

3.3. Machine à courant continu		CdE
Structure d'un moteur à courant continu à pôles lisses.	Décrire la structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée : rotor, stator, induit, inducteur.	
Collecteur.	Expliquer, par analogie avec le moteur synchrone, que le collecteur établit le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.	
Couple et f_{cem} .	Citer l'expression du moment du couple $\Gamma = \Phi i$, établir l'expression de la f_{cem} induite $e = \Phi \Omega$ par un argument de conservation énergétique. Décrire qualitativement les pertes existant dans une machine réelle : pertes cuivre, pertes fer, pertes mécaniques. Établir les équations électrique et mécanique. Tracer la caractéristique (Ω, Γ) à tension d'induit constante. Analyser le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment $-f \cdot \Omega$. Mettre en œuvre un moteur à courant continu.	
Fonctionnement réversible.	Décrire les conditions d'utilisation de la machine à courant continu en génératrice. Choisir des conventions d'orientation adaptées.	CdE2 : 21.10 ; 21.12
Applications.	Citer des exemples d'application de la machine à courant continu.	

MACHINES A COURANT CONTINU

1er convertisseur électro magnéto mécanique réversible.

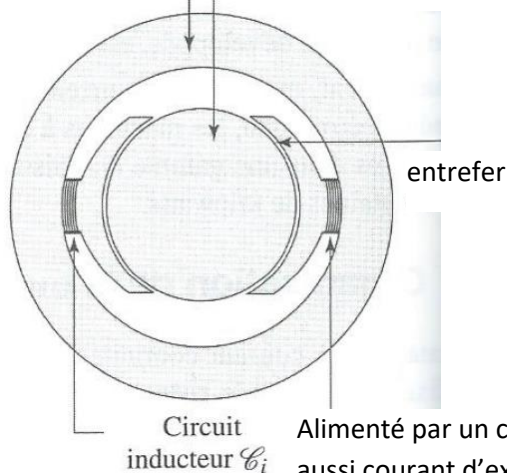
Commande en vitesse simple, mais l'existence d'un contact mécanique entre rotor et stator entraîne une usure et une limitation en puissance et en vitesse.

A faible puissance : jouets, ventilateurs

A forte puissance : machines outils, TGV Sud Est

1. Structure du moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée

Inducteur = Stator Rotor = Induit

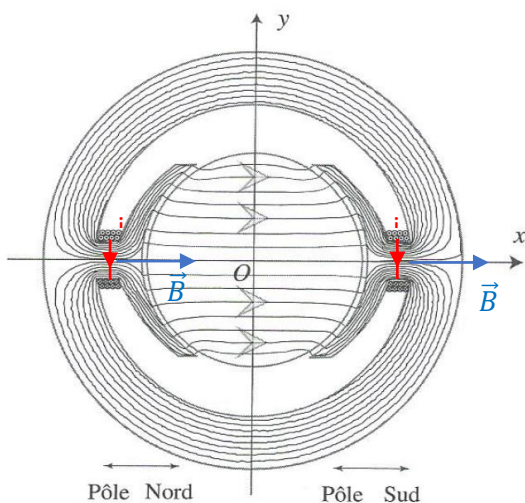


Le rotor et le stator sont modélisés par un matériau ferromagnétique doux de perméabilité relative infinie.

Alimenté par un courant continu appelé aussi courant d'excitation ou courant inducteur, c'est l'excitation séparée. Le stator peut aussi être réalisé par des aimants permanents

Le circuit inducteur a deux pôles, un pôle Nord et un pôle Sud : machine bipolaire

a. Le stator



En moyenne le champ magnétique statorique est colinéaire à Ox dans l'entrefer :

M est un point de l'entrefer, M' également.

