.b} = \Delta U_b I \quad (2.7)$$

où ΔU_b - chute de tension sur les résistances transitoires entre balaie et collecteur.

Selon la norme pour les balaies à charbon et graphites $\Delta U_b = 1V$, et pour charbon métal – 0.3 V.

Les pertes complémentaires dans la machine à courant continu apparaît à cause de la distorsion de la courbe du champ magnétique due à l'action de la réaction transversale d'induit lors de la commutation. En pratique, selon la norme leur valeur est égale à : en absence de l'enroulement de compensation 1%, et en sa présence – 0.5% de la puissance fournie pour le générateur, et de la puissance appliquée pour le moteur.

2.6 Générateurs à courant continu

Sans oublier, que la majeure partie de l'énergie électrique consommée revient au courant alternatif, il existe une série de domaines techniques (transport, industrie chimique, complexe métallurgique etc.) qui a fort besoin du courant continu. Ce courant peut être obtenu à l'aide des convertisseurs statiques ou électromécaniques d'énergie. En qualité de machine transformatrice d'énergie on utilise les générateurs à courant continu :

- à excitation indépendante (l'enroulement d'excitation est alimenté à partir d'une source extérieure à courant continu) ;
- à excitation parallèle (avec auto excitation) ;
- à excitation en série (en série, avec auto excitation) ;
- à excitation combinée (compound).

Les schémas de principe des générateurs cités ci-dessus sont représentés sur les fig. 2.3 a, b, c et d.

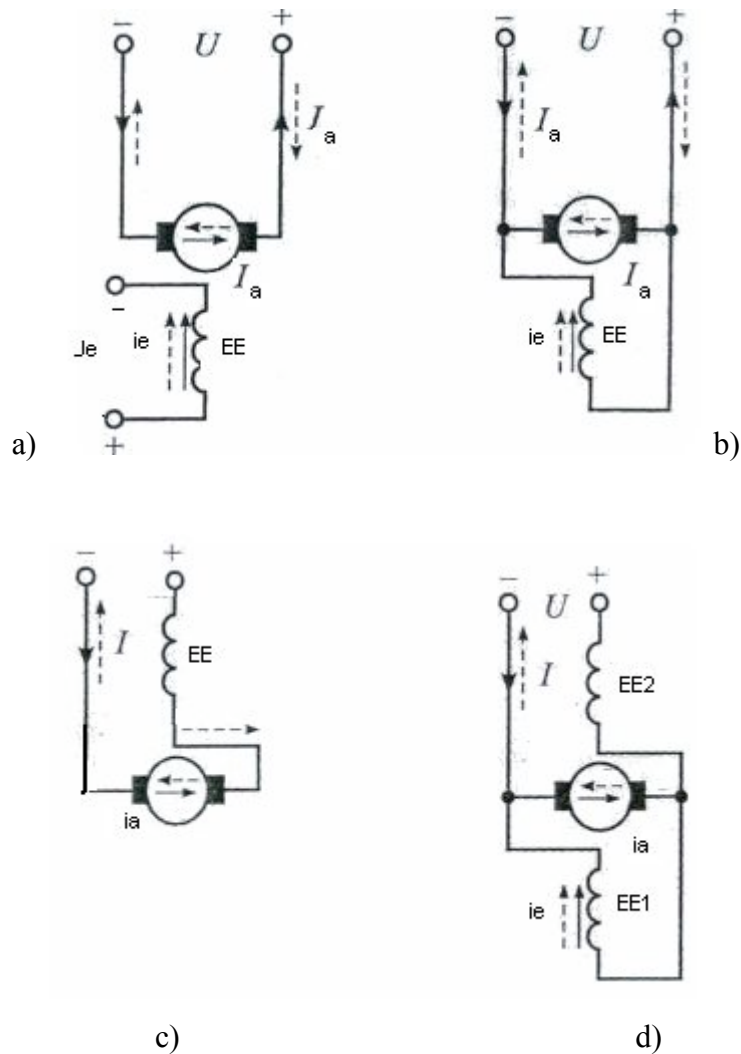


Fig. 2.3 : Schémas de principe des générateurs à courant continu : a) à excitation indépendante, b) à excitation parallèle, c) à excitation en série et d) combinée.

Leur différence fondamentale se situe dans la fabrication de l'enroulement d'excitation: dans les générateurs à excitation indépendante et parallèle, l'enroulement d'excitation est en fil fin, alors que les enroulements d'excitation et de l'induit du générateur à excitation en série et combinée sont en fil de même section. Les générateurs de faible puissance possèdent souvent une excitation magnétoélectrique (à partir des aimants permanents), leurs caractéristiques sont semblables à celles des générateurs à excitation indépendante.

2.7 Diagramme énergétique du générateur à excitation indépendante et ses caractéristiques

Le diagramme énergétique du générateur à excitation indépendante est représenté sur la fig. 2.4. La puissance fournie au circuit d'excitation, est dépensée dans les pertes en son sein. Le moteur qui entraîne en rotation l'arbre de l'induit du générateur, lui transmet une puissance P_1 , dont une partie part dans les pertes mécaniques ($p_{méc.}$) et magnétiques ($p_{mag.}$), ainsi que dans les pertes complémentaires ($p_{compl.}$). La partie restante se transforme en énergie électromagnétique, déterminée par la puissance électromagnétique :

$$P_{em} = I_a E = P_1 - (p_{méc} + p_{mag} + p_{compl}) \quad (2.8)$$

La puissance fournie par le générateur au réseau électrique ($P = UI_a$) est égale à la différence entre la puissance électromagnétique P_{em} et les pertes dans les résistances actives du circuit de l'induit (p_{el}) et dans le passage collecteur- balaie (p_{elb}) :

$$UI_a = P_1 - (p_{méc} + p_{mag} + p_{compl} + p_{el} + p_{elb}) \quad (2.9)$$

De là
$$U = E - I_a R_{a\Sigma} \quad (2.10)$$

où $R_{a\Sigma}$ - la somme des résistances du circuit de l'induit de la machine, qui prend en compte la résistance de passage collecteur balaie.

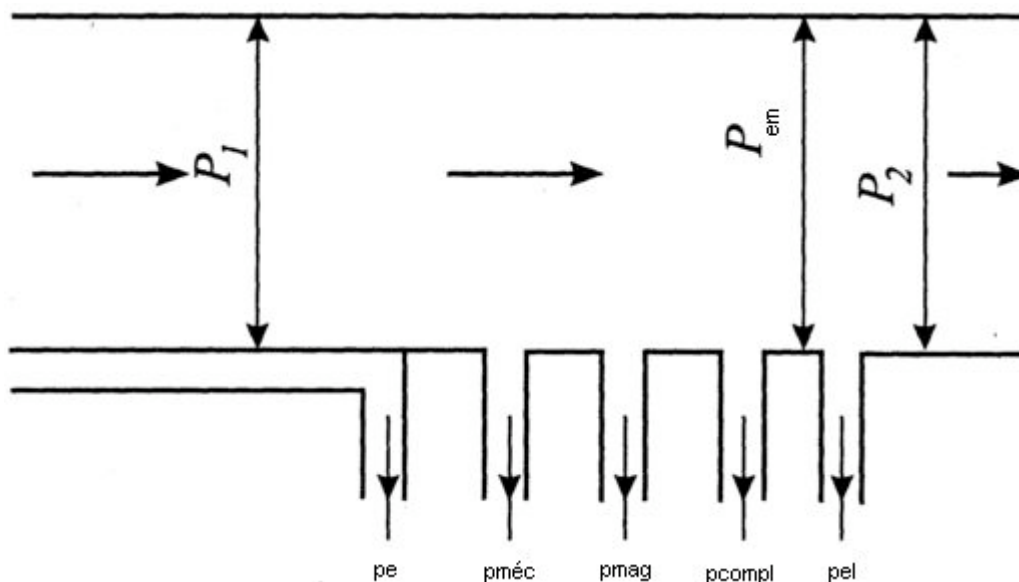


Fig. 2.4 : Diagramme énergétique de la machine à courant continu

On peut analyser les propriétés du générateur à partir de ses caractéristiques fondamentales : caractéristiques à vide, extérieure, de réglage et de charge.

