

CHAPITRE 2

Machines à Courant Continu Mcc

2.1 Généralités

Les machines à courant continu (Mcc) restent très utilisées dans le domaine de l'automobile (ventilateurs, lève-vitre, etc.) ainsi qu'en tant que « moteur universel » dans l'électroménager et l'outillage (Figure 1).

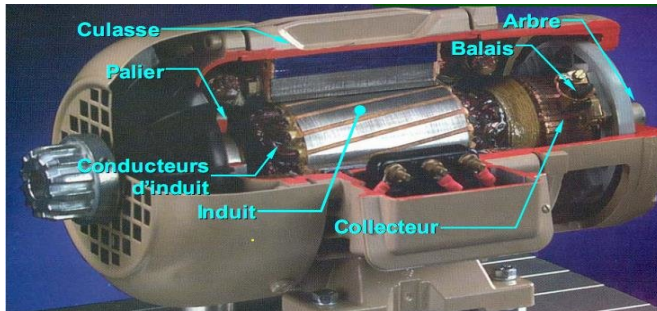


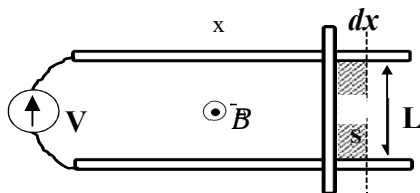
Figure 1. Machine à Courant Continu Mcc

Leur principe de fonctionnement est basé sur les lois de l'induction suivantes :

1. Production d'une force électromotrice (f.é.m) et force de LAPLACE

Les rails de Laplace :

Deux rails rectilignes placés dans un plan perpendiculaires à l'induction. et Une tige est mise en contact avec les rails.



1. Production d'une force électromotrice

Le déplacement de la tige engendre une variation de la surface $dS = L \times dx$. Alors le flux varie

$$d\phi = B \times dS = BLdx$$

Selon la loi de Faraday, la variation de flux est la cause d'une tension induite appelée force électromotrice. $e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{BL \times dx}{dt} = -BLv$

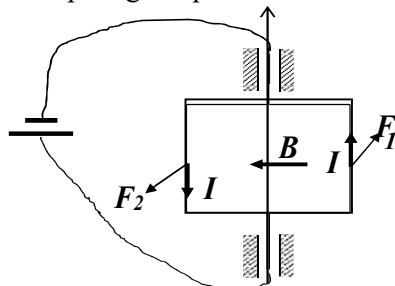
2. Forces de LAPLACE:

La tige, traversée par un courant, se met en mouvement, et son sens de déplacement est déterminé par la règle de la main droite.

La tige est soumise à la force de Laplace qui la met en mouvement. $F = BLI$

2. Cadre tournant et couple des actions mécaniques de Laplace :

On considère un cadre parcouru par un courant I et susceptible de tourner autour de l'axe (Oz). On impose un champ magnétique uniforme B



Sous l'effet du passage du courant, le cadre subit deux forces de Laplace (F_1, F_2) formant un

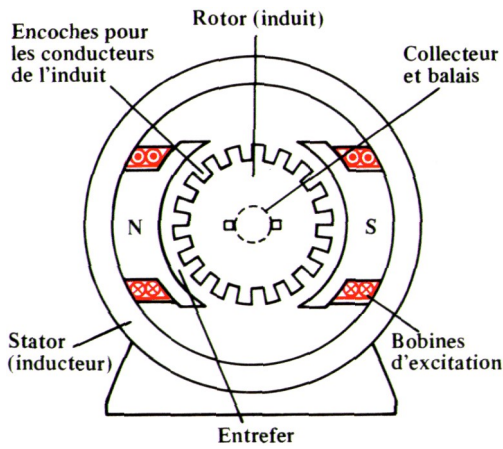
couple de force : $F_1 = -F_2 = BLI$

Le couple de force:

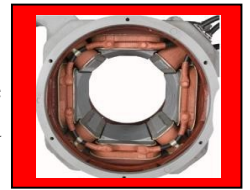
$$C_{em} = 2 \times RF = 2RBLI = SBI = \phi I$$

2.2 Constitution et principe de fonctionnement

Un **circuit magnétique** comportant une partie fixe, le stator, une partie tournant, le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties.