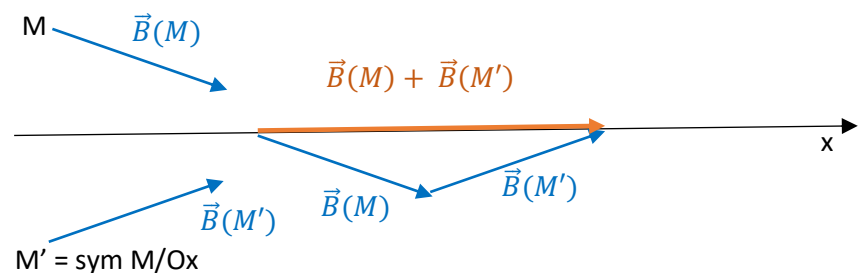
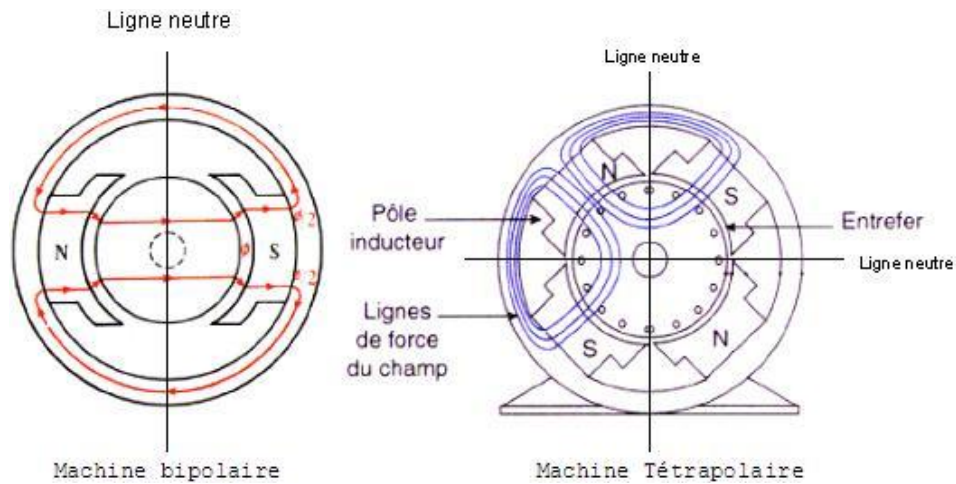


Figure 25.2 – Carte du champ généré par le circuit inducteur.

Par le même raisonnement que pour la machine synchrone, on montre que la valeur du champ magnétique $\vec{B}_S$ créé par le circuit inducteur est égale à $\mu_0 Ni / 2e$ où N est le nombre de spires total, i le courant continu dans l'inducteur et e l'épaisseur de l'entrefer.

Le champ magnétique total créé par le stator dans l'entrefer s'écrit donc : $\vec{B}_S = \frac{\mu_0 Ni}{2e} \vec{u}_x$

