

Chapitre 1

Machine à Courant Continu MCC

1.1 Constitution - Principe de fonctionnement

1.2 Présentation de la machine à courant continu(MCC)

Une machine électrique est un convertisseur d'énergie électromécanique réversible. En fonctionnement moteur, elle permet de produire de l'énergie mécanique à partir de l'énergie électrique ; en fonctionnement en génératrice la conversion est inversée.

1.2.1 Conversion d'énergie

Le courant induit peut être soit imposé par une alimentation la machine fonctionnera en moteur et produit un couple électromagnétique qui fait tourner le rotor, soit induit par la rotation forcée du rotor, la machine se comportera en génératrice.

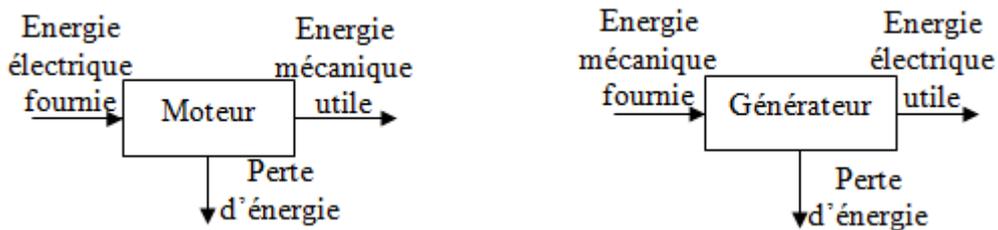


FIGURE 1.1 – Fonctionnement Moteur -Générateur

1.2.2 Schéma de principe

La figure suivante présente un schéma de principe en coupe d'une MCC, elle comprend

1. un circuit magnétique comportant une partie fixe, le stator, une partie tournante, le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties
2. une source continue alimente le bobinage inducteur (stator) crée le champ magnétique d'excitation et peut être remplacé par des aimants permanents (flux constant, machine de petite puissance)
3. un bobinage induit (rotor) parcourue par un courant continu subit les effets de ce champ inducteur est siège d'une force électromotrice f_{em} induite E
4. Le système balais-collecteur permet d'accéder au circuit électrique de l'induit(rotor).

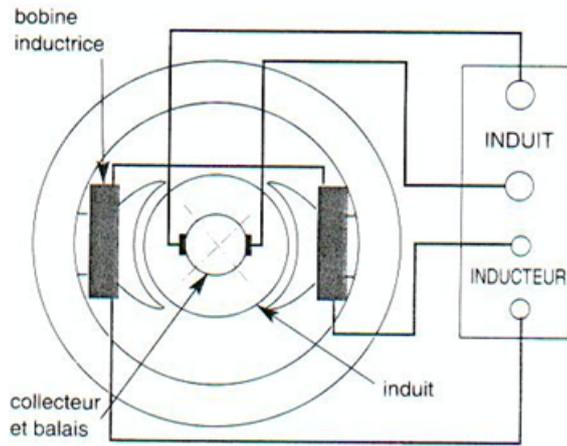


FIGURE 1.2 – Présentation d’une machine à courant continu

1.3 Moteur à excitation indépendante

Le moteur étant alimenté, le bobinage induit sous tension U_a placé dans un champ magnétique inducteur $\vec{B}(I_f)$, est soumis à un couple donné par la loi de Laplace et par conséquent le moteur tourne à une vitesse Ω tels que :

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

- n : vitesse de rotation en tr.mn^{-1}
- Ω : La vitesse de rotation en rd.s^{-1}

Remarque : le couple fourni dépend du flux dans l’entrefer résultant des flux induit et inducteur , ainsi au démarrage deux cas peuvent se présenter :

1. les flux sont additifs le moteur fournies un couple et donc il démarre
2. les flux sont soustractifs le moteur ne fournies pas un couple et donc il ne démarre pas. Dans ce cas pour que le moteur tourne il suffit de inverser la polarité de l’alimentation induit ou inducteur, généralement on inverse celle de l’inducteur

