

Chapitre 2: Machines à courant continu

1) Introduction

Comme toutes les machines électriques, les machines à courant continu sont réversibles.

Le moteur à courant continu, alimenté par un générateur de tension continue, peut fournir de l'énergie mécanique à une charge.

La génératrice à courant continu, entraînée par une source d'énergie mécanique (moteur thermique par exemple), peut fournir un courant continu à une charge.

Dans les deux cas la conversion d'énergie s'accompagne de pertes d'énergie (cette expression signifie que de l'énergie apparaît sous une autre forme autre que l'énergie utile souhaitée).

Nous verrons que la même machine peut fonctionner en moteur ou en générateur. Autrement dit, les machines électriques sont réversibles et que dans tous les cas, il y'a conversion de l'énergie. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie (fig 2.1).

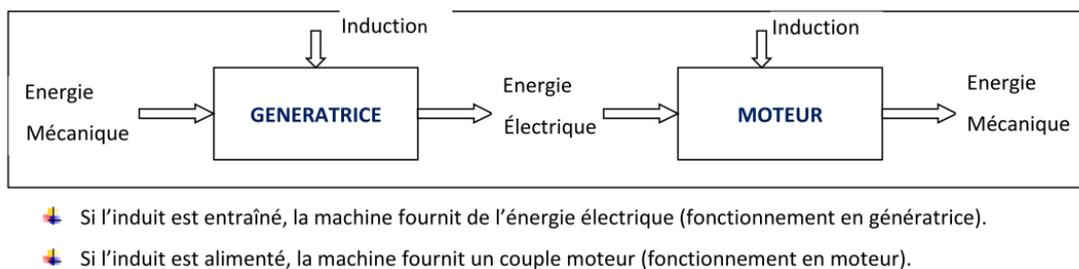


Fig 2.1 : Réversibilité des machines à courant continu

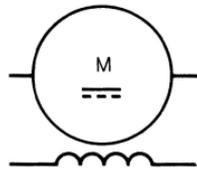
Les dynamos (génératrices) à courant continu ont été les premiers convertisseurs utilisés. Leur usage est en régression très nette. On utilise de préférence des redresseurs à semi-conducteurs.

Les moteurs à courant continu restent très utilisés dans le domaine de l'automobile ainsi qu'en tant que « moteur universel » dans l'électroménager et l'outillage.

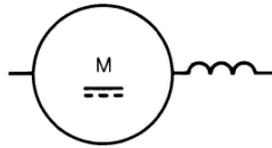
La fabrication de machines à courant continu de puissance supérieure à 100 MW se heurte à une frontière technologique infranchissable. En effet, les problèmes d'injection de courant par les contacts balais-collecteur posent des problèmes insolubles au dessus de ce seuil de puissance.

2) Symboles

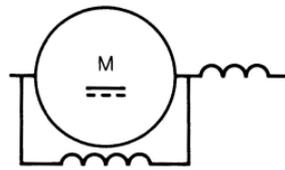
Ci-dessous les différents symboles utilisés pour représenter la machine à courant continu, selon qu'elle fonctionne en génératrice ou en moteur et selon le type d'excitation utilisée.



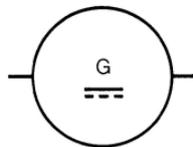
(a) Moteur à courant continu à excitation indépendante.



(b) Moteur à courant continu à excitation série.



(c) Moteur à courant continu à excitation composée.



(d) Symbole d'une dynamo, machine à courant continu fonctionnant en génératrice.

Fig 2.2 : Symboles de la machine à courant continu

3) Description simplifiée d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu se compose essentiellement (Fig 2.3) :

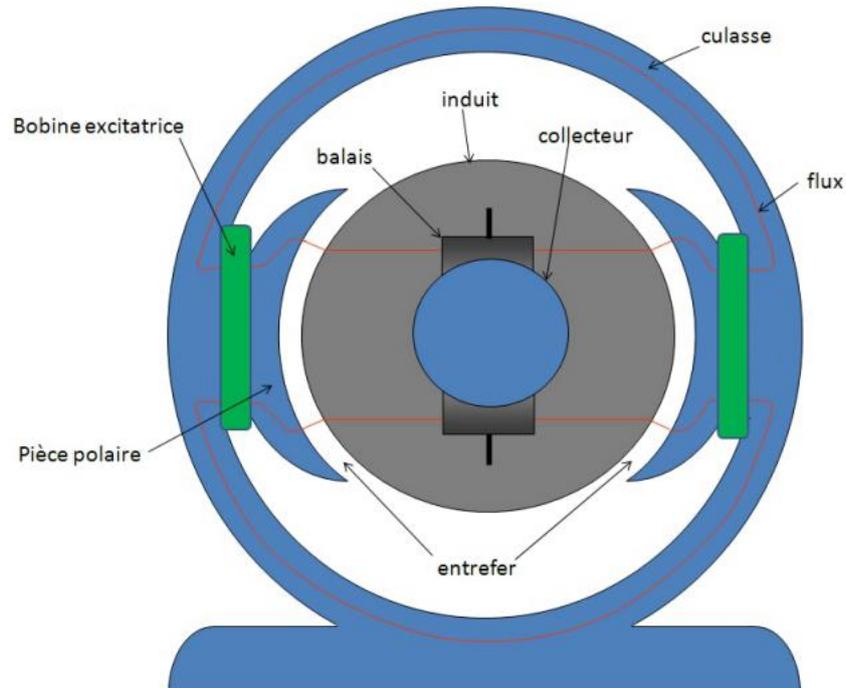


Fig 2.3 : Constitution d'une machine à courant continu

- a) d'un circuit magnétique comportant une partie fixe, le stator, et une partie tournante, le rotor, séparés par un entrefer ;
- b) de un ou plusieurs circuits électriques. Une source de champs magnétiques (inducteur) est nécessaire et deux sortes de configuration peuvent se rencontrer :
 - la source de champ est constituée d'aimants permanents et le circuit magnétique porte sur un bobinage unique, l'induit, disposé sur le rotor ;
 - la source de champ est un courant et le circuit magnétique porte alors deux circuits électriques : l'inducteur, ensemble de bobines qui produit le champ, et l'induit ;
- c) d'un collecteur qui, associé au balais, permet de relier le circuit électrique rotorique à un circuit extérieur de la machine.

- **L'induit**

C'est un circuit électrique obtenu en associant en série des conducteurs logés dans des encoches du rotor (Fig 2.4).



Fig 2.4 : Induit d'une machine à courant continu

Le rotor tourne entre les pôles de l'inducteur. Il constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur.

- **L'inducteur**

L'inducteur peut être formé d'aimants permanents ou de bobines en général disposé sur le stator. Les bobines sont placées autour de noyaux polaires. Ces bobines traversées par le courant d'excitation engendrent la force magnétomotrice ; force nécessaire à la production du flux.

Dans les machines bipolaires (deux pôles), deux bobines excitatrices sont portées par deux pièces polaires montées à l'intérieur d'une culasse. La culasse est généralement en fonte d'acier, tandis que les pièces polaires sont formées de tôles d'acier doux (Fig 2.5).



Fig 2.5 : Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu

Le nombre de pôles que porte l'inducteur d'une machine à courant continu dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles ; comme présenté sur la figure 2.6 et l'inducteur complet sur la figure 2.7.



Fig 2.6 : Mise en place des bobines sur le circuit magnétique d'une machine à courant continu

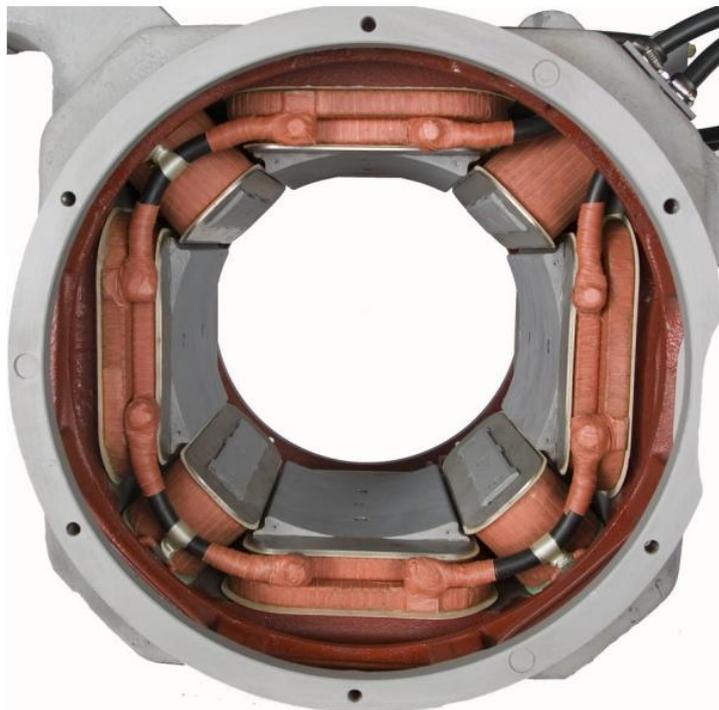


Fig 2.7 : Inducteur complet d'une machine à courant continu

- **Collecteur et balais**

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre, isolées les unes des autres par des feuilles de mica, et disposées suivant un cylindre, en bout du

rotor. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur. Dans une machine bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur. Ainsi, ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur (Fig 2.8a, 2.8b et 2.8c).



Fig 2.8a : Collecteur d'une machine à courant continu de faible puissance



Fig 2.8b : Collecteur d'une machine à courant continu de forte puissance



Fig 2.8c : Vues du collecteur et des balais d'une machine à courant continu de faible puissance

Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles. Les balais portés par le stator, frottent sur les lames du collecteur. Ces contacts glissants entre lames et balais permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit qui tourne et l'extérieur de la machine.

La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle (Fig 2.9).

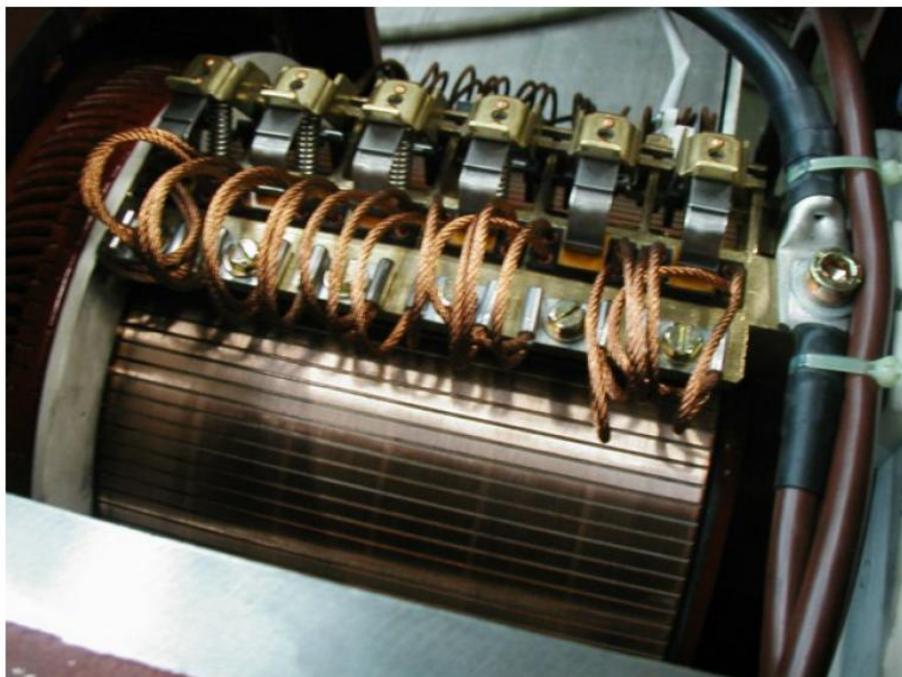


Fig 2.9 : Ligne des balais d'une machine à courant continu de forte puissance

4) Principe de fonctionnement

Rappel

- **Loi de Laplace** (Moteur)

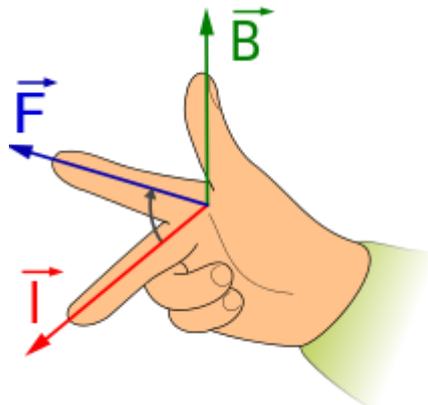
Si l'on place un conducteur, parcouru par un courant, entre les pôles de l'aimant, on constate :

- 1- que le conducteur est soumis à une force qui tend à le déplacer vers le bas ;
- 2- que si l'on change de sens du courant, le sens de la force change également.

