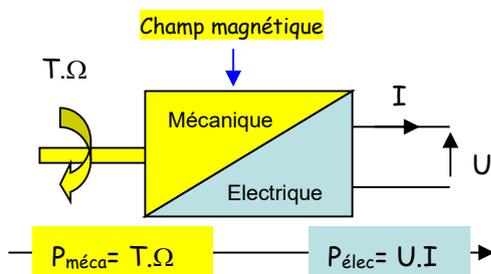


LA MACHINE A COURANT CONTINU

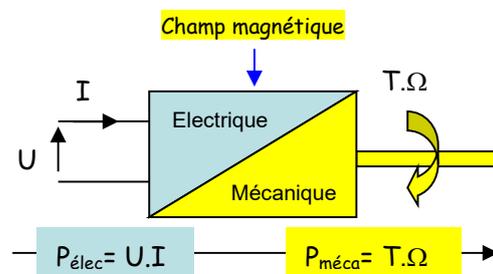
I Présentation

a Généralités

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique.



Fonctionnement en génératrice



Fonctionnement en moteur

- L'énergie mécanique se caractérise par un couple de moment T associé à une vitesse angulaire Ω , le produit de ces deux grandeurs définit la puissance mécanique :

$$P_{\text{méca}} = T \cdot \Omega$$

$P_{\text{méca}}$	Puissance mécanique en watts [W]
T	Moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm]
Ω	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s ⁻¹]

- L'énergie électrique est évaluée par un courant continu I et une tension continue U , la puissance électrique sera le produit de ces deux grandeurs :

$$P_{\text{élec}} = U \cdot I$$

$P_{\text{élec}}$	Puissance électrique en watts [W]
U	La tension en volts [V]
I	L'intensité du courant en ampères [A]

Energie absorbée	Fonctionnement	Energie fournie
Electrique	Moteur	Mécanique
Mécanique	Génératrice	Electrique

. b Description

➤ Vue d'ensemble :

La machine à courant continu comporte les parties principales suivantes :

- Une partie fixe appelée STATOR qui aura le rôle d'inducteur.
- Une partie mobile appelée ROTOR qui aura le rôle d'induit.
- Une liaison rotor - éléments extérieurs à la machine appelée COLLECTEUR.

➤ L'inducteur :

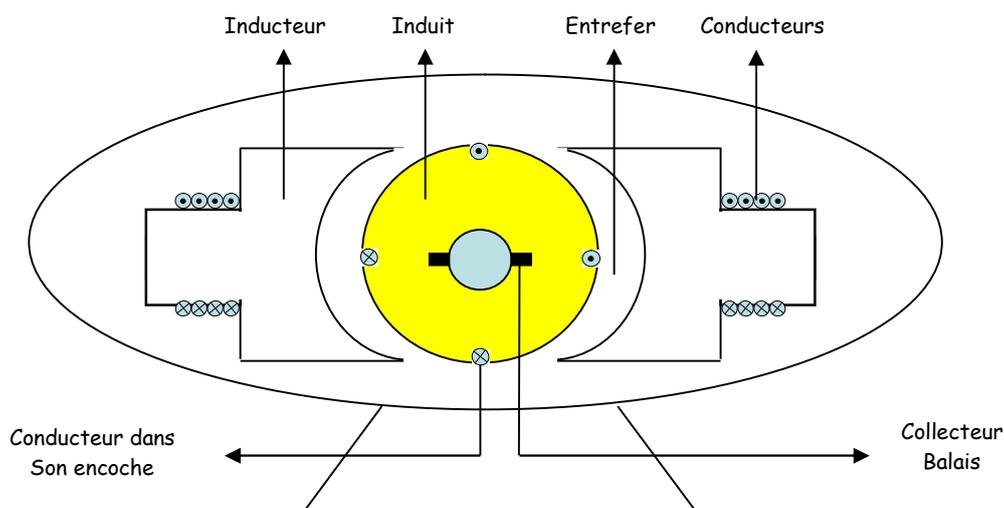
Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie mobile, où se situent les conducteurs.

➤ L'induit :

Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.

➤ Collecteur et balais :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées, disposées sur l'extrémité du rotor, les balais portés par le stator frottent sur le collecteur.