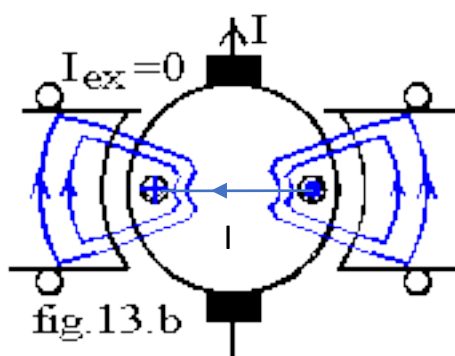


b. Le rotor

Dans les encoches des conducteurs de cuivre sont parcourus par des courants

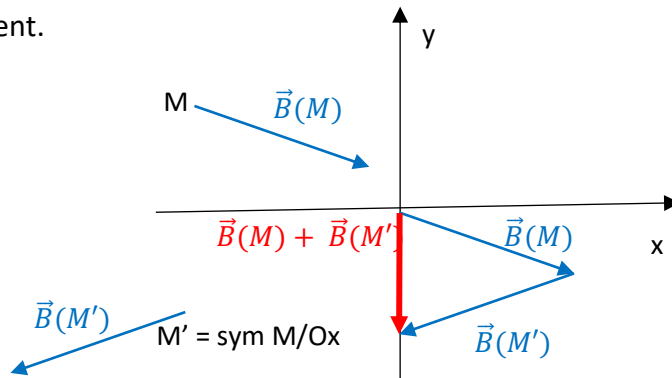


Comme pour la machine synchrone, on peut modéliser le circuit électrique du rotor par une seule spire parcourue par le courant constant I qui crée un champ magnétique dont les lignes sont représentées en bleu ci-dessous, où le courant dans le bobinage du stator est nul.



Lignes de champ créées par le bobinage du rotor parcouru par un courant constant.

En moyenne ce champ est colinéaire à Oy dans l'entrefer. M est un point de l'entrefer, M' également.

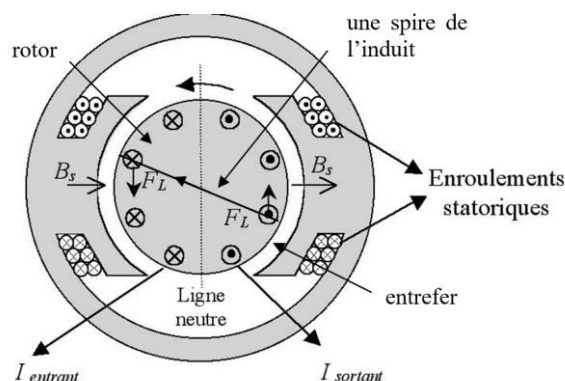


c. Le collecteur : pourquoi les champs statorique et rotorique sont-ils perpendiculaires ?

On a montré que pour la machine synchrone le couple électromagnétique est proportionnel à l'angle entre les champs magnétiques, donc si les champs sont toujours perpendiculaires, cet angle est toujours égal à $\pi/2$ et le couple est toujours maximal.