La force agit dans une direction qui est à la fois perpendiculaire à la direction du courant et à celle des lignes de force.

$$d\vec{F} = I (d\vec{l} \wedge \vec{B})$$
$$\vec{F} = I \vec{l} \wedge \vec{B}$$
$$F = BIl \sin \alpha \quad \alpha = (\vec{l}, \vec{B})$$

Le sens de la force peut être déterminé facilement par la règle des trois doigts de la main droite.



Dans le cas du moteur à courant continu le stator, aussi appelé inducteur, crée un champ magnétique \vec{B} , le rotor, aussi appelé induit, est alimenté en courant continu. Les conducteurs du rotor traversés par le courant sont immergés dans le champ \vec{B} et sont soumis alors à la force de Laplace.

C'est cette force qui va faire tourner le rotor en créant un couple moteur comme c'est illustré sur la figure 2.10 ci-dessous :

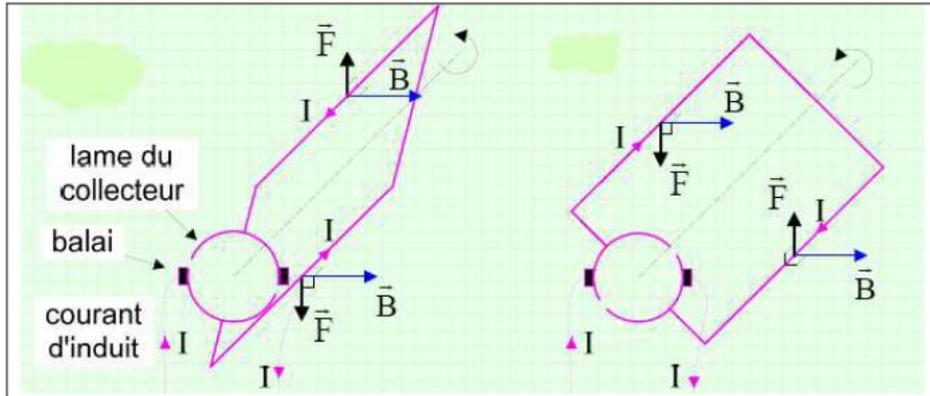


Fig 2.10 : Principe physique du moteur à courant continu

- **Loi de Faraday** (génératrice)

La loi de Lenz-Faraday, ou loi de Faraday, permet de rendre compte des phénomènes macroscopiques d'induction électromagnétique. Elle exprime l'apparition d'une force électromotrice dans un circuit électrique, lorsque celui-ci est immobile dans un champ magnétique variable ou lorsque le circuit est mobile dans un champ magnétique variable ou permanent.

$$e = \vec{B}(\overline{dl} \wedge \vec{v}), \quad \vec{v} : \text{vitesse}; l : \text{longueur}$$

$$d\Phi = \vec{B} \cdot \overline{dS} \quad \overline{dS} = \vec{l} \wedge \overline{dx} \quad \overline{dx} = \vec{v} \cdot dt$$

$$e = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| -\frac{\vec{B}\vec{l} \wedge \vec{v} dt}{dt} \right| = |\vec{B}\vec{l} \wedge \vec{v}|$$

$$e = Blv \sin \alpha \quad \alpha = (\vec{l}, \vec{v})$$

- **F.é.m aux bornes d'une spire diamétrale**

Si l'on considère un conducteur (1) placé sur l'induit qui tourne (voir figure 2.11), ce conducteur coupe les lignes de champ, il est alors le siège d'une force électromotrice e_1 donné par la relation suivante :

$$e_1 = Blv$$

Le conducteur 2 situé sur le pôle opposé est le siège d'une f.é.m e_2 de même sens que celui de e_1 . Les deux f.é.m s'ajoutent, on peut fermer le circuit et on réalise ainsi un générateur de courant.

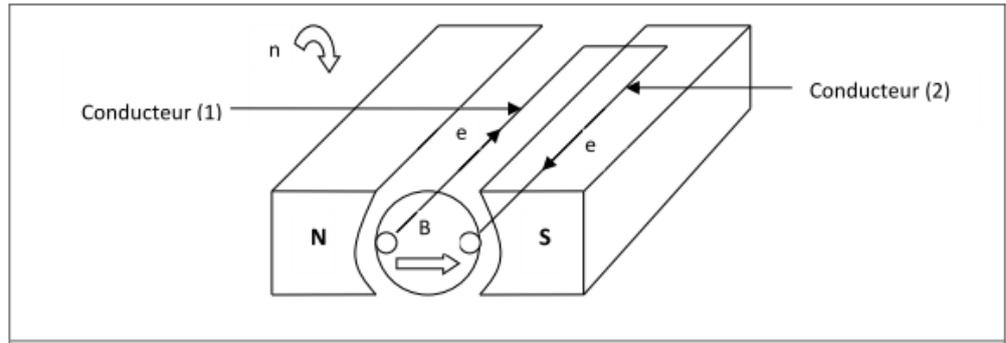


Fig 2.11 : Principe de fonctionnement d'une génératrice bipolaire

A) Fonctionnement en génératrice

1) Allure de la f.é.m

Soit une spire de l'induit repérée par l'angle θ qu'elle fait avec l'axe du pôle sud, comme illustré par la figure 2.12 ci-dessous :

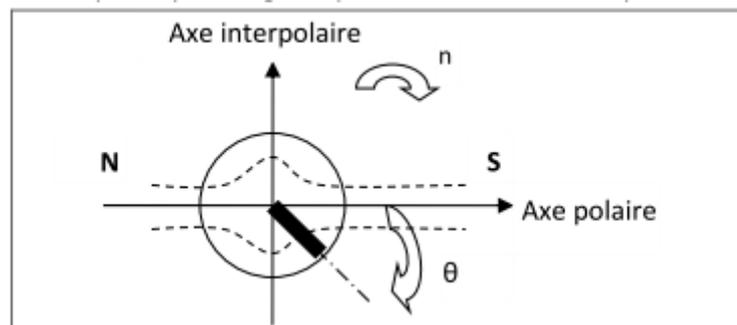


Fig 2.12 : Spire et flux

La portion ϕ du flux Φ qui traverse cette spire est nulle pour $\theta=0$. Elle croit d'abord avec θ atteignant $\phi/2$ quand $\theta=\pi/2$. Puis elle diminue, vaut 0 pour $\theta=\pi$, $-\phi/2$ pour $\theta=3\pi/2$. Ensuite elle croit à nouveau pour retrouver la valeur 0 lorsque $\theta=2\pi$.

De ϕ , on passe à e induite dans cette spire par :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \left(-\frac{d\Phi}{d\theta}\right) \cdot \left(\frac{d\theta}{dt}\right) = -\Omega \frac{d\phi}{d\theta}, \text{ comme illustré sur la figure 2.13.}$$

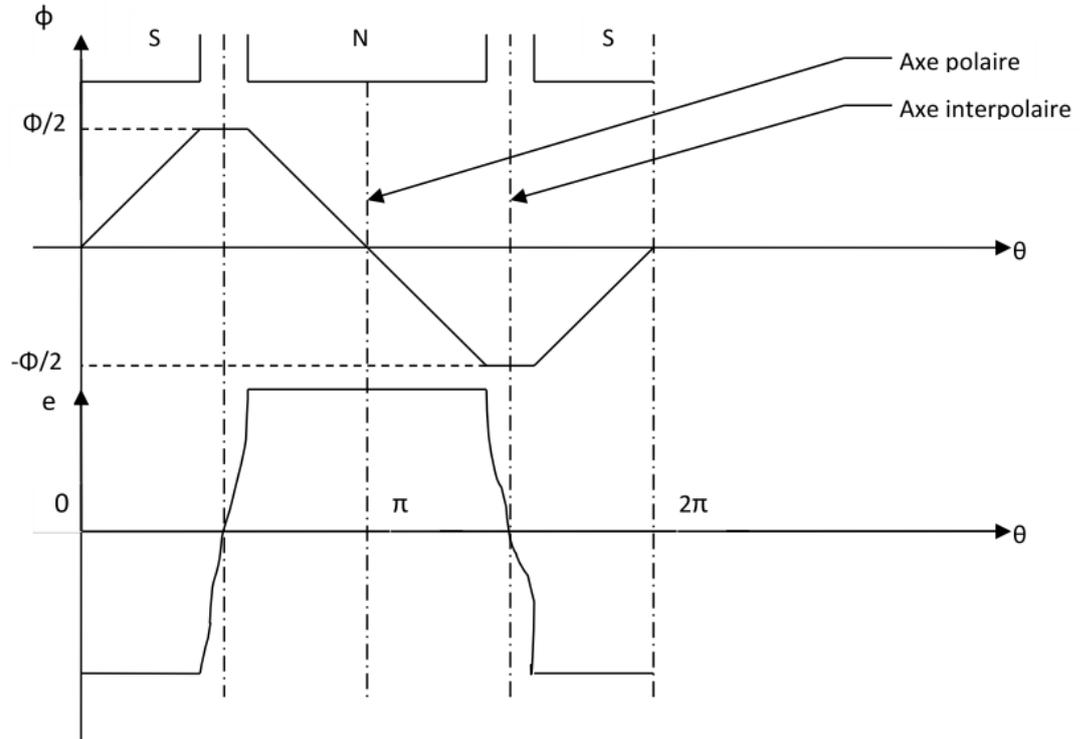


Fig 2.13 : Allure du flux et de la f.é.m

On remarque que la f.é.m induite dans une spire est alternative ; si elle est positive quand la spire est sous le pôle nord, elle est négative quand elle est sous le pôle sud.

2) Le redressement par le collecteur

Toutes les spires situées sous un même pôle étant le siège de f.é.m de même signe, les balais placés dans l'axe interpolaire (ligne neutre) permettant de les additionner (Fig 2.14).

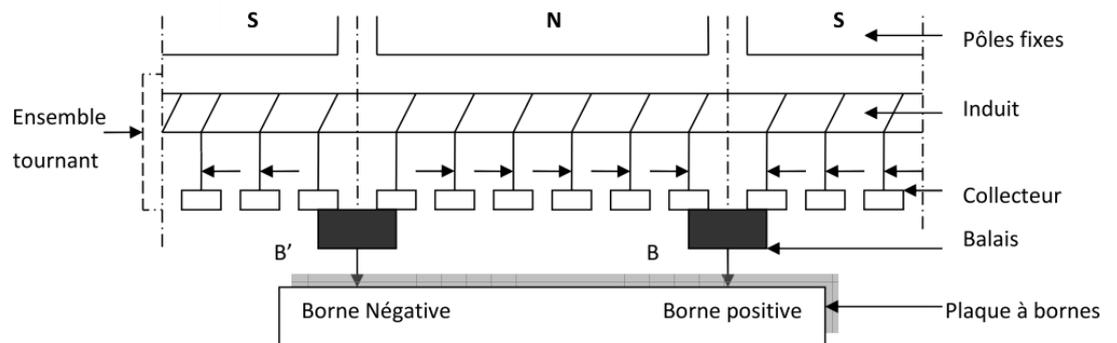


Fig 2.14 : Principe du collecteur

3) Calcul de la f.é.m entre balais

E est la somme des f.é.m engendrées par les $n/2$ spires situés sous le même pôle.

Le flux à travers une spire (position θ) est :

$$\varphi = \frac{\phi}{2} f(\theta) \quad f\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad f\left(\frac{3}{2}\pi\right) = -1$$

La f.é.m induite dans cette spire est :

$$e = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\phi}{2} f'(\theta) \frac{d\theta}{dt} = -\frac{\phi}{2} \Omega f'(\theta)$$

Dans les $\frac{n}{2\pi} d\theta$ spires situées sous $d\theta$, la f.é.m induite est :

$$e \cdot \frac{n}{2\pi} \cdot d\theta = -\frac{n}{2\pi} \frac{\phi}{2} \Omega f'(\theta) d\theta$$

$$E = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3}{2}\pi} -\frac{n}{2\pi} \frac{\phi}{2} \Omega f'(\theta) d\theta \quad \text{entre deux balais}$$

$$= -n \frac{\phi}{2} \frac{\Omega}{2\pi} \left\{ f\left(\frac{3}{2}\pi\right) - f\left(\frac{\pi}{2}\right) \right\} = -n \frac{\phi}{2} \frac{\Omega}{2\pi} (-2)$$

$$\Omega = 2\pi N \quad , \quad N: \text{nombre de tr/s}$$

$$E = -n \frac{\phi}{2} \frac{2\pi}{2\pi} N \cdot (-2)$$

$$E = n N \phi \quad \left\{ \begin{array}{l} N : \text{tr/s} \\ n : \text{nombre de spires de l'induit} \\ \phi : \text{flux inducteur par pôle} \end{array} \right.$$

- Généralisation de l'expression de la f.é.m

Si la machine est à 2p pôles ;

2a : nombre de branchements (nombre de circuits mis en parallèle entre les bornes).

$$E = \frac{2pnN\phi}{2a} \quad \left\{ \begin{array}{l} a: \text{nbre de paires de voies en parallèle} \\ p : \text{nbre de paires de pôles} \\ 2a : \text{nbre de voies en parallèle} \\ n : \text{nombre de spires (nbre de spires actifs)} \\ \phi : \text{flux sous un pôle} \end{array} \right.$$

Posons : $k = \frac{p}{a} \cdot n$

$$E = k N \phi$$

Cette expression de la f.é.m. est valable pour tout type d'excitation en moteur ou en générateur

Exemple d'application

Une génératrice bipolaire shunt (parallèle) comporte un induit de 600 conducteurs actifs tournant à la vitesse de 1800 tr/mn dans un flux utile de 0.006 Wb, $a=1$.