Vue du Moteur à courant continu

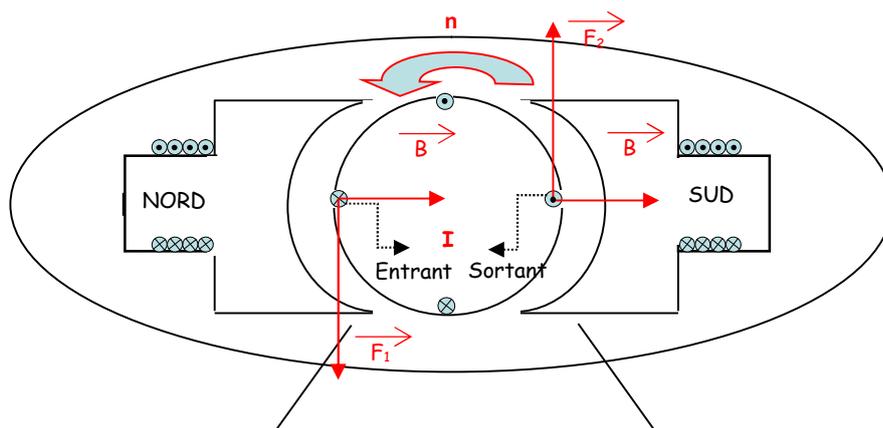
II Principe de fonctionnement

Une machine à courant continu possède un nombre N de conducteurs actifs, le flux utile sous un pôle créé par l'inducteur est Φ , exprimé en webers, et n représente la fréquence de rotation de l'arbre du rotor, en tours par seconde.

Deux cas peuvent se présenter :

- Soit un conducteur est à la fois traversé par un courant électrique et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors soumis à une force électromagnétique.
- Soit un conducteur est à la fois en mouvement de rotation et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors le siège d'une force électromotrice

Ces deux cas peuvent être décrits par le schéma suivant :



Courant + Champ magnétique



Force Electromagnétique

Force + Champ magnétique



Force Electromotrice

Les conducteurs actifs, de nombre N , coupent les lignes du champ magnétique, ils sont donc le siège de forces électromotrices induites, la force électromotrice f.e.m résultante de l'ensemble de ces N spires :

$$E = N.n.\Phi$$

E	La f.e.m en volts [V]
n	La fréquence de rotation en tours par seconde [tr.s^{-1}]
Φ	Le flux en webers [Wb]
N	Le nombre de conducteurs actifs

➔ Cette relation est essentielle pour la machine, car elle est le lien entre le flux Φ une grandeur magnétique, la tension E une grandeur électrique, et la fréquence de rotation n , une grandeur mécanique.

➔ Sachant que $\Omega = 2\pi.n$, une autre relation, reliant les trois types de grandeurs, est fréquemment utilisée, elle prend en compte la vitesse angulaire Ω exprimée en radians par seconde :

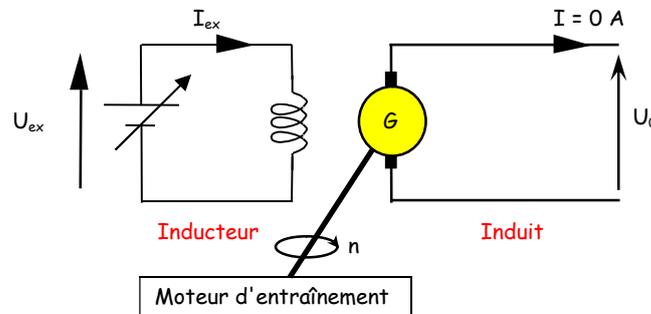
$$E = K.\Phi.\Omega$$

E	La f.e.m en volts [V]
Ω	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s ⁻¹]
Φ	Le flux en webers [Wb]
K	Constante