On entend par caractéristique à vide, la courbe représentative de la tension de sortie du générateur en fonction du courant de l'enroulement d'excitation en régime à vide, c'est à dire lorsque le circuit de la charge est ouvert (sous $n=\text{const}$, fig. 2.5 a).

Au cours du relevé des caractéristiques, les balaies doivent se trouver sur la ligne géométrique neutre. La variation du courant d'excitation doit s'effectuer dans un seul sens, car dans le cas contraire il y aura passage sur d'autres courbes de magnétisation qui ne correspondront pas au cycle relevé. Sous des grandes valeurs du courant d'excitation du générateur à cause de la saturation de son circuit magnétique la courbe aura une portion bien marquée de saturation.

Le point de la caractéristique, qui correspond au régime nominal de fonctionnement du générateur, se trouve généralement au coude de la courbe, car le fonctionnement du générateur est instable sur la partie linéaire de la courbe, et le fonctionnement sur la portion de sa saturation ne permet pas de régler la tension de sortie.

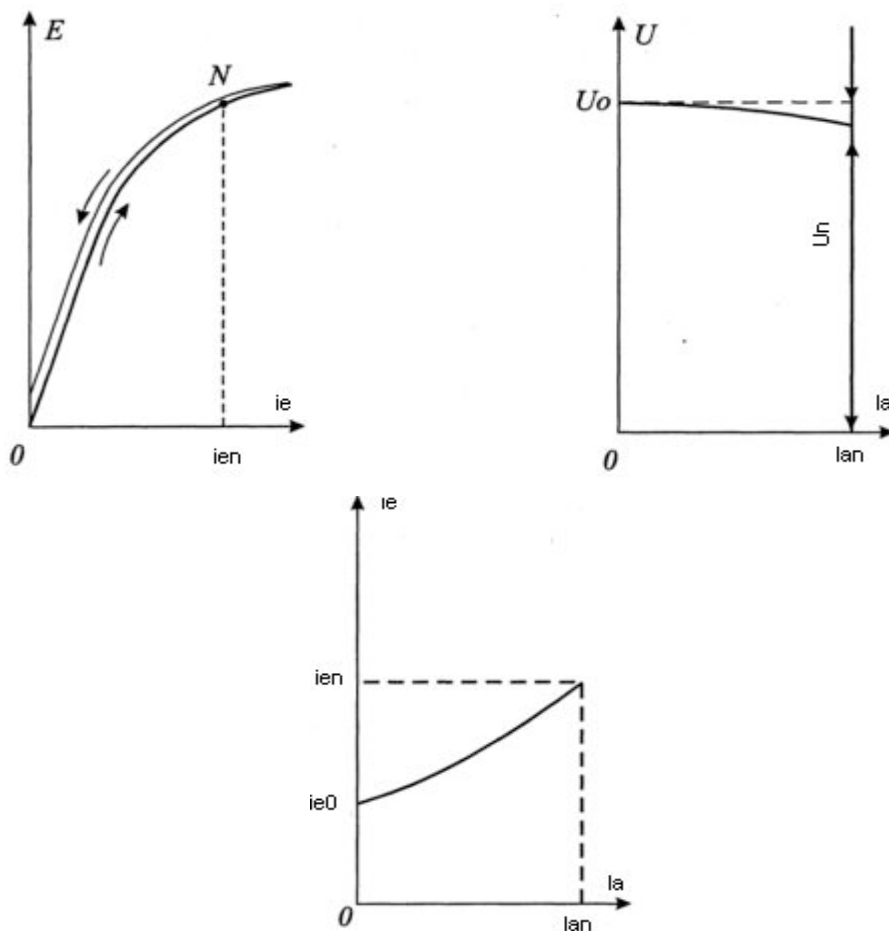


Fig. 2.5 : Courbes principales du générateur à courant continu : a) à vide, b) extérieure et c) de réglage.

Avec un courant nul d'excitation du générateur la tension de sortie est égale à 2 - 4% de la valeur nominale.

Par caractéristique extérieure, on sous entend la courbe représentative de la tension de sortie en fonction du courant de charge $U = f(I_a)$ avec $n = \text{const}$. Et $I_E = \text{const}$. Au cours du relevé de cette caractéristique, on maintient au début à leur valeur nominale le courant d'excitation du générateur I_E et le courant de charge I_{anom} , ensuite on décharge progressivement le générateur jusqu'au régime à vide. Sur la base de la courbe obtenue on détermine la chute de tension U_c (fig. 2.5 b).

La diminution de la tension à la sortie du générateur à excitation indépendante avec l'augmentation du courant de sa charge s'explique par:

- la chute de tension due à la circulation du courant de charge dans la résistance interne du générateur ;
- l'action de démagnétisation de la réaction transversale d'induit.

La variation de la tension est déterminée généralement en pourcentages par rapport à la tension nominale :

$$\Delta U = \frac{U_c - \Delta U_c}{U_c} 100\%. \quad (2.11)$$

La caractéristique de réglage $I_E = f(I_a)$ avec $n = \text{const}$ et $U = \text{const}$ montre sur quelle caractéristique il est nécessaire d'augmenter le courant d'excitation (sous l'augmentation du courant de charge I_a) pour qu'avec une vitesse de rotation du rotor constante, la tension de sortie du générateur reste elle aussi constante (fig. 4.5 c).

Les caractéristiques extérieures et de réglage du générateur peuvent être construites sur la base des courbes connues de la caractéristique de charge :

$U = f(I_E)$ avec $n = \text{const}$ et $I_a = \text{const}$ (fig. 2.6).

générateur on utilise le principe d'auto excitation, basé sur l'utilisation du flux magnétique résiduel 1 – 3% du flux magnétique nominal Φ_0 , qui existe toujours dans une machine déjà utilisée et débranchée de la source d'alimentation. Si l'enroulement d'excitation est connecté de telle sorte que sa force magnétisante soit en concordance de sens avec le flux résiduel, alors au cours de la rotation du rotor le générateur commence à fonctionner avec le courant d'excitation i_E et la f.e.m. E qui peuvent être déterminées par la valeur de la résistance de réglage du circuit d'excitation.

Sur la base de la deuxième loi de Kirchhoff

$$U = U_E = i_E R_E + L_E \frac{di_E}{dt} \quad (2.12)$$

où R_E, L_E - résistance active et l'inductance de l'enroulement d'excitation du générateur.

Le processus d'auto excitation du générateur est représenté sur la fig. 2.7.

Le point d'interception de la courbe à vide du générateur 1 avec la droite 2, qui est la courbe représentative de $U_{R_E} = f(i_E)$ détermine le régime stationnaire de fonctionnement du générateur (fig. 2.7). Le processus transitoire de la variation du courant d'excitation, est caractérisé par l'augmentation dans le temps de la chute de tension sur la résistance active de l'enroulement d'excitation.