Calculer :

- E
- La tension aux bornes de l'induit, de résistance 1.5Ω pour un courant de 10 A débité par cet induit et à excitation constante.
- Le courant d'excitation dans le cas b (résistance de 80Ω avec le rhéostat de champ).
- La puissance fournie au circuit extérieur.

$$a) E = \frac{p}{a} n N \phi = 600 \cdot \frac{1800}{60} \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 108 V$$

$$b) U = E - R_a I_a = 108 - (1.5 * 10) = 93 V$$

$$c) I_{exc} = \frac{U}{R_{exc}} = \frac{93}{80} = 1.1625 A$$

$$d) P_e = U(R_a - R_{exc}) = 93(10 - 1.1625) = 822.12 W$$

4) Couple Electromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est identique pour les deux fonctionnements ; moteur et génératrice.

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega} = \frac{EI}{2\pi N} \quad N.m$$

5) Caractéristiques lors du fonctionnement en génératrice

Les génératrices à courant continu sont utilisées que dans des cas précis :

- Capteurs tachymétrique, délivrant une tension $E = K N$.
- Génératrices compound à flux soustractifs (soudure, alimentation des arcs).

Nous allons les étudier pour des raisons pédagogiques.

5.1) Génératrice à excitation indépendante ou séparée

Les deux circuits, induit et inducteurs sont indépendants l'un de l'autre ; comme illustré sur la figure 2.15.

a) Caractéristique à vide

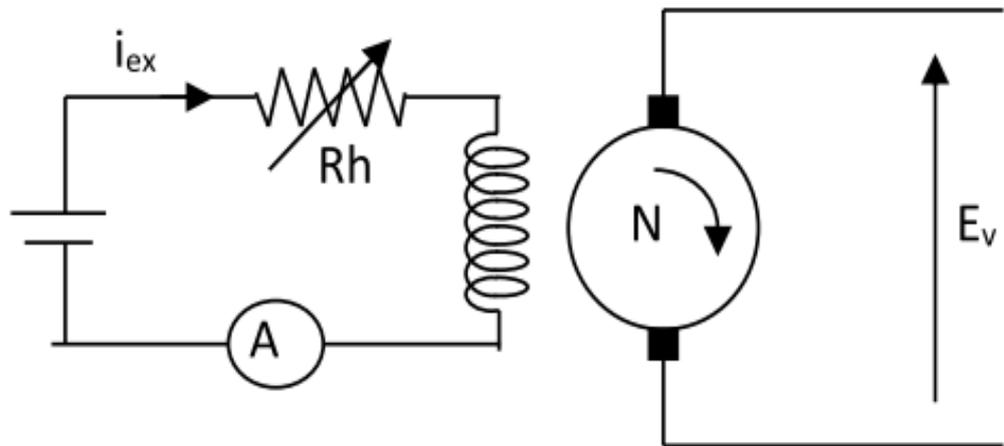


Fig 2.15 : Génératrice à excitation indépendante (à vide)

Le fonctionnement à vide à vitesse constante ($N=\text{constante}$) est la courbe représentant $E_v = E_0 = f(i_{ex})$ (Fig 2.16), i_{ex} étant l'intensité d'excitation du circuit inducteur. Le circuit d'induit est ouvert ($I=0$), et la tension mesurée aux bornes de l'induit est égale à la f.é.m à vide E_v ou E_0 .

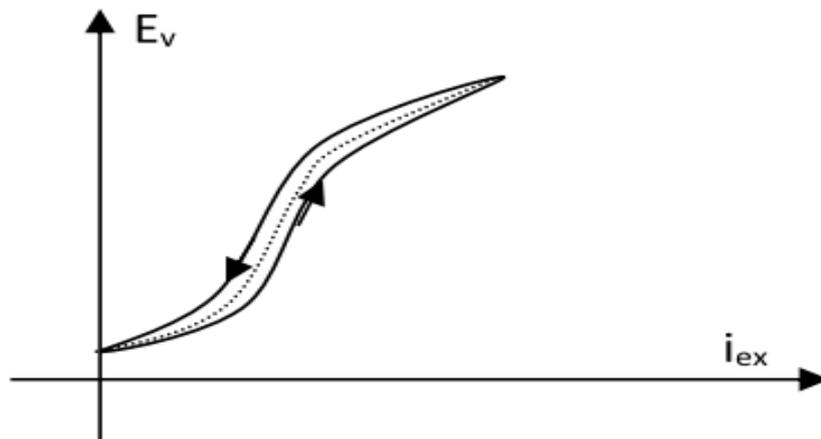


Fig 2.16 : Caractéristique à vide $E_v = f(i_{ex})$

Puisque l'induit n'est parcouru par aucun courant, la puissance électromagnétique est nulle, la caractéristique $E=f(i_{ex})$ ainsi relevée pourra être utilisée quel que soit le fonctionnement de la machine (moteur ou générateur).

Pour un courant d'excitation nul, la f.é.m est due au flux rémanent de la machine.

Les équations électriques sont :

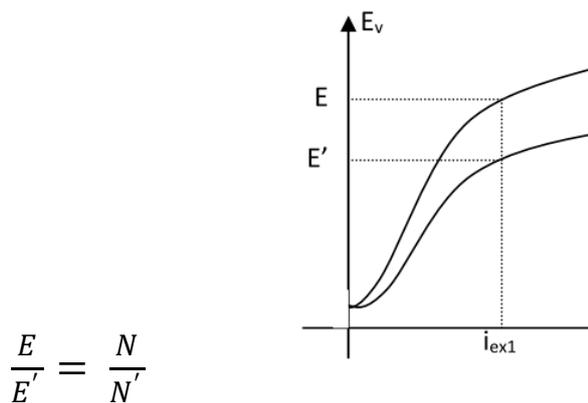
$$\begin{cases} U_{ex} = R_{ex} i_{ex} \\ U = E_v \\ E = K N \phi \end{cases}$$

A vitesse donnée, on retrouve les propriétés d'un circuit magnétique (car E_v est proportionnelle à B et i_{ex} est proportionnel à H) à savoir :

- Présence d'un flux rémanent qui donne naissance à une tension rémanente E_r .
- Les valeurs de E_r relevées à intensité croissante est légèrement inférieure à celles relevées à intensité décroissante (à cause de l'hystérésis).

A vitesse variable, les caractéristiques se déduisent par une affinité verticale (à courant d'excitation donné, la f.é.m est proportionnelle à la vitesse : $E_v = k\Omega\phi$).

On obtient donc (pour chaque valeur de i_{ex}) :



b) Caractéristique en charge

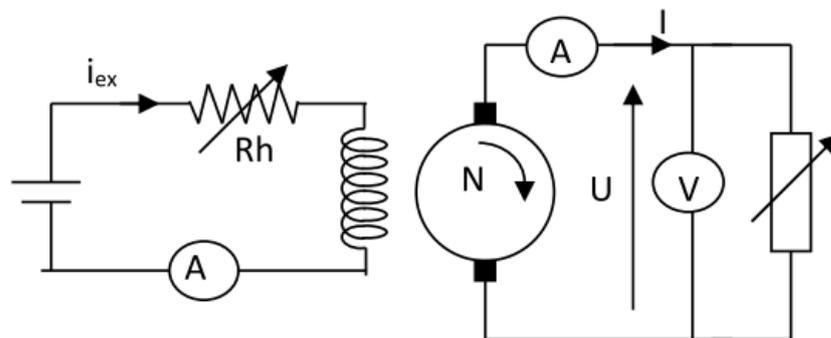


Fig 2.17 : Génératrice à excitation indépendante (en charge)

Equations électriques

$$U_{ex} = R_{ex} i_{ex}$$
$$U = E - RI \quad R: \text{résistance de l'induit}$$
$$E = K N \phi$$

A vitesse constante et à courant d'excitation constant, nous varions le courant d'Induit I en agissant sur la charge aux bornes de l'induit. Nous relevons la caractéristique $U(I)$ (Fig 2.18).

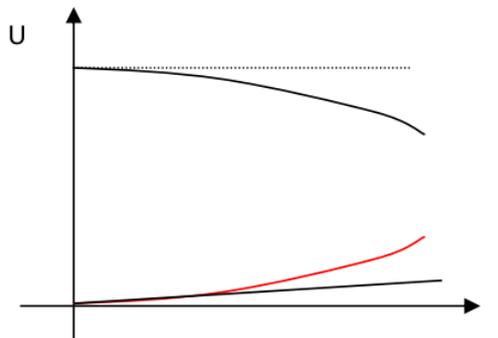


Fig 2.18 : Caractéristique $U(I)$

On constate que la tension U diminue quand le courant de charge augmente, Cette diminution représente la chute de tension totale qui est donc :

$$\Delta U(I) = \varepsilon(I) + RI$$

Ainsi, il est facile, après avoir mesuré la résistance de l'induit, de déterminer la courbe de la réaction magnétique d'induit par :

$$\varepsilon(I) = \Delta U(I) - RI$$

Remarque : pour maintenir une tension constante, il faut augmenter le courant d'excitation à vitesse constante.

c) Réaction magnétique de l'induit

Lorsqu'on fait débiter une génératrice sur un circuit extérieur, un courant parcourt les enroulements, ce courant crée un champ magnétique dit de réaction magnétique d'induit.

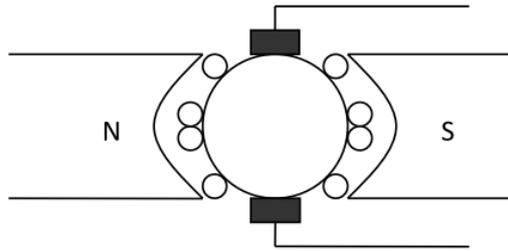


Fig 2.19 : Réaction magnétique d'induit (RMI)

L'induction résultante est donc la combinaison du champ inducteur et du champ de la réaction magnétique d'induit (Fig 2.20).

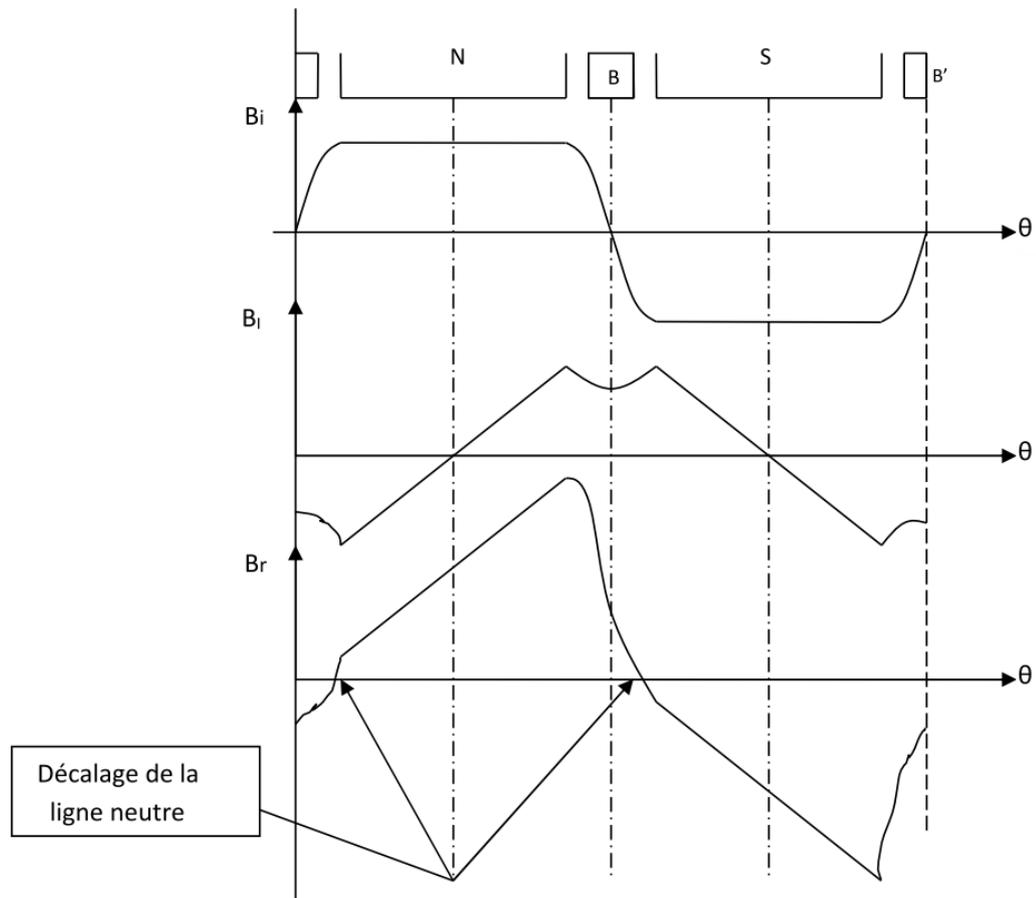


Fig 2.20 : Effet de la RMI

La RMI a donc pour effet :

- De diminuer le flux traversant l'induit et par suite la f.é.m.
- De décaler la ligne neutre dans le sens de rotation de la machine. La f.é.m est encore plus diminuée, en allant d'un balais à l'autre on ne collecte plus certaines des f.é.m induites dans les conducteurs présentant le même signe,

au contraire on met en série avec les sections sièges de f.é.m positives des sections sièges de f.é.m négatives.