III Fonctionnement en génératrice

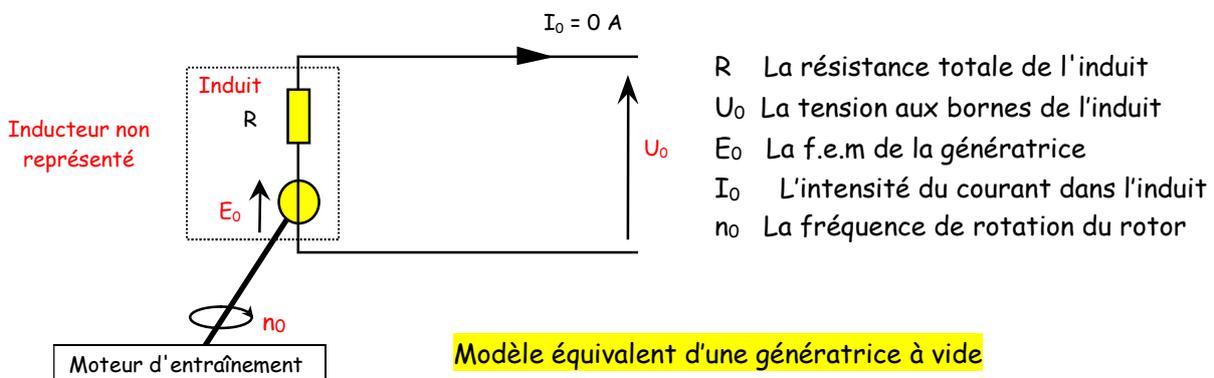
a Fonctionnement à vide et à fréquence de rotation constante

Le rotor de la machine est entraîné par une source extérieure à la fréquence de rotation n . Nous dirons que la génératrice fonctionne à vide lorsqu'elle ne débite aucun courant.



Fonctionnement d'une génératrice à vide

La relation $E = N.n.\phi$ se caractérise donc par deux constantes, le nombre de conducteurs N , et la fréquence de rotation n avec laquelle est entraînée la génératrice. La f.e.m E est dans ce cas proportionnelle au flux ϕ , elle est donc à un coefficient près l'image de la courbe de magnétisation de la machine. L'indice «₀» caractérise le fonctionnement à vide.



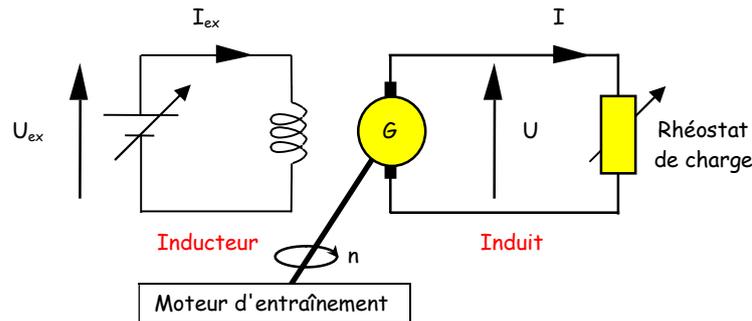
Modèle équivalent d'une génératrice à vide

R	La résistance totale de l'induit
U_0	La tension aux bornes de l'induit
E_0	La f.e.m de la génératrice
I_0	L'intensité du courant dans l'induit
n_0	La fréquence de rotation du rotor

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

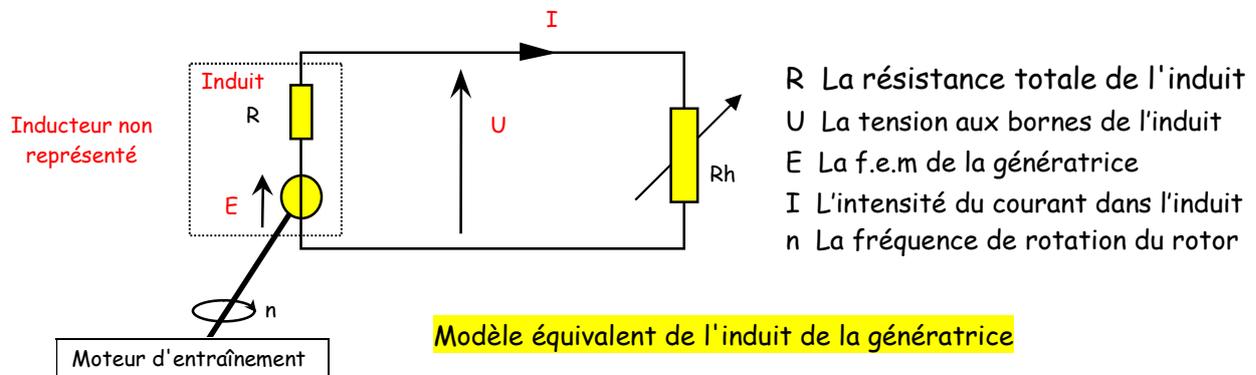
b Fonctionnement sur charge résistive

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



Fonctionnement d'une génératrice en charge

L'induit de la génératrice peut être remplacé par son modèle équivalent :