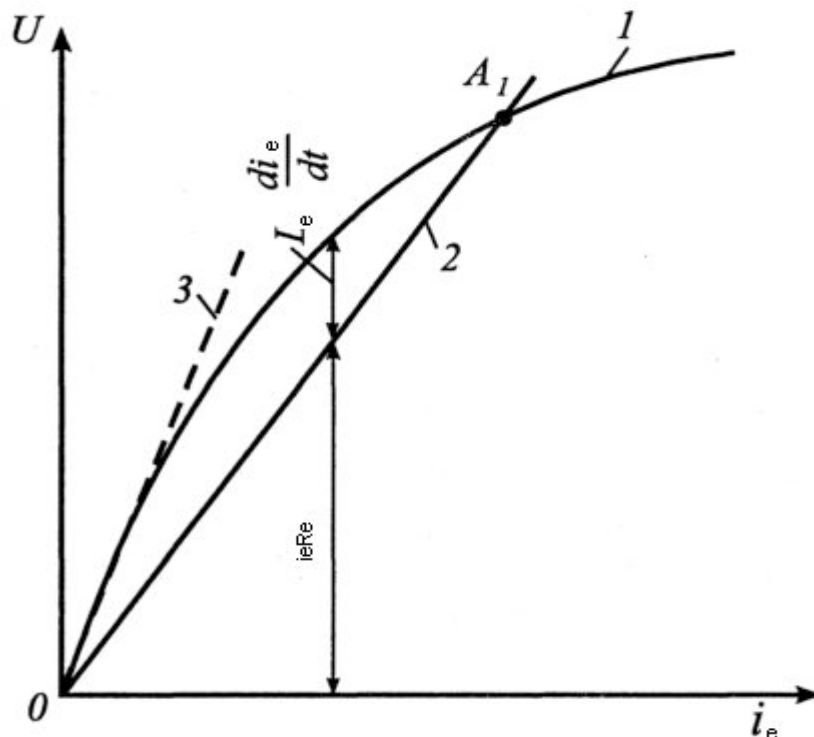


Fig. 2.7 : Processus d'auto - excitation du générateur à excitation parallèle

Avec l'augmentation du courant d'excitation de 0 à la valeur stationnaire, la f.e.m. d'excitation, sera déterminée par la variation de la différence des ordonnées des courbes 1 et 2 en allant de 0 au point A_1 .

La régulation de la tension de sortie du générateur est effectuée par la variation de R_E . La résistance $R_{E.cr}$ à laquelle la machine ne s'excite plus est appelée résistance critique (courbe 3, fig. 2.7).

Le courant d'excitation du générateur à excitation parallèle est seulement de 1-3% du courant nominal de l'induit, c'est pour cela, la caractéristique à vide de ce générateur coïncide pratiquement avec son analogue du générateur à excitation indépendante. On peut dire la même chose sur les caractéristiques de réglage et de charge du générateur.

La caractéristique externe du générateur à excitation parallèle (fig. 2.8) est la courbe représentative de la tension de sortie U en fonction du courant de charge I_C $U = f(I_N)$: avec $n = \text{const.}$ et la résistance dans le circuit d'excitation $R_E = \text{const.}$

En dehors de la chute de tension dans le circuit de l'induit et l'influence de la réaction d'induit sur le caractère de la caractéristique externe, la diminution du flux magnétique avec l'accroissement de la charge l'influe aussi. C'est pour cela la caractéristique externe de ce type de générateur (courbe 1, fig. 2.8) se trouve en dessous de son analogue du générateur à excitation indépendante (courbe 2, fig. 2.8).

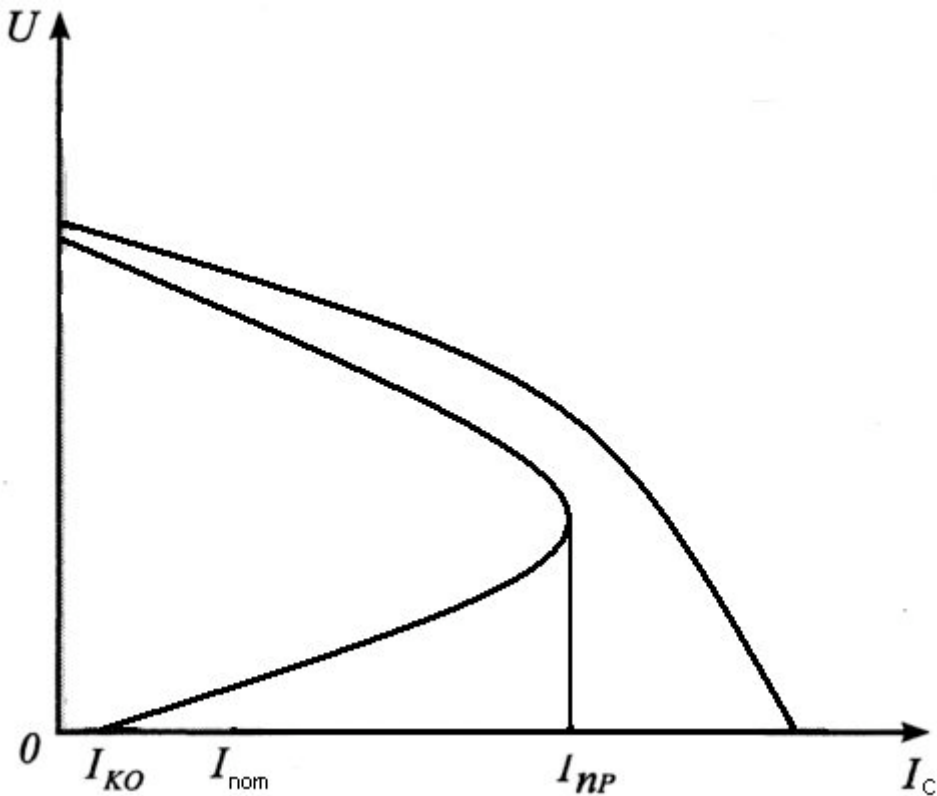


Fig. 2.8 : Caractéristique externe du générateur à excitation parallèle

A la valeur du courant d'excitation, qui correspond à la flexion de la caractéristique à vide, le courant de charge atteint sa valeur critique I_{cr} (généralement cette valeur ne dépasse pas 2 – 2.5 fois la valeur nominale du courant de charge). Une partie de la caractéristique externe du générateur Jusqu'au point critique correspond à son régime stationnaire de fonctionnement ; avec l'augmentation progressive de la charge, on rentre dans le régime instable de fonctionnement, comme résultat, nous aurons la valeur de la tension à sa sortie et le courant d'excitation nuls, et la valeur du courant de l'induit est déterminée par le flux magnétique résiduel Φ_0 .

Avec une brusque augmentation de la charge jusqu'au court circuit la variation du flux magnétique, vue une grande valeur de la constante électromagnétique du circuit d'excitation, reste en retard sur la dynamique d'accroissement du courant de charge. C'est pour cela, cette même valeur de la force électromotrice est obtenue dans l'induit du générateur qu'avant le régime de surcharge. En résultat le courant de l'induit peut atteindre la valeur, qui dépasse largement I_{cr} et provoque des feux circulaires sur le collecteur de la machine.

2.9 Générateur à excitation en série

Dans ce type de générateur (fig. 2.3 c) les courants d'excitation et de charge sont les mêmes. Dans ce cas les caractéristiques à vide et de charge ne sont pas relevées. La caractéristique externe (fig. 2.9) possède la forme de la courbe 2. La courbe 1, qui correspond au régime à vide, se trouve au dessus de la courbe 2.

