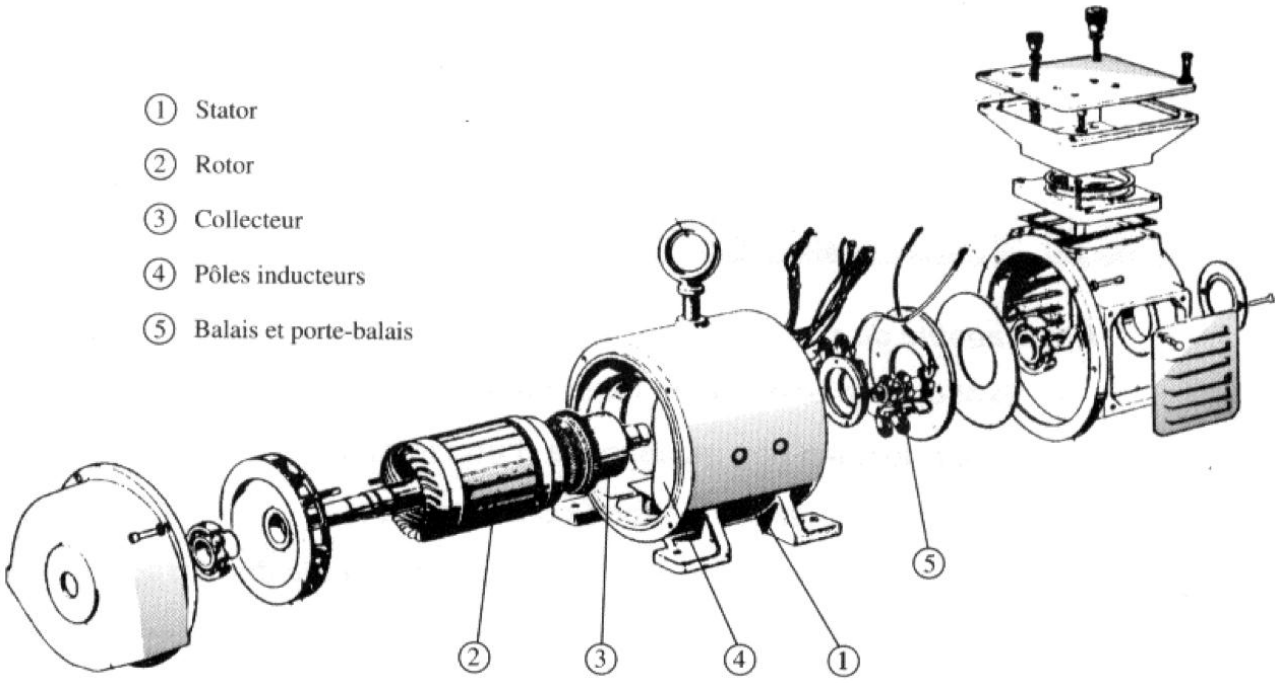
Université de Gabès
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès
Département Génie Electrique - Automatique

Elément de cours

Machines à Courant Continu

1ère Année Génie Electrique – Automatique GEA1

Enseignant : Dhaoui Mehdi



AU : 2020 – 2021

Table des Matières

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MACHINES A COURANT CONTINU

1.1. Introduction 03
1.2. Constitution 03
1.2.1. L'inducteur 03
1.2.2. L'induit 04
1.2.3. Les balais 05
1.3. Enroulements de l'induit 05
1.3.1. Définitions 05
1.3.2. Conditions vérifiées par l'induit d'une MCC 05
1.3.3. Classification 06
1.3.4. Voies d'enroulements de l'induit 07
1.4. Principe de fonctionnement de la MCC 08
1.4.1. Loi de Laplace : Fonctionnement Moteur 08
1.4.2. Loi de Faraday : Fonctionnement Générateur 09
1.5. Transformation du travail mécanique 09
1.5.1. Fonctionnement Moteur 09
1.5.2. Fonctionnement Générateur 10
1.6. Force Electromotrice 10
1.6.1. Création de la f.e.m induite 10
1.6.2. Rôle du collecteur 12
1.6.3. Amélioration de la qualité de la tension fournie 12
1.6.4. Expression de la f.e.m induite 13
1.6.5. Influence des paramètres de la f.e.m 14
1.7. Phénomènes dans la MCC 14
1.7.1. La réaction magnétique d'induit 14
1.7.2. Phénomène de commutation 15
1.8. Symbole de la MCC 16
1.9. Equations générales en régime statique 16
1.9.1. Schéma équivalent 16
1.9.2. Equation électrique 17
1.9.3. Equation mécanique 17
Problèmes chapitre 1 18
Corrigés problèmes 21

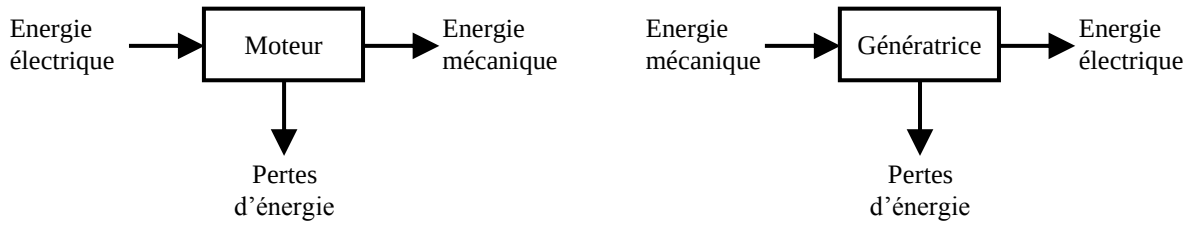
Chapitre 1

GENERALITES SUR LES MACHINES A COURANT CONTINU

1.1. Introduction

La machine à courant continu (MCC) ou aussi la machine à collecteur a été utilisée très tôt dans les applications industrielles en raison d'un principe de fonctionnement très simple et d'une commande aisée.

Il s'agit d'un convertisseur électromécanique d'énergie qui peut être conditionné pour fonctionner soit en **Moteu**r ou en **Génératrice** comme l'illustre les synoptiques suivants :



1.2. Constitution

Comme toute machine tournante, la MCC est constituée de deux parties principales : une partie fixe dite :**stator** et une partie tournante dite : **rotor**, Figure 1.1.

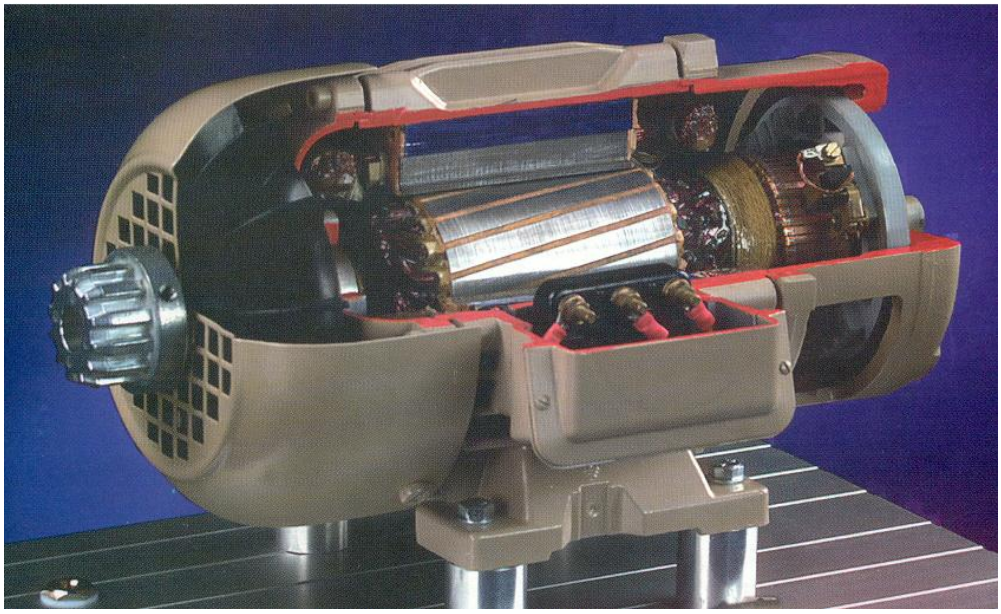


Figure 1.1. Vue en coupe normale d'une MCC

1.2.1. L'inducteur

L'inducteur (excitation) ou stator est la partie fixe de la MCC. Deux types d'excitation sont utilisées, soit :

a) à aimants permanents

Les pertes joules sont supprimées mais l'excitation magnétique est fixe. Dans les grosses machines, le coût des aimants pénalise cette solution.

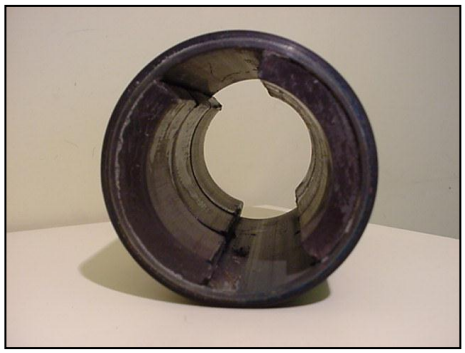


Figure 1.2. Machine avec inducteur à aimants permanents

b) A enroulements et pièces polaires

Sur le stator, sont bobinés un ou plusieurs enroulements formant ainsi le **bobinage de l'inducteur** parcouru par un courant dit **courant d'excitation**. Ce bobinage est destiné à produire un champ magnétique générant ainsi les **pôles inducteurs**. Le réglage de l'excitation rend possible le fonctionnement en survitesse.

Pour les grosses machines, le montage de *pôles auxiliaires* améliore la commutation du courant dans les conducteurs de l'induit.

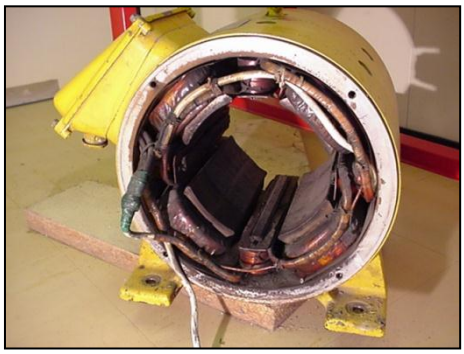


Figure 1.3. Machine avec inducteur bobiné

1.2.2. L'induit

L'induit ou rotor, est la partie tournante de la machine, logée dans la cavité cylindrique aménagée entre les pôles de l'inducteur. L'espace entre l'induit et l'inducteur est appelé ***entrefer***. Le champ inducteur vu par l'induit au cours d'un tour est variable. Le rotor est pourvu d'ouvertures dites encoches pour loger des bobines régulièrement espacées formant un enroulement continu entièrement fermé sur lui-même appelé **enroulement d'induit**. L'induit comporte les éléments suivants:

a) L'armature

Elle reçoit l'ensemble des conducteurs qui coupent le flux magnétique. Un certain nombre de conducteurs, regroupés en spires, forment une bobine. L'armature de l'induit renferme plusieurs bobines placées dans des encoches. L'armature est feuilletée afin de réduire les pertes fer de l'induit. Elle est donc constituée de tôles circulaires isolées et empilées sur l'arbre de façon à obtenir le cylindre d'induit. Ces tôles sont en acier au silicium et isolées par vernis.

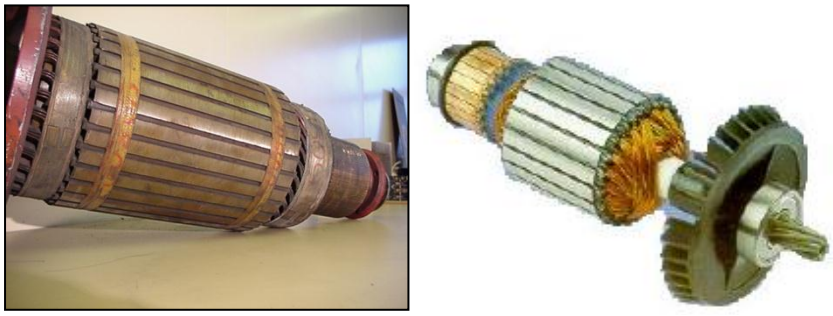


Figure 1.4. Rotors de MCC

b) Le Collecteur

Le collecteur est placé sur l'arbre de la machine à proximité de l'armature. Il est formé de lames conductrices isolées les une des autres et auxquelles sont raccordées les bobines de l'induit. Sur ces lames frottent les balais. Le collecteur a pour fonction d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit.

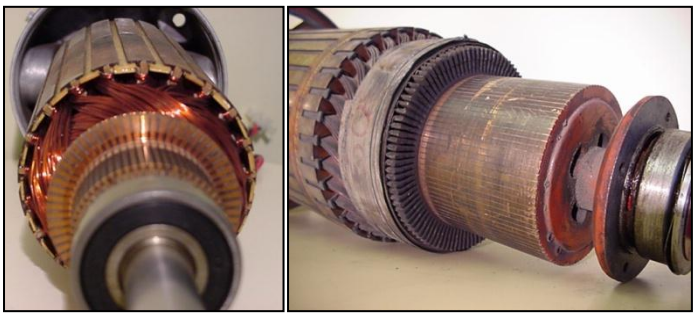


Figure 1.5. Le collecteur

1.2.3. Les balais

Les balais sont fixes et maintenus par des porte-balais dans lesquels des ressorts viennent maintenir une pression. Ils assurent la liaison électrique (contact glissant) entre la partie fixe et la partie tournante. Différentes technologies existent : les balais au charbon dur, les graphitiques, les électro-graphitiques, et les métallo-graphitiques. On peut considérer que dans un contact glissant les pertes sont de nature mécanique à 35% et de nature électrique à 65%.