La loi d'Ohm de l'induit se déduit facilement de son modèle équivalent :

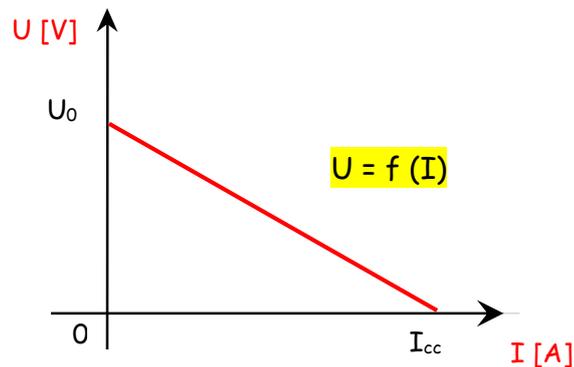
$$U = E - R.I$$

- | | |
|-----|---|
| U | La tension aux bornes de l'induit en volts [V] |
| E | La fem de la génératrice en volts [V] |
| R | La résistance de l'induit en ohms [Ω] |
| I | L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A] |

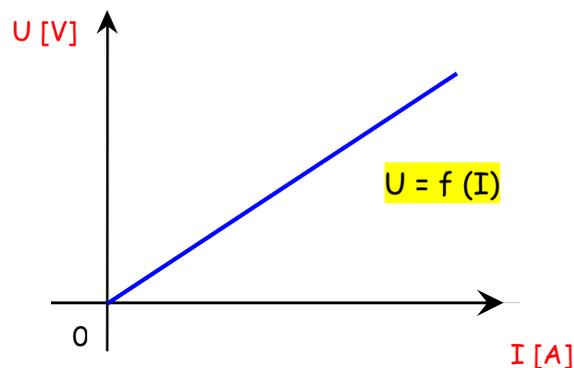
Suivant les valeurs prises par la charge résistive, le moment du couple ($U ; I$) de la tension aux bornes de l'induit et de l'intensité du courant dans l'induit ne peut se déplacer que sur la droite déterminée par deux valeurs particulières :

U_0 valeur maximale de la tension aux bornes de l'induit de la génératrice à vide, $I = 0$ A

I_{cc} valeur maximale de l'intensité du courant dans l'induit court-circuité, $U = 0 \text{ V}$

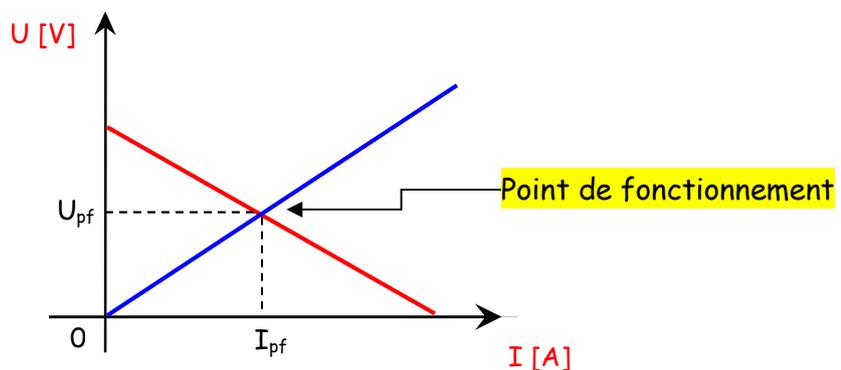


Nous pouvons tracer la caractéristique de la charge ohmique R en utilisant la loi d'Ohm, le moment du couple ($U ; I$) de la tension aux bornes de la charge et de l'intensité du courant qui la traverse se déplace sur la droite de coefficient directeur égal à la valeur de R :



. c Point de fonctionnement sur charge résistive

Le point de fonctionnement du groupe Induit - Charge résistive peut se déterminer graphiquement. Il correspond au fonctionnement simultané de l'alimentation et du récepteur. Les deux couples (courant ; tension) issus des deux caractéristiques doivent impérativement être égaux puisqu'ils sont associés, ainsi :