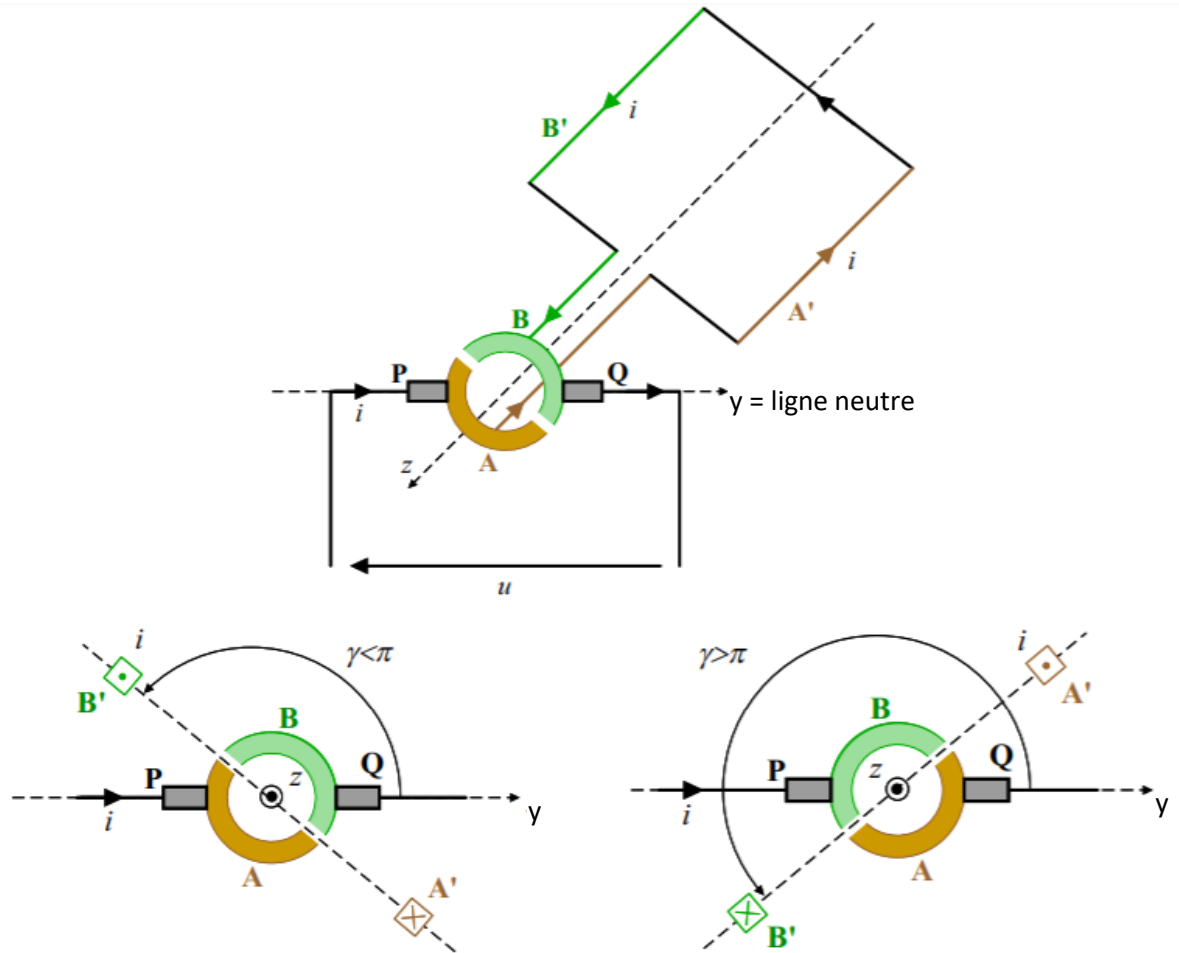
On peut produire un couple en superposant au champ statorique $\vec{B}_S$ un champ rotorique $\vec{B}_R$ synchrone. $\vec{B}_S$ étant stationnaire, il faut donc que le rotor génère un champ $\vec{B}_R$ également stationnaire, quelle que soit la position angulaire θ du rotor ! La solution est la suivante : le rotor est muni d'encoches dans lesquelles des conducteurs de cuivre sont alimentés par un circuit extérieur délivrant l'intensité constante i . Le collecteur décrit ci-dessous est un dispositif qui inverse le sens du courant à travers un conducteur lorsqu'il traverse la ligne neutre (Oy). Ainsi, lorsque la partie des spires conductrices est à droite de la ligne neutre, le courant va toujours vers l'avant de la figure ci-dessous et lorsqu'elle est à gauche le courant va toujours vers l'arrière de la figure.

Cette distribution génère dans l'entrefer un champ rotorique de direction moyenne colinéaire à Oy quelle que soit la position angulaire θ du rotor.



Pour simplifier, nous allons décrire le principe de fonctionnement du collecteur dans le cas d'un rotor muni d'un unique enroulement placé dans deux encoches diamétralement

opposées. Le collecteur est un commutateur rotatif constitué de deux lames A et B connectées à l'enroulement, et de deux balais P et Q connectés au circuit électrique extérieur. En repérant le conducteur B' avec l'angle γ , les schémas ci-dessous illustrent clairement l'inversion du sens du courant lorsque la spire franchit le plan neutre.



L'animation à l'adresse ci-dessous permet d'observer le changement du sens du courant dans la spire au passage de la ligne neutre :

http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/electricmotor_fr.htm

Pour une machine réelle, les conducteurs sont répartis tout autour du rotor et la commutation ne doit concerner que les conducteurs franchissant le plan neutre.