- Rendre difficile la commutation car la f.é.m induite dans les sections mises en court circuit sous les balais n'est pas nulle. AT

Compensation de la RMI

On compense la réaction d'induit par un enroulement logé dans des encoches dans l'inducteur et parcouru par le courant d'induit. Il crée une f.m.m égale et opposée à celle due aux ampères-tours de l'induit.

Les A.T de compensation et les A.T à compenser étant proportionnels à I (courant de charge), la compensation est bonne quelle que soit la charge.

Dans les petites machines tournant toujours dans le même sens et travaillant toujours en génératrice ou en moteur, on peut décaler les balais d'un angle α (Fig 2.21) :

- Dans le sens de rotation s'il s'agit d'une génératrice.
- Dans le sens inverse de rotation s'il s'agit d'un moteur.

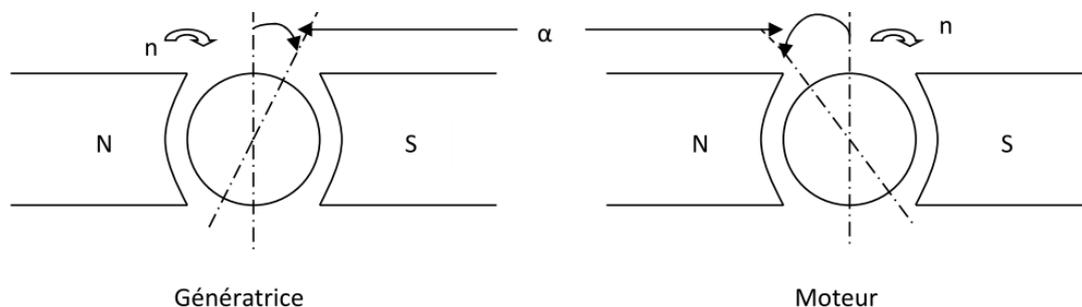


Fig 2.21 : Décalage de la ligne neutre pour les petites MCC tournant toujours dans le même sens

5.2) Génératrice à excitation shunt

L'enroulement inducteur est mis en parallèle avec l'enroulement induit (Fig 2.22).

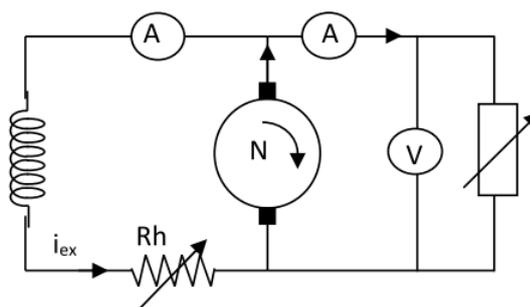


Fig 2.22 : Génératrice à excitation shunt

Pour la caractéristique à vide $E=f(I_{exc})$, elle est identique à celle de la génératrice à excitation indépendante.

Equations électriques

$$\begin{cases} I = I_{ch} + I_{exc} \\ U = E - RI - \varepsilon(I) \\ U = R_{exc} I_{exc} \end{cases} \quad \text{avec} \quad I : \text{courant d'induit, } I_{ch} : \text{courant dans la charge}$$

$\varepsilon(I)$: tension due à la R.M.I

Caractéristique en charge à N et I_{exc} constants (fig 2.23)

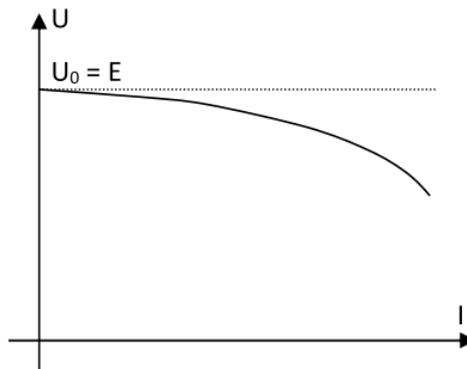


Fig 2.23 : Caractéristique en charge de la machine à exc shunt

La tension U diminue beaucoup plus vite en fonction du courant de la charge que pour la génératrice à excitation indépendante.

Pour déterminer ce graphe, il y a 2 méthodes :

- ✚ Méthode expérimentale : cette méthode consiste à relever des points pour différentes valeurs de la résistance de charge à $n=cste$.
- ✚ Méthode de Pecou : c'est la méthode la plus pratique, elle consiste à déterminer en excitation séparée la caractéristique à vide et la courbe de la chute de tension, puis les représenter respectivement dans les quadrants de gauche et de droite d'un même repère, puis construire graphiquement $U = f(I)$.

Il est aussi possible de déterminer la caractéristique $U=f(I)$ graphiquement par la méthode de Picou : c'est la méthode la plus pratique, elle consiste à déterminer en excitation séparée la caractéristique à vide et la courbe de la chute de tension, puis les représenter respectivement dans les quadrants de gauche (Fig 2.24) et de droite d'un même repère, puis construire graphiquement $U = f(I)$.

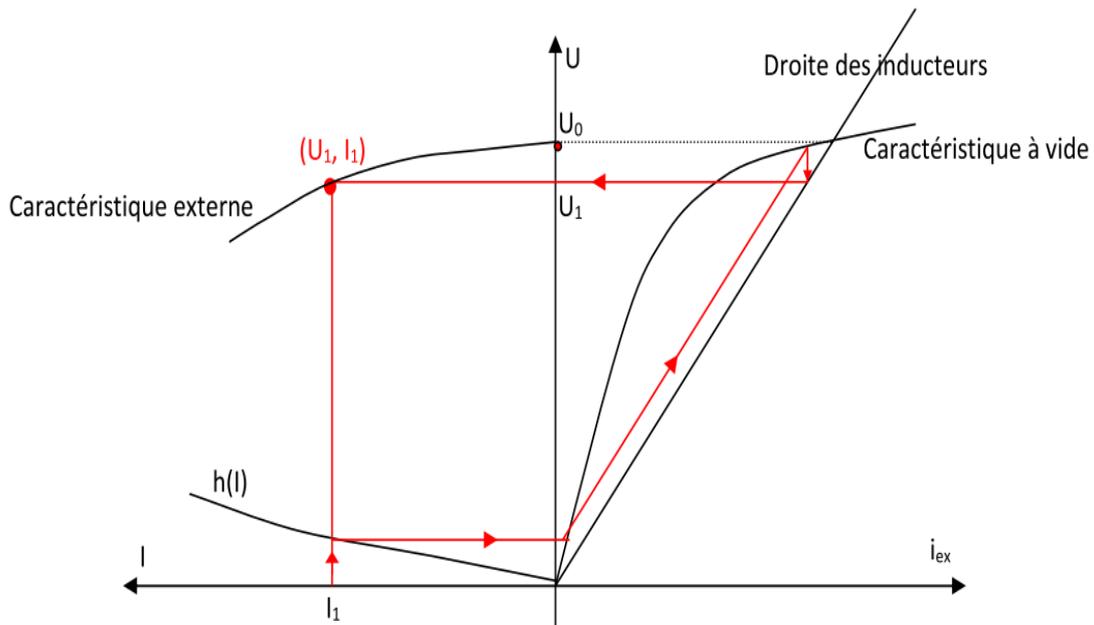


Fig 2.24 : Méthode de Picou

Amorçage de la génératrice shunt

La génératrice shunt s'amorce si :

- Les connections entre inducteur et induit sont convenable ; le flux rémanent qui engendre aux bornes de l'induit une faible f.é.m provoque le passage dans les inducteurs, d'un courant qui renforce la valeur de ce flux. Si la génératrice ne s'amorce pas pour le sens de rotation désiré, inverser les connections entre les bornes de l'inducteur ou de l'induit.
- La résistance totale du circuit inducteur ne dépasse pas une certaine valeur appelée : résistance critique d'amorçage.

5.3) Génératrice compound (composée)

Le circuit inducteur shunt peut être branché aux bornes de l'induit, c'est le montage courte dérivation, ou aux bornes de la machine, c'est le montage en longue dérivation (fig 2.25).

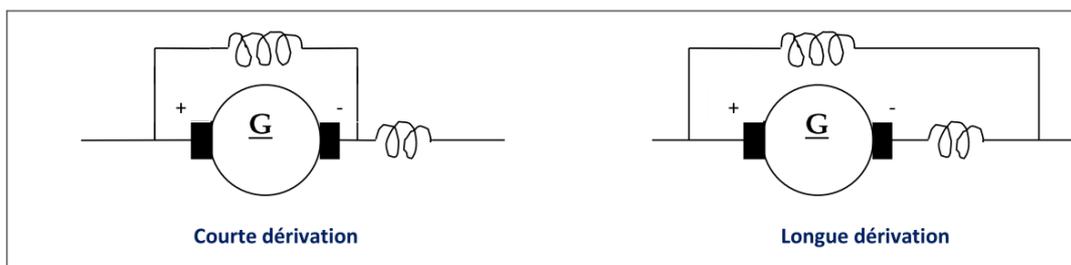


Fig 2.25 : Génératrice compound

Suivant le branchement, les ampères-tours série peuvent s'ajouter aux ampères-tours shunt ou s'en soustraire.

Dans le premier cas, la génératrice est dite à flux additifs (courte dérivation).

Dans le second cas, la génératrice est dite à flux soustractif (longue dérivation).

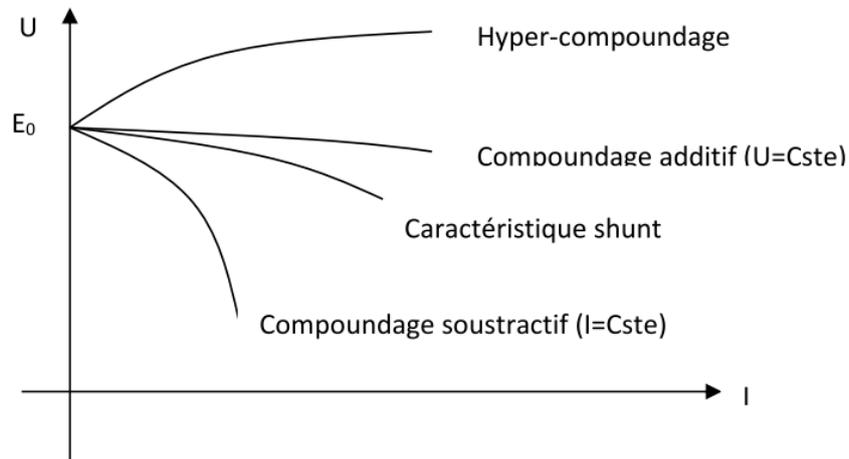


Fig 2.26 : $U=f(I)$ pour une génératrice compound

B) Caractéristique lors du fonctionnement en moteur

On peut faire facilement varier la vitesse des moteurs à courant continu : c'est là leur propriété essentielle. Ces moteurs sont utilisés dans un très large domaine de puissances.

Citons par exemple :

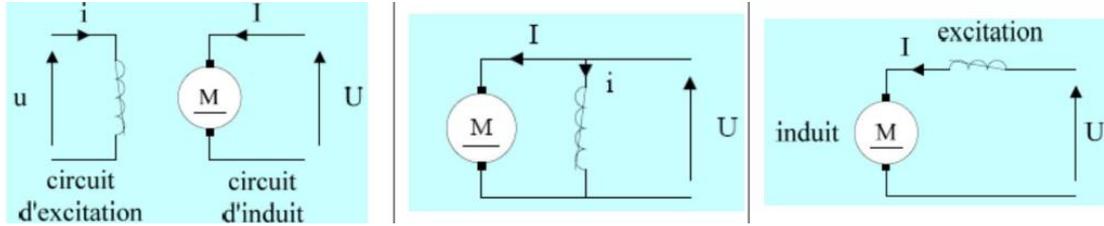
- les petits moteurs à aimants permanents, qui, dans les servomécanismes, développent moins de quelques watts ;
- les moteurs à excitation séparée de moyenne puissance (1 à 300 kW) utilisés dans les machines outils et les engins de levage ;
- les moteurs à excitation en série, de forte ou de très forte puissance (jusqu'à 10 MW) qui équipent des locomotives ou les trains de laminaires ;
- l'industrie automobiles (beaucoup de moteurs sont à courant continu).