Evaluation graphique du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement peut également se calculer à partir des deux équations :

$$\begin{cases} U = E - R.I \\ U = R_h.I \end{cases}$$

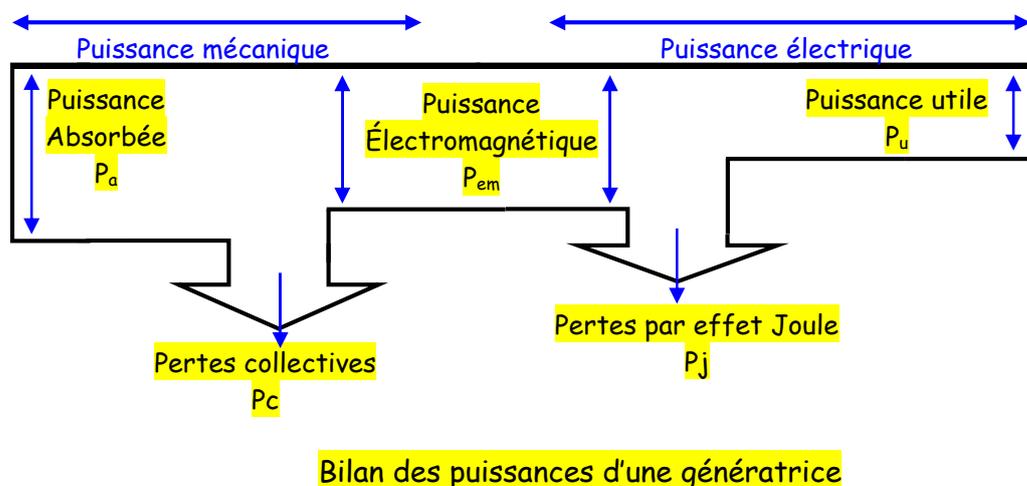
Le point d'intersection (U_{pf} ; I_{pf}) de ces deux droites donne les grandeurs communes aux deux dipôles.

. d Bilan des puissances

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

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance mécanique à la puissance électrique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :



La génératrice reçoit une puissance P_a , produit du moment du couple mécanique T provenant d'un système auxiliaire et de la vitesse angulaire Ω .

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

$P_a = T \cdot \Omega$ <p>Mécanique</p>	P_a La puissance absorbée en watts [W] T Le moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en en radians par seconde [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
$P_c = T_p \cdot \Omega$ <p>Mécanique</p>	P_c Les pertes collectives en watts [W] T_p Le moment du couple de pertes en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en en radians par seconde [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
$P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$ <p>Mécanique</p> <p style="text-align: center;">↕</p> $P_{em} = E \cdot I$ <p>Electrique</p>	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] T_{em} Le moment du couple électromagnétique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en en radians par seconde [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] E La fem de la génératrice en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]
$P_j = R \cdot I^2$ <p>Electrique</p>	P_j Les pertes par effet Joule en watts [W] R La résistance de l'induit en ohms [Ω] I^2 L'intensité du courant dans l'induit en ampères ² [A^2]
$P_u = U \cdot I$ <p>Electrique</p>	P_u La puissance utile en watts [W] U La tension délivrée par l'induit de la génératrice en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

Et

$$P_{em} = P_a - P_c$$

Mécanique

P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W]
 P_a La puissance absorbée en watts [W]
 P_c Les pertes collectives en watts [W]

Donc

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

Electrique

P_u La puissance utile en watts [W]
La puissance électromagnétique en watts [W]
 P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]

$$P_u = P_a - P_c - P_j$$

{ Mécanique
} Electrique

P_u La puissance utile en watts [W]
 P_a La puissance absorbée en watts [W]
 P_c Les pertes collectives en watts [W]
 P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]

- P_c représente la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans la génératrice. T_p est le moment du couple de pertes correspondant à cette puissance perdue.

- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent dans les tôles du rotor.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers.