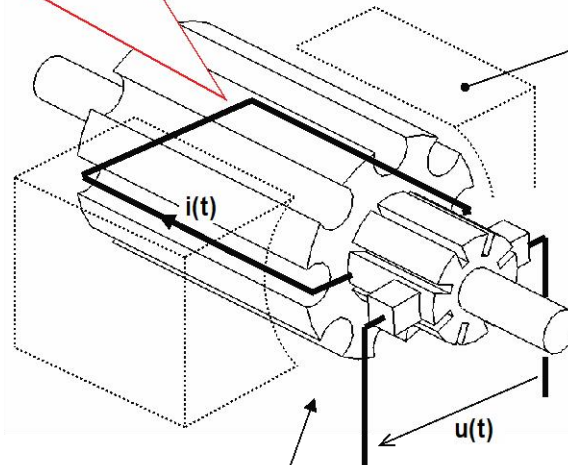
Il est à noter que le collecteur est le point faible de la MCC par rapport aux autres machines électriques. En effet, le contact glissant entre les balais et les lames provoque une usure régulière des balais réalisés généralement en graphite, cela nécessite un entretien régulier.

fichier MCC.mp4

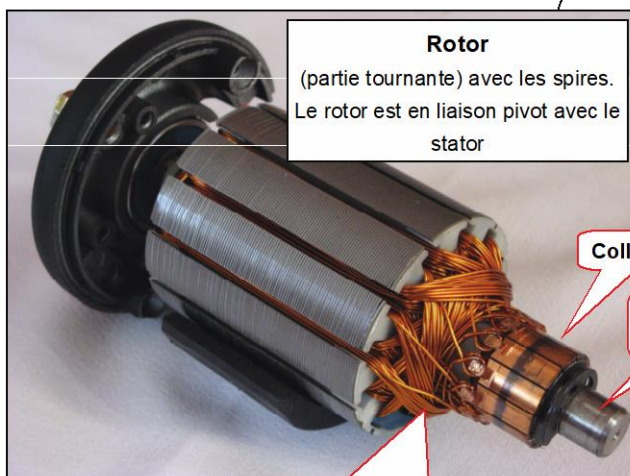
Réalisation

Les boucles sont appelées « spires »

Pour ce schéma, une seule spire est représentée. Dans la réalité, on multiplie le nombre de spires afin d'obtenir un mouvement régulier (voir photo ci-dessous)



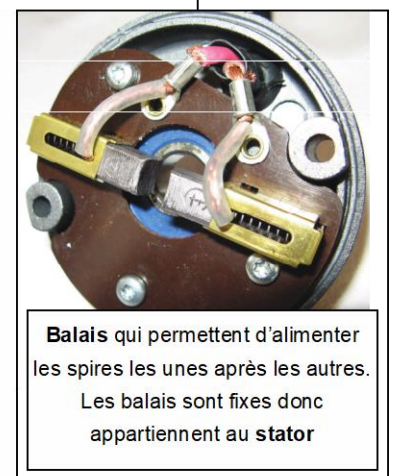
Aimants (inducteurs)
qui sont fixes donc
appartiennent au **stator**



Rotor
(partie tournante) avec les spires.
Le rotor est en liaison pivot avec le stator

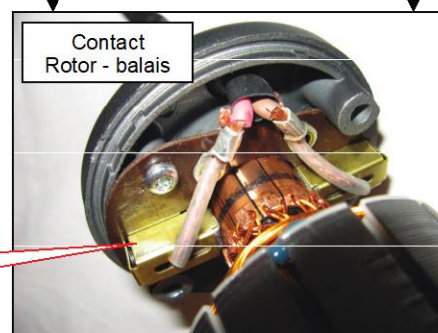
Collecteur

Arbre moteur



Balais qui permettent d'alimenter
les spires les unes après les autres.
Les balais sont fixes donc
appartiennent au **stator**

Ce moteur comporte 6 spires décalées de 30°.
Pour augmenter le couple du moteur, les spires
sont réalisées par des enroulements de fil. Les
fils sont recouverts de vernis qui empêche la
circulation du courant d'une spire à l'autre



**Contact
Rotor - balais**

Les balais frottent sur le rotor.