1.3.1 Schéma Équivalent

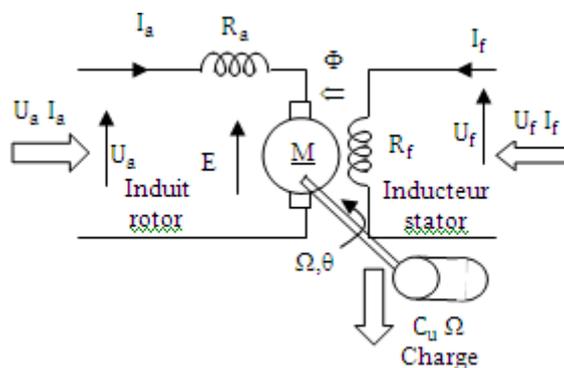


FIGURE 1.3 – Fonctionnement Moteur

1.3.2 Équations

— La relation de maille donne :

$$\begin{cases} \text{Induit :} & U_a = R_a I_a + E \\ \text{Inducteur :} & U_f = R_f I_f \end{cases}$$

En pratique En charge

$$I_a \gg I_f \quad \text{et} \quad R_f \gg R_a$$

— Force électromotrice FEM : La bobine (induit) en mouvement placée dans un champs magnétique(inducteur) est le siège d'une force électromotrice motrice FEM induite entre ces bornes donnée par la loi de Faraday :

$$E = k\Omega\Phi$$

— k : constante qui dépend de la machine

— Φ : flux maximum par pôle

— le flux étant :

$$\Phi = M_{af} I_f$$

circuit magnétique non saturé

— Le couple électromagnétique :

$$C_e = kI_a\Phi$$

1.3.3 Caractéristiques de vitesse

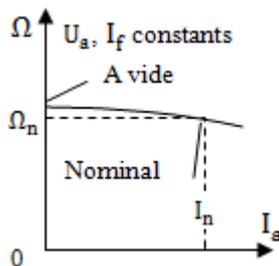
— D'après la fem :

$$E = k\Omega\Phi = k'\Omega I_f = U_a - R_a I_a$$

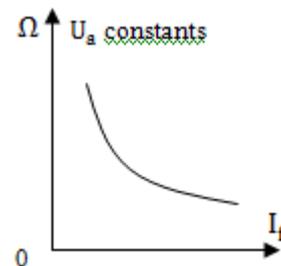
la vitesse s'écrit alors :

$$\Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k' I_f} = \frac{U_a}{k' I_f} - k'' \frac{I_a}{I_f}$$

— Caractéristique $\Omega(I_a)$ à U_a et I_f constants est une droite, si la charge augmente I_a augmente et Ω diminue (Ω varie peu avec la charge)



a : $\Omega(I_a)$ à U_a et I_f constants



b : $\Omega(I_f)$ à U_a et I_a constants

FIGURE 1.4 – Caractéristiques de vitesse d'un MCC

— caractéristique $\Omega(I_f)$ à U_a constant est une hyperbole, si I_f augmente, Ω diminue

remarque : si il y a coupure du circuit inducteur

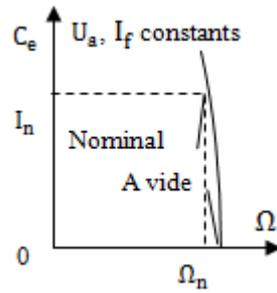
$$I_f = 0 \quad \implies \quad \Omega \implies \infty$$

et le moteur s'emballe, ainsi ne jamais couper l'alimentation de l'inducteur d'un moteur à excitation indépendante si l'induit est sous tension

— Caractéristique $C_e(\Omega)$ à U_a et I_f constants : D'après l'équation du couple

$$C_e = kI_a\Phi = k' I_a = \frac{k' U_a - k' \Omega}{R_a}$$

c'est une droite, si Ω augmente C_e diminue (C_e varie peu avec Ω) Le couple de démarrage ($\Omega = 0$) est important. Le moteur démarre seul

FIGURE 1.5 – $C_e(\Omega)$ à U_a constant et I_f constant

1.3.4 Écoulement des puissances et rendement

La Puissance absorbée s'écrit

$$P_{ab} = U_a I_a + U_f I_f$$

Sachant que la tension de induit :

$$U_a = E + R_a I_a$$

$$U_a I_a = E I_a + R_a I_a^2 = P_{em} + p_{ja}$$

Avec

- P_{em} est la Puissance électromagnétique transmise au rotor
- p_{ja} : Pertes joules induit
- Les pertes joules inducteur sont données par :

$$p_{jf} = R_f I_f^2 = U_f I_f$$

le couple électromagnétique

$$C_e = C_u + C_p \iff C_e \Omega = C_u \Omega + C_p \Omega \iff P_{em} = P_u + p_c$$