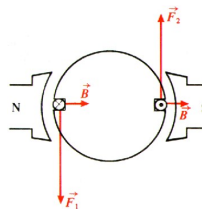
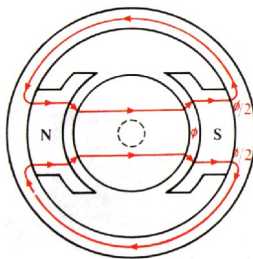
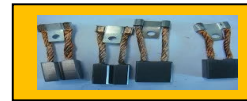
Stator : Source de champ magnétique nommée **inducteur** crée par un bobinage ou des aimants permanents



Rotor : Circuit électrique **induit** subit les effets de ce champ magnétiques.



Le **collecteur** et les **balais** permettent d'accéder au circuit électrique rotorique.



Circuit magnétique : Moteur bipolaire

2.3 LOIS GENERALES DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

1. Force Electromotrice (F.e.m)

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

Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = \frac{p}{2\pi a} N_c \Phi \Omega$$

p le nombre de paires de pôles

a le nombre de paires de voies d'enroulement

N_c le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)

Φ flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)

Ω vitesse de rotation (en rad.s⁻¹)

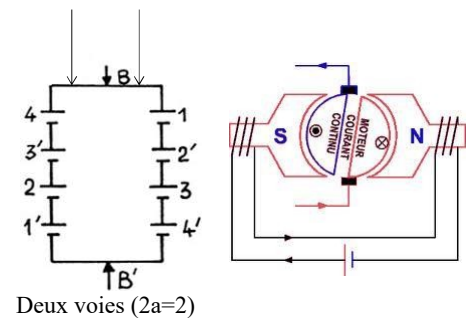
Finalement:

$$E = K \Phi \Omega$$

$$\text{Avec } K = \frac{p}{2\pi a} N_c$$

a. Voies d'enroulement

Les balais divise l'induit en **2a** voies d'enroulement, chaque voie d'enroulement comporte donc **N_c/2a** conducteurs actifs. Les voies d'enroulement sont à considérer comme deux générateurs identiques montés en parallèle (même f.e.m et même courant (**I/2a**)) avec **I** désigne le courant absorbé par l'induit



Deux voies (2a=2)

2. Puissance Electromagnétique (P_{em})

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I_a , il reçoit une puissance électromagnétique $P_{em}=E \times I_a$ (Watt)

Dans l'induit se produit une transformation d'énergie de la forme électrique à la forme mécanique (Cas d'un Moteur) ou de la forme mécanique à la forme électrique (Cas d'une génératrice). D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance électromagnétique est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique.

$$P_{em} = E \times I_a = C_{em} \times \Omega$$

3. Couple Electromagnétique (C_{em})

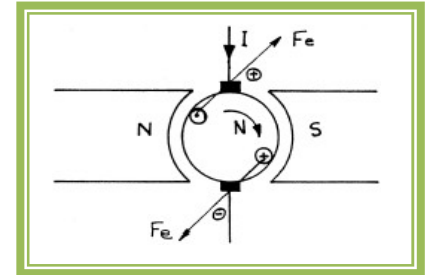
Lorsqu'un courant I_a , circule dans l'induit, il apparaît un couple électromagnétique C_{em} créé par les forces de Laplace $F = B L I_a$ qui s'exercent sur les conducteurs de l'induit.

Avec r rayon de l'induit $C_{em} = F \times r$.