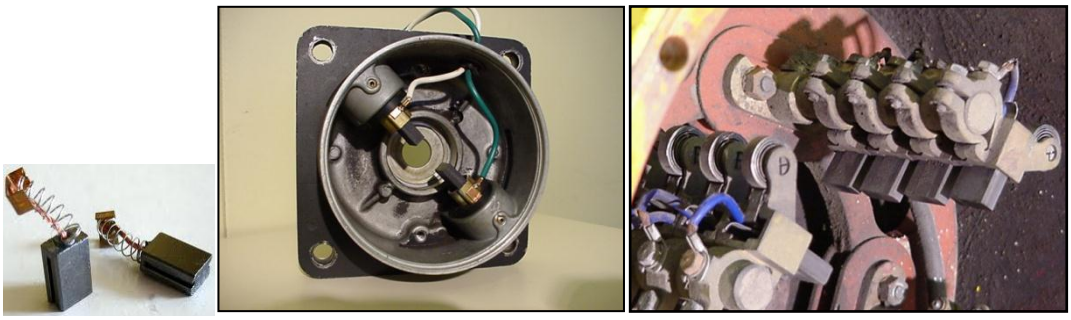


Figure 1.6. Les balais

1.3. Enroulements de l'induit

1.3.1. Définitions

- ✓ **Section :** c'est un groupe de spires en série. Chacune des extrémités d'une section est soudée à une lame du collecteur.
- ✓ **Faisceau :** chaque section comporte 2 faisceaux en général désigné par *faisceau-aller et faisceau-retour.*
- ✓ **Pas polaire :**c'est l'angle d'ouverture entre deux pôles consécutifs, noté ($\alpha_p = \pi / p$) *avec p est le nombre de* paire de pôles.
- ✓ **Dérivation :** ou voie d'enroulement : c'est l'ensemble des sections connectées en série que l'on parcourt entre deux balais consécutifs de polarités inverse ; le nombre de voie d'enroulement est un nombre entier paire qu'on note (*2a).*

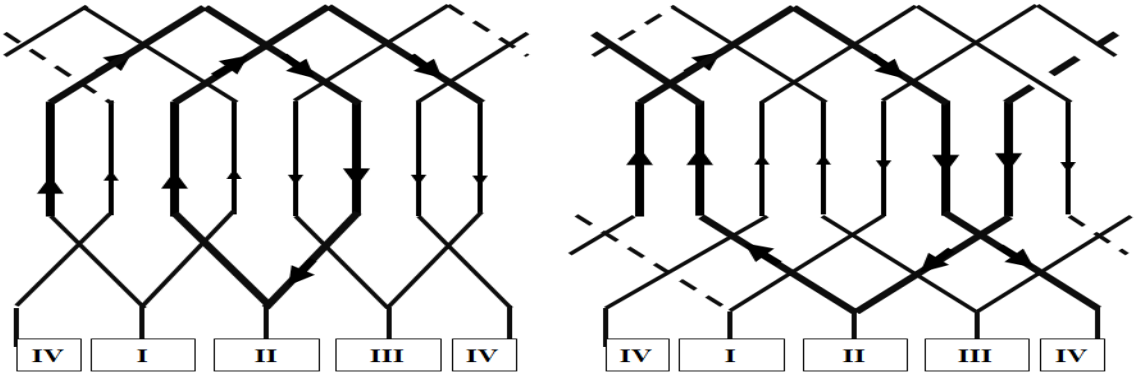
1.3.2. Conditions vérifiées par l'induit d'une MCC

- L'enroulement d'induit doit être fermé sur lui-même après avoir rencontré tous les faisceaux (condition de continuité)
- Les voies d'enroulement doivent êtres identiques.
- La largeur de chaque section (angle d'ouverture d'une section) doit être très voisine du pas polaire.

1.3.3. Classification

Il existe deux types d'enroulements : ***imbriqués*** et ***ondulés***.

- La figure 1.7.(a) montre le principe de construction d'un enroulement imbriqué où pour passer du faisceau-retour de la première section au faisceau-aller de la seconde on revient en arrière.
  Ce type de bobinage est utilisé lorsqu'il s'agit de *forte intensité, faible tension*.
- La figure 1.7.(b) montre le principe de construction d'un enroulement ondulé où le passage du faisceau-retour de la première section au faisceau-aller de la seconde se fait en parcourant l'enroulement dans le même sens. Le bobinage ondulé est employé dans le cas de *faible intensité, forte tension*.



(a). Bobinage imbriqué (b). Bobinage ondulé

Figure 1.7. Enroulement d'induit d'une MCC (vue développée)

Illustration : Les Figures 1.8 et 1.9 montrent deux MCC tétra-polaires (4 pôles) ayant 16 conducteurs actifs et 4 voies d'enroulement où la première renferme un enroulement imbriqué et la seconde un enroulement ondulé.

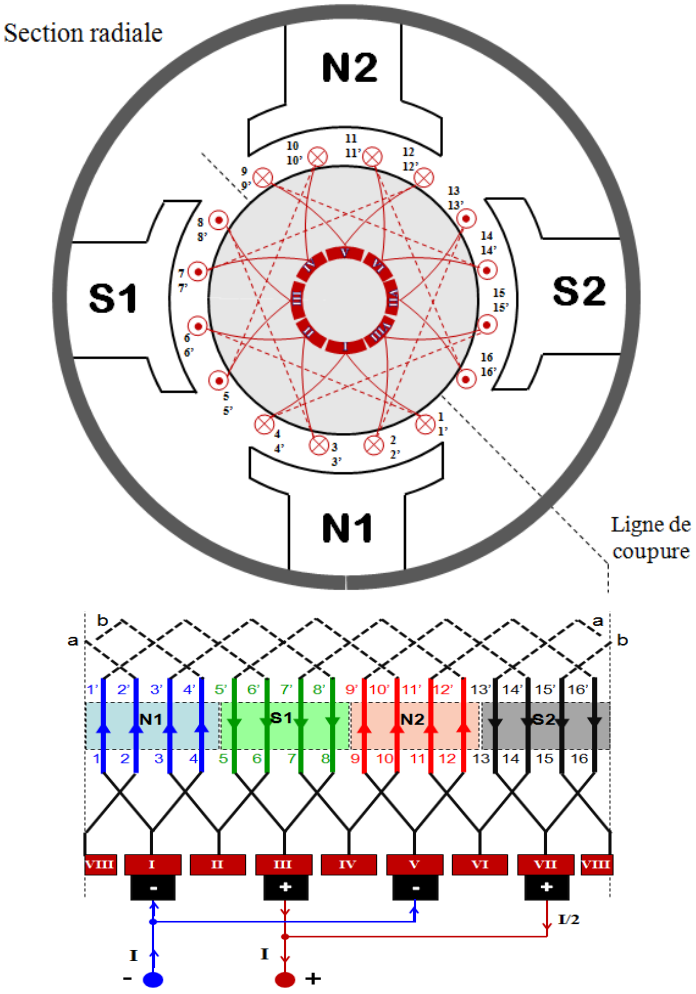


Figure 1.8. Enroulement imbriqué

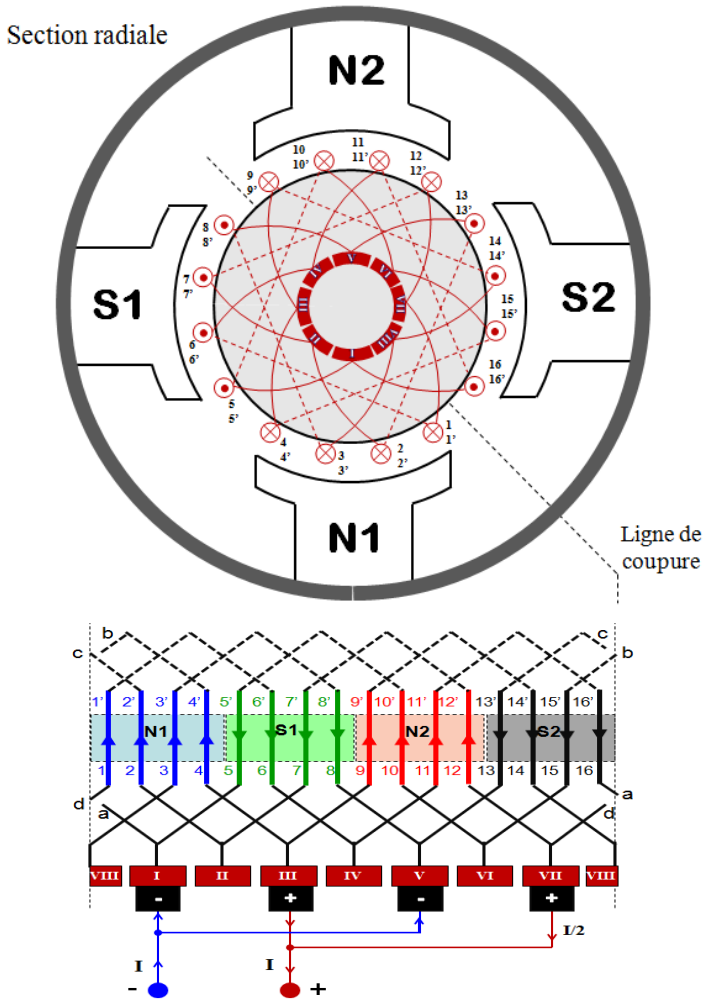


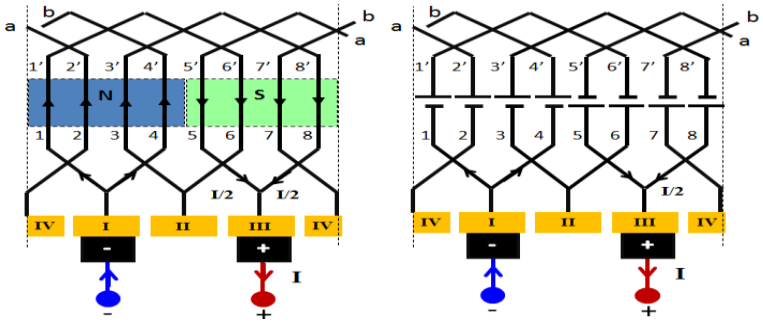
Figure 1.9. Enroulement ondulé

1.3.4. Voies d'enroulements de l'induit

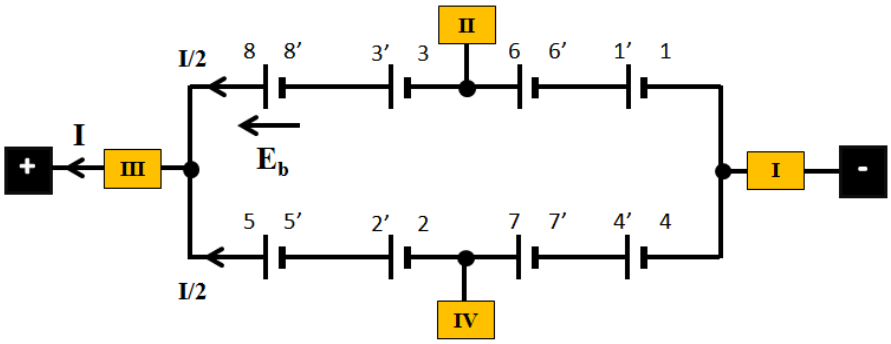
Quel que soit le type de bobinage; l'induit se comporte comme une seule et même bobine lorsqu'il est alimenté par les balais. Il est souhaitable d'avoir un grand nombre de lames sur le collecteur, cela permet d'avoir un couple plus régulier et un effet inductif entre 2 lames plus faible donc des étincelles plus faibles.

- Les balais divise l'induit en **2a** voies d'enroulement. Si **N** le nombre total de conducteurs sur l'induit; chaque voie d'enroulement comporte donc **(N/2a)** conducteurs actifs.
- Les voies d'enroulement sont à considérer comme des générateurs identiques montés en parallèle (même f.e.m et même courant **(I/2a),** avec **I** le courant total de la machine.

Exemple :Soit une machine bipolaire contenant un nombre N=**8** brins (conducteurs) actifs dont le schéma de bobinage est représenté par la figure (1.10.a). Chaque brin se déplaçant à une vitesse angulaire Ω dans un champ magnétique d'induction B produit une f.e.m moyenne $\mathbf{E_b}$(figure 1.10.b). Le schéma électrique représentant les voies d'enroulements de l'induit est donné par la figure (1.10.c).



(a) Bobinage de l'induit**(b)** Schéma électrique de l'induit



(c) Voies d'enroulements de l'induit

Figure 1.10. Représentation instantanée de l'induit d'une MCC bipolaire contenant 8 conducteurs

1.4. Principe de fonctionnement de la MCC

Pour comprendre le fonctionnement de la machine à courant continu voyons de près ce qui se passe au niveau d'un conducteur de l'induit. Pour ce, considérons un repère spatial(x,y,z) dans lequel on place sur deux rails conducteurs et fixes un conducteur de longueur utile **L**.L'ensemble est mis dans un champ d'induction magnétique $\vec{B}$ uniforme et orthogonal au plan formé par les rails et le conducteur comme l'illustre la fig.1.11.

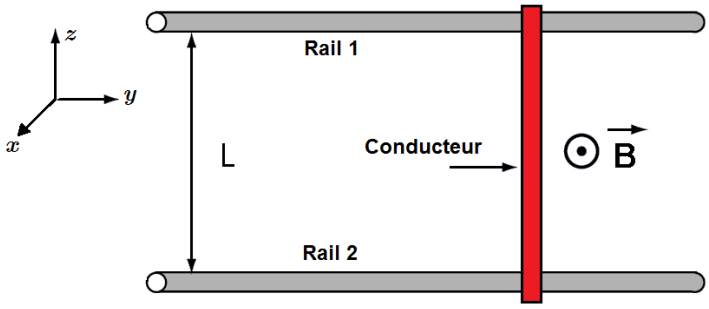


Figure 1.11. Conducteur placé sur deux rails fixes et plongé dans un champ magnétique

1.4.1. Loi de Laplace : Fonctionnement Moteur

Dans le cas où on fait circuler un courant ***I*** dans le conducteur de la figure 1.11, sur cedernier s'exerce alors une force $\vec{F}$ dite ***Force électromagnétique de Laplace*** ayant tendance àle faire déplacer.

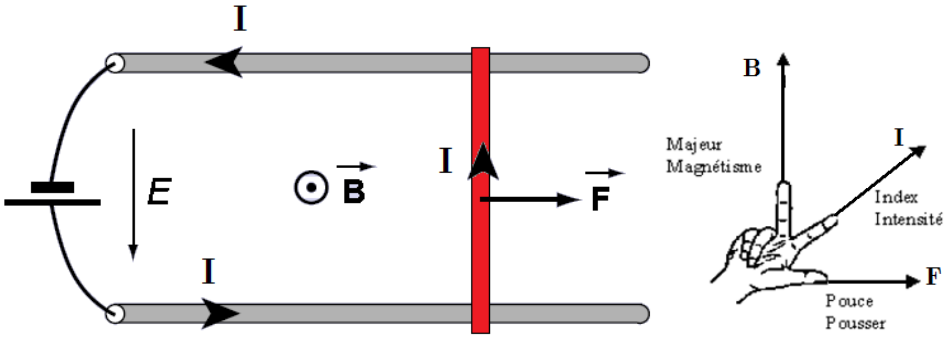


Figure 1.12. Sens de la force de Laplace (Règle de la main droite)

Chaque élément $d\vec{L}$ du conducteur subit une force élémentaire $d\vec{F}$ tel que : $d\vec{F} = I.d\vec{L} \wedge \vec{B}$

Pour tout le conducteur, on a :

$$\left\|\vec{F}\right\| = \left\|\vec{B}\right\|.L.I \qquad (1.1)$$

D'après la relation (1.1) ; le module de $\left\|\vec{F}\right\|$ ne dépend que des trois grandeurs :*B*, *L* et *I* à l'exclusion detout autre. Le sens et la direction de cette force $\vec{F}$ est obtenu en respectant la règle des *trois doigts de la main droite*décrite comme suite (Pouce : Force ; Index : Intensité ; Majeur : Magnétisme), figure 1.12.

1.4.2. Loi de Faraday : Fonctionnement Générateur

Cette fois-ci, on fait déplacer le conducteur d'un mouvement de translation àla vitesse $\vec{V}$.