Avec

$$p_c = p_{mec} + p_f$$

Avec

- C_p, p_c : couple de pertes et Pertes constantes (ou collectives)
- p_f, p_{mec} : Pertes fer et Pertes mécaniques (friction, ventilation, vibrations . . .)
- P_u : puissance mécanique utile

Enfin la puissance absorbée peut s'écrire :

$$P_{ab} = P_{em} + p_{ja} + p_{jf} = P_u + p_c + p_{ja} + p_{jf} = C_u \Omega + C_p \Omega + R_a I_a^2 + R_f I_f^2$$

diagramme

rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{C_u \Omega}{U_a I_a + U_f I_f}$$

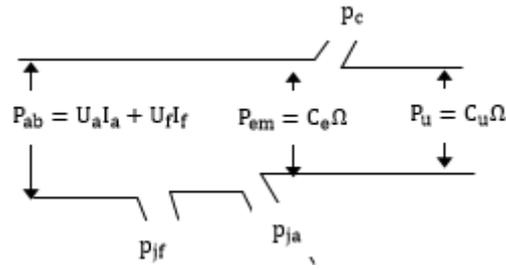


FIGURE 1.6

1.4 Moteur shunt

1.4.1 Schéma Équivalent

Le bobinage inducteur est placé en parallèle avec l'induit comme indiqué dans le schéma équivalent de la figure ci-dessous

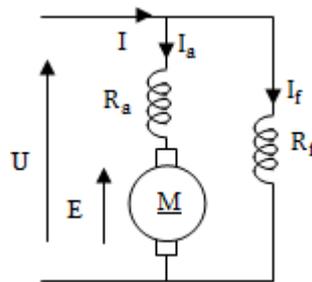


FIGURE 1.7

1.4.2 Équations

les équations sont les même que celles du moteur à excitation indépendante avec

$$U_a = U_f = U$$

— La relation de maille donne :

$$\begin{cases} \text{Induit :} & U = R_a I_a + E \\ \text{Inducteur :} & U = R_f I_f \end{cases}$$

— le flux :

$$\Phi = M_{af} I_f$$

— Force électromotrice FEM :

$$E = k \Omega \Phi = k' \Omega I_f$$

— Le couple électromagnétique :

$$C_e = k I_a \Phi = k' I_a I_f$$

1.4.3 Bilan des puissances

— Puissance absorbée :

$$P_{ab} = UI$$

— Pertes joules induit :

$$p_{ja} = R_a I_a^2$$

— Pertes joules inducteur :

$$p_{jf} = R_f I_f^2 = U I_f$$

— Puissance électromagnétique transmise :

$$P_{em} = E I_a = C_e \Omega$$

— Puissance utile :

$$P_u = C_u \Omega$$

— Pertes constantes (Pertes fer + Pertes mécaniques (friction, ventilation, vibrations . . .)) :

$$p_c = C_p \Omega = P_{em} - P_u$$

1.5 Moteur série

1.5.1 Schéma Équivalent

Le bobinage inducteur est placé en série avec l'induit comme indiqué dans le schéma équivalent de la figure ci-dessous

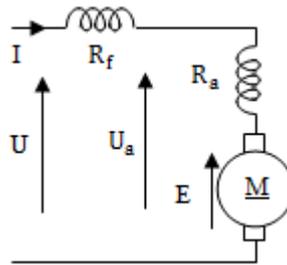


FIGURE 1.8

1.5.2 Équations

l'induit et l'inducteur sont parcourus par le même courant

$$I_a = I_f = I$$

— La relation de maille donne :

$$U = (R_a + R_f)I + E$$

— le flux étant :

$$\Phi = M_{af}I$$

— Force électromotrice FEM : :

$$E = k\Omega\Phi = k'\Omega I$$

— Le couple électromagnétique :

$$C_e = kI\Phi = kI^2$$

Remarque

- Sous tension Nominale le Moteur série ne doit jamais fonctionner à vide
- Sachant que le couple est proportionnel au carré du courant le Moteur série a un excellent couple de démarrage
- on utilise ce moteur comme démarreur d'automobile ou moteur de traction (locomotive métro..), ou encore dans les appareil de levage.
- Le moteur fonctionne aussi en alternatif, c'est un moteur universel