Il en résulte que le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E I_a}{\Omega} = \frac{k \Phi \Omega I_a}{\Omega} = k \Phi I_a$$

Avec : E (Volt), I_a (Amperes), Ω (rd/s), Φ (Weber) et C_{em} (N.m)



Remarque : Si la machine fonctionne à flux constants et sachant que $\Phi = k' i_e$

1. $E = k \Phi \Omega = k_\phi \Omega$
2. $C_{em} = k \Phi I_a = k_\phi I_a$ Avec $k_\phi = k \Phi$

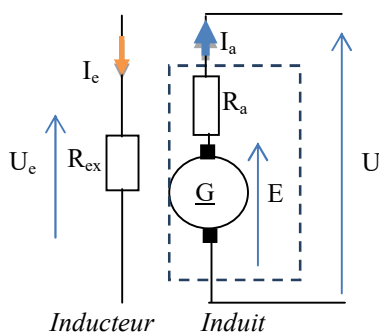
Réversibilité : A flux Φ constant, E ne dépend que de Ω et I_a ne dépend que de C_{em} .

La f.é.m. de la machine et l'intensité du courant dans l'induit sont deux grandeurs indépendantes. On peut donc donner le signe souhaité au produit $E \cdot I_a$. La machine peut donc indifféremment fonctionner en **moteur** ($P_{em} > 0$) ou en **génératrice** ($P_{em} < 0$).

2.4 Caractéristiques de la Mcc.

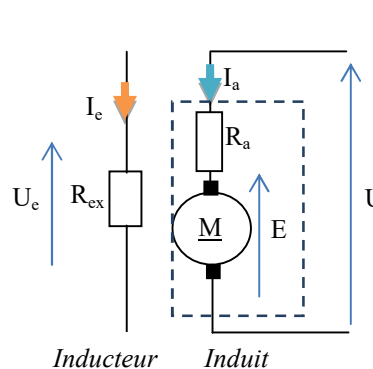
1. Modèle Electrique équivalent :

Génératrice



$$U = E - R_a I_a$$

Moteur



$$U = E + R_a I_a$$

E : f.é.m.

R_a : Résistance du bobinage d'induit

R_e : Résistance du bobinage d'inducteur

I_a : courant d'induit

I_e : courant d'inducteur (Courant d'excitation)

U : Tension aux bornes de connexion de l'induit.

U_e : Tension aux bornes de l'inducteur.

2.Caractéristiques à vide et en charge

Caractéristiques à vide	
Ev=f(φ) à Ω Constante	Ev=f(Ω) à Φ Constant
<ul style="list-style-type: none"> • De O à A, la caractéristique est linéaire, $E=K'\Phi$ • De A à B le matériau ferromagnétique commence à saturer. (μ_R n'est plus constant). • Après B, le matériau est saturé, la f.é.m n'augmente plus 	<p>$E = k_\phi \Omega$</p> <p>La caractéristique est linéaire tant que la saturation n'est pas atteinte.</p>
Caractéristiques en charge U=f(Ia)	
Génératrice : U=E-RaIa-ΔU	Moteur : U=E+RaIa+ΔU
<ul style="list-style-type: none"> • La résistance du bobinage provoque une légère chute de tension ohmique dans l'induit : $R_a \cdot I_a$ • Le courant dans l'induit crée un flux indésirable tel que le flux total en charge $\Phi_{Charge}(I_e, I_a) < \Phi_{Vide}(I_e)$. ce qui provoque une chute de tension : Réaction magnétique d'induit. • Pour l'annuler, la machine possède sur le stator des enroulements de compensation parcourus par le courant d'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 une légère chute de tension (souvent négligée). 	

3. Les différentes pertes

Pertes	Pertes magnétiques P_{fer} ou pertes fer	Pertes joules P_J	Pertes mécaniques $P_{méca}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de Ω.	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.
Parades	Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.	Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

Pertes Collectives ou Constantes $P_c = P_f + P_{mec}$	Pertes Joules d'induit $P_{Ja} = R_a I_a^2$	Pertes Joules d'inducteur $P_{Je} = R_e I_e^2$
Couple de pertes : $C_p = \frac{P_c}{\Omega}$ [N.m]		

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu varie entre 80 et 95 %.

2.5 Génératrice à courant continu.

La génératrice transforme une énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant continu.