Le rendement est le rapport entre la puissance électrique utile et la puissance mécanique absorbée par l'induit, d'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

η Rendement de l'induit de la génératrice [sans unités]

P_u La puissance utile en watts [W]

P_a La puissance absorbée en watts [W]

Le rendement de la génératrice complète tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur, P_{ex} , dans la mesure où celui-ci est alimenté électriquement. Cette puissance sert uniquement à magnétiser la machine, toute la puissance active absorbée par le circuit d'excitation est entièrement consommée par effet Joule donc :

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}$$

P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]

U_{ex} La tension d'alimentation de l'inducteur en volts [V]

I_{ex} L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères [A]

$$P_{ex} = r \cdot I_{ex}^2$$

P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]

r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

I_{ex}^2 L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères² [A^2]

$$P_{ex} = \frac{U_{ex}^2}{r}$$

P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]

U_{ex}^2 La tension d'alimentation de l'inducteur en volts² [V^2]

r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

Le rendement est donc

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + P_{ex}}$$

η Rendement de la machine complète [sans unités]

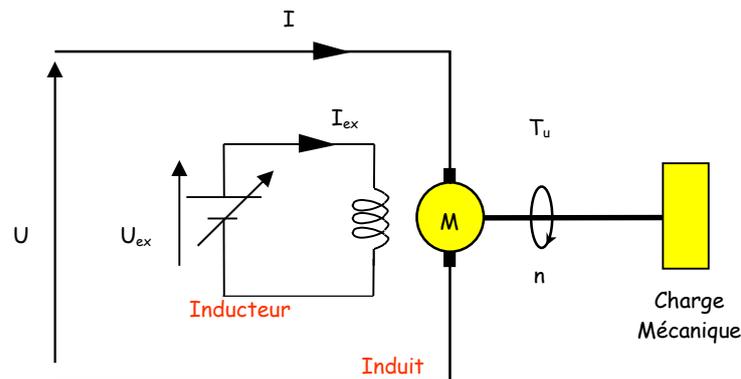
P_u La puissance utile en watts [W]

P_a La puissance absorbée en watts [W]

. IV Fonctionnement en moteur

. a Fonctionnement en charge

L'induit du moteur est alimenté par une seconde source de tension continue, il entraîne une charge mécanique à la fréquence de rotation n .

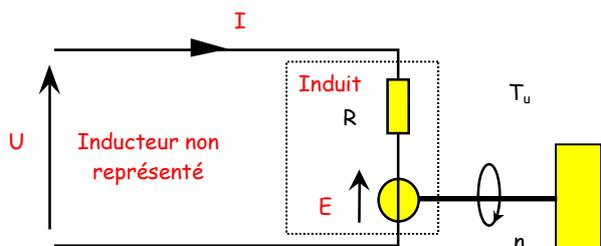


Fonctionnement d'un moteur en charge

Le moteur absorbe une puissance électrique et restitue une puissance mécanique, combinaison du moment du couple utile et de la fréquence de rotation.

. b Loi d'Ohm

L'induit du moteur peut être remplacé par son modèle équivalent :



- R La résistance totale de l'induit
- U La tension aux bornes de l'induit
- E La fem du moteur
- I L'intensité du courant dans l'induit
- n La fréquence de rotation du rotor

Modèle équivalent de l'induit du moteur

La loi d'Ohm de l'induit se déduit facilement de son modèle équivalent :

$$U = E + R.I$$

- U La tension aux bornes de l'induit en volts [V]
- E La f.e.m du moteur en volts [V]
- R La résistance de l'induit en ohms [Ω]
- I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

c Plaque signalétique du moteur

La plaque signalétique d'un moteur donne de précieux renseignements, ils concernent le fonctionnement le mieux approprié, c'est-à-dire celui qui permet un très bon rendement, pas forcément le plus élevé, mais qui assure une très bonne longévité de la machine. Les valeurs mentionnées pour l'induit, sont appelées les valeurs nominales, elles ne doivent pas être dépassées de plus de 1,25 fois, elles se décomposent ainsi :