1.6 Moteur à aimant permanent

Le bobinage inducteur est remplacé par un aimant permanent comme indiqué dans le schéma équivalent de la figure ci-dessous

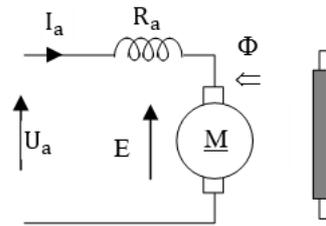


FIGURE 1.9

1.6.1 Équations

— La relation de maille (Induit) donne :

$$U = RI + E$$

— le flux est constant :

$$\Phi = \text{cte}$$

— Force électromotrice FEM : :

$$E = k\Omega\Phi = k'\Omega$$

— couple électromagnétique :

$$C_e = kI_a\Phi = k'I_a$$

1.7 Génératrice à excitation indépendante

La génératrice étant entraînée par une turbine à une vitesse Ω , le bobinage induit, en mouvement placé dans un champs magnétique inducteur $\vec{B}(I_f)$, est le siège d'une force électromotrice fem induite entre ces bornes donnée par la loi de Faraday :

$$E = k\Omega\Phi \quad \text{avec} \quad \Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

1.7.1 Schéma Équivalent

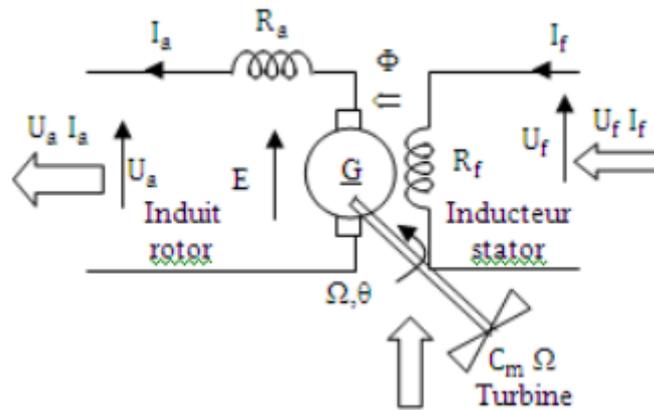


FIGURE 1.10 – Fonctionnement Générateur

Équations

$$U_a = E - R_a I_a$$

$$E = k\Omega\Phi = k'\Omega I_f$$

$$C_e = kI_a\Phi = k'I_a I_f$$

$$I_f = R_f I_f$$

régulation de tension

La régulation de tension est une mesure de la chute de tension aux bornes à pleine charge. Si U_{av} est la tension aux bornes à vide et U_{an} est la tension aux bornes à pleine charge, la régulation de tension est définie comme suit :

$$V_R\% = 100 \frac{U_{av} - U_{an}}{U_{an}}$$

Où $VR\%$ est le pourcentage de régulation de tension. Pour un générateur idéal (à tension constante), la régulation de tension doit être nulle. La régulation de tension est considérée comme positive lorsque la tension aux bornes à vide est supérieure à celle à pleine charge. Une régulation de tension négative indique que la tension aux bornes à pleine charge est supérieure à celle à vide.

1.7.2 Écoulement des puissances et rendement

La Puissance absorbée s'écrit :

$$P_{ab} = C_m \Omega + U_f I_f$$

Sachant que C_m est le couple d'entraînement

$$C_m = C_e + C_p \implies C_m \Omega = C_e \Omega + C_p \Omega \implies P_m = P_{em} + p_c$$

avec

$$p_c = p_{mec} + p_f$$

- C_p, p_c : Couple de pertes et Pertes constantes (ou collectives)
- $p_f; p_{mec}$: Pertes fer et Pertes mécaniques (friction, ventilation, vibrations . . .)
- P_m : Puissance mécanique d'entraînement
- P_{em} : Puissance électromagnétique transmise au stator