1. Principe de fonctionnement en mode génératrice.

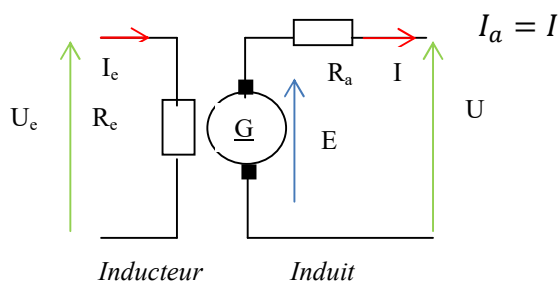
Le fonctionnement des génératrices repose sur la loi fondamentale de l'électromagnétisme (**loi de Faraday**) : lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique, une tension y est induite. L'inducteur est alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant. L'induit est entraîné en rotation par un moteur. Il est le siège de variation de flux au travers de spires qui le constituent. Ils en résultent la création d'une f.e.m alternative qui est redressée et transmise au circuit extérieur par l'ensemble collecteur-balais.

Il existe différents types d'excitation pour le fonctionnement d'une génératrice.

1. **Génératrice à excitation séparée ou indépendante.**
2. **Génératrice à excitation shunt**
3. **Génératrice à excitation série**
4. **Génératrice à excitation composée.**

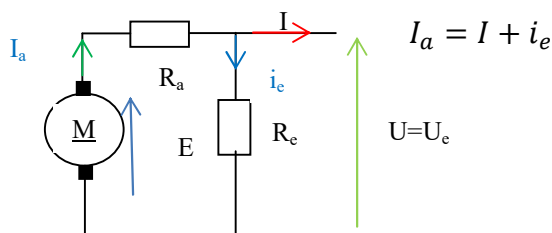
2. Génératrice à excitation séparée ou indépendante :

Une source d'alimentation est nécessaire pour l'alimentation de l'inducteur. L'induit est entraîné en rotation par un autre moteur.



3. Génératrice à excitation dérivation ou shunt.

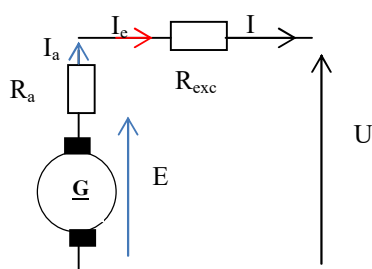
Principe : L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.



4. Génératrice à excitation série.

Principe : L'inducteur et l'induit sont reliés en série.

Conséquence : $I_a = I = i_e$ et comme $\Phi = k' i_e$ (hors saturation) on a $C_{em} = K \Phi I = k I^2$



Bilan de puissance

1. Génératrice à excitation shunt et série

$$P_a = P_{mec}$$

$$P_u = U \cdot I = C_u \cdot \Omega$$

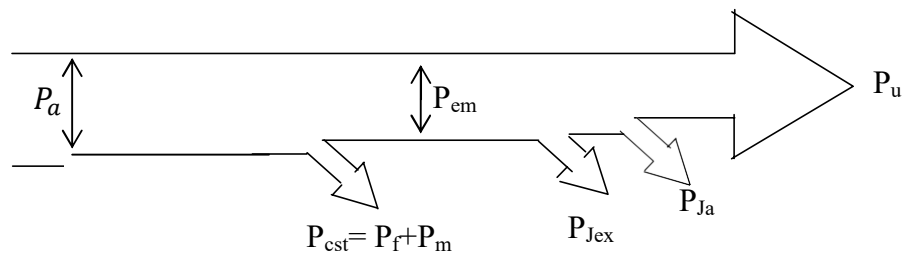
$$P_{Jex} = U_e \cdot i_e = R_e \cdot i_e^2$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega}$$

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

$$P_{Ja} = R_a \cdot I_a^2$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{U \cdot I}{P_{mec}} = \frac{U \cdot I}{P_u + \sum Pertes}$$