2. Les équations du moteur

a. Le stator (inducteur)

Contrairement à la machine synchrone, c'est le stator qui est l'inducteur parcouru par un courant constant I_{exc} , c'est lui qui est équivalent à une résistance électrique. Il peut aussi être réalisé à l'aide d'aimants permanents.

b. Le rotor (induit)

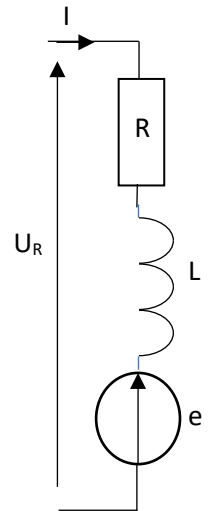
Le rotor est l'induit, il est modélisé par l'association en série d'une résistance R, d'une bobine L qui représente les phénomènes d'autoinduction et d'une fcém induite e créée par les variations du flux magnétique créé par le champ du stator dans rotor.

$$e = -e_{ind} = \frac{d}{dt} (\Phi(\vec{B}_S \rightarrow rotor))$$

Equation électrique = loi des tensions, ici pour le moteur

$$U_R = RI + L \frac{dI}{dt} + e = RI + L \frac{dI}{dt} + e$$

où U_R est la tension aux bornes du rotor, parcouru par l'intensité I et animé de la vitesse de rotation Ω_R .



c. Equations de la MCC

Expression de la fcém e (conservation de la puissance)

C est proportionnel à I_{exc} et à I

$C = \phi_0 i$

$$\text{Méca}(C) = \phi_0 \text{Elec}(i)$$

où la constante de couplage ϕ_0 est homogène à un flux magnétique et est proportionnelle au champ produit par l'inducteur, donc au courant d'excitation I_{exc} , matériau non saturé. ϕ_0 est appelé constante de la machine à courant continu, elle dépend des caractéristiques géométriques de la machine ainsi que du courant continu qui circule dans la stator.

Comme pour la machine synchrone, la puissance absorbée par la fcém $e.i$ est intégralement convertie en puissance mécanique $C.\Omega_R$ ce qui permet de déterminer l'expression de e, connaissant celle de C :

$$e.i = C. \Omega_R = \phi_0 i. \Omega_R \text{ d'où}$$

$e = \phi_0. \Omega_R$

$$\text{Elec}(e) = \phi_0 \text{Méca}(\Omega_R)$$

Equation mécanique = théorème scalaire du moment cinétique :

$$J \frac{d\Omega_R}{dt} = C - C_R = \phi_0 i - C_R$$

où C est le couple moteur et $C_R > 0$ un couple résistant qui représente la charge (frottements, charge, par exemple action d'une poulie connectée au rotor qui monte un seau ou d'une autre MCC connectée au rotor...)

d. Pertes de puissance :

Joule dans les fils de cuivre

Fer dans les matériaux magnétiques du rotor et du stator. Si le courant inducteur dans le stator est trop grand le matériau est saturé et Φ_0 n'est plus proportionnel au courant du stator

Par frottements dus aux contacts mécaniques notamment au niveau des balais.

La machine à courant continu a un fonctionnement réversible

En régime permanent, on ne représente pas L car la tension à ses bornes est nulle.

Schéma électrique en fonctionnement moteur en régime permanent :

Lorsque la machine fonctionne en moteur on représente plutôt la $f_{cem} = -f_{em}$, soit

$$E_{cem} = \Phi_0 \Omega_R$$

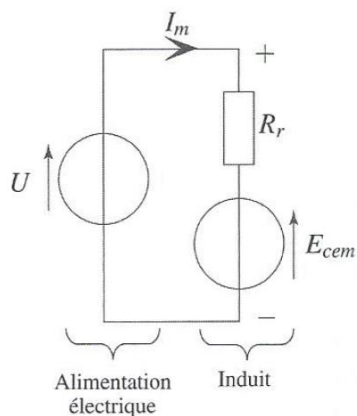


Figure 25.16 – Circuit électrique équivalent de l'induit.