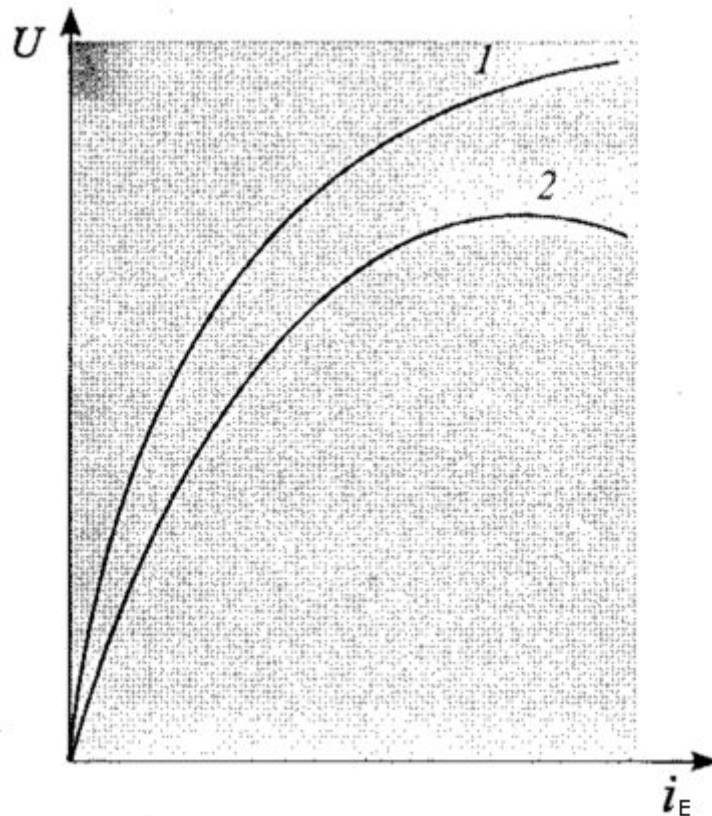


Fig. 2.9 : Caractéristique externe du générateur à excitation en série

Avec des surcharges considérables de la machine, la tension de sortie décroît car à cause de la saturation du circuit magnétique de la machine, le flux magnétique n'augmente pratiquement pas, et le flux de la réaction d'induit devient considérable.

La tension de sortie des générateurs à excitation en série est déterminée essentiellement par la valeur de la charge, et en régime à vide elle est même égale à zéro. C'est pour cela ce régime de fonctionnement de la machine à courant continu à excitation en série est utilisé seulement au cours du freinage.

2.10 Générateur à excitation combinée

Dans ce type de générateur (fig. 2.3, d) on combine les propriétés des générateurs à courant continu à excitations parallèle et en série. On le calcule de telle sorte qu'à vide la tension à la sortie soit déterminée par les paramètres de l'enroulement en parallèle (EE1) et lors du fonctionnement en charge, la chute de tension dans l'induit et la réaction d'induit soient compensées par l'enroulement en série (ES2). Cela permet de régler automatiquement la tension sur la charge dans des limites déterminées.

La caractéristique à vide du générateur ($U_0 = f(I_E)$, avec $n = const.$ et $I_C = const.$) ne diffère de rien de la caractéristique analogue du générateur à excitation parallèle.

La caractéristique de charge ($U = f(I_E)$ avec $n = const.$ et $I_C = const.$) possède la même forme que celle du générateur à excitation parallèle et indépendante (courbe 1, fig. 2.10), mais elle se situe, comme d'habitude au dessus. Cela est dû au fait qu'au profit de l'action de l'enroulement d'excitation en série (EE2) la chute de tension dans le circuit de l'induit, provoquée par l'accroissement de la charge, est compensée (courbe 2, fig. 2.10).

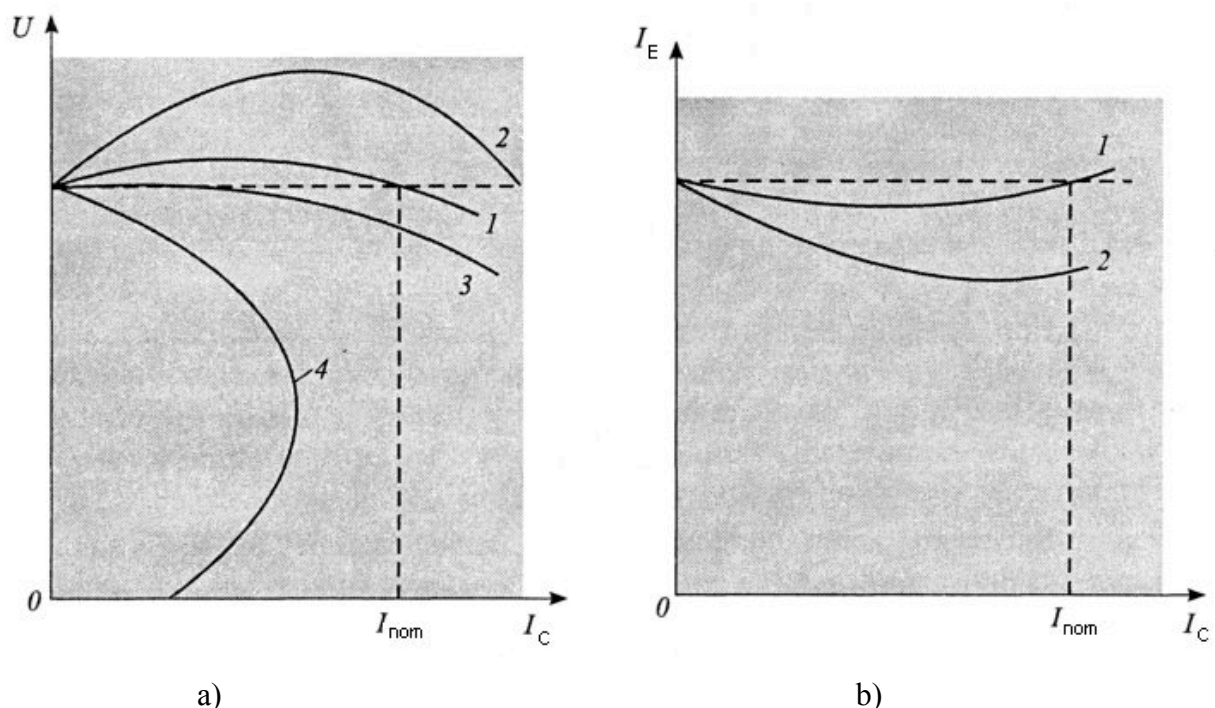


Fig. 2.10 : Caractéristiques du générateur à excitation combinée : a) externe et b) de réglage.

La caractéristique externe est la courbe représentative de $U = f(I_N)$ avec $n = const.$ et $R_E = const.$ En fonction du degré d'influence de l'enroulement d'excitation en série (EE2) on peut obtenir quatre sortes de forme de caractéristiques.

Avec la compensation de la réaction magnétique d'induit et de la chute de tension dans le circuit de l'induit pour le courant nominal de charge, nous avons la caractéristique de forme 1 (fig. 2.10 a), dans ce cas le générateur à excitation combinée est conventionnellement appelé générateur à enroulement normal d'excitation en série. Au cas, s'il est nécessaire de compenser la chute complémentaire de tension sur une ligne longue de liaison de charge avec le générateur, alors dans beaucoup de cas on augmente les spire – ampères de l'enroulement d'excitation en série (EE2) et la courbe de la caractéristique externe prendra la forme 2, et le générateur à excitation combinée est appelé générateur à enroulement d'excitation en série amplifié.