la fem s'écrit :

$$E = U_a + R_a I_a \implies E I_a = U_a I_a + R_a I_a^2$$

D'où

$$P_{em} = P_u + p_{ja}$$

Avec

- P_u : Puissance électrique utile
- p_{ja} : Pertes joules induit
- Les pertes joules inducteur sont données par :

$$p_{jf} = R_f I_f^2 = U_f I_f$$

Et la puissance absorbée peut s'écrire :

$$P_{ab} = P_{em} + p_c + U_f I_f = P_u + p_{ja} + p_c + p_{jf} = U_a I_a + R_a I_a^2 + c_p \Omega + R_f I_f^2$$

Le diagramme du bilan des puissances est illustré par la figure ci-dessous Le rendement est donné par :

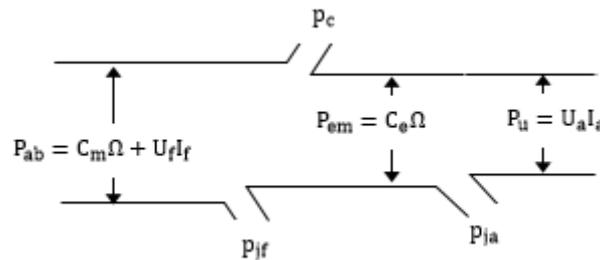


FIGURE 1.11

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{U_a I_a}{C_m \Omega + U_f I_f}$$

1.7.3 Caractéristique à vide

la génératrice à vide est entraînée à une vitesse Ω constante, on varie le courant d'excitation et on mesure la fem aux borne de l'induit. Cependant la fem fournie dépend du flux dans l'entrefer résultant des flux induit et inducteur, ainsi deux cas peuvent se présenter :

1. les flux sont additifs la fem aux de l'induit est supérieure à la fem rémanente et augmente avec l'augmentation du courant d'excitation, la génératrice peut fournir

2. les flux sont soustractifs la fem est inférieure à la fem rémanente et la génératrice ne peut pas fournir. Dans ce cas il suffit de inverser la polarité de l'alimentation inducteur

la fem rémanente est dû au champ rémanent stocké dans le bobinage inducteur, elle est égale à la tension à vide aux bornes de l'induit pour un courant d'excitation nul

$$I_f = 0 \implies U_{av} = E_v = E_r \ll U_n$$

U_n est la tension nominale

$$\begin{cases} \text{à vide : } I_a = 0 \text{ et } E_v = U_{av} \\ n = n_n = \text{cte : vitesse nominale} \end{cases} \quad \text{d'ou la caractéristique } E_v(I_f)$$

$$E = k\Omega\Phi = k'I_f$$

c'est une droite passant par l'origine si on néglige la fem rémanente E_r , ceci est illustrée dans la figure ci-dessous

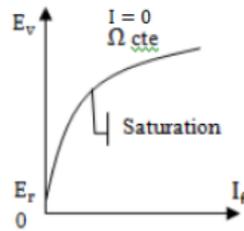


FIGURE 1.12

1.7.4 Point de fonctionnement à vide

Tout d'abord on précise que la caractéristique $E_v = f(I_f)$ ne dépend ni du mode d'excitation, ni du mode de fonctionnement, car elle représente la courbe d'aimantation du circuit magnétique. Il est toujours recommandé de la relever en génératrice à excitation séparée.

Si L'induit et l'inducteur sont en parallèle, la tension A vide aux bornes de l'induit est :

$$U_v = E_v = R_f I_f$$

D'après ces deux égalités, on voit que le point de fonctionnement à vide P_o est l'intersection entre la droite des inducteurs et la courbe. On peut déplacer le point de fonctionnement à vide par action sur I_f

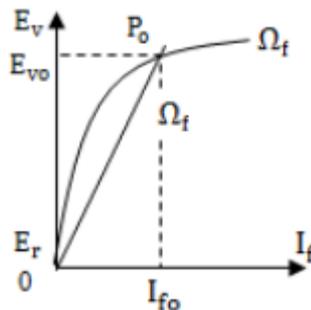


FIGURE 1.13

en insérant une résistance additionnelle R_h variable dans le circuit inducteur ou par action sur Ω à l'aide du système d'entraînement