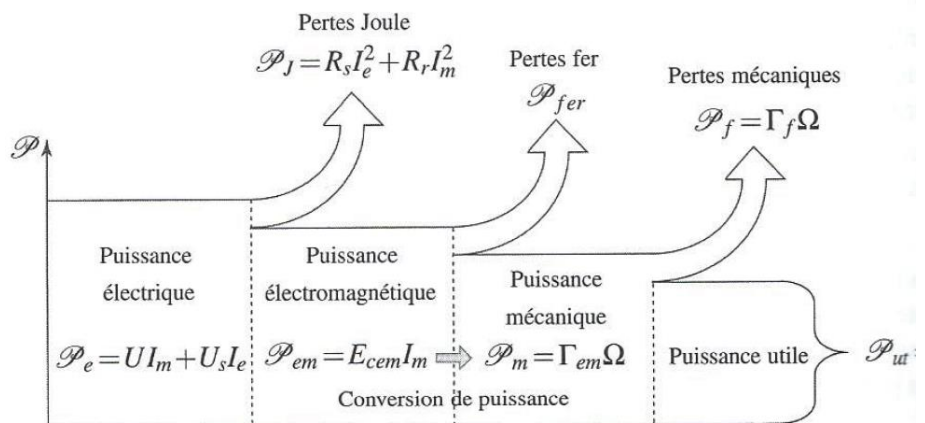


Figure 25.18 – Bilan de puissance du moteur.

$$E_{cem} = \Phi_0 \cdot \Omega_R$$

force contreélectromotrice du moteur

$$\text{Equation électrique : } U = R_r I_m + E_{cem}$$

$$\Gamma_{em} = \Phi_0 \cdot I_m$$

Couple électromagnétique

$$\text{Equation mécanique : } 0 = \Gamma_{em} + C_{charge}$$

$$(C_{charge} = -\Gamma_f - \Gamma_{ut})$$

Schéma électrique en fonctionnement générateur en régime permanent :

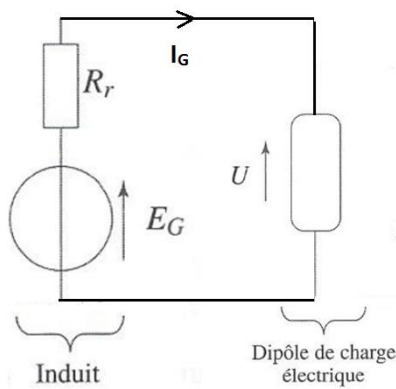


Figure 25.17 – Circuit électrique équivalent de l'induit.

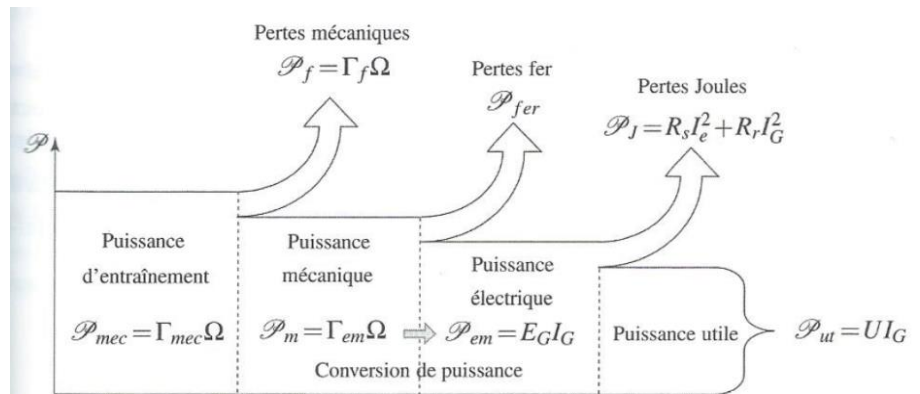


Figure 25.19 – Bilan de puissance de la génératrice.