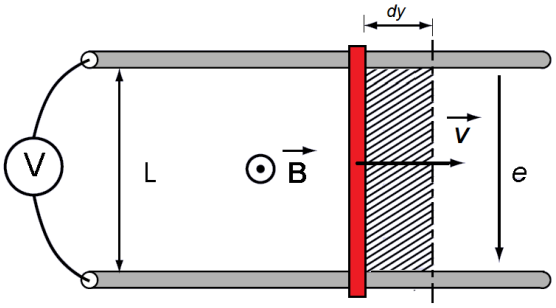


Figure 1.13. Création de force électromotrice (f.e.m)

Entre l'instant *t* et *t+dt*, le conducteur parcourt la distance élémentaire *dy=V.dt*. Le flux coupé par le conducteur vaut: $d\phi = \left\|\vec{B}\right\|.dS = \left\|\vec{B}\right\|.L.dy$

Selon la loi de Faraday; le conducteur sera alors le siège d'une force électromotrice (f.e.m), tel que : $e = -\frac{d\phi}{dt}$

.Cette f.e.m ayant pour module :

$$E = \frac{\left\|\vec{B}\right\|.L.dy}{dt} = \left\|\vec{B}\right\|.L.\left\|\vec{V}\right\| \qquad (1.2)$$

D'après la relation (1.2), la f.e.mne dépend que de la longueur *L* et des modules de *B*et de *V* à l'exclusion de toute autregrandeur : le fait que le conducteur soit parcouru par un courant ou non n'intervient pas.Le sens et la direction de la f.e.mE est obtenu en respectant la règle des *trois doigts de la main gauche* :(Pouce : Sens detranslation ; Index : Intensité (ou f.e.m) ; Majeur :Magnétisme), figure 1.14.

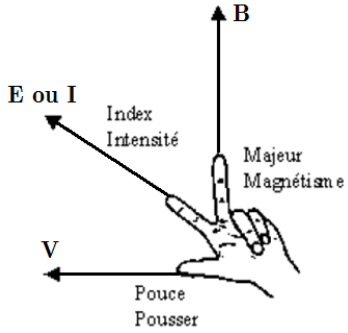


Figure 1.14. Règle de la main gauche

1.5. Transformation du travail mécanique

Considérons le schéma de la figure 1.12où le conducteur estparcouru par un courant I, placé dans un champ d'induction magnétique uniforme $\vec{B}$ orthogonal et se déplaçant parallèlement à lui-même à la vitesse $\vec{V}$. Nous supposons que $\vec{B}$, $\vec{V}$ et le conducteur sont portés par les axes d'un système trirectangle.

1.5.1. Fonctionnement Moteur

Supposons que le champ d'induction magnétique $\vec{B}$ et la vitesse $\vec{V}$ soient donnés etcherchons à quelle condition la force $\vec{F}$ peut être de même sens que $\vec{V}$.

Par la règle des doigts de la main droite on détermine le sens du courant *I* et par la main gauche on détermine celui de *E'*.

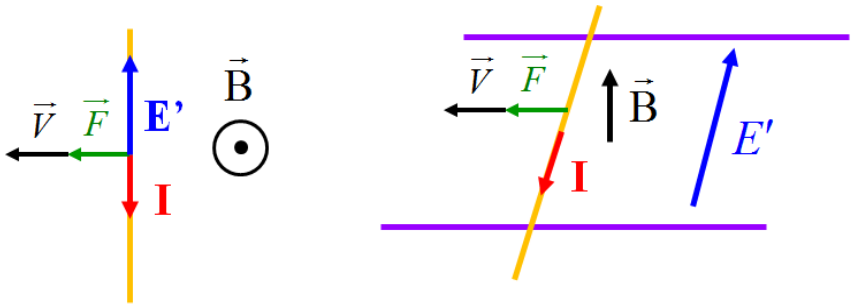


Figure 1.15. Transformation du travail mécanique

Dans ce cas la force et la vitesse ont le même sens, par conséquent le produit $\vec{F}.\vec{V}$ est positif. On dit que le milieu extérieur reçoit le travail que le conducteur fournit.Nous constatons aussi que le produit $\vec{E'}.\vec{I}$ est négatif (le sens de E' est opposé à celui du courant I), le conducteur est donc le siège d'une ***force contre-électromotrice*** (**f.c.e.m**) et le réseau lui fournit de l'énergie électrique.

En utilisant la relation (1.2) et en multipliant les deux membres par $\vec{V}$, nous obtenons:

$$\left\|\vec{F}\right\|.\left\|\vec{V}\right\| = \left\|\vec{B}\right\|.L.\left\|\vec{V}\right\|.I \tag{1.3}$$

L'énergie électrique fournie par le réseau au conducteur est telle que :

$$\left\|\vec{F}\right\|.\left\|\vec{V}\right\| = \left\|\vec{B}\right\|.L.\left\|\vec{V}\right\|.I = E'.I \tag{1.4}$$

Dans ce mode de fonctionnement, l'énergie électrique fournie par l'alimentation est transformée en énergiemécanique fournie au milieu extérieur. Notre machine élémentaire formée par un seulconducteur fonctionne ***en moteur***.

1.5.2. Fonctionnement Générateur

Faisons les mêmes hypothèses sur $\vec{B}$ et $\vec{V}$ et cherchons à quelle condition le produit $\vec{F}.\vec{V}$ peut être négatif. La règle des doigts de la main droite nous donne le sens de *I* et celle des doigts de la maingauche donne le sens de *E*.

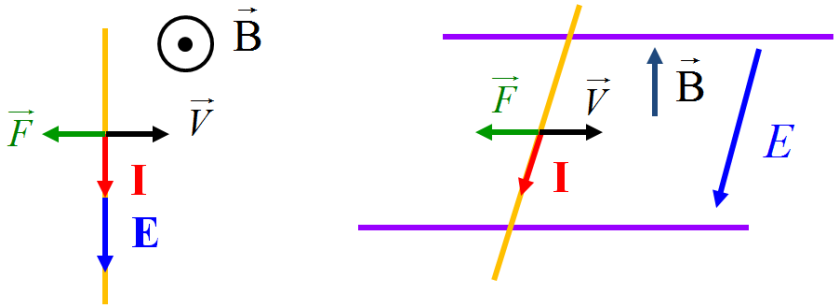


Figure 1.16. Transformation du travail mécanique

Dans ce cas,nous constatons que le produit $\vec{F}.\vec{V}$ est négatif. On peut alors écrire :

$$\left\|\vec{B}\right\|.L.\left\|\vec{V}\right\|.I = E.I = -\vec{F}.\vec{V} > 0 \tag{1.5}$$

Le conducteur reçoit donc du travail fourni par le milieu extérieur.

On dit alors que le milieu extérieur a fournit un travail mécanique (F.V) au conducteur qui l'a transformé à son tour en énergie électrique (E.I) fournie au réseau. Nous assistons ainsi à un fonctionnement ***en génératrice***.

1.6. Force Electromotrice

1.6.1. Création de la f.e.m induite

Soit une machine élémentaire bipolaire (figure 1.17) où l'induit, comportant unespire enroulée sur un rotor cylindrique en fer de rayon R et de longueur Lest entraîné en rotation à la vitesse angulaire Ω_r. La spire comporte un conducteur aller sous le pôle sud qui génère une f.e.m. (***+e***) et un retour sous le pôle Nord qui fournit (***–e***) car la vitesse est opposée à celle sous l'autre pôle. L'association en série ajoute les deux f.e.m.En considérant la

mise en série desdeux conducteurs, la f.e.m au niveau de la spire est égal à (***2e***) et a pour forme la quasi-sinusoïdedonnée par la figure 1.18.

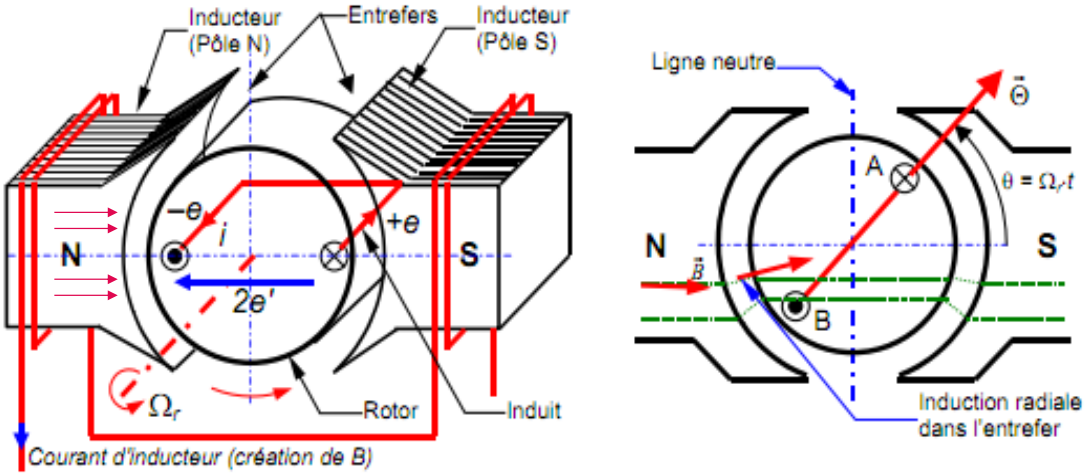


Figure 1.17. Création de la f.e.m dans une MCC

Sous l'effet de la rotation, la spire découpe la surfaceinstantanée :

$$S\ t\ = 2\pi.R.L.\cos\ \Omega t \tag{1.6}$$

Le flux qui en découle est tel que :

$$\phi\ t\ = \left\|\vec{B}\right\|.S\ t\ = 2\pi.\left\|\vec{B}\right\|.R.L.\cos(\Omega t) = \phi_{\max}.\cos(\Omega t) \tag{1.7}$$

D'après la loi de Faraday, la f.e.m instantanée e(t) induite dansla spire vaut :

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = \phi_{\max}.\Omega.\sin(\theta) = e_{\max}.\sin(\theta) \tag{1.8}$$

Ce résultat montre que la f.e.m induite est proportionnelle au flux Φ sous un pôle, à la vitesse angulaire Ω et à la position θ.

La représentation temporelle du flux sous un pôle et de la f.e.m induite estdonnée par la figure 18.1:

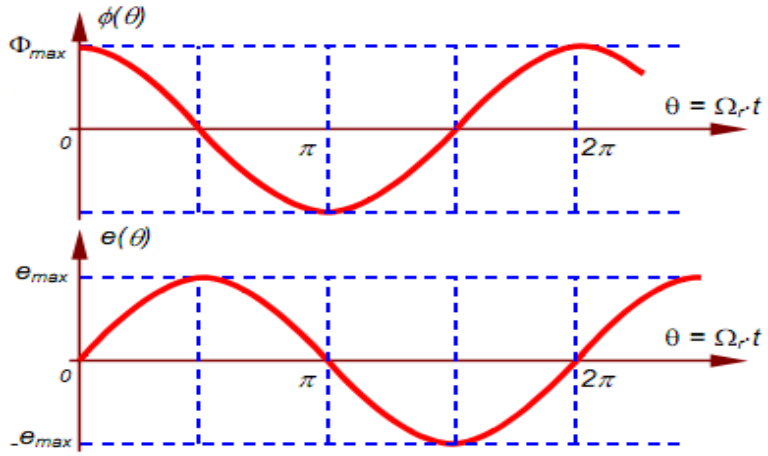


Figure 1.18. Flux et f.e.m dans une MCC

Remarque:

- La tension est disponible aux bornes d'une spire mobile, mais le besoin apparaît sur la partie fixe. Il faut donc trouver un moyen d'effectuer le transfert par un contact glissant ;
- On remarque que la f.e.m obtenue est sinusoïdale et qu'elle ne peut pas être utiliséepour alimenter directement une charge continue il faut la rendre unidirectionnelle (continue).

1.6.2. Rôle du collecteur

Pour assurer les deux fonctions citées dans la remarque précédente, on met en place le collecteur : les extrémités de la spire (A-B) sont reliées électriquement à deux lames en cuivre. Pour prélever la f.e.m (e_{AB}) sur la partie fixe, deux balais (B1-B2) en graphite liés au stator frottent sur les lames.

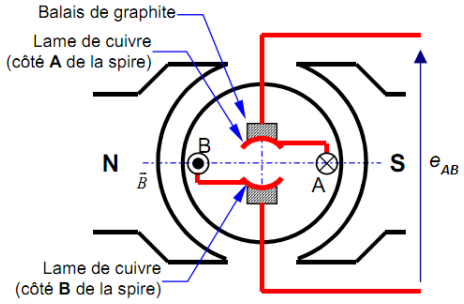
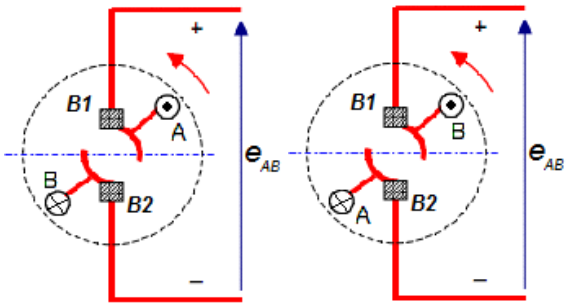


Figure 1.19. Récupération de la f.e.m

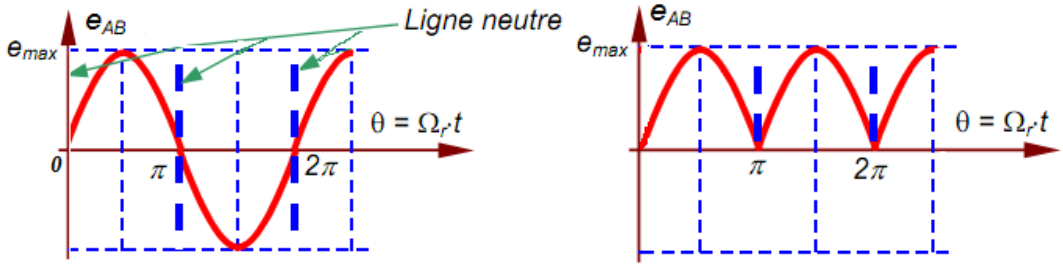


(a) Rotor en position (θ) **(b)**Rotor en position (**θ+π**)

Figure 1.20. Redressement de la f.e.m

- En position (θ) ; la lame A et le balai B1 sont polarisés positivement (+). La lame B et le balai B2 sont polarisés négativement (-).
- En position (θ+π) ; la lame B et le balai B1 sont polarisés positivement (+). La lame A et le balai B2 sont polarisés négativement (-).

On remarque que les lames A et B ont changé de polarité alors que les balais B1 et B2, ont conservé leur polarités. Le collecteur joue un rôle de redresseur mécanique.