Ils sont plus coûteux que le moteur à courant alternatif usuel, son entretien est plus exigeant, mais la variation de la vitesse est très facile.

L'utilisateur d'un moteur s'intéresse en premier lieu à la caractéristique mécanique $C_e = f(N)$ qui donne le couple produit en fonction de la vitesse. Il faut par ailleurs connaître le courant absorbé en fonction du couple demandé : c'est la caractéristique électromécanique $C_e = f(I)$. On utilise aussi la caractéristique de vitesse $N = f(I)$.

Ces courbes sont généralement tracées avec pour paramètre la tension d'alimentation U ; les propriétés obtenues dépendent du mode d'excitation.

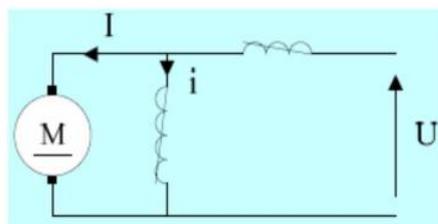
Différents types de moteurs à courant continu



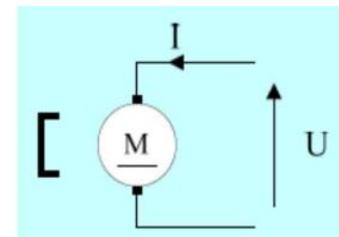
Moteur à exc indépendante

Moteur à exc shunt

Moteur à exc série



Moteur compound (courte dérivation)



Moteur à aimant permanent

Fig 2.27 : Moteur à CC (différents types d'excitation)

1) Moteur à excitation indépendante (séparé)

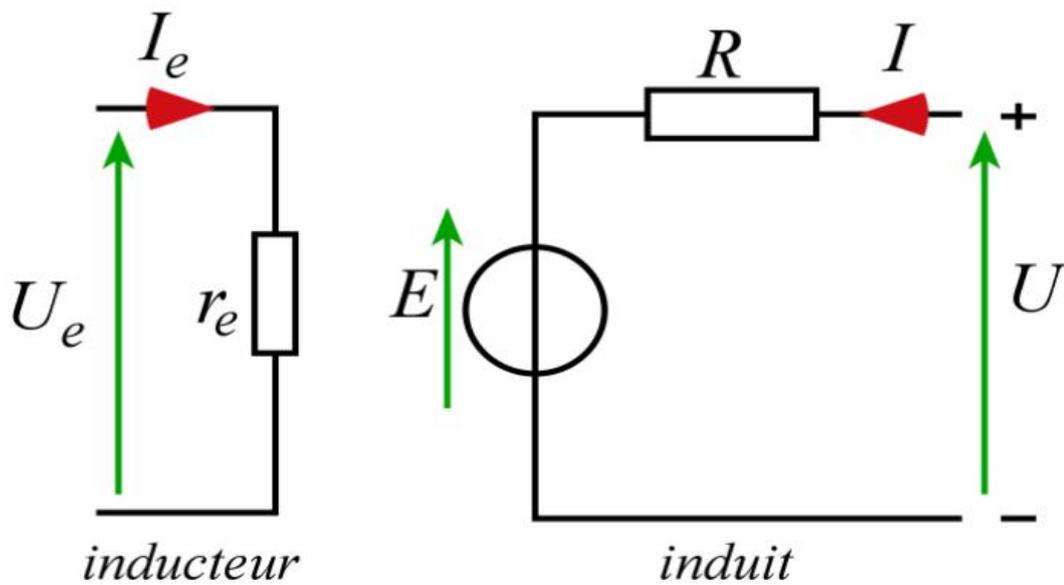


Fig 2.28 : Modèle équivalent du moteur à exc indépendante

Les équations électriques sont :

$$\begin{cases} U = E + RI \\ U_e = R_e I_e \\ E = kN\Phi \end{cases}$$

Le couple électromagnétique est :

$$C_e = \frac{EI}{\Omega} = \frac{KN\Phi I}{2\pi N} = \frac{K\phi I}{2\pi} = k' \phi I \quad \text{avec } k' = \frac{k}{2\pi}$$

a) Caractéristique à vide $E_v = f(I_e)$ à vitesse constante (Fig 2.29)

- De O à A, la caractéristique est linéaire, $E_v = kN\Phi(I_e) = k' \phi(I_e)$ (avec $k' = kN$)
- De A à B le matériau ferromagnétique dont est constitué le moteur commence à saturer (μ_r n'est plus constant).
- Après B, le matériau est saturé, la f.é.m n'augmente plus.
- La zone utile de fonctionnement de la machine se situe au voisinage de A. Sous le point A, la machine est sous utilisée, et après B les possibilités de la machine n'augmentent plus (mais les pertes augmentent puisque I_e augmente).
- Dans la réalité du fait du matériau ferromagnétique, on relève une caractéristique avec une faible hystérésis.

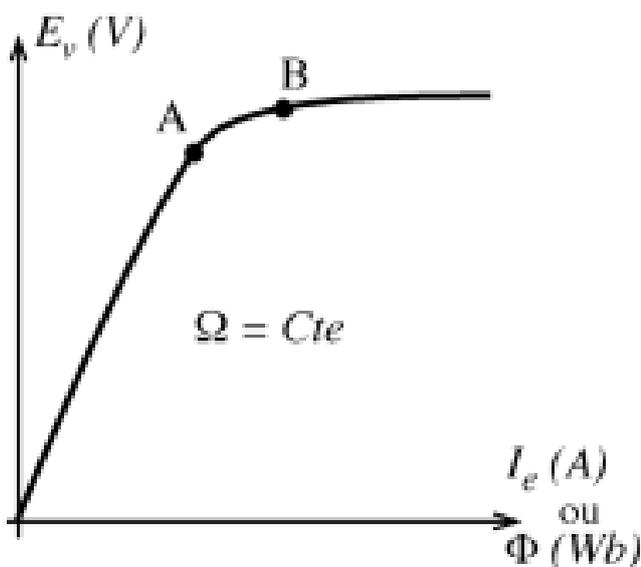


Fig 2.29 : Caractéristique à vide du moteur à exc séparée

b) Caractéristique en charge $U=f(I)$ à I_e et N constants (Fig 2.30)

- La résistance du bobinage provoque une légère chute de tension ohmique dans l'induit : RI
- Le courant qui circule dans l'induit crée son propre flux de sorte que le flux total en charge $\Phi_{charge}(I, I_e) < \Phi_{vide}(I_e)$. Cela se traduit par une chute de tension supplémentaire ΔU ; c'est la réaction magnétique d'induit. Pour l'annuler, la machine possède sur le stator des enroulements de compensation parcourus par le courant induit : on dit que la machine est compensée. C'est souvent le cas.
- La distribution du courant d'induit par les balais et le collecteur provoque également une légère chute de tension (souvent négligée).

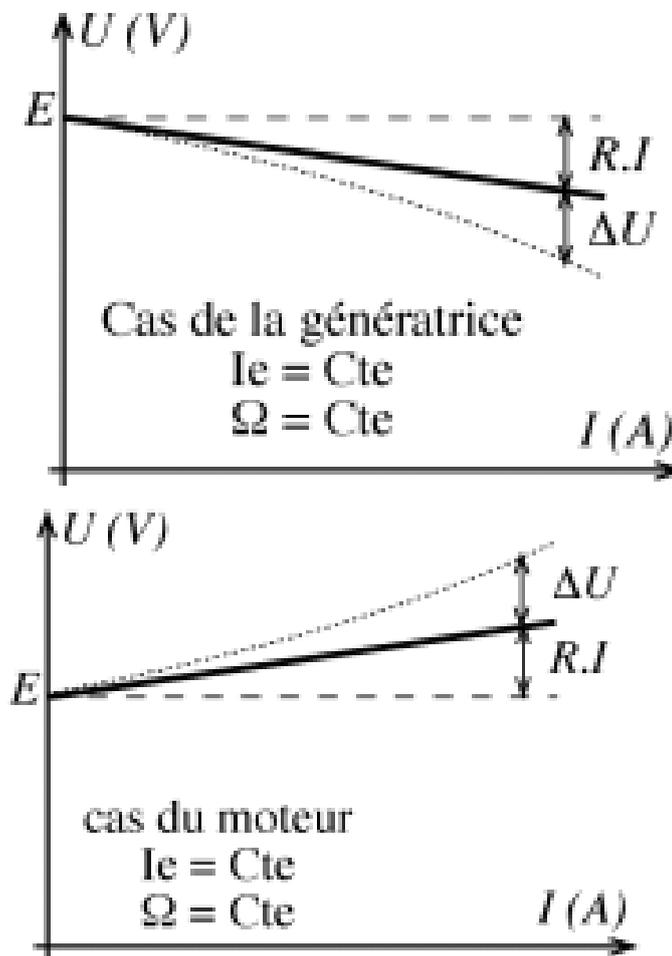


Fig 2.30 : Caractéristiques en charge de la MCC à exc séparée

Pour une génératrice : $U = E - RI - \Delta U$

Pour un moteur : $U = E - RI - \Delta U$

2) Moteur à excitation shunt (Fig 2.31)

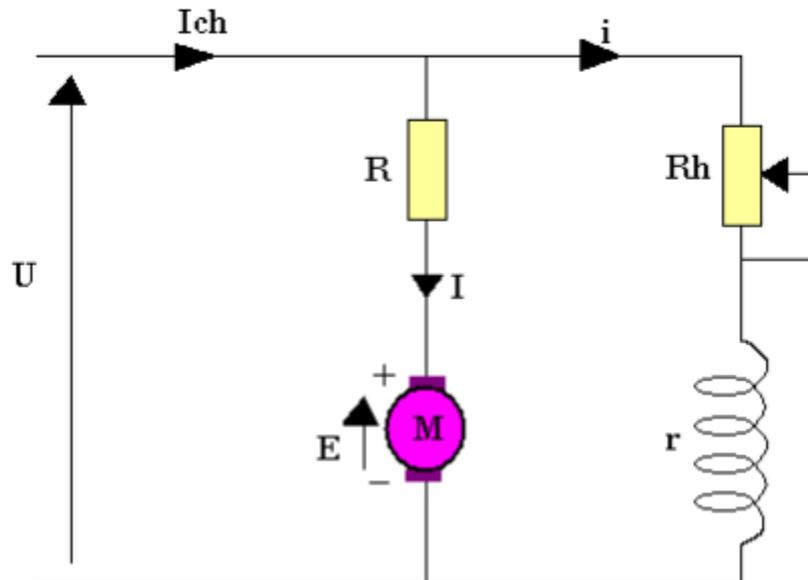


Fig 2.31 : Modèle équivalent du moteur shunt

Comme les deux enroulements sont mis en parallèle, on rajoute un rhéostat d'excitation R_h en série avec l'inducteur afin de varier le courant d'excitation indépendamment de la tension U .

Le moteur à excitation shunt possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas, l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit.

Montage pratique (Fig 2.32)

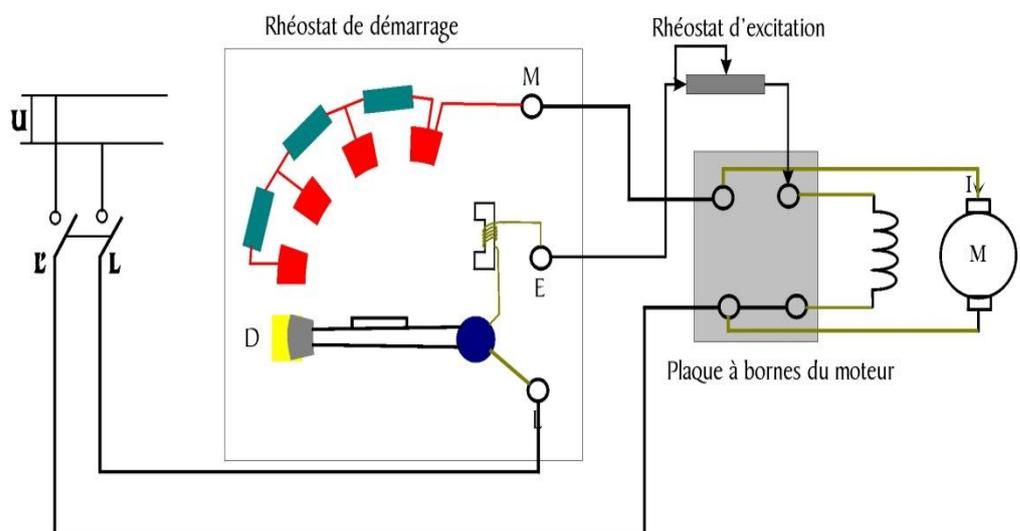


Fig 2.32 : Montage pratique pour le démarrage du moteur shunt

a) Caractéristique de vitesse

- Caractéristique à vide $N_0 = f(I_{exc})$ à C_u nul et à tension U constante

A vide $I = I_0$ dans l'induit est faible, ce qui permet de négliger les effets de I_0 et de la réaction magnétique d'induit.

$$\begin{aligned}U &= E_0 + RI_0 \cong E_0 \\U &\cong E_0 = k N_0 \Phi_0 \\N_0 &\cong \frac{U}{k \Phi_0} \quad , \quad \Omega_0 \cong \frac{U}{2\pi k \Phi_0}\end{aligned}$$

Cette dernière expression permet de tracer la caractéristique à vide de la vitesse en fonction du courant d'excitation puisque $\Phi_0 = f(I_{exc})$.