— action sur R_f : à la limite $R_h = R_c$ (valeur critique) le point de fonctionnement n'est plus défini et la machine se désamorce

$$R_c + R_f = \frac{E_v}{I_f} \implies R_c = \frac{E_v}{I_f} - R_f \quad (\text{zonelinéaire})$$

— action sur Ω :

$$\Omega_c = \frac{R_h + R_f}{R_c} \Omega_n$$

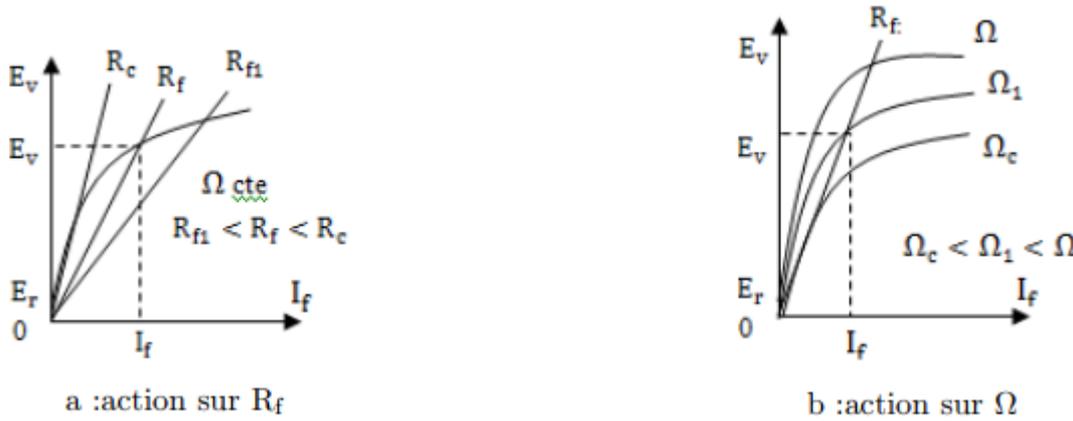


FIGURE 1.14

1.7.5 Caractéristique en charge $U_a(I_a)$ à Ω et I_f constants

— Si on ne tient pas compte de la Réaction magnétique d'induit la tension s'écrit :

$$U_a = E_{ch} - R_a I_a = E_v - R_a I_a$$

— Si on tient compte de la Réaction magnétique d'induit Ceci conduit à une distorsion du flux inducteur sous l'effet du courant induit par conséquent le flux et la fem en charge sont inférieurs à ceux à vide et si la réaction d'induit est compensée son effet est négligeable.

Pour un régime de fonctionnement en charge, la chute de tension dû à la de la Réaction magnétique d'induit s'écrit :

$$\epsilon(I_a) = E_v - E_{ch}$$

et la tension de l'induit s'écrit :

$$U_a = E_{ch} - R_a I_a = E_v - \epsilon(I_a) - R_a I_a = E_v - h(I_a)$$

$$h(I_a) = E_v - U_a = \frac{E_v}{2} - \left(U_a - \frac{E_v}{2} \right)$$

$h(I_a)$: est donc symétrique à $U_a(I_a)$ par rapport à l'axe $\frac{E_v}{2}$ sachant que :

$$h(I_a) = \epsilon(I_a) + R_a I_a \implies \epsilon(I_a) = h(I_a) - R_a I_a$$

On trace alors la réaction magnétique d'induit $\epsilon(I_a)$ à partir de $h(I_a)$ en retranchant $R_a I_a$ pour différents valeurs de I_a .

Remarque : Lorsque I_a augmente $U_a(I_a)$, diminue $h(I_a)$, $\epsilon(I_a)$ augmentent. Ainsi pour maintenir constante, on augmente I_f afin de compenser la chute de tension $h(I_a)$