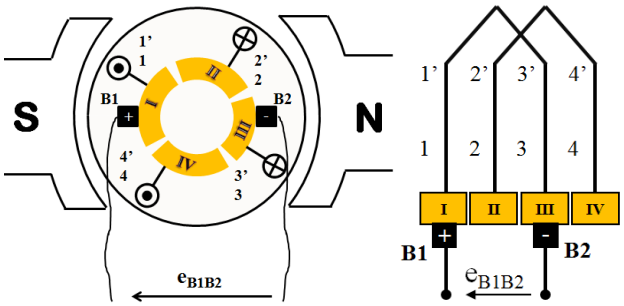
(b) f.e.m induite aux bornes de la spire**(b)** f.e.m induite redressée par le collecteur

Figure 1.21. f.e.m avant et après collecteur

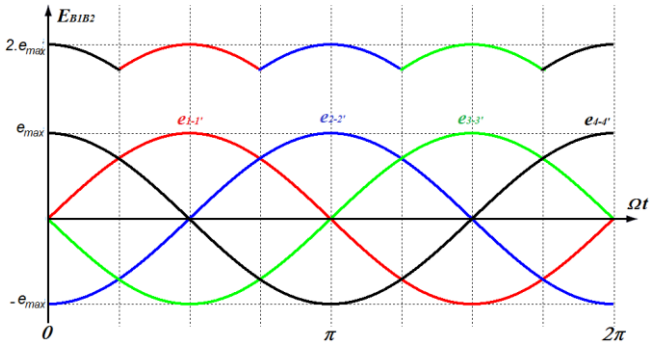
1.6.3. Amélioration de la qualité de latension fournie

Pour améliorer la qualité de la tension produite, l'une des solutions consiste à augmenterle nombre de conducteurs dans la machine. La figure (1.22.a) montre une machine bipolaireayant un induit comportant 4 conducteurs (1-1'), (2-2'), (3-3') et (4-4') connectésrespectivement aux lames I, II, III et IV comme l'illustre la Figure (1.22.b). La f.e.m produiteau niveau de chaque conducteur ainsi que la f.e.m totale e_{B1B2} récupérée au niveau des balais(B1-B2) sont données par la figure (1.22.c).

Il est à signaler que lors d'une période du rotor les balais (B1-B2) seront en contactrespectivement et successivement avec les lames (I-III), (II-IV), (III-I) et (IV-II).



(a) (b)



(c)

Figure 1.22. Amélioration de la qualité de la f.e.m générée

En analysant les formes de ces f.e.m, on remarque que :

- Les f.e.m élémentaires sont déphasées les unes des autres d'un angle égal à π/2.
- La f.e.m totale présente un module plus important et un taux d'ondulation plus faible que celui de la f.e.m de la figure 1.22.b.

En pratique pour augmenter la valeur de la f.e.m e_{B1B2} on met plusieurs spires en série parsection. La continuité du circuit d'induit est garantie par la mise en parallèle des bobines.

1.6.4. Expression de la f.e.m induite

a) F.e.m moyenne dans un brin actif

Supposons qu'un conducteur actif de l'induit qui se déplace d'un pas polaire($\alpha_p = \pi/p$), il va donc découper un flux $d\phi = \phi$ *et* ceci en un temps $dt = \alpha_p/\Omega$.

D'après la loi de Faraday, la f.e.m moyenne aux bornes du conducteur sera donnée par :

$$E_b = \frac{d\phi}{dt} = \frac{P}{\pi}.\phi.\Omega \qquad (1.9)$$

b) f.e.m moyenne totale

L'induit est reparti sur (2a) voies d'enroulements identiques. Chaque voie comporte (N/2a) conducteurs actifs, par conséquent la f.e.m moyenne totale sera celle produite par voie d'enroulement.

$$E = \frac{N}{2a}.E_b = \frac{N}{2a}.\frac{P}{\pi}.\phi.\Omega \qquad (1.10)$$

Avec : N : nombre de conducteurs actifs

2a : nombre de voies d'enroulements

P : nombre de paire de pôles

Ω : vitesse angulaire (rad/s)

ϕ : flux sous un pôle (Wb)

Sachant que Ω = 2π.n, avec n est la vitesse de rotation de l'induit (trs/s), la relation (1.10) devient alors :

$$E = \frac{P}{a}.N.n.\phi = k.n.\phi \qquad (1.11)$$

Avec : $k = \frac{P}{a}.N$ est une constante de la machine.

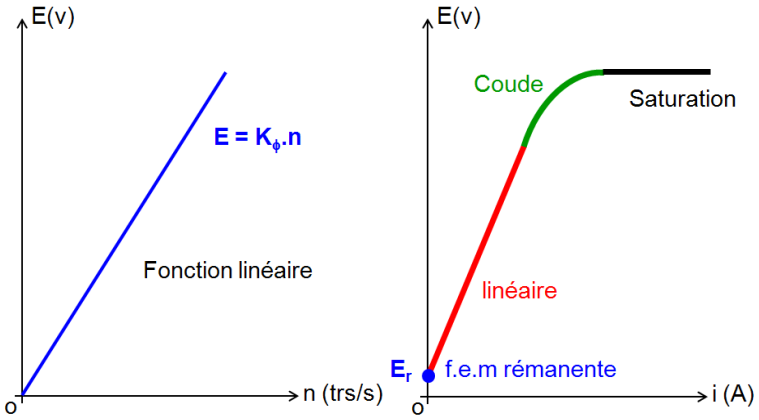
La f.e.m. totale de la MCC dépend :

- Des paramètres de construction, purement technologiques (***P***, ***a*** *et* ***N)*** *;*
- Du paramètre de fonctionnement interne, le flux sous un pôle **Φ** (donc du courant d'excitation ***i***).
- Du paramètre de fonctionnement externe, la vitesse de rotation **n**.

1.6.5. Influence des paramètres de la f.e.m

Les paramètres P, a et N sont des constantes constructives de la machine. Il reste donc les deuxgrandeursΦ et nsur les quelles on peut agir pour varier la f.e.m E.

- à$\Phi = cte$; $E = f\ n\ = k_{\phi}.n$;la caractéristique est linéaire (fig.1.23.a).
- à $n = cte; E = f\ \phi\ = k_{n}.\phi$ .Sachant que dans le cas d'un inducteur bobiné, le flux Φ dépend du courant i d'excitation donc, $E = f\ i\ $ .La caractéristique obtenue (fig.1.23.b) a la même allure que celle de première aimantation d'un circuit magnétique $B = f\ H\ $.



(a) **(b)**

Figure 1.23. Influence des paramètres de la machine

1.7. Phénomènes dans la MCC

1.7.1. Réaction magnétique d'induit

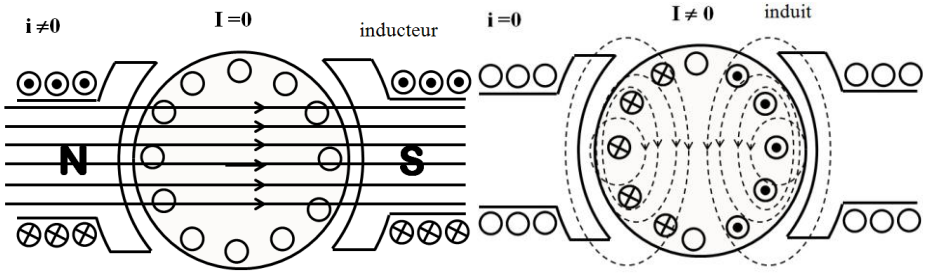
a) Description

A vide le flux dans la machine est dû uniquement au courant inducteur. En charge, dès qu'un courant circule dans l'induit, il crée à son tour un flux. Ainsi, le flux résultantdans la machine sera la superposition du flux principal créé par l'inducteur et celui de la réaction magnétique duau courant de l'induit.

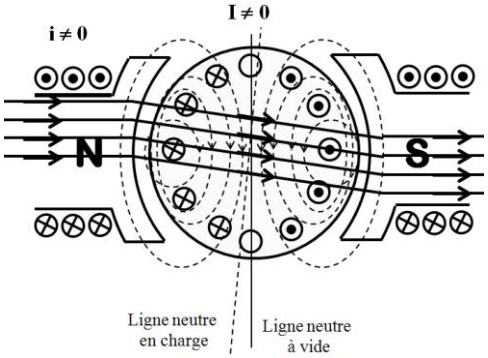
Les figures 1.24.(a), (b) et (c) présentent la répartition des lignes de champ dans une machine bipolaire dans les trois états suivants : **(a)** : A vide (I =0 et i ≠0) ;Champ du à l'inducteur seul;

(b) : En charge (I≠0 et i = *0*) ; Champ dû à l'induitseul ;

(c) : En charge (I≠0, i ≠0) ;Champs dû à l'inducteur et l'induit.



(a) **(b)**



(c)

Figure 1.24. Lignes de champ magnétique dans une MCC bipolaire

Le passage de la spire (ou de la section) sous le flux maximal correspond à une f.e.m. nulle (dϕ/dt =0).C'est à cet endroit, appelé ligne neutre, que la f.e.m. est prélevée pour être transmise à lapartie fixe. La RMI a pour effet de modifier les lignes de champs dans la machine ce quiengendre un décalage de la ligne neutre : les sections misent en court-circuit sous les balais nesont plus le siège d'une f.e.m nulle ce qui aggrave les difficultés de la commutation.

Le décalage de la ligne neutre entraîne aussi la saturation de certaines cornes de l'inducteur d'ou réduction du flux par pôlepar conséquentladiminution du flux embrassé par le bobinage. En résumé, on a :

- A vide, $\phi = \phi_0 = \phi_{\max}$ (pas de décalage de la ligne neutre)
- En charge, on a : $\phi = \phi_{ch} < \phi_0$ (décalage de la ligne neutre)

A vitesse de rotation constante, nous avons donc $E_{ch}<E_0$ (E_0 : f.e.m à vide etE_{ch}:f.e.m en charge).

Cette différence pourrait être exprimée comme suit :

$$E_0 - E_{ch} = k.n.\phi_0 - k.n.\phi_{ch} = k.n.\Delta\phi = \varepsilon\ I \qquad (1.12)$$

Oùε(I) est la chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit (RMI).

b) Compensation

Dans le cas des machines de faible puissance (P ≤1kW) tournant toujours dans le mêmesens et travaillant toujours en moteur ou en génératrice, on ramène les balais sur la ligneneutre réelle.

Dans le cas des machines de grandes puissances, cette astuce n'est plus valide. Ces machinessont donc équipées *d'enroulements de compensation* servant à compenserla réaction de l'induit (figure 1.25). Ces enroulementsproduisent un flux qui s'oppose à celui créépar l'induit. Ilssont donc mis en anti-série avec l'induit.

1.7.2. Phénomène de commutation

Le passage du balai d'une lame du collecteur à une autre (donc d'une section àune autre) s'appelle commutation.Plusieurs phénomènes comme la f.e.m d'auto-induction, la saturation et bien d'autres font quelacommutation se fait sans annulation du courant. Ceci engendrel'apparition d'une forte étincelle de rupture.

Pour en remédier, il faut produire dans la section en commutation une f.e.m *Ec* appelée f.e.mde commutation par l'intermédiaire de pôles supplémentaires appelés : *pôles auxiliaires*.

Ces pôles sont situés dans les axes inter-polaires (lignes neutres) comme l'illustre la figure 1.25. Ils créentlocalement et au niveau de la section en commutation un champ d'induction qui s'oppose auchamp créé par l'induit. Ils sont donc parcourus par le même courant que ce dernier. De cettefaçon ces pôles participent en plus à la compensation de la RMI dans les zonesinter-polaires (zones non compensées par les enroulements de compensation installés sur lespôles inducteurs).

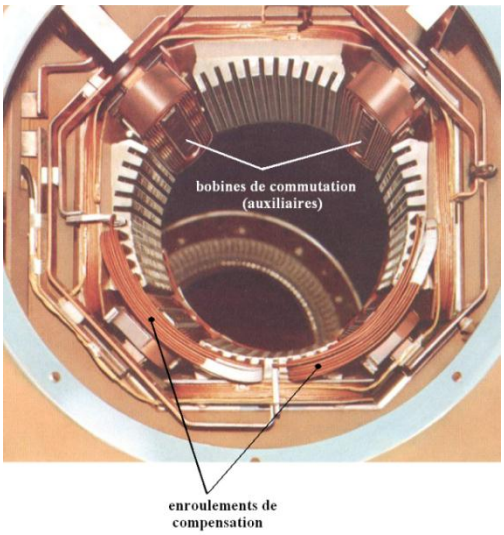
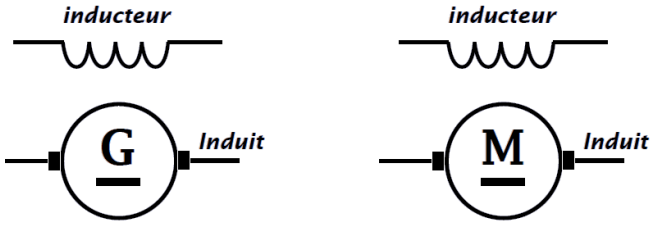


Figure 1.25. Placement des enroulements de compensation et des pôles de commutation

1.8. Symbole de la MCC

Il en existe plusieurs. Nous utilisons généralement le symbole suivant :



(a) Mode Générateur **(b)** Mode Moteur

Figure 1.26. Symbole d'un MCC

1.9. Equations générales en régime statique

1.9.1. Schéma équivalent

En régime statique ; la machine à courant continu est équivalente à deux circuits électriques, l'un pour l'inducteur comportant une résistance (**r**) et le second relatif à l'induit contenant une résistance ($\boldsymbol{R_a}$)en série avec une f.e.m($\boldsymbol{E}$)(Les inductances des enroulements ne sont pas tenu compte puisqu'il s'agit du courant continu).

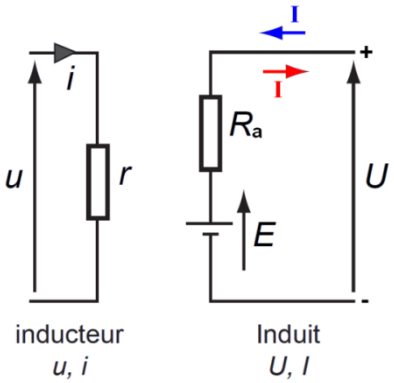


Figure 1.27. Modèle équivalent d'une MCC

Avec :**r** : résistance de l'enroulement inducteur

R_a : Résistance totale du circuit parcouru par I (bobine de l'induit +enroulement decompensation et celui de commutation).

E : f.e.m, en fonctionnement générateur et f.c.e.m E', en fonctionnement moteur

U : Tension aux bornes de l'induit

u : Tension aux bornes de l'inducteur

I : Courant de l'induit

i : Courant de l'inducteur (excitation)

Le sens du courant induit I dépend du mode de fonctionnement :

- **Génératrice**→Puissance électrique → E et I dans le même sens
- **Moteur**→ Puissance mécanique → E et I en sens inverses

1.9.2. Equation électrique

La loi de maille relative à l'induit, appliquée pour les deux modes de fonctionnement permet d'écrire :

$$\begin{cases} U = E - R_a.I & (G) \\ U = E' + R_a.I & (M) \end{cases} \tag{1.13}$$

A la chute ohmique (R_a.I) vient s'ajouter d'autres chutes de tension nonlinéaire: ε(I), due à la RMI et e_B(I) due au phénomène de commutation. Les relations (1.13) deviennent :

$$\begin{cases} U = E_0 - R_a.I + e_B\ I\ + \varepsilon\ I & (G) \\ U = E_0' + R_a.I + e_B\ I\ - \varepsilon\ I & (M) \end{cases} \tag{1.14}$$

Les chutes $\varepsilon\ I$ et $e_B\ I$ deviennent négligeables dans une machine munie d'enroulements de compensation et de commutation.