Dans certains cas (dans les transformateurs de soudure, les dispositifs de projection) il est nécessaire d'avoir une caractéristique externe de forme 4, quand la force magnétisante de l'enroulement d'excitation en série est dirigée en sens opposé et ne compense pas la chute de tension dans le circuit de l'induit, et, au contraire rend la caractéristique externe plus douce.

La caractéristique de réglage ($I_E = f(I_C)$ avec $n = const.$ et $U = const.$) possède la forme de la courbe 1 (fig. 2.10 b) pour les générateurs à enroulement d'excitation normale en série et la forme 2 – pour les générateurs à variante amplifiée de l'enroulement d'excitation en série.

La majeure partie des générateurs à courant continu possède en général, une excitation en parallèle avec un petit enroulement d'excitation en série, qui permet d'améliorer la forme de la caractéristique externe. Ces générateurs peuvent travailler aussi en régime d'excitation indépendante. Les générateurs à excitation en parallèle sont utilisés seulement en grande puissance et en faible valeur de la tension générée. Dans ceux-ci indépendamment de la valeur de la tension dans l'induit, l'enroulement d'excitation est calculé sur la base d'une des tensions standardisées 110 ou 220 V, ce qui permet d'unifier l'appareillage de réglage.

2.11 Les moteurs à courant continu

La classification des moteurs est comme celle des générateurs. On distingue les moteurs à courant continu: à excitations indépendante, en parallèle, en série et combinée.

Les moteurs de grande puissance sont d'excitation indépendante et cela a pour but de rendre plus confortable et plus économique la régulation du courant d'excitation. Par ses caractéristiques, ils ne se diffèrent de rien des moteurs à excitation en parallèle.

2.12 Diagramme énergétique des moteurs à courant continu

Le diagramme énergétique du moteur à courant continu est représenté sur la fig. 2.11.

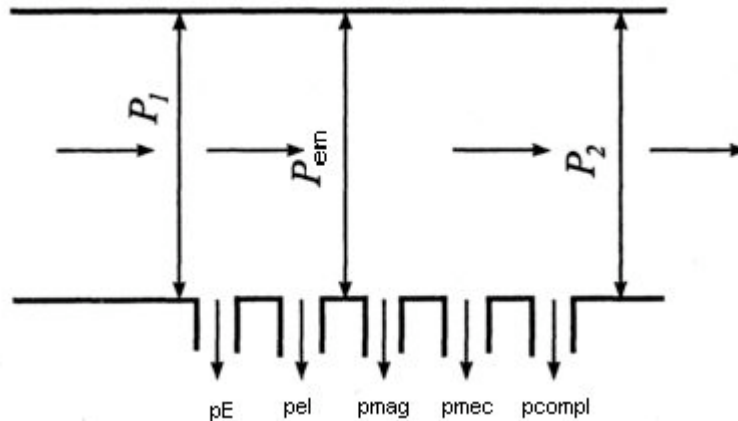


Fig. 2.11 : Diagramme énergétique du moteur à courant continu.

La puissance d'entrée P_1 , fournie au moteur à partir du réseau électrique est déterminée par l'expression :

$$P_1 = P_E + P_a = U_E I_E + U_a I_a, \quad (2.13)$$

Une partie de cette puissance est dépensée dans la couverture des pertes dans l'enroulement d'excitation $p_E = I_E^2 R_E$ et dans le circuit de l'induit $p_{el} = I_a^2 R_{a\Sigma}$. La partie restante, égale à la puissance électromagnétique après soustraction des pertes magnétiques p_{mag} , des pertes de frottement dans les roulements et ventilation p_{mec} , et des pertes complémentaires, fournie à l'arbre de la machine à courant continu une puissance de sortie P_2 .

2.13 Caractéristiques mécaniques du moteur à excitation indépendante

Sur la base de la deuxième loi de Kirchhoff pour les circuits d'excitation et d'induit (fig. 2.1) ainsi qu'en considérant, les liaisons exprimées par les expressions (5.1, 5.2), pour le régime stationnaire on peut écrire :

$$\begin{aligned}
 U_E &= I_E R_E; \Phi = k I_E \\
 U_a &= I_a R_{a\Sigma} + C_e \Phi \omega; \\
 M &= C_M \Phi I_a
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Avec $R_{a\Sigma}$, R_E : sommes des résistances du circuit de l'induit et la résistance de l'enroulement d'excitation.

La caractéristique mécanique du moteur sous entend la courbe représentative de sa vitesse de rotation en fonction du couple de la charge $\omega = f(M)$. La caractéristique mécanique statique peut être facilement obtenue, à partir de la deuxième et troisième équation du système (5.11) :

$$\omega = \frac{U_a}{C_e \Phi} - \frac{R_{a\Sigma}}{C_e C_M \Phi^2} M
 \tag{2.14}$$

L'équation (5.12) montre qu'à tension aux bornes de l'induit et flux constant, la vitesse de la machine décroît avec l'accroissement du couple.

Le branchement aux bornes du circuit de l'induit de la résistance additionnelle, la variation du flux et celle de la tension transforment la forme des caractéristiques mécaniques.

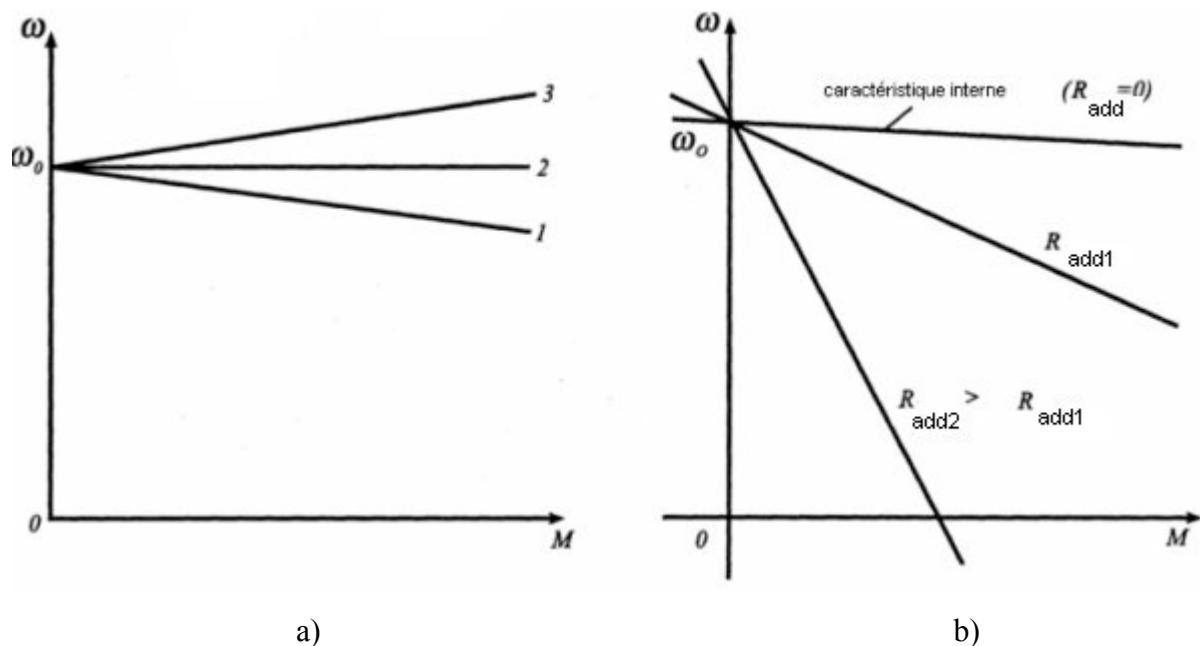


Fig. 2.12 : Formes des caractéristiques du moteur à courant continu à excitation parallèle: a) mécaniques internes et b) de rhéostat.