2. Génératrice à excitation séparée

$$P_a = P_{mec} + U_e \cdot i_e$$

$$P_u = U \cdot I = C_u \cdot \Omega$$

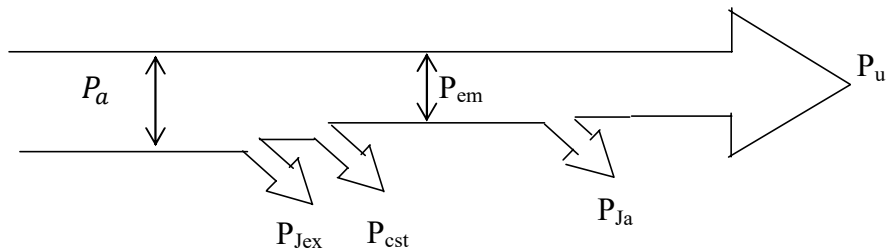
$$P_{Jex} = U_e \cdot i_e = R_e \cdot i_e^2$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega}$$

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

$$P_{Ja} = R_a \cdot I_a^2$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{U \cdot I}{P_{mec} + U_e \cdot i_e} = \frac{U \cdot I}{P_u + \sum Pertes}$$



Exercice

La plaque signalétique d'une génératrice à courant continu à excitation série indique :

$P_u = 4560W$, $N = 1500tr/min$, $2p = 2$, $2a = 2$. La résistance de la charge $R_{ch} = 2.85\Omega$, $N_c = 600$, $R_a = 0.1\Omega$, $R_e = 0.2\Omega$ et $P_{cst} = 300W$.
Calculer:

- 1) Le courant de charge.
- 2) La tension aux bornes de la charge.
- 3) La F.E.M.
- 4) Le flux utile par pôle.
- 5) Les pertes par effet Joule.
- 6) La puissance absorbée.
- 7) Le rendement

Solution

1. **Courant de charge :** $P_u = U \times I = R_{ch} \times I^2$ alors $I = \sqrt{\frac{P_u}{R_{ch}}} = \sqrt{\frac{4560}{2.85}} = 40A$
2. **Tension aux bornes de la charge :** $U = \frac{P_u}{I} = \frac{4560}{40} = 114V$
3. **Force électromotrice f.e.m.:** $E = U + (R_a + R_e) \times I = 114 + (0.1 + 0.2) \times 40 = 126V$
4. **Flux utile par pôle :** $E = \frac{p}{2\pi} N_c \Phi \Omega$ ALORS $\Phi = \frac{2\pi a}{p N_c \Omega} \times E = \frac{2\pi}{600 \times 1500 \frac{2\pi}{60}} \times 126 = 8.4mwb$
5. **Pertes par effet Joule :** $P_J = R_a \times I_a^2 + R_e \times I_e^2 = (R_a + R_e) \times I^2 = 0.3 \times 40^2 = 480W$
6. **Puissance absorbée :** $P_a = P_u + P_J + P_c = 4560 + 480 + 300 = 5340W$
7. **Rendement :** $\rho = \frac{P_u}{P_a} = \frac{4560}{5340} = 85.4\%$

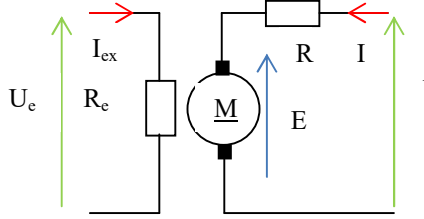
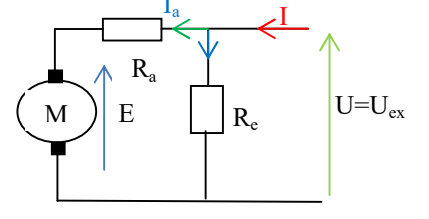
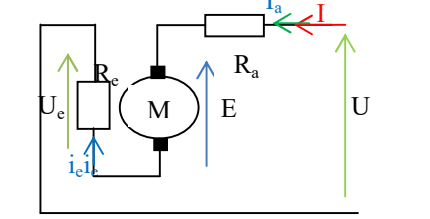
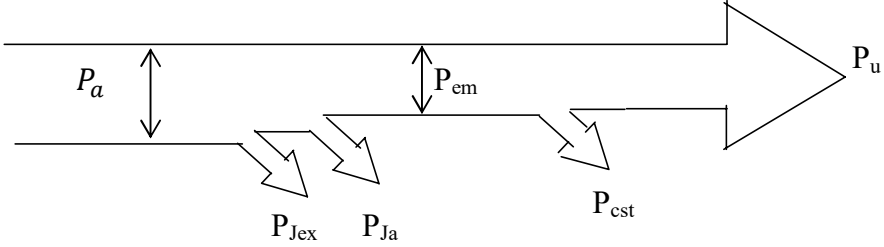
2.6 Moteur à courant continu.