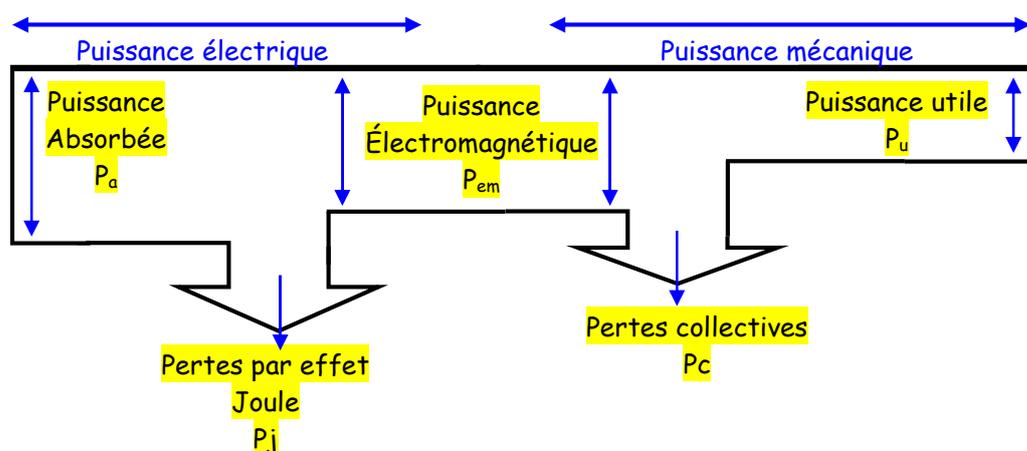
- U Tension nominale à appliquer aux bornes de l'induit.
- I Intensité nominale du courant dans l'induit
- n Fréquence de rotation nominale du rotor
- P_u Puissance utile nominale, d'origine mécanique délivrée par le moteur.

d Bilan des puissances

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

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance électrique à la puissance mécanique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :



Bilan des puissances d'un moteur

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

Le moteur reçoit une puissance P_a , produit de la tension, appliquée sur les bornes de l'induit et de l'intensité du courant qui le traverse.

$P_a = U \cdot I$ <p style="color: red; margin: 0;">Electrique</p>	P_a La puissance absorbée en watts [W] U La tension aux bornes de l'induit en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]
$P_j = R \cdot I^2$ <p style="color: red; margin: 0;">Electrique</p>	P_j Les pertes par effet Joule dans l'induit en watts [W] R La résistance de l'induit en ohms [Ω] I^2 L'intensité du courant dans l'induit en ampères ² [A^2]
$P_{em} = E \cdot I$ <p style="color: red; margin: 0;">Electrique</p> <div style="text-align: center; margin: 5px 0;"> \updownarrow </div> $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$ <p style="color: red; margin: 0;">Mécanique</p>	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] E La f.e.m du moteur en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] T_{em} Le moment du couple électromagnétique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]
$P_c = T_p \cdot \Omega$ <p style="color: red; margin: 0;">Mécanique</p>	P_c Les pertes collectives en watts [W] T_p Le moment du couple de pertes en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]
$P_u = T \cdot \Omega$ <p style="color: red; margin: 0;">Mécanique</p>	P_u La puissance utile en watts [W] T Le moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

$P_{em} = P_a - P_j$ <p style="color: red; margin: 0;">Electrique</p>		P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]
---	--	---

Et

$P_u = P_{em} - P_c$ <p style="color: red; margin: 0;">Mécanique</p>		P_u La puissance utile en watts [W] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_c Les pertes collectives en watts [W]
--	--	--

Donc

$P_u = P_a - P_j - P_c$ <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">{</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> Electrique Mécanique </div> </div>		P_u La puissance utile en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W] P_c Les pertes collectives en watts [W]
--	--	---

- P_c représente la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans le moteur. T_p est le moment du couple de pertes correspondant à cette puissance perdue.
- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent dans les tôles du rotor.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers.

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par l'induit, d'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

η	Rendement de l'induit du moteur [sans unités]
P_u	La puissance utile en watts [W]
P_a	La puissance absorbée en watts [W]

Le rendement du moteur complet tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur, P_{ex} , dans la mesure où celui-ci est alimenté électriquement. Cette puissance sert uniquement à magnétiser le moteur, toute la puissance active absorbée par le circuit d'excitation est entièrement consommée par effet Joule donc :

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}$$

P_{ex}	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
U_{ex}	La tension d'alimentation de l'inducteur en volts [V]
I_{ex}	L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères [A]

$$P_{ex} = r \cdot I_{ex}^2$$

P_{ex}	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
r	La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]
I_{ex}^2	L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères ² [A^2]

$$P_{ex} = \frac{U_{ex}^2}{r}$$

P_{ex}	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]
U_{ex}^2	La tension d'alimentation de l'inducteur en volts ² [V^2]
r	La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