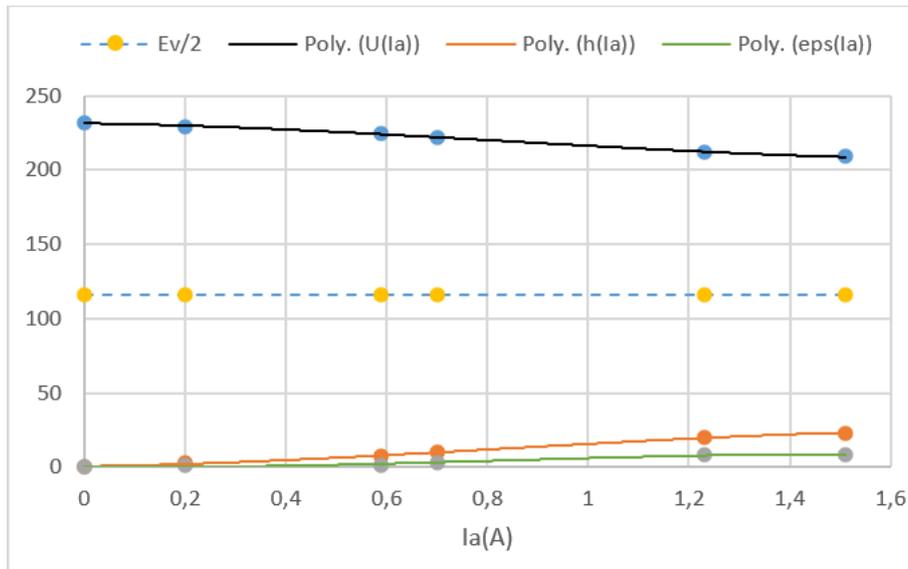


FIGURE 1.15 – Caracteristiques : $U_a(I_a)$, $h(I_a)$, $\epsilon(I_a)$

1.7.6 Caractéristique de réglage $I_a(I_f)$ à Ω et U_a constantes

Sachant que :

$$I_a = \frac{E - U_a}{R_a} = \frac{k'I_f - U_a}{R_a}$$

c'est une droite : si I_f augmente I_a augmente

Remarque :

1. On peut obtenir cette caractéristique directement par expérience, les différentes valeurs de l'excitation correspondant aux différents courants induits sous tension et vitesse constantes.
2. On peut tracer cette caractéristique graphiquement à partir des caractéristiques à vide et en charge précédentes :

à vide

$$I_a = 0 \implies I_{fv} = \frac{E_v}{k'} = \frac{U_{av}}{k'}$$

I_{fv} est l'excitation produisant à vide la fem E_v Soit $I_a = I_{a1}$ d'après la caractéristique en charge $U_a(I_a)$ on a :

$$U_{a1}(I_{a1}) \text{ et donc } h_1(I_{a1}) \text{ or } h_1 = E_{v1} - U_{a1} \implies E_{v1} = U_{a1} + h_1$$

ainsi, d'après la caractéristique $E_v(I_f)$ on obtient la variation du courant d'excitation I_{f1}

On suit la même procédure pour tous les points afin de compléter le tableau de valeurs de la caractéristique de réglage $I_a(I_f)$

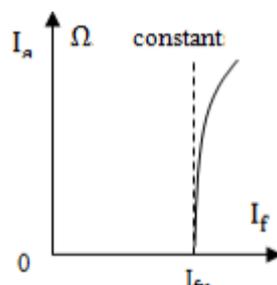


FIGURE 1.16

1.8 Génératrice à excitation shunt

L'inducteur est monté en parallèle avec l'induit

1.8.1 Schéma Équivalent

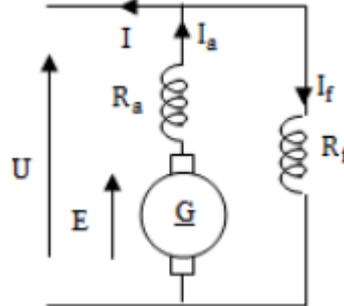


FIGURE 1.17

1.8.2 Équations

$$\begin{cases} U = E - R_a I_a = R_f I_f \\ I_a = I + I_f \\ E = k\Omega\Phi = k'\Omega I_f \\ C_e = kI_a\Phi = k'I_a I_f \end{cases}$$