Il transforme une énergie électrique de forme continue en une énergie mécanique.

2.6.1 Principe de fonctionnement en mode moteur.

L'inducteur est alimenté par une tension continue et produit un champ magnétique constant. L'induit est alimenté par une source de courant continu. Le champ inducteur agit sur ses conducteurs en leur appliquant des forces électromagnétiques. Ces forces électromagnétiques (Forces de Laplace) produisent un couple moteur qui entraîne l'induit en rotation.

Il existe différents types d'excitation (manière d'alimenter l'induit et l'inducteur):

Excitation indépendante. Deux sources d'alimentation sont nécessaires pour l'induit et l'inducteur.	Excitation dérivation ou shunt. La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.	Excitation Série. La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en série avec l'induit.
$I = I_a$ $U = E + R_a \times I$ et $i_e = \frac{U_e}{R_e}$	$I = I_a + i_e$ $U = U_e = E + R_a \times I$ et $i_e = \frac{U_e}{R_e}$	$I = I_a = i_e$ et $C_{em} = k' \times I^2$ $U = E + (R_a + R_e).I$ et $i_e = \frac{U_e}{R_e}$
		
$P_a = U \cdot I + U_e \cdot i_e$	$P_a = U \times I$	$P_a = U \times I$
 <p> $P_u = C_u \cdot \Omega$, $P_{je} = U_e \cdot i_e = R_e \cdot i_e^2$, $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega}$, $P_{ja} = R_a \cdot I_a^2$, $P_{cst} = P_f + P_{méc}$, $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{C_u \cdot \Omega}{UI + P_{je}}$ </p>		

Exercice 2 :

La plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation indépendante indique :

- 1,12 kW, 1200 tr/min,
- **Induit** 220 V 5,7 A
- **Excitation** 220 V 0,30 A

1- Calculer le couple utile nominal (en Nm).

$$\Omega = \frac{2\pi}{60} \times N = \frac{2\pi}{60} \times 1200 = 125,7 \text{ rd/s}$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{1120}{125,7} = 8,9 \text{ Nm}$$

2- Calculer le rendement nominal.

$$\rho = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{U \times I + U_e \times i_e} = \frac{1120}{220 \times 5,7 + 220 \times 0,3} = 84,8\%$$

Exercice 3 :

Un moteur à courant continu à excitation shunt est alimenté par une tension **230V** et absorbe un courant de **20A** et tourne à une vitesse de 1200tr/mn, les pertes constantes $P_c=300W$, $R_e=100\Omega$, $R_a=0.1\Omega$.

Déterminer le rendement du moteur.

Rendement : $\rho = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - P_c - P_J}{P_a}$

Courant d'excitation : $i_e = \frac{U}{R_e} = \frac{230}{100} = 2.3A$

Courant d'induit : $i_a = I - i_e = 20 - 2.3 = 17.7A$

Pertes Joules : $P_J = R_e \times I_e^2 + R_a \times I_a^2$
 $= 100 \times 2.3^2 + 0.1 \times 17.7^2 = 560W$

Puissance absorbée : $P_a = U \times I = 230 \times 20 = 4600 W$

Rendement : $\rho = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - P_c - P_J}{P_a} = \frac{4600 - 560 - 300}{4600} = 81.3\%$

Exercice 4 :

Un moteur à courant continu à excitation série est alimenté sous tension $U=220V$, $R_e=0.5\Omega$, $R_a=0.2\Omega$, le courant absorbé $I=20A$, la vitesse de rotation $N=1500tr/mn$. Calculer :

- 1) La F.E.M du moteur
- 2) La puissance absorbée, la puissance dissipée par effet Joule et la puissance utile si les pertes collectives sont de 100W. En déduire le couple utile et le rendement.