Remarque : Pour un courant d'excitation nul, le moteur s'emballé (la vitesse N_0 tend vers l'infini théoriquement).

- Caractéristique de vitesse en charge $N = f(I)$ à U et I_{exc} constants

En négligeant la RMI, l'équation électrique de l'induit est :

$$U = E + RI = kN\Phi + RI$$

$$N = \frac{U - RI}{k\Phi} = \frac{U - RI}{k'}, \text{ c'est l'équation d'une droite (Fig 2.33)}$$

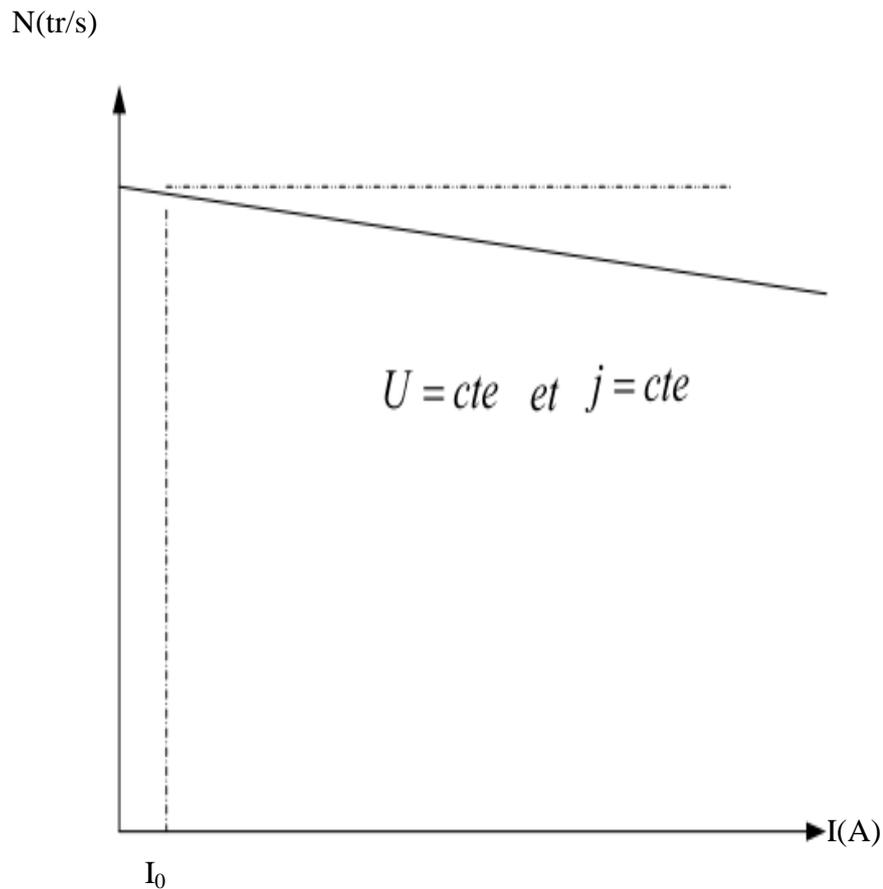


Fig 2.33 : Caractéristique de vitesse en charge

En fonctionnement normal : la chute de tension dans l'induit (RI) demeure souvent très inférieure à la tension d'alimentation. Lorsque RI n'est pas négligeable devant U , la vitesse N est inférieure à N_0 et elle décroît légèrement lorsque l'intensité I augmente.

$$N = N_0 - \frac{RI}{k\Phi}$$

La caractéristique de vitesse est alors asymptotiquement un segment de droite horizontal.

Conclusion : à tension d'induit et à excitation constante, la vitesse du moteur reste voisine de sa vitesse à vide.

b) Caractéristique du couple

Le couple électromagnétique est défini par :

$$C_e = \frac{EI}{\Omega} = \frac{EI}{2\pi N} = \frac{k' EI}{N} \quad , \quad k' = 1/2\pi$$

Comme toute machine, le couple utile C_u est inférieur au couple électromagnétique à cause des pertes mécaniques, des pertes Joule et des pertes fer.

A courant d'excitation donné, les pertes dépendent de la vitesse et du flux, elles sont à peu près constantes.

- A vide

$$P_0 = U I_0 = p_{méc} + p_{fer} + p_j$$
$$P_0 \cong p_{méc} + p_{fer} = p_c \text{ (pertes dites constantes)} \quad p_j \cong 0$$

Le couple de pertes c_p est déduit par l'expression :

$$c_p \cong \frac{P_0}{\Omega} =$$

Le couple utile est :

$$C_u = C_e - c_p = \frac{EI - UI_0}{\Omega}$$

La fig 2.34 représente la caractéristique $C_e = f(I)$ à courant d'excitation constant.

Enfin, la puissance utile peut être déduite par :

$$P_u = \Omega \cdot C_u$$

3) Moteur à excitation série

L'inducteur de ce moteur est en série avec l'induit. Le courant d'induit est également le courant d'excitation. Le modèle équivalent de ce moteur est représenté par la fig 2.35.

Pour cette étude nous supposons que le flux ϕ sous un pôle est proportionnel au courant d'excitation, c'est-à-dire que le circuit magnétique n'est pas saturé.

L'inducteur du moteur série est formé d'un petit nombre de spires de gros fil.

Les caractéristiques de ce moteur diffèrent complètement de celles du moteur shunt.

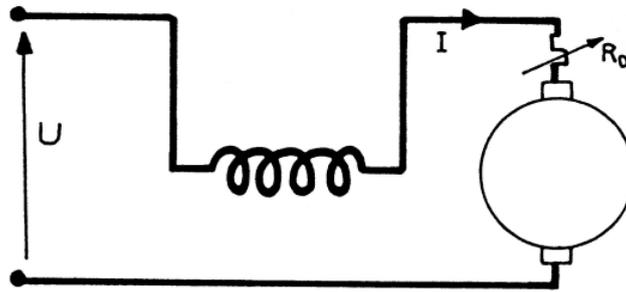


Fig 2.35 : Schéma équivalent d'un moteur à excitation série

a) **Caractéristique de vitesse $N=f(I)$ à tension d'induit constante**

Si on néglige la réaction magnétique d'induit,

$$U = E + (R_{série} + R_{induit})I = kN\Phi + R_{tot}I$$

Comme en général : $R_{tot}I \ll U$; $U \approx E = kN\Phi$

$N = \frac{U}{k\Phi}$; pour $U = cste$, on a l'équation d'une hyperbole, avec $\phi = f(I)$ (fig 2.36).

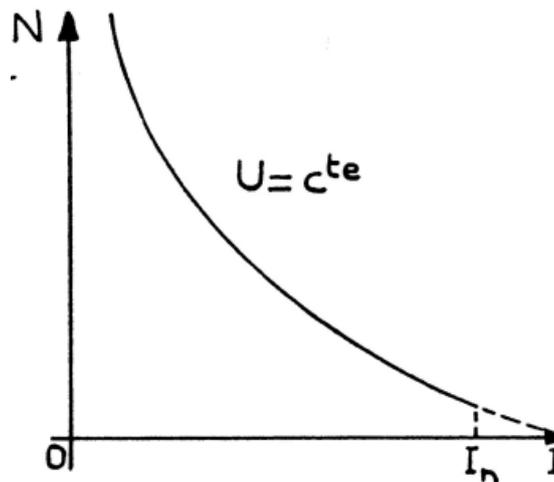


Fig 2.36 : Caractéristique de vitesse $N = f(I)$

- Pour $I = 0$, la vitesse N tend vers l'infini.
- A vide le courant est très faible, par conséquent on ne doit jamais démarrer un moteur série à vide. Sous tension nominale, il tend à s'emballer la vitesse qui correspond à de telles conditions de fonctionnement dépasse largement la limite admissible.

b) **Caractéristique du couple à tension constante ($C_e = f(I)$ et $C_e = f(N)$)**

$$C_e = \frac{EI}{\Omega} = \frac{kN\Phi \cdot I}{2\pi N}$$

Comme $\phi = f(I)$, on pose $\phi = k' I$

$$C_e = \frac{kN \cdot k' I \cdot I}{2\pi N} = \frac{kk' I^2}{2\pi} \quad \text{posons } \frac{kk'}{2\pi} = k''$$

$$C_e = k'' I^2$$

Le couple est alors proportionnel à I^2 , il a l'allure d'une parabole dans la partie linéaire.

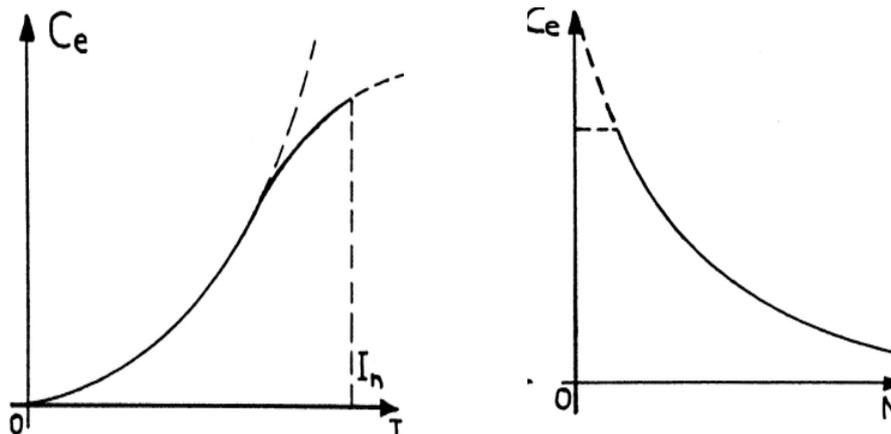


Fig 2.37 : Caractéristique du couple d'un moteur série

c) Applications

Ce moteur est particulièrement adapté à l'entraînement des charges exigeant un couple important au démarrage et à basse vitesse. On les rencontre donc essentiellement dans le domaine des très fortes puissances (1 à 10 Mw, en traction électrique dans l'entraînement des laminoirs. Pour ces applications électrique, il tend de plus en plus à être remplacé par un moteur synchrone autopiloté ou moteur autosynchrone. En petite puissance, il est employé comme démarreur des moteurs à explosion dans les automobiles.

d) Freinage Electrique

- Le freinage en récupération n'est pas possible avec le moteur série. Lorsque son couple utile s'annule la vitesse est déjà excessive, elle serait infinie au zéro du couple électromagnétique.
- Le freinage rhéostatique est possible, mais il faut inverser les connexions entre induit et inducteur en même temps qu'on sépare la machine de la source pour la brancher sur la résistance de débit. Le courant dû au rémanent renforce les effets de celui-ci. On augmente le couple de freinage en diminuant la résistance du rhéostat jusqu'à l'éliminer aux très basses vitesses.
- En traction, en freine en transformant la machine en génératrice à excitation indépendante grâce à une source très basse tension distincte. On

retrouve alors les possibilités de freinage en récupération avec réglage de la vitesse, freinage rhéostatique pour arrêter la machine.

4) Moteur à excitation composé (compound), (fig 2.38)

Dans le moteur compound une partie du stator est raccordé en série avec le rotor et une autre est de type parallèle ou shunt. Ce moteur réunit les avantages des deux types de moteur. Le fort couple à basse vitesse du moteur série et l'absence d'emballement (survitesse du moteur shunt).

- Pour concilier les avantages, on utilise un moteur comportant sur les pôles deux inducteurs :
 - l'un dérivé, comportant N_e spires, branché en parallèle et parcouru par le courant d'excitation ;
 - l'autre série, comportant N_s spires, branché en série parcouru par le courant d'induit.

Il existe deux types de montages :

- moteur à ampères-tours additifs, longue dérivation ;
- moteur à ampères-tours soustractifs, courte dérivation.

Remarque : on n'utilisera que le moteur compound à ampères-tours additifs (longue dérivation), on montrera les dangers que présenterait le moteur compound à ampères-tours soustractifs.