1.9.3. Equation mécanique

Soit une machine élémentaire bipolaire contenant 6 conducteurs sur l'induit (rotor cylindrique)de rayon R et de longueur L(figure 1.28). Chaque conducteur, traversé par le courant I et placé dans le champ magnétique d'induction $\vec{B}$ crée par l'inducteur, sera soumis à une force de Laplace $\vec{F}$ qui tend à l'entrainer à une vitesse angulaire Ω.

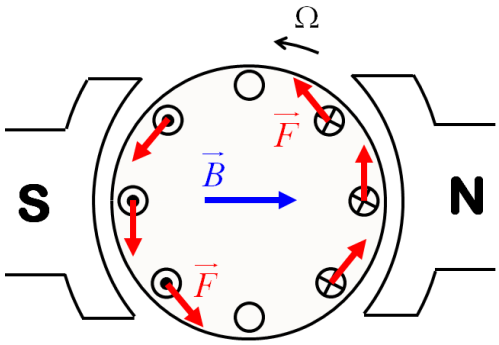


Figure 1.28. Force de Laplace exercée aux conducteurs de l'induit

Le travail mécanique exprimé par la relation (1.4): $\left\|\vec{F}\right\|.\left\|\vec{V}\right\| = E.I$, représente la puissance électromagnétique $\boldsymbol{P_{em}}$ transmise entre rotor et stator.La conversion de cette puissance dépend du mode de fonctionnement :

- Conversion : mécanique →électrique (générateur)
- Conversion : électrique→ mécanique (moteur)

Sachant que : $\left\|\vec{V}\right\| = R.\Omega$, on peut alors écrire :

$$\left\|\vec{F}\right\|.R.\Omega = E.I = P_{em} \tag{1.15}$$

Le produit $\left\|\vec{F}\right\|.R$ représente le couple électromagnétique $\boldsymbol{T_{em}}$appliqué par les forces de Laplacesur le rotor.

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E.I}{2\pi.n} \tag{1.16}$$

En remplaçant dans la relation (1.16) la f.e.m (E) par son expression (1.11), il vient :

$$T_{em} = \frac{E.I}{2\pi.n} = \frac{k\phi}{2\pi}.I \tag{1.17}$$

Pour une machine fonctionnant à flux constant ; le couple T_{em}est proportionnel au courant induit I.

Problèmes :

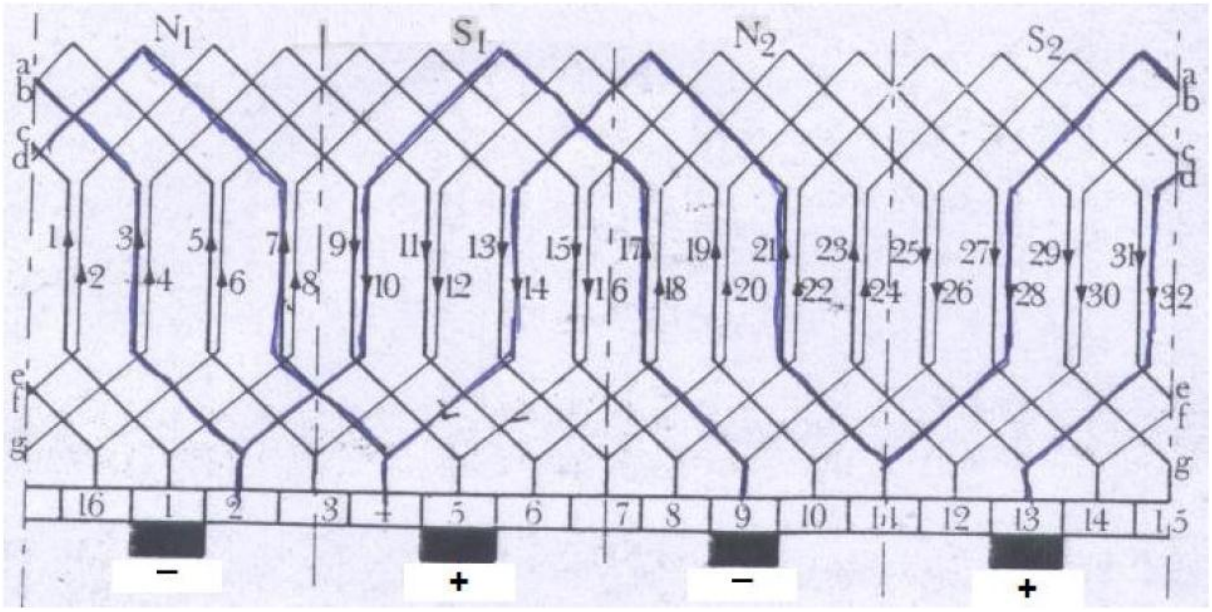
Problème 1.1 :

On considère les bobinages d'induits de deux MCC donnés par les figures 1(a) et (b).

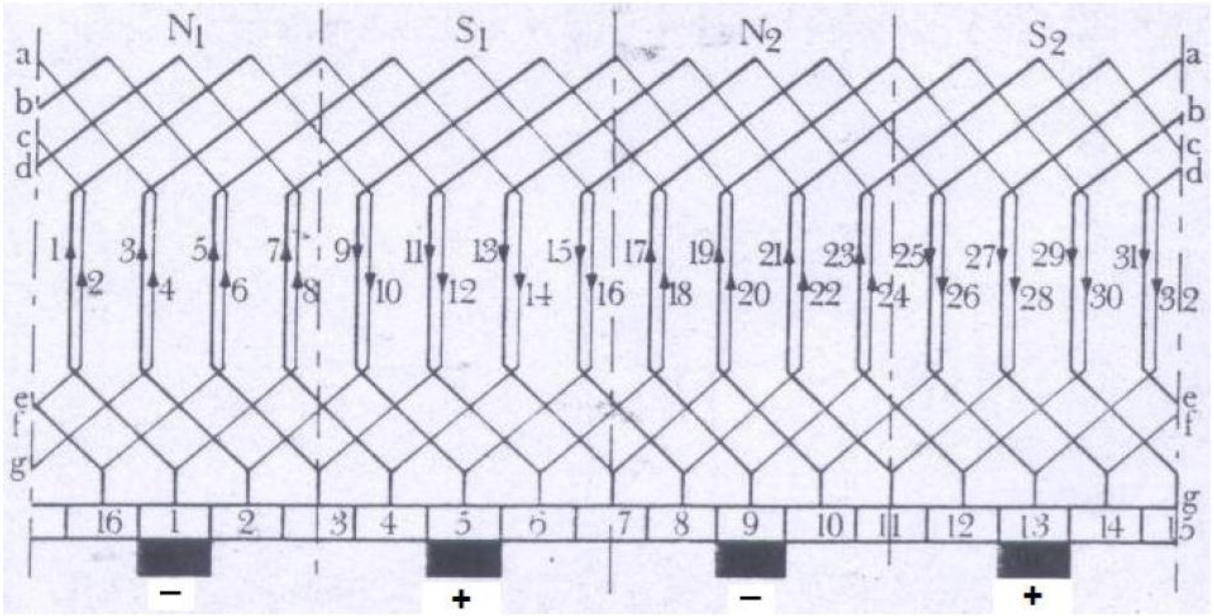
Pour chacune des deux machines :

Identifier le type d'enroulement (ondulé ou imbriqué) et déterminer :

le nombre de pôles 2p, le nombre de cotés de sections Ncs, le nombre d'encoches Ne (sachant qu'on peut placer 2 cotés de section dans une encoche), le nombre de lames de collecteur NL et le nombre de voies d'enroulements 2a.



(a)



(b)

Figure 1 : Bobinages d'induits pour MCC

Problème 1.2 :

Une MCC comportant 12 pôles, 12 voies d'enroulements et 72 bobines sur l'induit(figure 2), est utilisée en génératrice. La machinedébite un courant de 2400 A dans la charge sous une tension de 240V entre les balais adjacents. Calculer :

1. le courant fourni par chacun des balais.

2. le courant circulant dans chaque bobine.

3. la valeur moyenne de la tension induite dans les bobines.

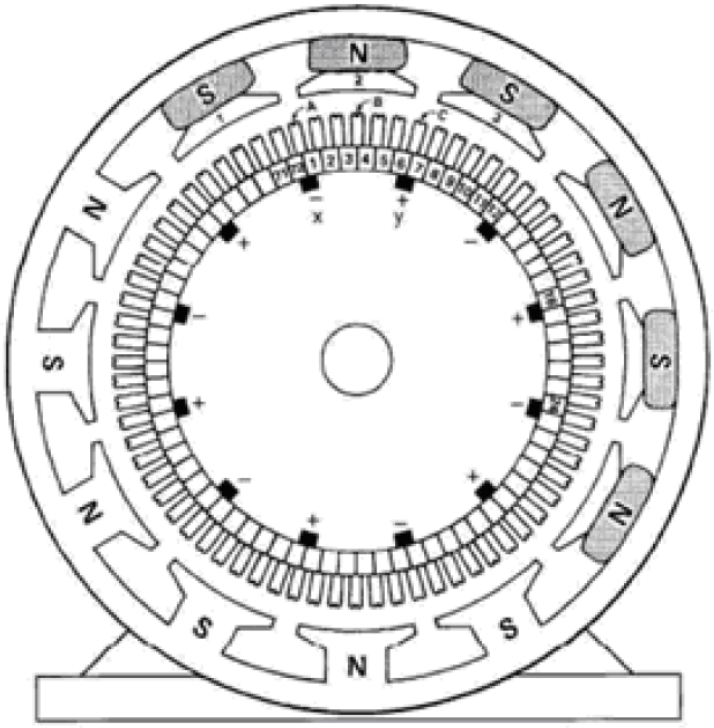


Figure 2 : diagramme schématique de la MCC

Problème 1.3 :

On considère la MCC élémentaire de la figure 3(a) ayant un induit composé d'une seule bobine développant une tension maximale de 10V entre balais. On considère un fonctionnement à vide de la génératrice.

1. Sachant que la f.e.m produite est sinusoïdale, déterminer la valeur de la tension produite pour chacune des huit positions illustrées dans la Figure 3(b) tout en indiquant les polarités des bornes a et b.

2. En réalité l'induit comporte huit bobines identiques interconnectées comme le montre la figure 3(c). Il est à noter que les bobines logées dans les mêmes encoches produisent des tensions identiques mais de polarités contraires. Déterminer les valeurs instantanées des tensions dans les huit bobines illustrées par la figure 3(d) tout en indiquant les polarités au niveau de chacune d'entre elles.

3. Rappeler la condition de continuité pour le bobinage d'induit d'une MCC et dessiner au niveau de la figure 3(e) les interconnexions entre les bobines pour satisfaire cette condition.

4. En prenant en compte les connexions de la figure 3(e), connecter les lames du collecteurs aux différentes bobines au niveau de la figure 3(f) et préciser la ligne neutre de la machine ainsi que l'endroit d'emplacement de ses deux balais (B1 et B2). Calculer la tension mesurée au niveau des balais et indiquer la polarité de B1 et B2.

5. Que se passe t-il dans le cas où les balais sont déplacés de 45° dans le sens horaire ?

6. Que se passe t-il dans le cas où les balais sont déplacés de 90° dans le sens horaire ?

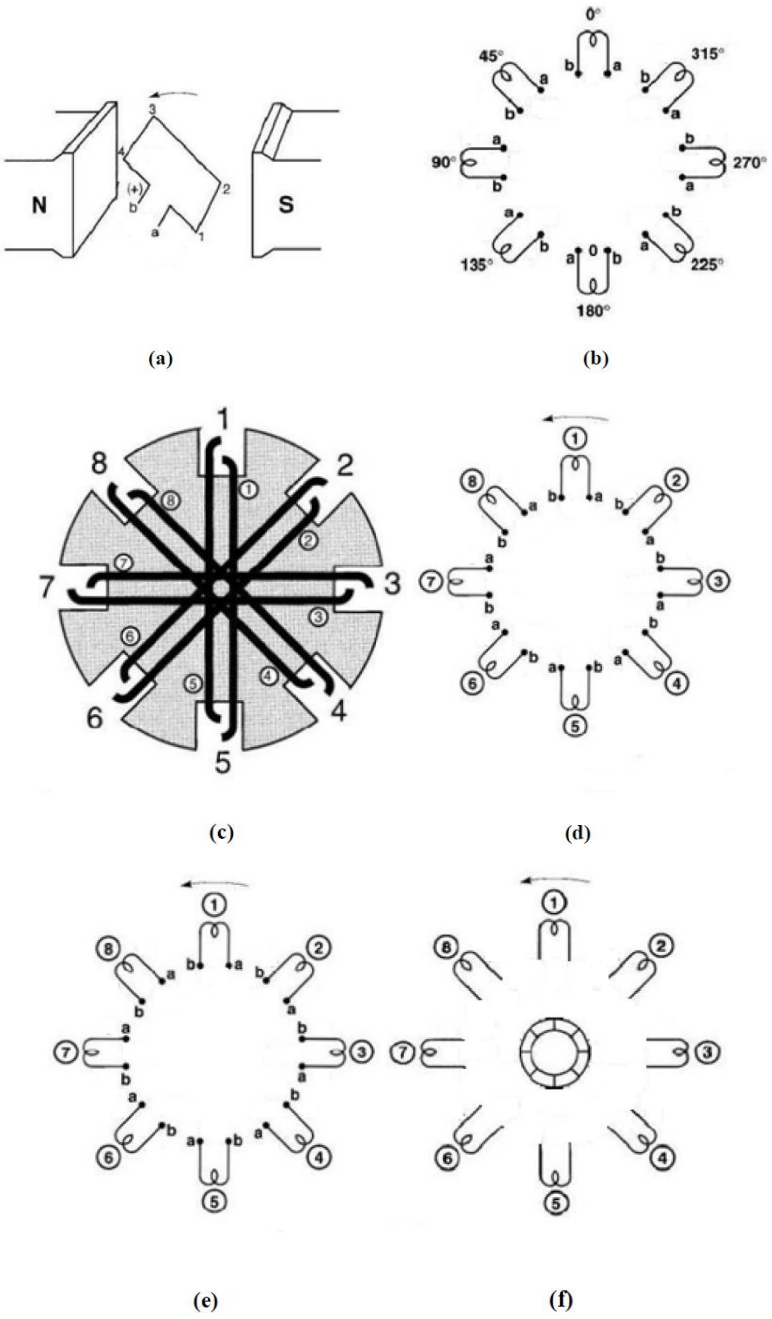


Figure 3 : Commutation dans une MCC

Corrigés :

Sol. Problème 1.1:

- **Figure 1(a):** Bobinage ondulé ayant : 4 pôles (p =2), 32 cotés de section, 16 encoches, 16 lames collectrices, 4 voies d'enroulements (a = 2).
- **Figure 1(b):** Bobinage imbriqué ayant : 4 pôles, 32 cotés de section, 16 encoches, 16 lames collectrices, 4 voies d'enroulements (a = 2).