Le rendement est donc

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + P_{ex}}$$

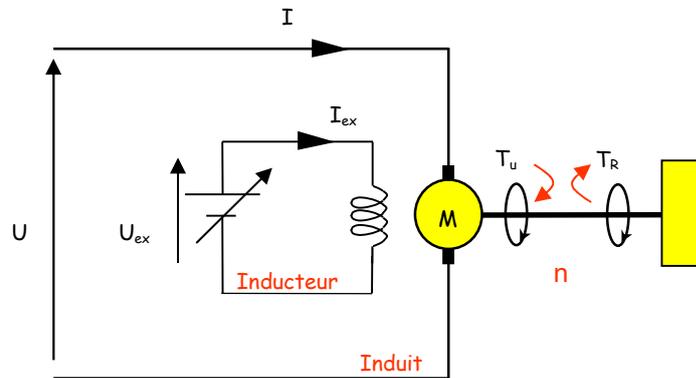
η	Rendement du moteur complet [sans unités]
P_u	La puissance utile en watts [W]
P_a	La puissance absorbée en watts [W]

. d Essai à vide

Nous dirons que le moteur fonctionne à vide s'il n'entraîne aucune charge sur son arbre. L'indice «₀» caractérise cet essai. Sa fréquence de rotation est notée n_0 , elle est légèrement supérieure à sa fréquence de rotation nominale, l'intensité du courant dans l'induit I_0 est très

faible devant sa valeur nominale et la tension d'alimentation U_0 de l'induit est réglée à sa valeur nominale. En faisant varier U_0 , la tension aux bornes de l'induit mesurée en volts, nous pouvons relever en ampères l'intensité du courant dans l'induit I_0 , et la fréquence de rotation n_0 en tours par seconde. Les éléments U_0 , I_0 et n_0 nous permettent de calculer la fem à vide E_0 en utilisant la relation :

e Essai en charge



Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.

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

En régime permanent

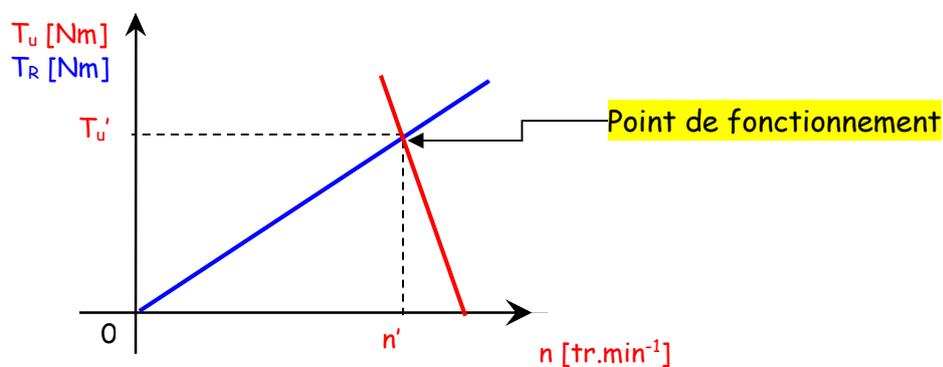
$$T_u = T_R$$

T_u Le moment du couple utile en newton-mètres [Nm]

T_R Le moment du couple résistant en newton-mètres [Nm]

g Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le moment du couple résistant de la charge.



Evaluation graphique du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement donne graphiquement n' , la fréquence de rotation du moteur ainsi que T_u' le moment du moment du couple utile.

. i Le risque d'emballement du moteur

Dans la relation :

$$E = N.n.\Phi \quad \Rightarrow \quad n = \frac{E}{N\Phi}$$

Si l'intensité du courant dans l'inducteur s'annule, le flux tend alors vers zéro. Suivant la loi d'Ohm la valeur de la fem n'est pas nulle

$$E = U - R.I \quad \Rightarrow \quad n = \frac{U - R.I}{N\Phi}$$

La fréquence de rotation d'un moteur alimenté tend vers l'infini si le flux s'annule.

➔ Une coupure dans le circuit d'excitation entraîne donc un emballement du moteur.

Pour éviter que le moteur s'emballe, il est indispensable de respecter un ordre pour le câblage ainsi qu'un ordre inverse pour le dé câblage du moteur. L'inducteur doit être alimenté en premier lors du câblage, il sera débranché en dernier au dé câblage du moteur.