Les caractéristiques mécaniques de la machine à excitation indépendante (en parallèle) sous différentes résistances dans le circuit de l'induit sont représentées sur la fig. 2.12 b, les

caractéristiques mécaniques sous différents flux sont représentées sur la fig. 2.13 a, et avec différentes tensions sur l'induit – sur la fig. 2.13 b.

La forme de ces caractéristiques détermine aussi la zone de leur utilisation au cours du réglage de la vitesse de rotation du moteur à courant continu : dans la zone des vitesses inférieures à la nominale, on utilise le réglage de la tension sur l'induit, et dans la zone des vitesses supérieures – la diminution du flux magnétique de la machine.

L'augmentation de la tension de l'induit pour le réglage de la vitesse au dessus de la nominale n'est pas généralement utilisée (l'exception est faite pour certains types de moteurs des ponts roulants pour métallurgie dans lesquels on permet une double augmentation de la tension de l'induit), car cette augmentation emmène à des complications considérables de commutation dans le fonctionnement du collecteur mécanique. L'augmentation du flux magnétique n'est pas sollicitée car le point de fonctionnement de la machine se trouve au coude de la courbe de magnétisation de la machine, proche de la portion de saturation.

Le réglage de la vitesse de rotation (du côté de sa diminution par rapport à la nominale) avec l'augmentation de la résistance dans le circuit de l'induit est rarement utilisé de nos jours, car il détériore les caractéristiques énergétiques de la commande électrique.

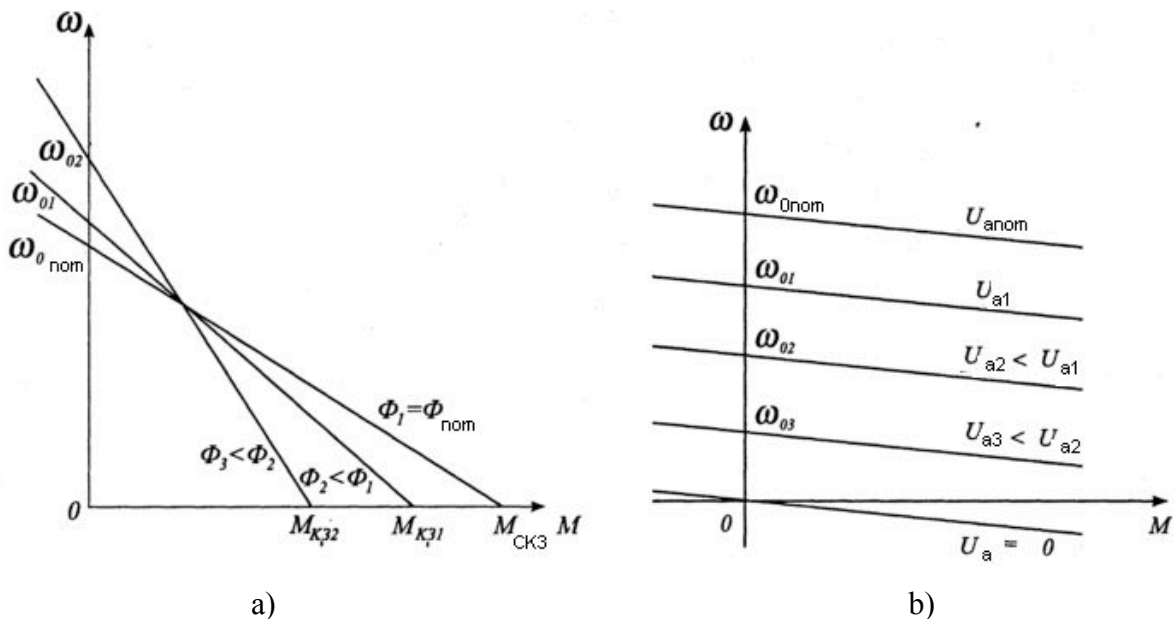


Fig. 2.13 : Caractéristiques mécaniques : a) par variation du flux et b) par variation de la tension aux bornes de l'induit.

2.14 Caractéristiques mécaniques du moteur à excitation en série

Dans le moteur à excitation en série le flux et le couple dépendent du courant de l'induit. C'est pour cela les caractéristiques mécaniques de la machine sont déterminées par l'expression

$$\omega = \frac{U_a}{k\Phi I_a} - \frac{MI_a R_{a\Sigma}}{k^2 \Phi^2 I_a} \quad (2.15)$$

La forme de ces caractéristiques (fig. 2.14) à charges faibles a un caractère hyperbolique, ce qui parle sur la nécessité d'exclure un tel régime de fonctionnement de la machine.

Pour les moteurs à excitation indépendante (en parallèle) $M \equiv I_a$ et pour les moteurs à excitation en série approximativement $M \equiv I_a^2$. C'est pour cela ces derniers au cours du démarrage développent couple considérablement grand. Si la vitesse des premiers peut être considérée non dépendante du couple $\omega = const$, alors la vitesse des seconds en dépend, comme montre l'expression

$$\omega \approx \frac{U_a}{I_a} \approx \frac{U_a}{\sqrt{M}}. \quad (2.16)$$

C'est pour cela pour les moteurs à excitation indépendante

$$P_2 = \omega M \approx M,$$

et pour les moteurs à excitation en série

$$P_2 = \omega M \approx \sqrt{M}.$$

Ainsi, avec la variation du couple de la charge dans des larges limites, l'intervalle de la variation de la puissance pour les moteurs à excitation en série est largement inférieur à celui d'autres types, c'est ce qui explique leur large utilisation dans la commande électrique de traction.

Comme le calcul des caractéristiques mécaniques des moteurs à excitation en série, à cause de la non linéarité de la courbe de magnétisation de la machine, est assez compliqué, c'est pour cela dans les catalogues on trace les caractéristiques internes $\omega = f(I_a)$ et $M = f(I_a)$.

La forme des caractéristiques statiques du moteur à courant continu à excitation en série avec différents valeurs de la résistance dans le circuit de l'induit et les valeurs de la tension d'alimentation sont représentées sur la fig. 2.14 a, b.