$$\Gamma_{em} = \Phi_o \cdot I_G$$

Couple électromagnétique reçu par le rotor

$$E_G = \Phi_o \cdot \Omega$$

force électromotrice de la génératrice

$$\text{Equation mécanique : } 0 = \Gamma_{méca} + C_{charge}$$

$$(\Gamma_{mec} = \Gamma_{em} + \Gamma_f)$$

$$\text{Equation électrique : } U = - R_r I_G + E_G$$

3. Caractéristique ($C_{ém}$, Ω_R) à tension d'induit $U = \text{constante}$

A partir de l'équation électrique et des relations du moteur à courant continu en régime permanent, montrer que $C_{ém}$ le couple électromagnétique est une fonction affine décroissante de la vitesse de rotation Ω_R du rotor lorsque U est une constante.

Représenter graphiquement cette fonction.

Exprimer la valeur du couple maximal, pour quelle valeur de la vitesse de rotation ce couple est-il obtenu ? Que peut-on en conclure par rapport au démarrage du moteur ?

Lorsque le rotor est soumis au couple de charge – C_R ($C_R > 0$) constant, déterminer graphiquement le point de fonctionnement de la MCC.

Comment évolue la vitesse de rotation si C_R augmente ?

Quelle est la valeur de la vitesse de rotation lorsque $C_{ém}$ est nul ? Sachant que la constante du moteur est proportionnelle au courant dans le stator que devient la vitesse de rotation en cas de coupure du courant d'excitation ? Conclusion ?

4. Démarrage du MCC entrainant une charge soumise uniquement à un couple résistant fluide $C_R = f \Omega_R$

On s'intéresse à la réponse à un échelon de tension du MCC.

A $t = 0^-$ $U(t) = 0$, à $t = 0^+$ $U(t) = E$.

On veut déterminer l'équation différentielle dont $\Omega_R(t)$ est solution :

Ecrire dans ce cas les équations différentielles électriques et mécaniques du moteur.

On rappelle que $C_R(t) = f \Omega_R(t)$.

Eliminer $i(t)$ pour former l'équation différentielle recherchée.

Quel est l'ordre de cette équation différentielle ?

Tracer l'allure de $\Omega_R(t)$.

Dans la pratique, on remarque que L est souvent négligeable. Que devient alors l'équation différentielle ? $\Omega_R(t)$? Déterminer le temps de réponse de ce système.

On peut reprendre ce raisonnement à partir de la fonction de transfert du système qui s'écrit dans le domaine de Laplace : $H(p) = \frac{\Omega_R(p)}{U(p)}$.

Comparaison machine synchrone, machine à courant continu

	Machine synchrone	Machine à courant continu
Stator	Alimentation sinusoïdale à la pulsation ω_s $I_s(t) = I_s \cdot \cos(\omega_s \cdot t)$	Excitation : alimentation continue ou aimants permanents
Rotor	Excitation : alimentation continue ou aimants permanents	Alimentation continue $I_R = \text{const}$
Induit	Stator	Rotor
Inducteur ou excitateur	Rotor	Stator
Champ magnétique statorique $\vec{B}_S$	Tournant à la vitesse de rotation ω_s	Stationnaire
Champ magnétique rotorique $\vec{B}_R$	Tournant à la vitesse de rotation Ω_R du rotor	Stationnaire
Condition de synchronisme	$\omega_s = \Omega_R$	Les deux champs sont perpendiculaires pour optimiser le couple
Couple moyen	$C = C_{\text{MAX}} \cdot \sin \alpha$ Où α est la position angulaire de $\vec{B}_S$ par rapport à $\vec{B}_R$ $C_{\text{MAX}} = \Phi_o I_s$	$C = \Phi_o I_R$
Démarrage	Besoin d'aide	Pas besoin d'aide