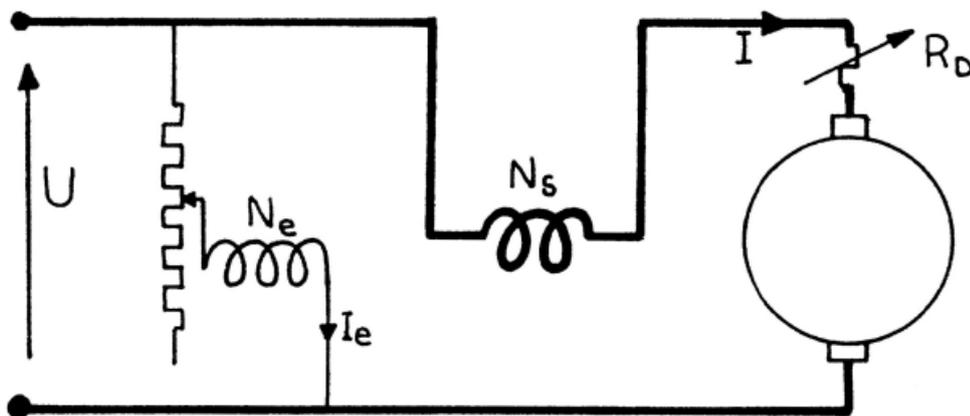


Fig 2.38 : Moteur à excitation composé longue dérivation

La force magnétomotrice est donc : $N_e I_e \mp N_s I$, le signe dépendant des sens relatifs des enroulements :

\oplus : **montage additif**

\ominus : **montage soustractif**

On étudie les courbes pour $U = \text{cste}$; $I_e = \text{cste}$.

- A vide, le couple et I sont nuls. On retrouve la même vitesse qu'en excitation séparée (l'enroulement série est sans effet).
- Si le montage est additif, le flux étant accru par le courant I, la vitesse est plus faible qu'en excitation séparée.
- Si le montage est soustractif, la réduction du flux due au courant entraîne un accroissement de la vitesse en charge pouvant conduire à l'emballement : le montage soustractif est à proscrire ($N \rightarrow \infty$).

Les caractéristiques mécaniques sont représentées sur la figure 2.39.

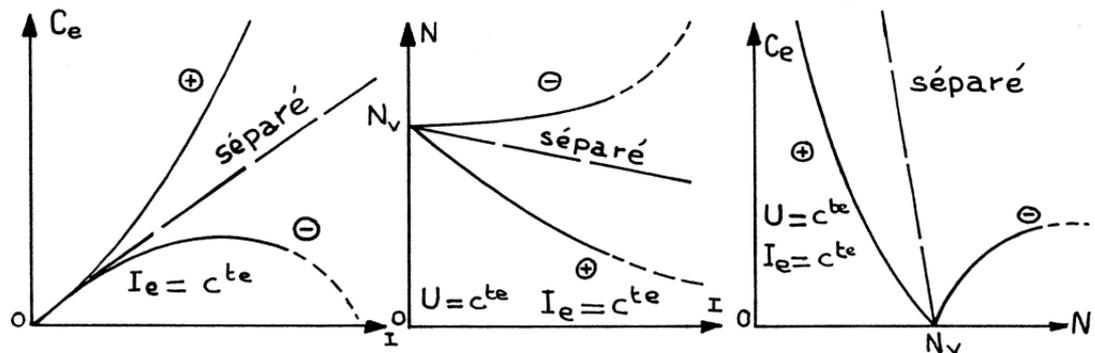


Fig 2.39 : Caractéristiques mécaniques du moteur composé

5) Démarrage d'un moteur à courant continu

Si, lorsque la vitesse du moteur est nulle, on applique une tension U aux bornes de l'induit, le courant circulant dans l'induit est alors :

$$I_D = \frac{U}{R}, \text{ puisque la f.é.m est nulle (N=0).}$$

Ce courant est très supérieur au courant nominal, ce qui entraînerait :

- un échauffement instantané de l'induit très élevé ;
- une chute de tension inadmissible sur le réseau d'alimentation ;
- un couple de démarrage lui aussi très supérieur au couple nominal et risquant de rompre l'accouplement.

Aussi faut-il limiter le courant d'induit en plaçant, lors du démarrage, une résistance R_D en série avec l'induit. Ce rhéostat de démarrage est court-circuité progressivement tandis que le moteur prend sa vitesse et que le f.é.m augmente (fig 2.40).

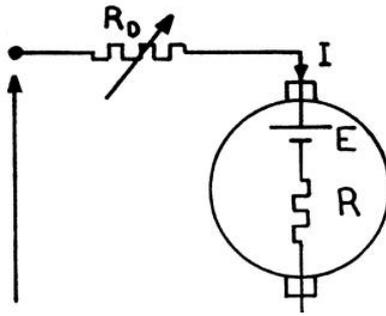


Fig 2.40 : Rhéostat de démarrage d'un moteur à courant continu

$$I_D = \frac{U}{R + R_D}$$

On calcul R_D afin que I_D soit 1 à 2 fois le courant nominal I_n . Pour que le démarrage soit rapide, il faut que le couple soit élevé donc que le flux soit alors maximum (courant d'excitation maximum).

$$C_{e.dém} = \frac{E \cdot I_D}{2\pi N}$$

Remarque : On peut aussi limiter le courant en utilisant une tension variable U , il suffira de faire croître U progressivement.

6) Pertes et rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \text{pertes}} = \frac{P_a - \text{pertes}}{P_a} = 1 - \frac{\text{pertes}}{P_a}$$

Les pertes sont de trois types :

- pertes électriques par effet Joule ;
- pertes magnétiques dans le fer (par hystérésis et par courant de Foucault) ;
- pertes mécaniques dues au mouvement.

- Pertes Joule (induit et inducteur)

$$p_j = RI^2 + R_{exc} I_{exc}^2$$

- Pertes fer

a) Pertes par hystérésis

$$p_h = k_h \cdot f \cdot B_m^2$$

k_h : coefficient qui dépend de la nature des tôles

f : fréquence

B_m : induction

b) Pertes par courant de Foucault

$$p_{fouc} = k_{fouc} \cdot (e \cdot f \cdot B_m)^2$$

k_{fouc} : coefficient qui dépend des tôles

e : épaisseur de la tôle

La somme des deux pertes est appelée pertes fer :

$$p_{fer} = p_h + p_{fouc}$$

c) Pertes mécaniques : p_m

La somme des pertes fer et mécaniques sont appelées les pertes constantes :

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

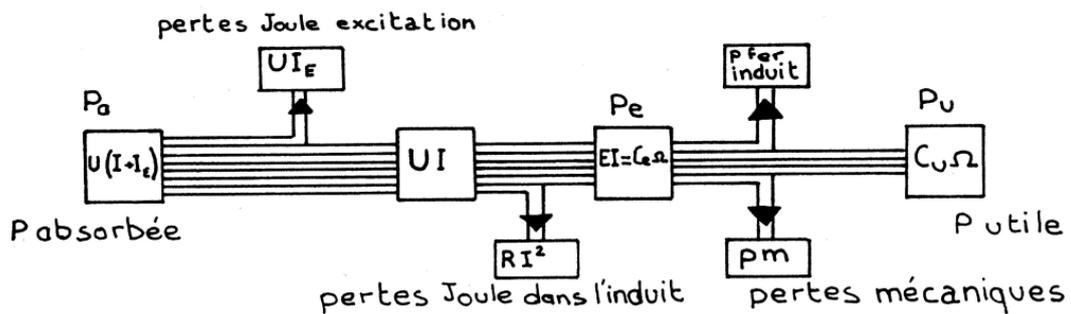


Diagramme des pertes d'une machine à courant continu à excitation séparée

Exercices

2.1

Une machine à courant continu comporte 8 pôles. Le flux utile sous un pôle est 6 mWb. L'induit comporte 40 encoches et chacune d'elles contient 60 conducteurs dont la longueur moyenne est 75 cm. L'enroulement induit est constitué de 2 voies d'enroulement. Il est réalisé en fil de cuivre de diamètre 3.5 mm.

- 1- Lorsque la fréquence de rotation de la machine est de 1500 tr/mn, quelle est la f.é.m de la machine ?
- 2- Durant une phase de récupération d'énergie, la machine fonctionne en génératrice et débite un courant tel que la densité de courant dans les conducteurs est de $2,08 \text{ A/mm}^2$. La température de l'enroulement induit est de $50 \text{ }^\circ\text{C}$. On donne : résistivité du cuivre à $0 \text{ }^\circ\text{C}$: $\rho_0 = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$; coefficient de température : $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} (\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$.

Calculer :

- 2.1. la résistance de l'enroulement induit ;
- 2.2. l'intensité du courant débité par la génératrice ;
- 2.3. la d.d.p aux bornes de l'induit ;
- 2.4. le moment du couple électromagnétique résistant lorsque la fréquence de rotation de la génératrice est égale à 1500 tr/mn.

2.2

Pour un moteur à excitation indépendante, on dispose des indications suivantes :

- inducteur : résistance $r = 150 \Omega$; tension d'alimentation $U_e = 120 \text{ V}$;
- induit : résistance $R = 0,5 \Omega$; tension d'alimentation $U = 220 \text{ V}$.

Lors d'un essai à vide on a relevé les valeurs suivantes : puissance absorbée par l'induit $P_v = 320 \text{ W}$; intensité du courant appelé $I_v = 1,2 \text{ A}$.

Un essai en charge a donné pour l'induit tournant à la fréquence de rotation de 1450 tr/mn : Intensité du courant : 18 A.

Ces deux essais sont réalisés sous les tensions nominales respectives de l'induit et de l'inducteur.

Calculer :

- 1- pour l'essai en charge :
 - 1.1. la puissance électromagnétique.
 - 1.2. les pertes par effet Joule statoriques et rotoriques ;
 - 1.3. les pertes « constantes » ;
 - 1.4. la puissance utile ;
 - 1.5. le moment du couple utile
 - 1.6. le rendement du moteur
- 2- pour l'essai à vide :
 - 2.1. la f.é.m ;

2.2. la fréquence de rotation.

2.3

Un moteur à courant continu à excitation en série, fonctionne dans les conditions suivantes :

tension d'alimentation constante $U = 220 \text{ V}$; intensité du courant $I_1 = 18 \text{ A}$; fréquence de rotation $n_1 = 1070 \text{ tr/mn}$; puissance utile $P_{u1} = 3,2 \text{ kW}$.

L'inducteur tétrapolaire présente une résistance à chaud $r = 0,31 \Omega$; l'induit comporte deux voies d'enroulement et sa résistance, mesurée à chaud, est $R = 0,8 \Omega$. Le nombre total de conducteurs de l'induit est 560.

1° Calculer :

1.1. le rendement η_1 ;

1.2. la f.é.m E_1 ;

1.3. les pertes par effet Joule p_{j1} , les autres pertes p_{c1} ;

1.4. le flux sous un pôle inducteur Φ_1 ;

1.5. le rhéostat de démarrage nécessaire pour limiter le courant de démarrage à la valeur $I_d = 40 \text{ A}$.

2° Le flux étant proportionnel à l'intensité du courant, pour une intensité I_2 de 9 A calculé :

2.1. la puissance absorbée P_{a2} ;

2.2. la f.é.m E_2 ;

2.3. la fréquence de rotation n_2 ;

2.4. les pertes par effet Joule p_{j2} , la puissance utile P_{u2} et le moment C_{u2} du couple utile, sachant que les autres pertes sont maintenant égales à $p_{c2} = 430 \text{ W}$.

2.4

Les caractéristiques nominales d'un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante sont les suivantes :

f.é.m : $E_n = 115 \text{ V}$,

fréquence de rotation : $n'_n = 958 \text{ tr/mn}$,

moment du couple électromagnétique : $C_{en} = 57,3 \text{ Nm}$,

intensité du courant dans l'induit : $I_n = 50 \text{ A}$,

tension d'induit nominale : $U_n = 120 \text{ V}$.

La résistance de l'induit est $R = 0,1 \Omega$ et la tension d'alimentation de l'induit est maintenue constante, égale à sa valeur nominale.

1° Déterminer l'expression

1.1. de la caractéristique de vitesse $n'(I)$ du moteur ;

1.2. de la caractéristique électromécanique de couple $C_{em}(I)$;

1.3. de la caractéristique mécanique $C_{em}(n')$.

2° Le moteur entraîne un ventilateur dont le couple a pour moment $C_r = 0.22n^2$ (unités S.I.). En supposant que les pertes autres que par effet Joule sont négligeables, calculer :

2.1. la fréquence de rotation de l'ensemble moteur-ventilateur ;

2.2. le moment du couple électromagnétique du moteur ;

2.3. l'intensité du courant qui traverse l'induit ;

2.4. la f.é.m du moteur.

2.5

Une machine bipolaire à courant continu, à bobinage diamétral, a ses balais A et B dans l'axe neutre.