Solution

1. **Force électromotrice f.e.m:** $E = U - (R_a + R_e) \times I = 220 - (0.2 + 0.5) \times 20 = 206V$
2. **Puissance absorbée:** $P_a = U \times I = 220 \times 20 = 4400W$
3. **Pertes par effet Joule :** $P_J = R_a \times I_a^2 + R_e \times I_e^2 = (R_a + R_e) \times I^2 = 0.7 \times 20^2 = 280W$
4. **Puissance utile:** $P_u = P_a - P_J - P_c = 4400 - 280 - 100 = 4020W$
5. **Couple utile :** $C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{4020}{\frac{1500 \times 2\pi}{60}} = 25.6N.m$
6. **Rendement :** $\rho = \frac{P_u}{P_a} = \frac{4020}{4400} = 91.36\%$

2.6.2 Démarrage du moteur : (Surintensité de démarrage)

On considère un Moteur à excitation séparée :

C_{dc} le couple de démarrage imposé par la charge (N.m);

C_d le couple de démarrage du moteur (N.m);

I_d le courant de démarrage (A);

$U_n=240 V$ la tension d'alimentation nominale de l'induit ;

$I_n = 20 A$ le courant nominal dans l'induit ;

$R_a=1 \Omega$ la résistance de l'induit.

Au démarrage : $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0$ et donc $I_d = \frac{U_n - E}{R_a} = \frac{U_n}{R_a} = 240A \gg I_n$

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

Au démarrage en charge :

il faut que $C_d > C_{dc}$ il faut donc **un courant de décollage** $I_d \approx \frac{C_d}{K\Phi} > \frac{C_{dc}}{K\Phi}$

On constate qu'étant donné la pointe de courant de démarrage, le moteur à excitation indépendante peut démarrer en charge.

Conséquences : La pointe de courant de 240 A va provoquer la détérioration de l'induit par échauffement excessif par effet joule. **Il faut limiter le courant de démarrage** : en général, on accepte $I_d = 1,5 I_n$

Solutions pour limiter le courant :

Solution 1 : on utilise des **rhéostats de démarrage**. Cette solution est peu économique.

$$\text{Dans notre exemple } U_n = (R + R_h)I_d = (R + R_h)1,5I_n$$

$$\text{Soit : } R_h = \frac{U_n}{1,5I_n} - R = 7 \Omega$$

Solution 2 : on démarre sous une **tension d'alimentation réduite**.

$$\text{Dans notre exemple } U_d = RI_d = R \cdot 1,5 \cdot I_n = 30 \text{ V}$$

2.6.3 Variation de Vitesse

La vitesse est donnée par : $\Omega = \frac{U - R_a \times I_a}{k\Phi}$, On peut varier la vitesse par :

➤ **Par action sur le courant d'excitation**

A tension U constante, la vitesse du moteur est inversement proportionnelle au flux et donc au courant d'excitation ($i_e = \frac{\Phi}{k'}$)

L'action sur le courant d'excitation permet donc essentiellement d'accroître la vitesse $\Omega = \frac{U - R_a \times I_a}{k'' i_e}$ à partir du point de fonctionnement nominal jusqu'à la vitesse maximale supportable par le moteur.

➤ **Par action sur la tension d'alimentation**

A flux constant, la vitesse du moteur est quasiment proportionnelle à U : $\Omega = \frac{U - R_a \times I_a}{k\Phi} \approx \frac{U}{k\Phi}$

L'alimentation de l'induit par l'intermédiaire d'un pont redresseur commandé ou d'un hacheur permet donc de faire varier continuellement la vitesse de 0 jusqu'à Ω_N