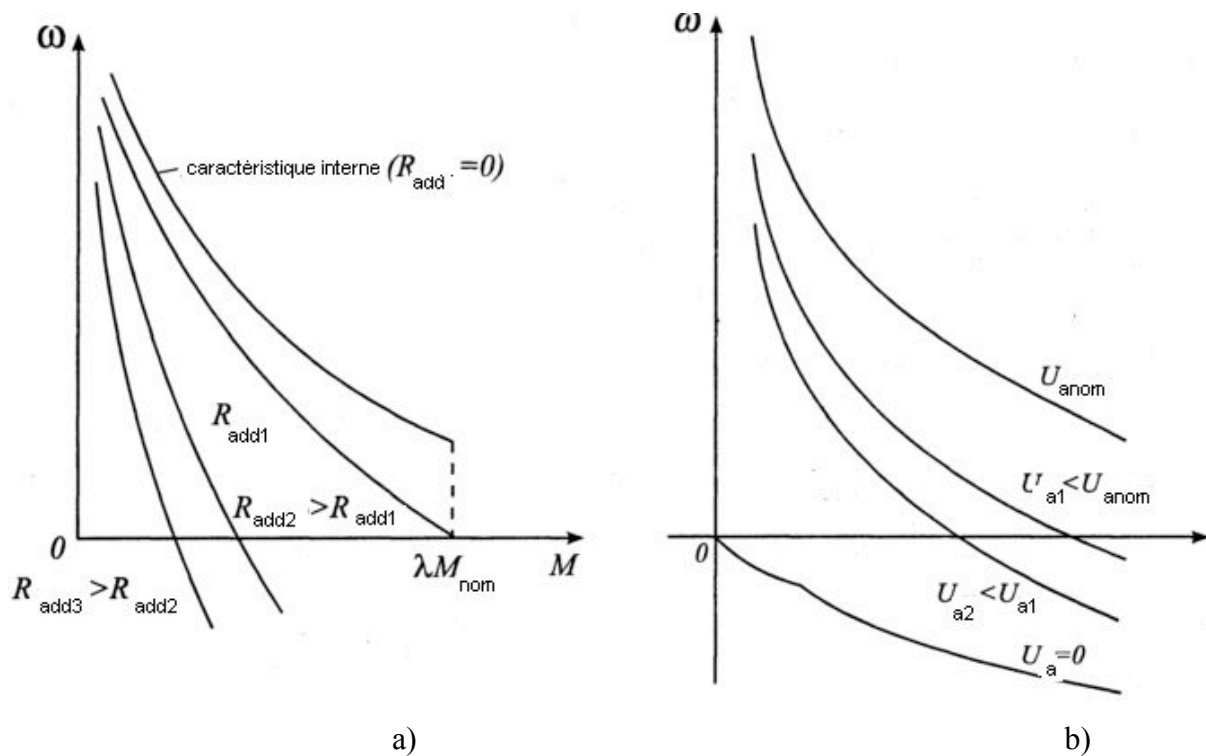


Fig. 2.14 : Caractéristiques du moteur à courant continu à excitation en série par variation a) de la résistance dans le circuit de l'induit et b) de la valeur de la tension d'alimentation.

De ces caractéristiques nous voyons, qu'avec la diminution de la tension d'alimentation, la vitesse diminue et la rigidité des caractéristiques mécaniques reste pratiquement constante. La caractéristique avec $U_a = 0$ correspond au régime de freinage par contre courant du moteur avec le circuit de l'induit en court-circuit. Il est clair que le couple de freinage dans ce cas est possible seulement avec l'auto excitation de la machine. Il existe deux conditions d'auto excitation :

- le sens de rotation de la machine en régime de freinage doit être opposé au sens en régime de moteur. C'est pour cela pour réaliser le régime de freinage non pas seulement dans le quatrième quadrant mais aussi dans le second, il est nécessaire de changer la polarité des sorties des enroulements soit de l'induit, soit de l'excitation ;
- l'auto excitation apparaît seulement à une vitesse de rotation définie de l'induit de la machine. Avec l'augmentation de la résistance dans le circuit de l'induit la valeur de la vitesse critique (c'est à dire de la vitesse minimale, à laquelle il est encore possible l'auto excitation) aussi augmente.

2.15 Moteurs à courant continu à excitation combinée

Ces moteurs sont utilisés dans des cas, quand selon les conditions de l'évolution du processus technologique, il est nécessaire d'avoir une caractéristique mécanique qui a une forme moyenne, entre la rigide-moteur à excitation indépendante (en parallèle) et la douce-moteur à excitation en série. Généralement un de ses enroulements est principal et donne 70% de la force magnétisante, et l'autre complémentaire. Si le principal est un enroulement en parallèle, alors la machine est appelée parallèle série dans le cas contraire série parallèle. On distingue le branchement adapté et le branchement mis en opposition des enroulements. Avec une connexion adaptée la caractéristique de la machine occupe une position intermédiaire, mais proche des caractéristiques à excitation en parallèle.

Dans certains cas il est nécessaire d'avoir une vitesse de rotation assez stable de la machine. Cela peut être réalisé, par le couplage en opposition des enroulements, de telle sorte que cette action en concordance avec la réaction d'induit équilibre la chute de tension dans le circuit de l'induit. Ainsi il faut souligner que le fonctionnement du moteur dans ce cas peut être instable.

L'avantage du moteur à excitation combinée est de limiter la vitesse à vide comparativement au moteur à excitation en série, car dans ce cas elle possède une valeur déterminée.

Pour avoir les conditions meilleures de freinage lors du passage en régime de générateur, l'enroulement en série doit être déconnecté. Dans ce cas la caractéristique mécanique deviendra linéaire avec une rigidité considérable.

2.16 Caractéristiques de fonctionnement des moteurs à courant continu

Les caractéristiques de fonctionnement du moteur à courant continu sont les courbes représentatives du moment, de la vitesse de rotation, du courant de l'induit et du rendement en fonction de la puissance de sortie du moteur. La forme qualitative de ces caractéristiques pour les moteurs à excitation en parallèle (indépendante) et en série est représentée sur la fig. 2.15 a, b.

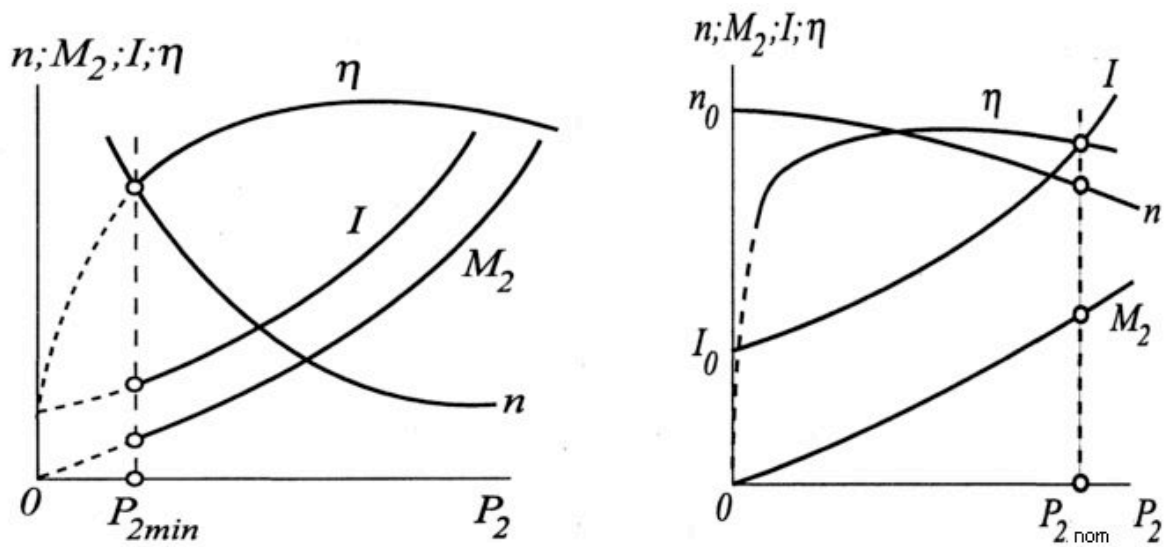


Fig. 2.15 : Caractéristiques de fonctionnement du moteur à courant continu à excitation
a) indépendante et parallèle, et b) et en série.

Chapitre 3

ENTRAÎNEMENTS A VITESSE VARIABLE

3.1 Système d'entraînement électromécanique

On appelle système d'entraînement électromécanique ou entraînement électrique à vitesse variable un système qui convertit de l'énergie électrique en énergie mécanique utilisable par un organe de travail.

Sur le plan de la réalisation, un entraînement à vitesse variable constitue un ensemble convertisseur moteur entraînant une charge mécanique avec une vitesse et un couple réglables par une commande appropriée, appliquée à cet ensemble. De plus, le procédé inverse d'échange d'énergie peut aussi avoir lieu : l'énergie mécanique, emmagasinée dans la machine (ou plus largement dans tout le mécanisme du système) sous forme d'énergie cinétique ou potentielle, peut être convertie énergie électrique et restituée au réseau.