Sol. Problème 1.2:

1) Le courant de ***2400A*** sort de la borne (+) et entre par la borne (-) de la génératrice. Il y a **12** balais en tout ***6(+) et 6(-)***. Le courant par balais est :$I_B = 2400/6 = 400A$.

2) Au point de contact avec le collecteur, chaque balai (+) porte le courant venant des enroulements situés à gauche et à droite du balai. Donc, le courant porté par chaque bobine est :

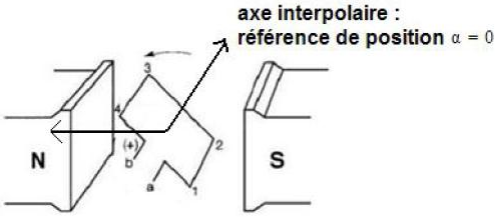
$I_{bob} = I_B/2 = 200A$.

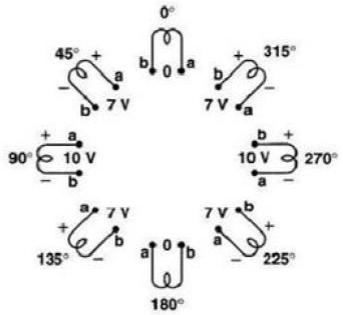
3) L'induit comporte **72** bobines réparties entre **12** balais, soit $72/12 = 6$ bobines entre deux balais consécutifs. La tension entre balais étant de ***240V***, la tension moyenne par bobine est :

$E_{moy} = 240/6 = 40V$.

Sol. Problème 1.3:

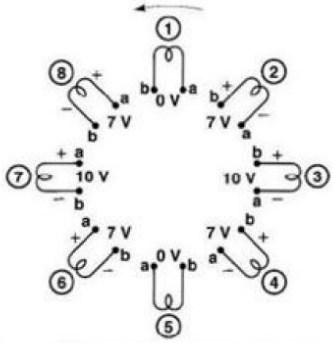
1) La f.e.m crée est sinusoïdale ayant pour forme $E = E_M.sin(\alpha)$ avec ***EM*** : valeur maximale de la f.e.m et α : la position de la bobine % à l'axe inter-polaire. Les conducteurs en face du pôle Nord sont de polarité (+) et ceux en face du pôle Sud sont de polarité (-).





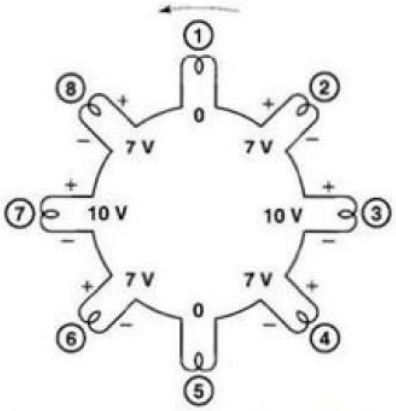
Tensions Induites pour 8 positions du cadre

2) Faisons tourner à ce stade l'ensemble des huit bobines à la même vitesse qu'auparavant. Chaque bobine génère une tension et une polarité correspondant à sa position. Vu que chaque bobine est espacé de ses adjacente de 45°, on retrouve la même situation que la question précédente comme illustré ci-après.Notons que les bobines (1) et (5) sont logées dans les mêmes encoches : par conséquent, leurs tensions Eab ont instantanément la même valeur, mais de polarités contraires. Il en est de même pour les bobines (2), (6) ; (3), (7) et (4), (8).



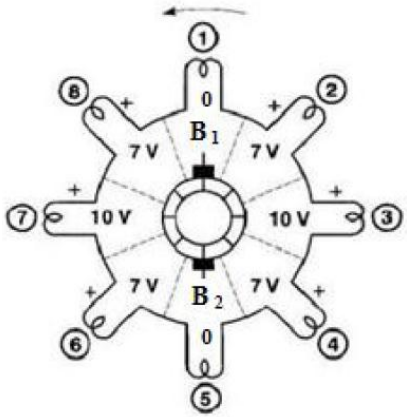
Valeurs instantanées des tensions dans les huit bobines

3) L'enroulement d'induit doit être fermé sur lui-même après avoir rencontré tous les faisceaux. Les interconnexions entre les huit bobines sont comme suit :



Interconnexion des bobines d'induit

4) Les zones neutres sont les endroits situés à la surface de l'induit où la densité de flux est nulle. Ayant considéré un fonctionnement à vide de la génératrice, les zones neutres se trouvent exactement à mi-chemin entre les pôles. Aucune tension n'est induite dans une bobine traversant une zone neutre : c'est pourquoi on cherche à disposer les balais autour du collecteur dans cette zone afin qu'ils soient en contact avec les bobines franchissant ces zones neutre. On assure en même temps une tension maximale entre les balais. La tension recueillie est égale à la somme des tensions entre les lames: E_{B1B2} = (+7) + (+10) + (+7) = 24V.



Les balais sont placées à l'endroit produisant la plus grande tension E_{B1B2}

5) Le balai B1 est en contact avec deux lames mettant ainsi la bobine (1) en court-circuit. De la même façon, le balai B2 y court-circuite la bobine (5). Mais comme la tension induite dans ces bobines est nulle, ce court-circuit momentané n'a aucun effet. Par contre, si les balais sont déplacés de 45° dans le sens horaire, ils court-circuiteront les bobines (2) et (6). Or, la tension de 7V générée par ces bobines donnera naissance à un courant de court-circuit important qui risque de produire des étincelles et de provoquer la destruction progressive des balais et de la surface du collecteur : mauvaise commutation. Le déplacement des balais occasionne aussi une diminution de la tension entre les balais, même si ces tensions induites dans les bobines demeurent inchangées. En effet, dans ce cas la tension E_{B1B2} devient : E_{B1B2} = (+10+7+0) = 17V.

6) Si l'on déplace les balais de 90°, la tension E_{B1B2} tombe à (+7+0-7) = 0V.

En même temps, les balais court-circuitent les bobines qui génèrent une tension de ***10V.*** Parconséquent, le problème de la commutation sera encore plus pire.

Table des Matières

CHAPITRE 2 : GENERATRICES A COURANT CONTINU

2.1. Introduction……..... 24

2.2. Caractéristiques usuelles……..……..……... 24

2.3. Génératrice à excitation séparée……..... 24

2.3.1. Schéma et équations de fonctionnement……..……...…... 25

2.3.2. Caractéristique à vide……...…..……..……..…... 25

2.3.3. Caractéristiques en charge……..……....……....…… 26

2.4. Génératrice à excitation shunt…….……....….. 27

2.4.1. Schéma et équations de fonctionnement……..…..…..……... 27

2.4.2. Problème d'amorçage……...……..……..……... 27

2.4.3. Point de fonctionnement à vide……...…….…..... 28

2.4.4. Caractéristique en charge……..……...……...…… 29

2.5. Génératrice à excitation série……..…….……..……... 32

2.5.1. Schéma et équations de fonctionnement…….……..…..……... 32

2.5.2. Caractéristique à vide……..……..……...…... 32

2.5.3. Caractéristique en charge……..……...……..…… 32

2.6. Génératrice à excitation composée (compound)……..……...….. 33

2.6.1. Schéma et équations de fonctionnement……..……..……..…... 33

2.6.2. Caractéristique à vide……..……...……..……... 34

2.6.3. Caractéristique en charge……..……...……...…… 34

Problèmes chapitre 2…… 35

Corrigés problèmes ……..…… 37

Chapitre 2

GENERATRICES A COURANT CONTINU

2.1. Introduction

Les machines à courant continu sont essentiellement destinés pour fonctionner en moteur ; la génératrice en tant que machine a été totalement remplacée par des dispositifs électroniques statiques réalisant la conversion alternatif-continu(Redresseurs).Cependant il est intéressant de connaître le fonctionnement générateur et ceci, au moins, pour deux raisons :

- Pour maîtriser le fonctionnement moteur, il est intéressant d'assimiler le fonctionnement générateur.
- Lors de son fonctionnement, le moteur accouplé à sa charge, peut parfois, fonctionner en génératrice, afin de freiner cette charge. Par exemple, en traction électrique et dans le cas d'un métro en descente, la vitesse va se maintenir raisonnable grâce au freinage par récupération.

Pour que le f.e.m existe, il faut deux conditions :

- La machine doit être entrainée à une vitesse de rotation n (par exemple à l'aide d'un moteur auxiliaire) ;
- L'existence d'un champ magnétisant, donc l'inducteur doit être alimenté

Au chapitre précédent, on a déjà vu qu'il existe 4 modes d'alimentation de l'inducteur (on dit aussi excitation) : excitation séparée, excitation shunt, excitation série et excitation compound.

2.2. Caractéristiques usuelles

Les variables de fonctionnement d'une génératrice sont :

- La vitesse de rotation n
- Le courant d'excitation i
- La tension aux bornes de l'induit U
- Le courant d'induit I

Il en résulte, les caractéristiques usuelles suivantes :

- Caractéristiques à vide (ou interne) : $E_0 = f(i)$ à n= constante
- Caractéristiques en charge(ou externe) : $U = f(I)$ à n=constante et i=constant
- Caractéristiques de réglage : $i = f(I)$ à n=constante et U = constante

2.3. Génératrice à excitation indépendante ou séparée

L'excitation séparée est à la fois un avantage et un inconvénient. En effet, l'excitation est indépendante de la charge ce qui est souvent recherchée, mais elle nécessite une source de tension continue extérieure. En réglant le courant d'excitation on peut maintenir la tension constante en fonction de la charge, comme on peut faire le contraire en variant la tension de 0 à sa valeur nominale d'une manière continue. C'est grâce à cette dernière faculté, qu'elle est surtout employée pour l'alimentation des moteurs qui nécessitent des tensions variant dans de grandes limites tels que les groupes Ward-Léonard.

2.3.1. Schéma et équations de fonctionnement

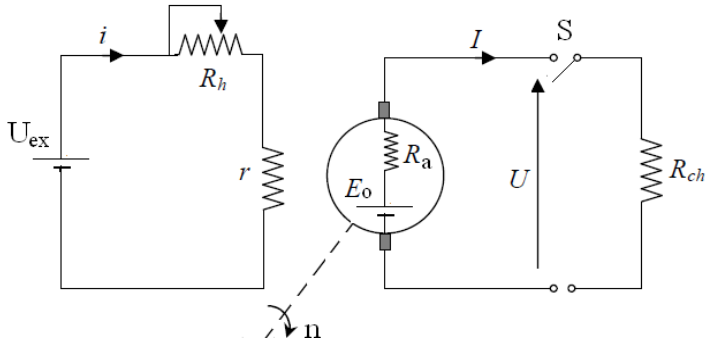


Figure 2.1. Génératrice à excitation séparée

U_{ex}: tension d'excitation ; *Rh* : Rhéostat d'excitation et *r* : résistance de l'enroulement inducteur

- ✓ Au niveau du circuit inducteur, on a :

$$U_{ex} = Rh + r \ .i = R_f.i \tag{2.1}$$

Avec R_f : résistance totale du circuit inducteur.

- ✓ Au circuit induit, tout en considérant le modèle déjà établi au chapitre précédent, on a:

$$U = E_o - \varepsilon(I) + e_B(I) + R_a.I \tag{2.2}$$

Avec R_a: résistance totale de l'induit et ε (*I*) : chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit.

2.3.2. Caractéristique à vide

C'est la courbe $E_0 = f(i)$ à n = constante

A vide (charge isolé, c.à.d S ouvert), tout en maintenant la vitesse constante ; on fait varier le courant d'excitation i et on relève la tension aux bornes de l'induit.

a) Allure de $E_0 = f(i)$ à n= constante

On a vu au chapitre 1 que la f.e.m à vide est donnée par $E_0 = k.n.\phi$

A vitesse constante $E_0 = k_n.\phi$

La caractéristiqueE_0=f(i)a la même allure que B = f (H) (Voir chap.1)

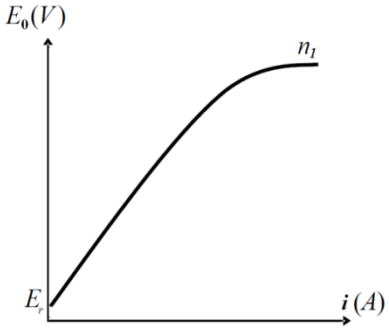


Figure 2.2. Caractéristique à vide

- Pour $i = 0$ ➔$E_0 = E_r$: f.e.m rémanente <<U_n(tension nominale lue sur la plaque signalétique)
- Pour les faibles valeurs de i le circuit magnétique n'est pas saturé E_0 est proportionnel à *i* donc $E_0 = f(i)$ est une droite.
- Pour des valeurs d'excitations importantes, le circuit magnétique va se saturer et l'accroissement de la f.e.m sera lente que précédemment $E_0 = f(i)$ présente donc une coude de saturation.
- A la saturation, même si on augmente l'excitation la f.e.m à vide E_0 ≈constante.

b) Prédétermination de $E_0 = f(i)$ à n_2 à partir de $E_0 = f(i)$ à n_1:

A *i* =constante (par exemple i_1), on vérifie que :

$$\frac{E_1}{n_1} = \frac{E_2}{n_2} \Rightarrow E_2 = \frac{n_2}{n_1}.E_1 \qquad (2.3)$$

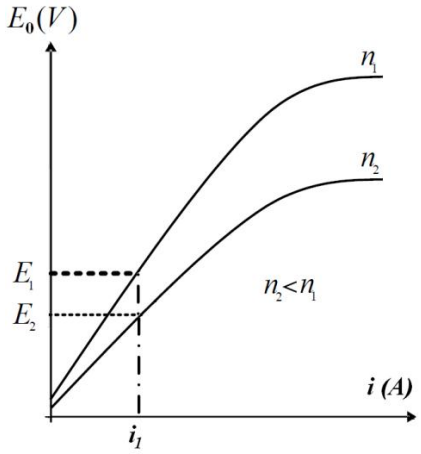


Figure 2.3. Caractéristique à vide pour deux vitesses

2.3.3. Caractéristiques en charge

a) Caractéristique externe

C'est la courbe $U = f(I)$ à n et i constantes.

En charge, on ferme l'interrupteur S (figure 1).

