

La machine à courant continu

I Généralités :

La machine à courant continu est constituée de deux parties.

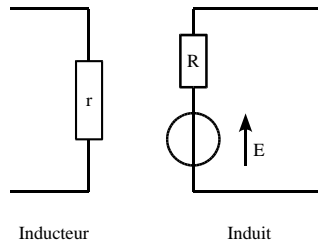
Une partie fixe, le **stator**, qui crée le champ magnétique ; c'est l'**inducteur**. Cet inducteur peut-être constitué d'aimants permanents ou d'une bobine alimentée par un courant continu.

Une partie mobile, le **rotor**, qui est l'**induit** de la machine. Le rotor de la machine est constitué de conducteur et lorsque le rotor tourne, il se crée aux bornes de l'ensemble des conducteurs une tension induite E.

Pour faire fonctionner une machine à courant continu, on peut brancher l'inducteur en série avec l'induit : on parle alors de machine série. Si l'inducteur est alimenté de façon séparée par rapport à l'induit, on parle de machine à excitation indépendante.

La machine à courant continu est une machine réversible. Elle peut fonctionner soit en génératrice, soit en moteur.

I.1 Modèle électrique d'une machine à courant continu :



I.2 La force électromotrice (f.e.m.) E:

L'inducteur crée le flux magnétique Φ en Weber [Wb].

Le rotor est composé de N conducteurs et tourne à la vitesse angulaire Ω en [rad/s].

On montre que l'expression de la f.e.m. E est : $E = \frac{N \Phi \Omega}{2 \pi}$.

Si on pose $K = \frac{N}{2 \pi}$ (constante sans dimension) alors, $E = K \Phi \Omega$ avec $\begin{cases} \Phi \text{ en [Wb]} \\ \Omega \text{ en [rad/s]} \\ E : \text{f.e.m. induite en [V]} \end{cases}$

Si le flux est constant, la f.e.m. induite E est proportionnelle à la vitesse de rotation n soit : $E = k.n$

I.3 Couple électromagnétique :

Lorsqu'il circule une intensité I dans l'induit, la puissance électromagnétique est $P_E = E.I$.

Le rotor tournant à la vitesse Ω , il existe un couple électromagnétique T_{EM} tel que $P_E = T_{EM} \cdot \Omega$.

On montre alors que l'expression du couple électromagnétique est :

$$T_{EM} = K \Phi I$$

c'est-à-dire que le couple électromagnétique est proportionnel à l'intensité qui circule dans l'induit.

II Fonctionnement en moteur de la machine à courant continu :

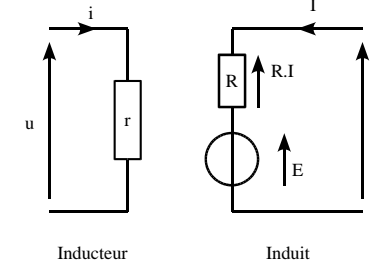
II.1 Le moteur à excitation indépendante :

II.1.1 Modèle électrique :

L'inducteur est alimenté par une tension continue u et est traversé par le courant continu i (si l'inducteur n'est pas à aimants permanents).

L'induit est alimenté par une tension continue U et est traversé par une intensité I.

Modèle électrique du moteur à excitation indépendante :



Pour ce moteur, le flux Φ est directement proportionnel au courant d'excitation i.

Équation de fonctionnement pour l'induit : $U = E + R.I$

II.1.2 Bilan énergétique et rendement:

Le moteur absorbe la puissance électrique $P_A = u.i + U.I$. (Si le moteur est à aimant permanent, $u.i = 0$)

Au niveau de l'excitation (l'inducteur), il se crée des pertes par effet Joule $P_{JE} = u \cdot i = r \cdot i^2$.

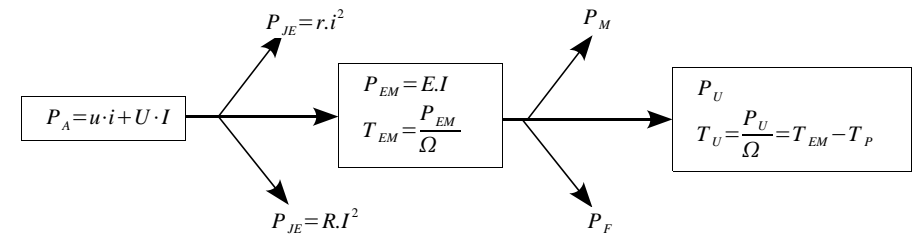
Pour l'induit, les pertes par effet Joule sont $P_{JI} = R \cdot I^2$.