L'induction magnétique radiale est à répartition spatiale sinusoïdale dans l'entrefer et a pour valeur maximale dans l'axe des pôles $B_m = 1$ T. On note L la longueur du rotor et $D = 2R$ son diamètre.

1) Montrer que le flux utile ϕ_u de la machine, flux de \vec{B} à travers la surface S_c du demi-cylindre

$$\text{rotorique vaut : } \phi_u = \int_{S_c} B dS = S \cdot B_m = \phi_m ;$$

S étant la surface de la spire diamétrale AB dans l'axe neutre.

2) Le module de l'induction dans l'entrefer étant $B = f(\alpha) = B_m \cdot \cos \alpha$, montrer que $\phi_u = S_c \cdot B_{\text{moyen}} = \phi_m = S \cdot B_m$.

En pratique pour limiter les fuites, l'ouverture des pôles est définie par le rapport $\beta = \frac{S_p}{S_c} \simeq 0,63$, S_p étant la surface d'un pôle.

Un moteur à courant continu à excitation indépendante parfaitement compensé présentent les caractéristiques nominales suivantes : $U = 220 \text{ V}$; $I = 20 \text{ A}$; $i_{\text{ex}} = 1,5 \text{ A}$; résistance d'induit $r = 1 \text{ } \Omega$; $N = 1\,500 \text{ tr/min}$.

À vide, la tension d'alimentation est $U_0 = 308 \text{ V}$ et $N_0 = 1\,200 \text{ tr/min}$.

Ce moteur fonctionne sur une charge dont le couple résistant varie en fonction de la vitesse de rotation. La caractéristique $C_r = f(N)$ de cette machine est assimilée à une droite passant par les points : $N = 0$, $C_r = 12 \text{ Nm}$ et $N = 2\,000 \text{ tr/min}$, $C_r = 30 \text{ Nm}$.

1) L'intensité du courant d'excitation est maintenue constante à $1,5 \text{ A}$.

– Calculer le rapport de proportionnalité entre la f.é.m. E et la vitesse de rotation N .

– Montrer que la caractéristique mécanique du

couple a pour équation $C = 4 \frac{U - 8N}{\pi}$.

2) Pour régler la vitesse de l'ensemble « moteur + charge », on agit sur la tension d'alimentation de l'induit en maintenant toujours $i_{\text{ex}} = 1,5 \text{ A}$.

– Le démarrage du groupe se fait sans rhéostat : calculer la tension minimale à appliquer et le

courant au niveau de l'induit au moment du démarrage.

- À partir des caractéristiques $C_r(N)$ et $C(N)$, établir la relation $N = f(U)$.
- Calculer la vitesse et l'intensité dans l'induit pour $U = 110 \text{ V}$ et $U = 220 \text{ V}$.

2.7

Les caractéristiques nominales d'un moteur à courant continu à excitation série sont les suivantes : 400 V, 27 A, 1 000 tr/min. Les résistances mesurées à chaud ont pour valeurs : $r = 1 \Omega$ pour l'induit et $r_s = 0,6 \Omega$ pour l'inducteur.

La caractéristique interne à 1 000 tr/min est :

$E[V]$	136	174	233	287	308	335	357	383	429
$i_s[A]$	5,7	7,35	10,5	15,2	18	22,6	27	33,2	45

La machine est supposée parfaitement compensée.

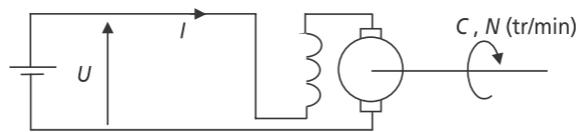
1) Le moteur est alimenté sous 400 V.

- Le courant I dans le moteur a pour intensité 22,6 A. Calculer le moment du couple électromagnétique C_{em} et la vitesse N de rotation.
- On équipe ce moteur d'un rhéostat de démarrage limitant l'intensité à 45 A. Calculer la résistance totale R_d de ce rhéostat, le moment du couple électromagnétique C_d au démarrage ainsi que la fréquence de rotation au moment où le courant I prend la valeur 27 A, la totalité du rhéostat de démarrage étant encore en service.

2) Afin de déterminer la somme p_{fm} des pertes mécaniques et des pertes dans le fer, dans les conditions du 1) précédent, on fait fonctionner la machine en moteur à excitation séparée à vide. On désigne par U_0 la tension aux bornes de l'induit, par I_0 le courant dans l'induit et par i_0 le courant inducteur.

- Sachant que $I_0 = 2,2$ A, calculer U_0 , p_{fm} , i_0 .
- En déduire, dans les conditions du 1), le moment du couple utile C_u et le rendement η du moteur.

On s'intéresse à l'étude d'un moteur très utilisé en traction électrique : le moteur série. Il présente la particularité de posséder un bobinage inducteur placé en série avec l'induit comme le représente la *figure 4.6*.



- 1) À quelle grandeur est proportionnel le flux dans la machine ?
- 2) Quelle relation relie alors le couple et le courant de la machine ? Quel est l'intérêt de cette relation ?
- 3) Quelle relation relie également la force électromotrice interne E à la vitesse angulaire de la machine Ω et au courant I ?
- 4) Représenter le schéma électrique équivalent de la machine en rotation, on notera R la résistance d'induit et R_e la résistance d'inducteur.
- 5) Déterminer la relation existant entre Ω , I et les grandeurs constantes du système. Idem entre Ω et la couple C .
- 6) Représenter alors l'allure de l'évolution de la vitesse Ω en fonction du courant. Représenter également l'évolution de Ω en fonction du couple.

2.9

On étudie dans cet exercice une machine à courant continu à excitation séparée dont on a mesuré au préalable la valeur de la force électromotrice interne E en fonction du courant d'excitation I_e . Les valeurs de $E(I_e)$ mesurées à la vitesse de rotation de 1 500 tr/min sont reportées dans le *tableau*

I_e (A)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$E(I_e)$ (V)	0	24	46	68	87	104	114	121	125	129	133

La résistance d'induit du moteur a été mesurée : $R = 0,1 \Omega$. La puissance nominale de la machine est de 18 kW et son rendement nominal vaut $\eta = 0,8$. Dans toute la suite de l'exercice, on alimente l'induit sous la tension : $U = 110$ V.

- 1) À vide, pour un courant d'excitation $I_e = 1,2$ A, la machine consomme un courant $I = 16,3$ A. Justifier la présence de ce courant. Calculer alors la valeur de la force électromotrice de la machine.
- 2) Calculer alors la valeur de la vitesse à vide de la machine.
- 3) Préciser la valeur de la puissance de pertes mécaniques : P_p .
- 4) Le moteur est à présent chargé à sa charge nominale, c'est-à-dire que la puissance mécanique fournie par le moteur est : $P_m = 18$ kW. Calculer la valeur de la puissance totale consommée : P_{totale} .
- 5) En faisant un bilan de puissances, déterminer la valeur de la puissance P_R perdue dans la résistance d'induit. En considérant les pertes mécaniques constantes, calculer la valeur du courant nominal I_n .
- 6) Calculer alors la valeur de la force électromotrice E .
- 7) En déduire la vitesse de rotation du moteur.
- 8) Quel courant d'excitation faudrait-il choisir pour fournir la même puissance à la charge mais à la vitesse de 1 500 tr/min ? (On supposera dans cette question le rendement de la machine toujours égal à 0,8.)

2.10

Un moteur à courant continu à excitation indépendante entraîne un treuil soulevant verticalement une charge de masse M kg suspendue à l'extrémité d'un filin enroulé sur le tambour du treuil, de rayon supposé constant égal à $0,1$ m. La vitesse de rotation du tambour est égale au vingtième de la vitesse de rotation du moteur. L'induit du moteur de résistance intérieure $0,5 \Omega$ est connecté aux bornes d'une source d'énergie fournissant une tension réglable de $U = 0V$ à $U_n = 240V =$ tension nominale du moteur.

On donne : $g = 10\text{m/s}^2$. On adoptera les hypothèses simplificatrices suivantes :

- rendement du treuil = 1 ;
- négliger toutes les pertes du moteur sauf celle par effet Joule dans l'induit ou dans la résistance de démarrage ;
- négliger la réaction d'induit et la saturation des circuits magnétiques.

1. Le courant inducteur est réglé à sa valeur maximum admissible $I_e = 5\text{A}$. On constate alors que le treuil hisse la charge $M = \frac{4800}{\pi}$ kg à la vitesse $v = \frac{11 \cdot \pi}{60}$ m/s alors que la puissance absorbée par l'induit est de $9,6$ kW et que la tension appliquée à l'induit est égale à la tension nominale.

- 1.1. Calculer l'intensité du courant absorbé par l'induit du moteur.
- 1.2. Calculer la force contre-électromotrice du moteur.
- 1.3. Calculer la puissance utile du treuil.
- 1.4. Calculer le couple utile du moteur.
- 1.5. Calculer la vitesse de rotation du moteur.

2. La charge M et le courant d'excitation gardant les valeurs définies précédemment.
 - 2.1. Calculer l'intensité absorbée par l'induit lorsque, alimenté sous la tension U_c , celui-ci développe un couple moteur permettant de maintenir la charge M décollée et immobile.
 - 2.2. Calculer la valeur de la tension U_c précédente.
 - 2.3. Calculer la valeur de la tension U_d de démarrage que l'on peut appliquer brusquement à l'induit pour décoller la charge M et lui communiquer une vitesse constante sans que la pointe de courant dans l'induit dépasse 60 A.
 - 2.4. Calculer la vitesse stabilisée du moteur à la fin de la première phase du démarrage définie précédemment.
 - 2.5. Calculer la valeur de la résistance de démarrage qu'il serait nécessaire de monter en série avec l'induit du moteur pour limiter à 60 A la pointe de courant dans l'induit lorsque la tension fournie par la source n'est plus réglable mais garde la valeur maximum de 240 V.
3. La charge hissée n'étant plus que les $4/5$ de la charge précédente, à quelles valeurs faut-il régler simultanément la tension appliquée à l'induit, sans résistance de démarrage d'une part, et le courant inducteur d'autre part, de telle façon que la vitesse de hissage soit la plus élevée possible sans qu'en régime établi l'intensité du courant dans l'induit excède 40 A? Calculer cette vitesse.

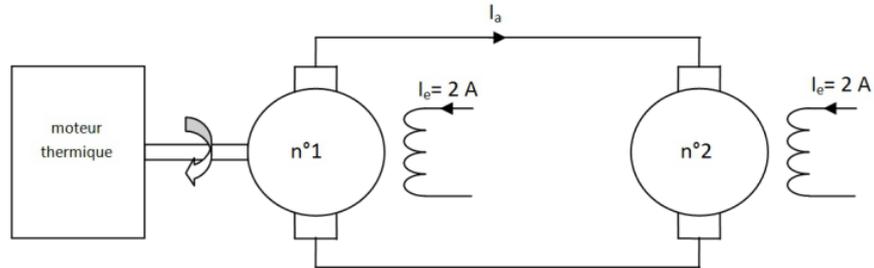
2.11

Soit une machine à courant continu à excitation indépendante parfaitement compensée. Sa résistance d'induit est : $R_a = 0,3\Omega$. Les pertes constantes seront supposées nulles. On donne à 1200 tr/min :

$I_{excitation}$ (A)	0,5	1	1,5	2	2,5
E (V)	156	258	308	328	338

1. La machine étant à vide et le courant d'excitation étant de 1,5 A, on alimente le rotor par une source de tension, supposée idéale, de 400 V.
 - 1.1. Calculer la vitesse du rotor en tr/min.
2. La machine absorbe un courant de 40 A, le courant inducteur est maintenant de 2,5 A et la tension d'alimentation de 300 V.

- 2.1. Calculer la vitesse du rotor en tr/min .
3. Le rotor est entraîné par un moteur thermique à la vitesse de 1000 tr/min, le courant d'excitation est de 2 A.
 - 3.1. Calculer la f.é.m. de la machine n° 1 à vide.
4. La machine débite sur une machine à courant continu n° 2 parfaitement identique et elle aussi excitée par un courant de 2 A. Cette seconde machine fonctionne à vide.



- 4.1. Calculer le courant débité par la machine n° 1 .
- 4.2. Calculer la vitesse de la machine n° 2.
5. On réduit le courant d'excitation à 1 A sur la machine n° 2.
 - 5.1. Calculer la nouvelle vitesse du rotor.
6. Le courant d'excitation des machines 1 et 2 est à nouveau réglé à 2 A. La machine n° 2 entraîne une pompe et ce faisant absorbe une puissance de 2 kW. On admettra l'hypothèse simplificatrice selon laquelle le rendement des deux machines est de 1.
 - 6.1. Calculer le couple résistant opposé par la machine n° 1 au moteur thermique dont la vitesse est toujours de 1000 tr/min.
 - 6.2. Calculer le courant débité par la machine n° 1.
 - 6.3. Calculer la vitesse de rotation de la machine n° 2.