Pour relever cette caractéristique, on fait varier le courant *I* à l'aide d'une charge résistive R_{ch}et on relève la tension *U* aux bornes de l'induit tout en maintenant la vitesse *n* et l'excitation *i* constante. On obtient l'allure suivante :

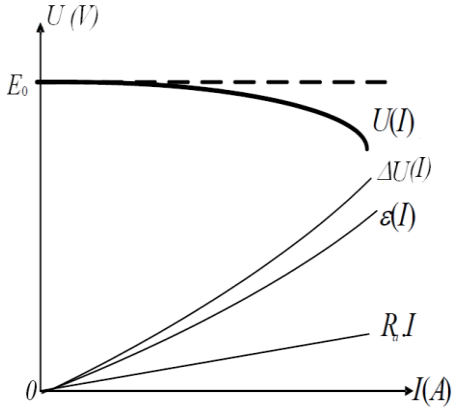


Figure 2.4. Caractéristique en charge

Pour un régime de fonctionnement en charge (pour *I* donné), la chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit est donnée par $\boldsymbol{\varepsilon(I) = E_0 - E_{ch}}$

Avec : $\mathbf{E_{ch}}$:f.e.m en charge ; $\mathbf{E_0}$:f.e.m à vide

La loi des mailles appliquée à l'induit nous donne :

$$U = E_o - \varepsilon(I) + e_B(I) + R_a.I = E_o - \Delta U \qquad (2.4)$$

- Lorsque *I* croit, la tension *U* diminue, donc *U*(*I*) est décroissante et s'incurve de plus en plus à cause de ε(*I*) (variation non linéaire).
- Puisque n et i constantes, $E_0(I) = cte$, c'est-à-dire horizontale qui sort de E_0.
- ΔU(*I*) est donc symétrique de *U*(*I*) par rapport à $\mathbf{E_0}/2$.
- On trace ε (*I*) à partir de ΔU(*I*) en retranchant la chute ohmique R_a.I.

b) Caractéristique de réglage

C'est la courbe $i=f(I)$ à $n = cte$ et $U = cte$.

On peut obtenir directement par l'expérience, les différentes valeurs de l'excitation permettant pour les différents courants I de maintenir la tension constante. L'allure est donnée ci-dessous.

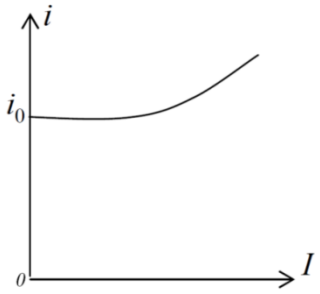


Figure 2.5. Caractéristique de réglage

- $i_0$est l'excitation produisant à vide $U_0 = E_0$
- Lorsque I augmente la tension U diminue.Pour maintenir U constante, on augmente i pour compenser la chute de tension ΔU.

La caractéristique $i=f(I)$ peut être encore prédéterminéeà partir des deux caractéristiques :$E_0=f(i)$ et $U=f(I)$

Soit I = I_1

$$I_1 \rightarrow U_1 \rightarrow \Delta U_1 = E_0 - U_1 \rightarrow E_{01} = E_0 + \Delta U_1 \rightarrow i_1$$

2.4. Génératrice à excitation shunt

2.4.1. Schéma et équations de fonctionnement

- Le circuit inducteur $Rh + r$ est branché en parallèle avec l'induit, d'où l'appellation shunt.
- Le courant induit dans ce cas est $I_a = I+i$, il est légèrement supérieur à I dans la charge.

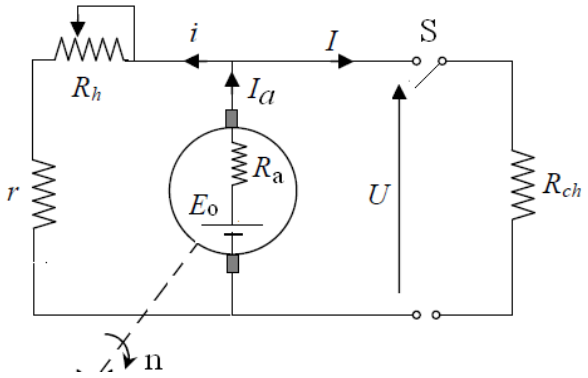


Figure 2.6. Génératrice à excitation shunt

La loi des mailles appliquée :

✓ Au circuit inducteur, nous donne :

$$U = \ Rh + r \ .i = R_f.i \qquad (2.5)$$

✓ Au circuit induit tout en considérant le modèle déjà établi au chapitre 1, nous donne :

$$U = E_o - \varepsilon(I) - R_a.I_a \qquad (2.6)$$

2.4.2. Problème d'amorçage

La génératrice est entrainée à sa vitesse nominale et excitée par son excitation nominale, elle est dit amorcée si elle délivre une tension de l'ordre de sa tension nominale. Si non, on dit que la génératrice est désamorcée. Ce problème doit être résolu à vide.

La génératrice est entrainée à vide, on ouvre le circuit inducteur (i=0) $\rightarrow$ U= E_r<< U_n, avec E_r désigne la f.e.m rémanente.

Lorsqu'on ferme le circuit inducteur, deux situations peuvent se présenter :

- Soit $U \nearrow \Rightarrow i = \dfrac{U}{Rh + r} \nearrow \Rightarrow \phi \nearrow \Rightarrow E_0 \nearrow \Rightarrow U \nearrow$ Amorçage
- Soit $U \searrow \Rightarrow i = \dfrac{U}{Rh + r} \searrow \Rightarrow \phi \searrow \Rightarrow E_0 \searrow \Rightarrow U \searrow$ Pas d'amorçage

Par conséquent, l'amorçage de la génératrice exige les conditions suivantes :

- Existence de la f.e.m rémanente
- La résistance du circuit inducteur soit ajustée à sa valeur minimale et ce en court circuitant le rhéostat de champ ($\boldsymbol{R_f \preceq R_{fc}}$)
- La vitesse d'entraînement soit suffisamment importante puisque la f.e.m lui est proportionnelle ($\boldsymbol{n \geq n_c}$).

Si ces conditions sont satisfaites et que la machine ne s'amorce pas c'est que le faible courant dû au champ rémanent a créé un flux antagoniste (de sens contraire) à celui du champ rémanent. Ce problème peut être évité :

- Soit en inversant le sens de rotation
- Soit en permutant les connexions entre induit et inducteur

2.4.3. Point de fonctionnement à vide

Tout d'abord on précise que $E_0 = f(i)$ 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.A vide le fonctionnement est régi par les deux relations:

$$\begin{cases} E_O = f(i) \\ E_O = Rh + r \ .i = R_f.i \end{cases} \tag{2.7}$$

La droite d'équation $\Delta = R_f.i$ est appelée : « droite des inducteurs ».

Pour qu'il y ait amorçage, il faut que les deux caractéristiques se coupent, donc $R_f$soit toujours inférieure à la valeur de la résistance totale du circuit inducteur pour laquelle la caractéristique à vide et la droite $R_{fc}.i$ n'ont pas de point commun (R_{fc}est la pente à l'origine de $E_0 = f(i)$).

D'après ces deux égalités, on voit que P_0 le point de fonctionnement à vide est l'intersection de $E_0 = f(i)$. et la droite des inducteurs $R_f.i$.

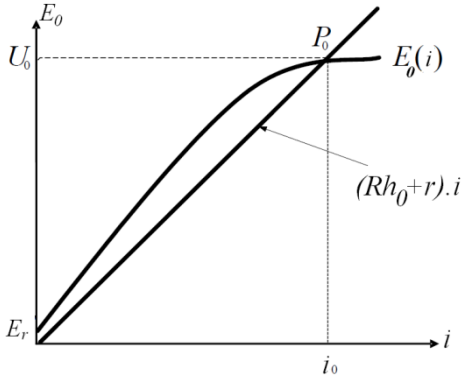


Figure 2.7. Point de fonctionnement

On peut déplacer le point de fonctionnement P_0 à vide par action sur Rh, soit sur la vitesse de rotation n.

✓ **Action sur le rhéostat d'excitation**

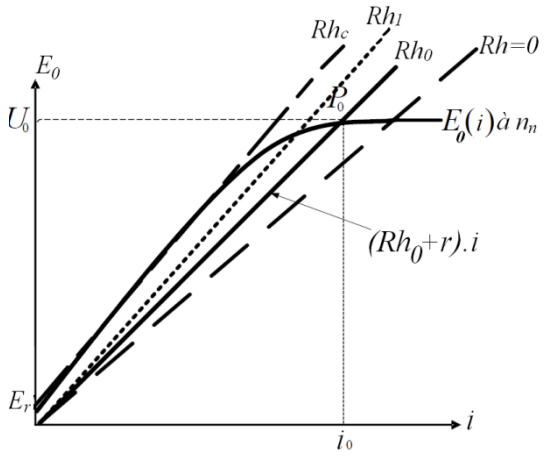


Figure 2.8. Déplacement de point de fonctionnement

- Si on augmente Rh, la droite des inducteurs va tourner vers l'axe des ordonnées et le point de fonctionnement se déplace sur $E_0=f(i)$ à gauche.
- A la limite de Rh = Rh_c (valeur critique), le point de fonctionnement n'est plus défini et la machine se désamorce.

On peut déterminer graphiquement Rh_c (dans la zone linéaire):

$$Rh_c = R_{fc} - r = \frac{\Delta E_0}{\Delta i} - r \tag{2.8}$$

✓ **Action sur la vitesse de rotation**

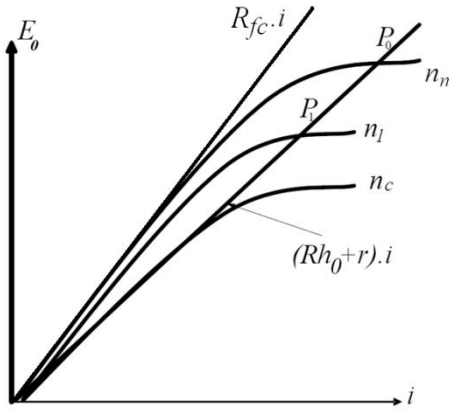


Figure 2.9. Action sur la vitesse

- En diminuant la vitesse n ; la caractéristique à vide va se déplacer par affinité vers le bas et le point de fonctionnement à vide va se déplacer aussi vers le bas sur la droite des inducteurs.
- A la limite pour une vitesse critique n_c la génératrice s'amorce, on démontre que :

$$n_c = \frac{R_{fo}}{R_{fc}}.n_n = \frac{Rh_o + r}{R_{fc}}.n_n \tag{2.9}$$

2.4.4. Caractéristique en charge

C'est la courbe *U= f(I)* à *n = cte* et *i = cte.*

On peut obtenir cette caractéristique :

- ✓ Soit directement par essai
- ✓ Soit graphiquement par construction de Picou

- **Essai direct**

On varie le courant I de la charge et on relève la tension U tout en gardant la vitesse de rotation et le courant d'excitation constant.

En charge, on a :

$$U = E_o - \varepsilon(I_a) + R_a.I_a = E_o - \Delta U \quad (2.10)$$

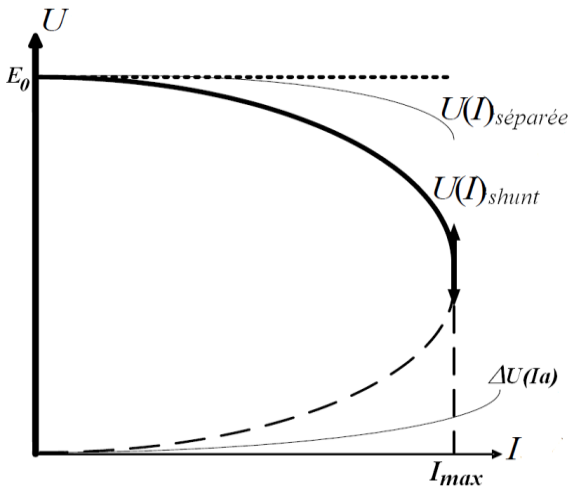


Figure 2.10. Caractéristique en charge

Dans ce cas, on remarque que:

- *U = f (I) shunt* est plus tombante que *U = f (I) séparée* car le courant de l'induit I_a pour une génératrice shunt est la somme du courant de charge I et celui de l'excitation i.
- Le courant débité présente un maximum, au delà du quel, la génératrice refuse sa charge: si l'on diminue encore la résistance de charge, le courant décroit en même temps que la tension.

- **Prédétermination par construction de Picou**

A partir de $E_0 = f(i)$ à $n = cte$ et $\Delta U(I)$ (ou encore separée $U = f(I)$) à la même vitesse, tracées à la même échelle de part et d'autre de l'axe des tensions ; on va pouvoir (sans faire l'essai) tracer la caractéristique en charge de la mémé génératrice lorsqu'elle fonctionnait à excitation shunt.

La marche à suivre est expliquée par la figure suivante :

$$Pour\ I_1 \rightarrow \Delta U_1 \rightarrow (Rh_1 + r).i + \Delta U_1 \rightarrow E_{01} \rightarrow U_1 = E_{01} - \Delta U_1$$

On refait cette démarche pour plusieurs courants I, on obtient les tensions correspondantes U(I).