La puissance électromagnétique $P_{EM} = P_A - P_{JE} - P_{JI} = E.I$

Lors d'un essai à vide, $P_V = R.I_V + P_C$, on peut déterminer les pertes collectives P_C qui représentent les pertes magnétiques ou pertes fer P_F ainsi que les pertes mécaniques P_M soit : $P_C = P_F + P_M$.

On définit le couple de pertes par $T_p = T_{EM} - T_U = \frac{T_p}{\Omega}$

La puissance utile disponible sur l'arbre du moteur est $P_U = P_A - P_{JE} - P_{JI} - P_C$.



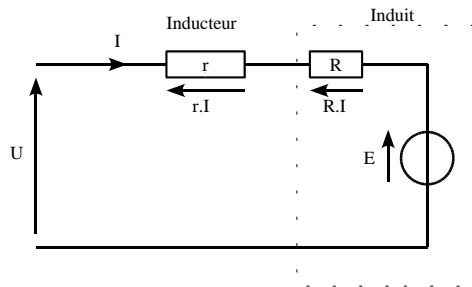
Le rendement du moteur à courant continu est $\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{P_U}{P_U + u \cdot i + R \cdot I^2 + P_C}$.

II.2 Le moteur à excitation série :

II.2.1 Modèle électrique :

L'inducteur est placé en série avec l'induit. L'inducteur et l'induit sont donc traversés par la même intensité I .

Modèle électrique du moteur à excitation série :



Équation de fonctionnement : $U = E + (r + R) \cdot I$

II.2.2 Bilan des puissance et rendement :

Le moteur absorbe la puissance électrique $P_A = U \cdot I$.

Au niveau de l'excitation (l'inducteur), il se crée des pertes par effet Joule $P_{JE} = r \cdot I^2$.

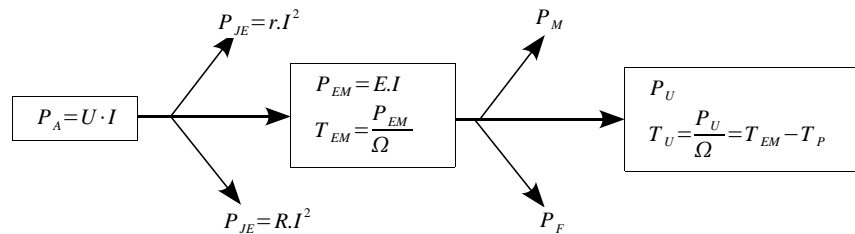
Pour l'induit, les pertes par effet Joule sont $P_{JI} = R \cdot I^2$.

La puissance électromagnétique $P_{EM} = P_A - P_{JE} - P_{JI} = E \cdot I$

Lors d'un essai à vide, on peut déterminer les pertes collectives P_C qui représentent les pertes magnétiques ou pertes fer P_F ainsi que les pertes mécaniques P_M soit : $P_C = P_F + P_M$.

On définit le couple de pertes par $T_p = T_{EM} - T_U$

La puissance utile disponible sur l'arbre du moteur est $P_U = P_A - P_{JE} - P_{JI} - P_C$.



Le rendement du moteur à courant continu est $\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{P_U}{U \cdot I}$.

II.3 Quelques considérations pour le moteur à courant continu :

II.3.1 Utilisation des moteurs à courant continu :

Le principal avantage de ces moteurs, c'est qu'il est très facile de faire varier la vitesse de rotation par modification de la tension d'alimentation U en utilisant des ponts redresseurs commandés ou des hacheurs.

II.3.2 Démarrage des moteurs à courant continu :

Nous avons vu que la f.e.m. $E = k \cdot n$. Or, au démarrage, $n = 0$ d'où $E = 0$.

Pour un moteur à excitation séparée, $U = R \cdot I_D \Rightarrow I_D = \frac{U}{R}$. Le courant de démarrage est très important.

Ce courant est source de détérioration du moteur, on essaie de limiter ce courant soit par adjonction d'une résistance de démarrage qu'on diminue progressivement soit par augmentation progressive de la tension d'induit. Dès que le moteur commence à tourner, $I_D = \frac{U - E}{R}$ et décroît rapidement jusqu'à sa valeur nominale I .

Si le moteur doit démarrer en charge avec une charge qui présente un couple résistant T_R , l'intensité de démarrage doit être $I_D > \frac{T_R}{K \Phi}$.