1.8.3 Écoulement des puissances et rendement

La Puissance absorbée s'écrit :

$$P_{ab} = P_m = C_m \Omega$$

$$C_m = C_e + C_p$$

et

$$P_{ab} = P_{em} + p_c$$

D'autre part la fem s'écrit :

$$E = U + R_a I_a \quad \text{et} \quad U = R_f I_f$$

$$\implies EI_a = UI_a + R_a I_a^2 = UI + UI_f + R_a I_a^2$$

D'où

$$P_{em} = P_u + p_{jf} + p_{ja}$$

Et la puissance absorbée peut s'écrire :

$$P_{ab} = P_{em} + p_c = P_u + p_{jf} + p_{ja} + p_c = UI + R_f I_f^2 + R_a I_a^2 + c_p \Omega$$

Le rendement est donné par :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{UI}{C_m \Omega} = \frac{UI}{UI + p_{jf} + p_{ja} + p_c}$$

Nota : les caractéristiques sont identiques à ceux de la Génératrice à excitation indépendante

1.8.4 rendement maximal

ˆ Dans le cas d'une Génératrice à aimant permanent le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} = \frac{P_u}{P_u + \sum \text{pertes}} = \frac{U_a I_a}{U_a I_a + R_a I_a^2 + p_c}$$

$$\frac{d\eta}{dI_a} = 0 \Rightarrow \eta = \eta_{\max}$$

$$\frac{U_a I_a + R_a I_a^2 + p_c - I_a(U_a + 2R_a I_a)}{(U_a I_a + R_a I_a^2 + p_c)^2} = 0 \Rightarrow p_c - R_a I_a^2 = 0 \Rightarrow I_{a\max} = \sqrt{\frac{p_c}{R_a}}$$

$$\Rightarrow \eta_{\max} = \eta(I_a = I_{a\max}) = \frac{U_a}{U_a + R_a \sqrt{\frac{p_c}{R_a}} + \frac{p_c}{\sqrt{\frac{p_c}{R_a}}}} = \frac{U_a}{U_a + \sqrt{p_c R_a} + \sqrt{p_c R_a}} = \frac{U_a}{U_a + 2\sqrt{p_c R_a}}$$

Les conditions pour un rendement maximal d'autre génératrice

— Excitation indépendante :

$$R_a I_a^2 = P_c + R_f I_f^2$$

— Excitation shunt :

$$R_a I_a^2 = P_c + (R_a + R_f) I_f^2$$

— Excitation série :

$$(R_a + R_f) I_a^2 = P_c$$

Université Aboubakr Belkaid Tlemcen
Faculté De Technologie
Département GEE

3*

Master 1 AII
2022-2023

TD ETT MCC
AI721

Exercice N°1

Un moteur à excitation séparée dont la tension d'alimentation est de 100V, le moteur étant à vide il tourne à une vitesse 1200tr.min⁻¹. la résistance de l'induit $R_a = 2\Omega$. Calculer le couple et le courant si la tension d'alimentation est de 220V et la vitesse est 1500tr.min⁻¹.

Nota : On suppose le courant d'excitation constant.

Exercice N°2

Un moteur série 220V, la résistance totale (induit+inducteur) $R_{\text{tot}} = 0.1\Omega$ Le courant absorbé est de 100A avec une vitesse de rotation 800tr.min⁻¹. Calculer la vitesse pour développer la moitié du couple nominal

Exercice N°3

Un moteur shunt (à flux constant) 220V, 11KW(absorbée), la résistance d'induit $R_a = 0.5\Omega$, celle de l'inducteur $R_f = 110\Omega$. Le courant et la vitesse à vide de la machine sont respectivement 5A et 1150tr.min⁻¹. Calculer couple, le rendement et la vitesse en charge

Exercice N°4

Une génératrice shunt de puissance 100Kw(fournie) et une tension 230V, la résistance de l'induit est $R_a = 0.05\Omega$, celle de l'inducteur est $R_f = 57.5\Omega$. Sachant que la machine fonctionne à tension nominale, calculer la fem dans le cas :

1. A plein charge
2. A moitié charge

Exercice N°5

Une machine à excitation indépendante 25kW, 125V fonctionne à vitesse constante $3000\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ et un courant d'excitation constant. Sachant que la tension induit à vide est de 125V, la résistance d'induit est $R_a = 0.02\Omega$, calculer le courant induit, la puissance d'induit et la puissance et couple électromagnétique si la tension induit est de

1. 128V
2. 124V. NB : on néglige la réaction magnétique d'induit