Enfin, dans la plupart des cas, le flux d'énergie échangé avec la machine entraînée est réglable ; autrement dit, le système d'entraînement est réglé.

L'ensemble convertisseur moteur procure au système d'entraînement un certain nombre d'avantages, entres autres :

- Une variation de vitesse graduelle et ajustable dans une grande plage en agissant soit sur la tension d'alimentation et ou la fréquence d'alimentation.
- Aucun système de démarrage n'est requis. Le système tourne à vitesse programmée et en suivant une certaine rampe d'accélération.
- Des vitesses élevées de rotation sont possibles en agissant sur la fréquence de sortie.
- Ajustement précis de la vitesse et de possibilité de synchronisation.
- Entretien minimal en ayant recours à des machines à aimants permanents.
- Une solution économique dû à un grand nombre d'entraînements et de combinaisons possibles.

Un entraînement réglé est constitué :

- ❖ D'une chaîne de puissance : comprenant un convertisseur de puissance C, un moteur électrique M, un convertisseur du mouvement mécanique CMM et un organe de travail OT de la machine entraînée

- ❖ D'une chaîne de commande : qui comprend des capteurs de grandeurs physiques (vitesse, couple, courant, etc.) et organes de réglage et de commande qui s'étendent d'un bouton-poussoir jusqu'à l'appareillage électronique y compris le micro-ordinateur.

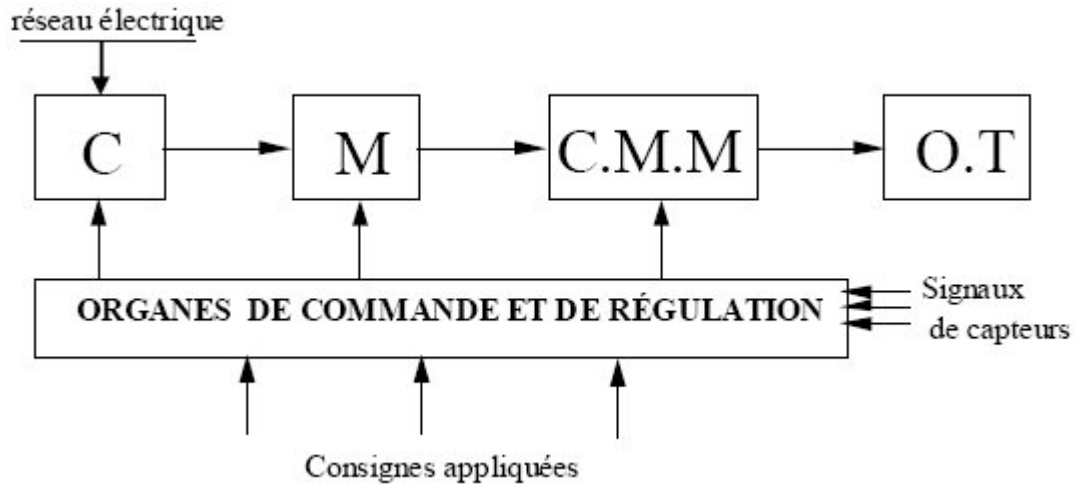


Fig.3.1 : Diagramme structurel d'un entraînement réglé.

3.2 Applications industrielles

Les domaines d'application industrielle des entraînements réglés sont très variés.

Voici quelques exemples puisés parmi les principaux domaines :

- Machines outils, entraînements principaux de tours, entraînement des outils ;
- Laminoirs, entraînements principaux des cylindres, entraînements des dérouleuses et des enrouleuses, du positionnement des cylindres, entraînements auxiliaires ;
- Machines pour la fabrication de matières plastiques, entraînements des rouleaux, entraînements des enrouleuses ;
- Machines pour la fabrication du papier ;
- Machines à imprimer, entraînements des groupes imprimeurs, entraînements des dérouleuses ;
- Machines textiles, entraînements des machines à filer ;
- Monte-charge, entraînements pour monte-charges de mines, ascenseurs.

3.3 Exigences générales posées aux entraînements réglés

Il existe plusieurs exigences imposées aux entraînements réglés parmi lesquels on distingue avant tout des caractéristiques recherchées et des conditions d'utilisation.

Exemples de caractéristiques recherchées :

- la puissance ;
- la vitesse maximale ;
- la plage de réglage de vitesse ;
- le couple résistant en fonction de la vitesse;
- etc

Exemple de conditions d'utilisation :

- les conditions de démarrage ;
- les conditions de freinage et de réversibilité ;
- la synchronisation avec une autre machine ;
- l'environnement ;
- les facilités d'entretien ;
- les conditions imposées par le réseau d'alimentation ;
- l'encombrement ;
- le coût d'investissement et d'exploitation ;
- etc.

Le choix d'un système d'entraînement correspondant aux exigences imposées est souvent difficile et l'expérience des constructeurs peut être utile.

3.4 Classification des divers entraînements

Principalement il existe deux types de moteurs soit :

- les moteurs à courant continu ;
- les moteurs à courant alternatif (moteur asynchrone à cage, moteur asynchrone à rotor bobiné, moteur synchrone).

Les entraînements électriques comprennent :

- les commandes pour moteurs CC ;
- les commandes CA à fréquence ou à tension variable pour les entraînements à cage ;
- les commandes CA pour les moteurs à rotor bobiné.

3.4.1 Entraînements CC (Machines à excitation séparée)

L'utilisation de l'électronique pour commander la vitesse des moteurs CC est simple, parce que leur vitesse est proportionnelle à la tension d'induit.

La tension CC peut être modifiée par le biais d'un redresseur commandé par réglage de phase ou par un hacheur si la puissance d'entrée est en courant continu.

On peut modifier la vitesse d'un moteur CC sur une très vaste plage en faisant varier le courant de l'induit ou le courant de champ ou les deux.

Le moteur CC est très versatile et offre la possibilité de commander la vitesse pour n'importe quel type de charge. Il est disponible pour une puissance variant de 100 W à 100 kW. Pour les applications spécialisées, des moteurs de quelques MW sont fabriqués.

Les moteurs auto ventilés sont adaptés pour les environnements secs et propres. Si équipé d'un filtre à air, ils peuvent également fonctionner dans des environnements poussiéreux.

Les moteurs à refroidissement par la surface sont mieux adaptés pour les installations externes où l'environnement peut être poussiéreux et humide. Ces moteurs n'ont pas de ventilateurs et le refroidissement se fait seulement par radiation. En raison de cette contrainte de dissipation minimale, ces moteurs présentent une solution économique pour les ventilateurs et pour les applications intermittentes où le rapport de vitesse est de 1:3.

Des moteurs avec enroulements de compensations sont requis où la charge est de type peak ou où une grande plage de réduction de flux est requise. Par contre, les moteurs non compensés ont cependant l'avantage d'avoir des inductances plus élevées ce qui soulage les convertisseurs de puissance.

3.4.2 Machines CC à aimant permanent

Ces moteurs ont connu une croissance importante durant ces dernières années. En comparaison avec l'excitation séparée, il présente des différences aux niveaux suivants :

- la caractéristique vitesse couple : le couple maximum est obtenu à la vitesse zéro ;
- le couple maximum diminue lorsque la vitesse augmente ;
- Aucune excitation donc moins de perte et meilleur rendement ;

- Aucune alimentation pour l'inducteur.

Un grand nombre de ces moteurs est utilisé pour les machines outils.

de commande de machines à courant continu, Bamako ENI-ABT, 2002.110p.