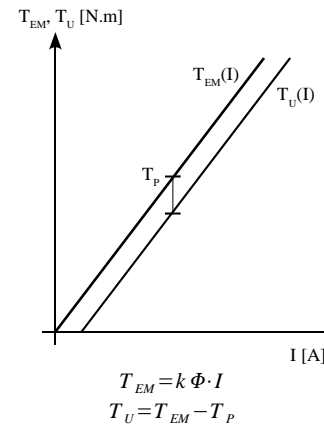
Remarque importante : Pour démarrer un moteur à excitation indépendante, on doit commencer par mettre l'induit sous tension et ensuite seulement mettre l'inducteur sous tension. Si le moteur est à vide, il ne faut jamais couper la tension de l'inducteur avant celle de la tension d'induit au risque de voir l'emballage du moteur.

Pour un moteur à excitation série, le moteur doit démarrer en charge.

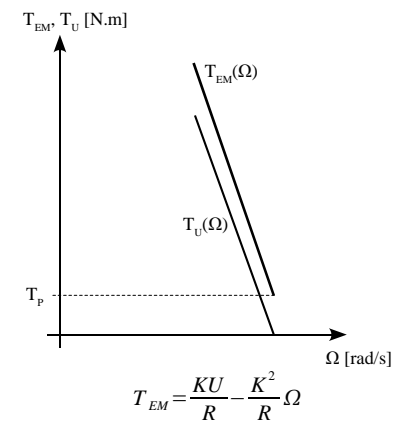
II.3.3 Caractéristiques des moteurs à courant continu :

Pour un moteur à excitation indépendante, $P_{EM} = E \cdot I = T_{EM} \cdot \Omega$, $E = k \cdot \Phi \cdot \Omega$ et $T_U = T_{EM} - T_p$.
Pour un flux constant Φ , pour une tension d'induit constante U et pour un couple de perte T_p constant.

Caractéristique $T(I)$:



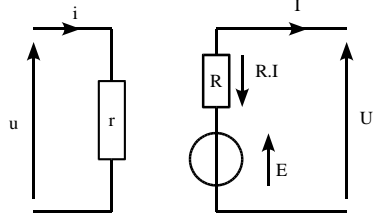
Caractéristique mécanique $T(n)$:



III Fonctionnement de la machine à courant continu en génératrice :

Génératrice à excitation indépendante :

Modèle et équation de fonctionnement :



Équation de fonctionnement : $U = E - R \cdot I$

IV Exercices d'application :

Exercice n°1 :

Un moteur à excitation indépendante porte les indications suivantes :
Résistance de l'inducteur $r = 150 \Omega$; tension d'alimentation $u = 120 \text{ V}$.
Résistance de l'induit $R = 0,5 \Omega$; tension alimentation $U = 220 \text{ V}$.

Lors d'un essai à vide, on mesure la puissance absorbée par l'induit $P_V = 320 \text{ W}$, $I_V = 1,2 \text{ A}$.
Pour essai en charge à la vitesse $n = 1450 \text{ tr/min}$, l'intensité $I = 18 \text{ A}$.

Pour l'essai en charge, calculer :

- 1- La puissance électromagnétique.
- 2- Les pertes par effet Joule au stator et au rotor.
- 3- Les pertes collectives.
- 4- La puissance utile P_U .
- 5- Le moment du couple utile T_U .
- 6- Le rendement η du moteur.

Pour l'essai à vide, calculer :

- 7- La f.e.m. E_V .
- 8- La fréquence de rotation n_V .

Réponses :

- 1- Équation de fonctionnement : $U = E + R \cdot I \Rightarrow E = U - R \cdot I$ soit $E = 211 \text{ V}$
La puissance électromagnétique est $P_{EM} = E \cdot I$ soit $P_{EM} = 3,8 \text{ kW}$
- 2- $P_{JE} = u \cdot i = \frac{u^2}{r}$ et $P_{JI} = R \cdot I^2$ soit : $P_{JE} = 96 \text{ W}$ et $P_{JI} = 162 \text{ W}$
- 3- Lors de l'essai à vide, $P_V = R \cdot I_V^2 + P_C \Rightarrow P_C = P_V - R \cdot I_V^2$ soit $P_C = 319 \text{ W}$
- 4- $P_U = P_A - P_{JI} - P_{JE} - P_C = P_{EM} - P_C$ soit $P_U = 3,5 \text{ kW}$
- 5- $T_U = \frac{P_U}{\Omega} = \frac{P_U}{(2\pi n/60)}$ soit $T_U = 23 \text{ Nm}$
- 6- $\eta = \frac{P_U}{P_A} = \frac{P_U}{(u \cdot i + U \cdot I)}$ soit $\eta = 85,8 \%$
- 7- A vide : $U = E + R \cdot I_V \Rightarrow E = U - R \cdot I_V$ soit $E = 219,4 \text{ V}$
- 8- A vide $E_V = k \cdot n_V \Rightarrow k = \frac{E_V}{n_V}$ et en charge $E = k \cdot n \Rightarrow k = \frac{E}{n}$ soit $n_V = \frac{E_V}{E} \cdot n = 1508 \text{ tr/min}$.
(k est identique dans les deux cas car le moteur est à excitation constante).

Exercice n°2 :

Un moteur à excitation indépendante à pour résistance d'induit $R = 0,9 \Omega$ et est alimenté par une tension d'alimentation U variable.

Un essai à vide permet de mesurer le courant $I_V = 1,3 \text{ A}$, la tension $U_V = 150 \text{ V}$ et $n_V = 1250 \text{ tr/min}$.

1- Calculer les pertes collective P_p et le moment du couple de pertes T_p .

En charge, pour une tension d'alimentation $U = 170 \text{ V}$, l'induit appelle un courant constant de $I = 22 \text{ A}$, la vitesse de rotation $n = 1250 \text{ tr/min}$.

2- Calculer la f.e.m. E .

3- Établir la relation entre E et n lorsque U varie.

4- Calculer la tension de décollage U_D .

5- Établir l'expression de n en fonction de U .

6- Montrez que le moment du couple électromagnétique T_{EM} est constant et calculer sa valeur.

7- Le moment du couple de perte T_p est proportionnel à la vitesse n , soit $T_p = a \cdot n$. Calculer a .

8- Ecrire l'expression de T_U (n).

9- Le moteur doit entraîner une charge qui à pour couple résistant $T_R = 2,10^{-6} \cdot n^2 - 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot n + 23$.
Calculer les coordonnées du point de fonctionnement.

Réponses:

1- $P_V = R \cdot I_V^2 + P_C \Rightarrow P_C = U_V \cdot I_V - R \cdot I_V^2$ soit $P_C = 193,4 \text{ W}$ et $T_p = \frac{P_C}{(2\pi n/60)} = 1,48 \text{ Nm}$

2- $U = E + R \cdot I \Rightarrow E = U - R \cdot I$ soit $E = 150,2 \text{ V}$

3- On sait que $E = k \cdot n \Rightarrow k = \frac{E}{n}$ soit $k = 120,2 \cdot 10^{-3}$. D'où la relation $E = 120,2 \cdot 10^{-3} \cdot n$

4- Lorsque le moteur démarre, $E = 0$ et $U_D = R \cdot I$ soit $U_D = 19,8 \text{ V}$

5- On sait que $E = 120,2 \cdot 10^{-3} \cdot n$ et $U = E + R \cdot I \Rightarrow U = 120,2 \cdot 10^{-3} \cdot n + R \cdot I$ soit $n = \frac{U - R \cdot I}{120,2 \cdot 10^{-3}}$

On trouve : $n = 8,32 \cdot U - 164,8$

6-

$T_{EM} = \frac{E \cdot I}{\Omega}$ avec $I = \text{Cste}$, $E = 120,2 \cdot 10^{-3} \cdot n$ et $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ alors $T_{EM} = \frac{120,2 \cdot 10^{-3} \cdot n \times 22}{(2\pi n/60)} = 25,2 \text{ Nm}$

7- Pour $n = 1250 \text{ tr/min}$, $T_p = 1,48 \text{ Nm}$. et $a = \frac{T_p}{n} = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ Nm/tr/min}$.

8- $T_U = T_{EM} - T_p$ soit $T_U = 25,2 - 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot n$

9- Pour calculer le point de fonctionnement, on fait $T_U = T_R$.

$25,2 - 1,18 \cdot 10^{-3} \cdot n = 2,10^{-6} \cdot n^2 - 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot n + 23$ soit $2,10^{-6} \cdot n^2 - 80 \cdot 10^{-6} \cdot n - 2,2 = 0$

$\Delta = (-80 \cdot 10^{-6})^2 - 4 \times 2,10^{-6} \times (-2,2) = 17,6 \cdot 10^{-6}$

$n_1 = \frac{-(-80 \cdot 10^{-6}) - \sqrt{17,6 \cdot 10^{-6}}}{2 \times 2,10^{-6}} = -1029$ et $n_2 = \frac{-(-80 \cdot 10^{-6}) + \sqrt{17,6 \cdot 10^{-6}}}{2 \times 2,10^{-6}} = 1070$

On choisit la vitesse positive : $n = 1070 \text{ tr/min}$ et $T = 23,9 \text{ Nm}$.