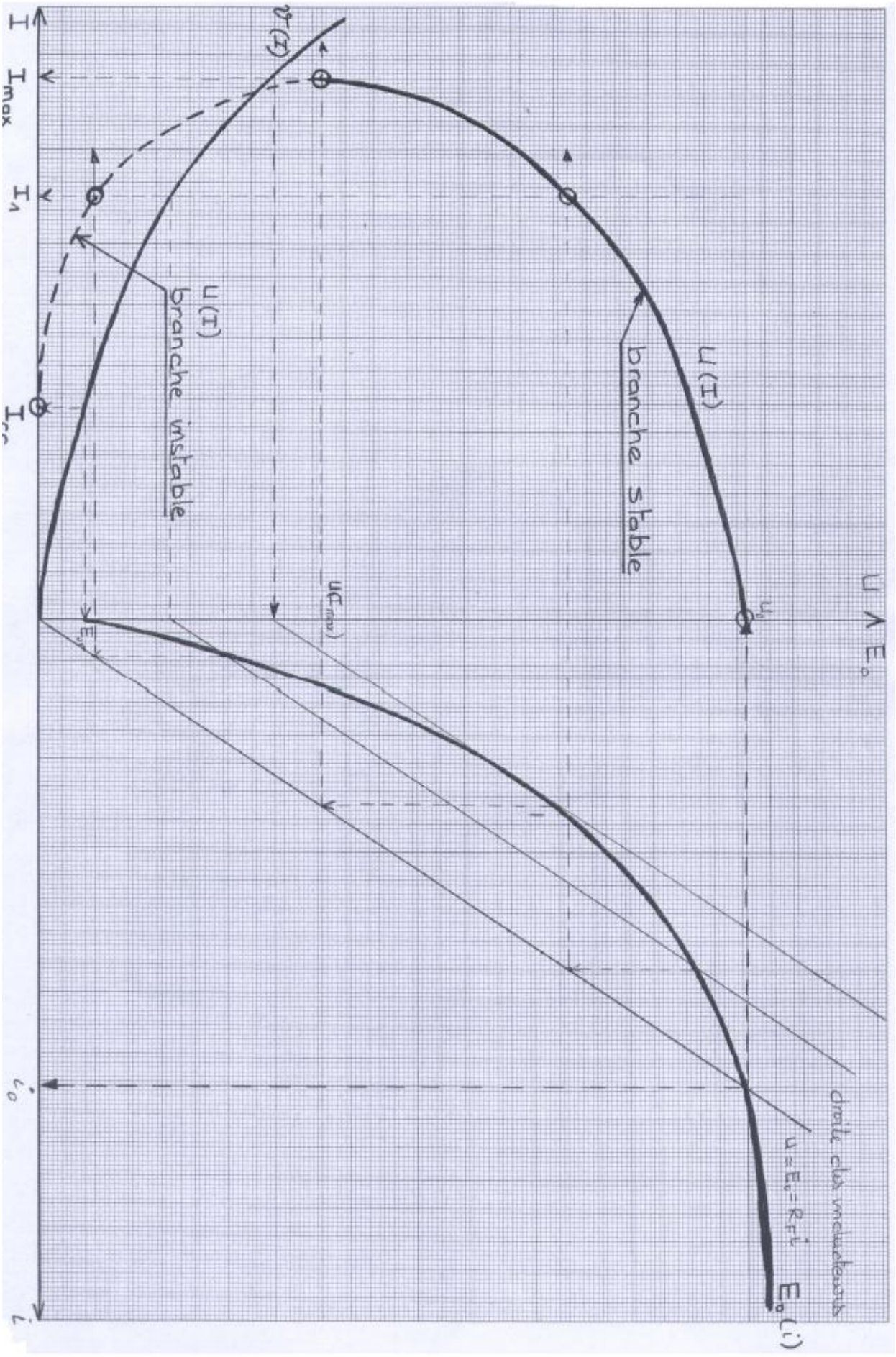


Figure 2.11. Construction de Picou

2.5. Génératrice à excitation série

2.5.1. Schéma et équations de fonctionnement

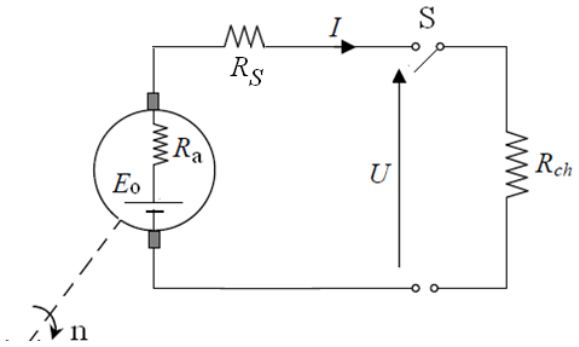


Figure 2.12. Génératrice à excitation shunt

L'inducteur, l'induit et la charge sont connectés en série donc l'inducteur est réalisé par un nombre réduit de spires de forte section et de résistance R_s.

En l'absence de charge, la génératrice ne peut donner que la tension due au champ rémanent.

La génératrice série est une machine auto-excitée qui ne peut s'amorcer que sous trois conditions:

- ✓ Existence d'une f.e.m rémanente,
- ✓ Le sens de rotation ou la connexion de l'inducteur soit de manière convenable pour que la f.e.m rémanente produise des effets qui s'ajoutent à ceux du flux rémanent,
- ✓ La résistance du circuit de charge soit inférieure à une résistance critique d'amorçage ce qui permettra d'obtenir un point de rencontre de la caractéristique en charge $U(I)$ et de la droite $(R_{ch}.I)$. La résistance critique d'amorçage est définie par la pente initiale de la caractéristique $U(I)$.

La loi de maille appliquée à la machine permet d'écrire les relations suivantes:

$$\begin{cases} U = E_o - \varepsilon \ I \ - \ R_s + R_a \ .I \\ \quad = E_o - \Delta U \\ \quad = R_{ch}.I \end{cases} \tag{2.11}$$

2.5.2. Caractéristique à vide

C'est la courbe $E_0=(I)$ à $n = cte$.

On peut obtenir cette caractéristique :

- ✓ Soit directement par essai en excitation séparée (dans ce cas, il faut utiliser un rhéostat d'excitation qui supporte le courant I).
- ✓ Soit graphiquement par déduction à partir de la caractéristique en charge $U=f(I)$ en retranchant la chute de tension $\Delta U=f(I)$.

2.5.3. Caractéristique en charge

C'est la courbe $U= f(I)$ à $n = cte$ et à courant d'excitation constant. Or,il n'est plus possible de prendre cette caractéristique car I est variable. On relève la caractéristique en charge $U(I)$ à $n$constante seulement.

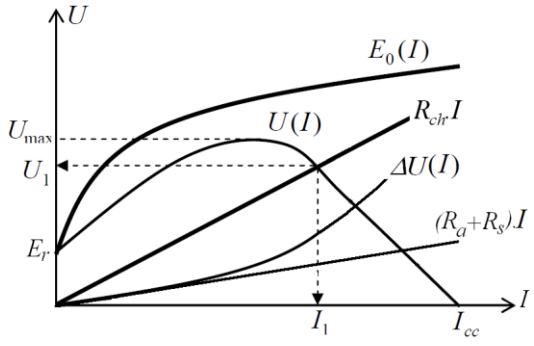
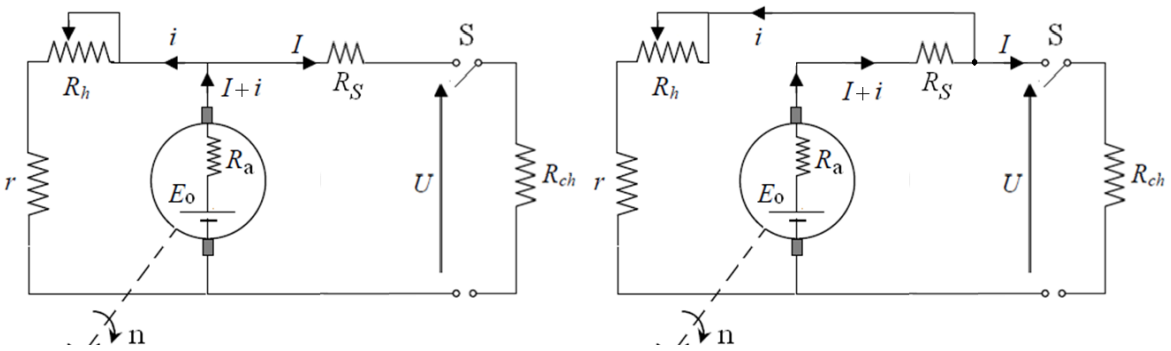


Figure 2.13. Caractéristiques d'une génératrice série

2.6. Génératrice à excitation composée (COMPOUND)

2.6.1. Schéma et équations de fonctionnement

Il s'agit toujours d'une génératrice à *excitation shunt* sur laquelle on a ajouté en plus quelques spires *d'excitation série*. Si les enroulements shunt sont directement connectés aux balais, la machine est dite à *courte dérivation*, si ces enroulements sont connectés en parallèle avec la charge, la machine est dite à *longue dérivation*.



(a) Montage courte dérivation (b) Montage longue dérivation

Figure 2.14. Génératrice à excitation composée (Compound)

Le flux total dans la machine est la résultante de deux flux inducteur, soit :

$$\phi_t = \phi_{sh} \pm \phi_s \tag{2.12}$$

Par conséquent, deux modes de fonctionnement sont à considérer :

- Si l'inducteur série produit un flux de même sens que celui de l'enroulement shunt ; la génératrice est dite à flux additif ($\phi_t = \phi_{sh} + \phi_s$).
- Par contre ; si le flux série agit en sens contraire, le fonctionnement est dit à flux soustractif ($\phi_t = \phi_{sh} - \phi_s$).

Pour ce type de machine, on définit :

Taux de compoundage

Le taux de compoundage est le rapport entre les ampères-tours série et les ampères-tours shunt de la machine au point de fonctionnement considéré.

Si N_S est le nombre de spires série et N_{sh} le nombre de spires shunt, I et i étant respectivement le courant dans l'inducteur série et dans l'inducteur shunt, on définit alors le rapport :

$$\alpha = \frac{N_s.I}{N_{sh}.i} \tag{2.13}$$

Rapport d'Equivalence

Le rapport d'équivalence βest le rapport entre le nombre de spires série et celui shunt. Sachant que $N_{sh}>>N_s$, ce rapport est pratiquement faible et ne dépassant pas les quelques %.

$$\beta = \frac{N_s}{N_{sh}} \tag{2.14}$$

Courant équivalent shunt

Il s'agit d'un courant purement fictif qui s'il traverserait l'inducteur shunt (l'inducteur série étant en circuit ouvert) produirait un flux équivalent à l'action simultanée des deux inducteurs shunt et série.

En appelant : $(I+i)$: le courant d'induit ; I' : le courant traversant l'inducteur série ; i : le courant d'inducteur shunt et i' : le courant équivalent shunt, Nous pouvons établir l'expression générale suivante : $i' = i \pm \beta.I'$.

Ainsi quatre expressions du courant équivalent shunt peuvent être distinguées suivant le fonctionnement de la génératrice compound, à savoir :

- Longue dérivation à flux additifs : $i' = i + \beta.\ I + i\ = \ 1 + \beta\ .i + \beta.I$
- Longue dérivation à flux soustractifs : $i' = i - \beta.\ I + i\ = \ 1 - \beta\ .i - \beta.I$
- Courte dérivation à flux additifs : $i' = i + \beta.I$
- Courte dérivation à flux soustractifs : $i' = i - \beta.I$

2.6.2. Caractéristique à vide

La caractéristique $E_0 = f(i)$ à $n = cte$ est identique à celle d'une génératrice shunt, puisque à vide, le courant de charge I est nul.

2.6.3. Caractéristique en charge

La caractéristique $U=f(I)$ à $n = cte$ et $i = cte$ dépend du compoundage considéré et la connexion de l'inducteur shunt. L'équation générale régissant le fonctionnement en charge est donnée par :

$$\begin{aligned} U &= E_t - R_a.\ I + i\ - R_s.I' \\ &= \ E_{sh} \pm E_s\ - R_a.\ I + i\ - R_s.I' \end{aligned} \tag{2.15}$$

Ainsi, on distingue quatre expressions de la tension selon le fonctionnement de la génératrice compound, à savoir :

- Longue dérivation à flux additifs : $U = E_{sh} + E_s - \ R_a + R_s\ .\ I + i$
- Longue dérivation à flux soustractifs : $U = E_{sh} - E_s - \ R_a + R_s\ .\ I + i$
- Courte dérivation à flux additifs : $U = E_{sh} + E_s - R_a.\ I + i\ - R_s.I$
- Courte dérivation à flux soustractifs : $U = E_{sh} - E_s - R_a.\ I + i\ - R_s.I$

Pour simplifier l'étude, on néglige le courant inducteur devant celui de la charge I, il vient :

$$U = E_{sh} \pm E_s - R_t.I \tag{2.16}$$

Avec : R_t est la résistance totale des deux enroulements induit et inducteur série ($R_t = R_a + R_s$).

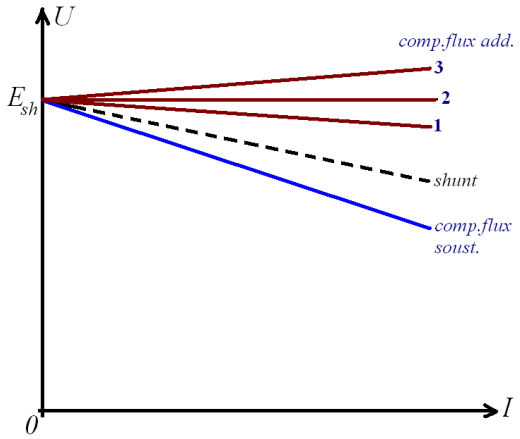


Figure 2.15. Caractéristiques en charge d'une génératrice Compound

A flux soustractif, la tension U diminue beaucoup avec la charge. Elle est plus faible que celle aux bornes d'unegénératrice shunt.

En compoundage additif, la caractéristique $U=f(I)$ est toujours au dessus de celle shunt. Elle peut prendre trois positions différentes selon la f.e.m E_s crée par l'inducteur série.

- Si $E_s < R_t.I$ (**Courbe 1**) ; la tension U diminue légèrement en fonction de la charge I.
- Si $E_s = R_t.I$ (**Courbe 2**) ; la tension U reste constante $\forall$ la charge.
- Si $E_s > R_t.I$ (**Courbe 3**) ; la tension U augmente légèrement en fonction de la charge.

Problèmes :

Problème 2.1 :

L'induit d'une génératrice à 6 pôles, 600 trs/min, contient 48 encoches dont chacune comporte 2 côtés de bobines. Chaque bobine est formée de 4 spires. L'enroulement est de type imbriqué et admet un nombre de voies égal à 6.

1°. Déterminer le nombre total de conducteurs sur l'induit.

2°. Sachant que le flux par pôle est de 0,04 Wb, calculer alors la valeur de la f.e.m induite aux bornes de cette génératrice.

Problème 2.2 :

Une génératrice à excitation indépendante fournit une f.e.m de 220 V pour un courant d'excitation de 3,5 A. La résistance de l'induit est de 90 mΩ.

Calculer la tension d'induit U lorsqu'elle débite 56 A dans le circuit de charge.

Problème 2.3 :

Sur une génératrice à excitation indépendante on a relevé la caractéristique en charge pour une vitesse de rotation n=1500 trs/mn et un courant d'excitation i=2 A.

I (A)	0	10	20	30	40
U (V)	240	235	229	222	213

1°. Sachant que la résistance de l'induit est R_a = 0,3 Ω, calculer pour chaque valeur du courant de charge la réaction de l'induit ε(I), puis tracer la courbe correspondante.

2°. Pour un courant I = 20 A, calculer :

a) La puissance utile

b) Les pertes joules dans l'induit et dans l'inducteur si la tension de l'inducteur est V_f = 110 V.

c) Le rendement de la machine, sachant que les pertes constantes sont Pc=275 W.

Problème 2.4 :

Une génératrice séparée délivre une f.e.m constante de 210 V pour un courant inducteur de 2 A.

Les résistances des enroulements induit et inducteur sont respectivement 0,6 Ω et 40 Ω.

Les pertes « constantes » sont de 400 W.

En supposant que la machine est compensée et pour un débit de 45 A, calculer :

1°. La tension aux bornes de l'induit U

2°. La puissance utile Pu

3°. Les pertes Joule induit et inducteur

4°. Le rendement η

Problème 2.5 :

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

11,2 Nm/1500 tr/min induit 220 V/6,8 A excitation 220 V/0,26 A

Calculer pour le fonctionnement nominal.

1°. La puissance mécanique consommée.

2°. La puissance consommée par l'excitation.

3°. La puissance utile.

4°. En déduire le rendement nominal.

Problème 2.6 :

Une génératrice à excitation shunt est entrainée à vide à la vitesse 1500 trs/mn. La variation du courant inducteur est obtenue en agissant sur un rhéostat d'excitation de résistance *Rh* mis en série avec l'enroulement inducteur de résistance r = 50 Ω.

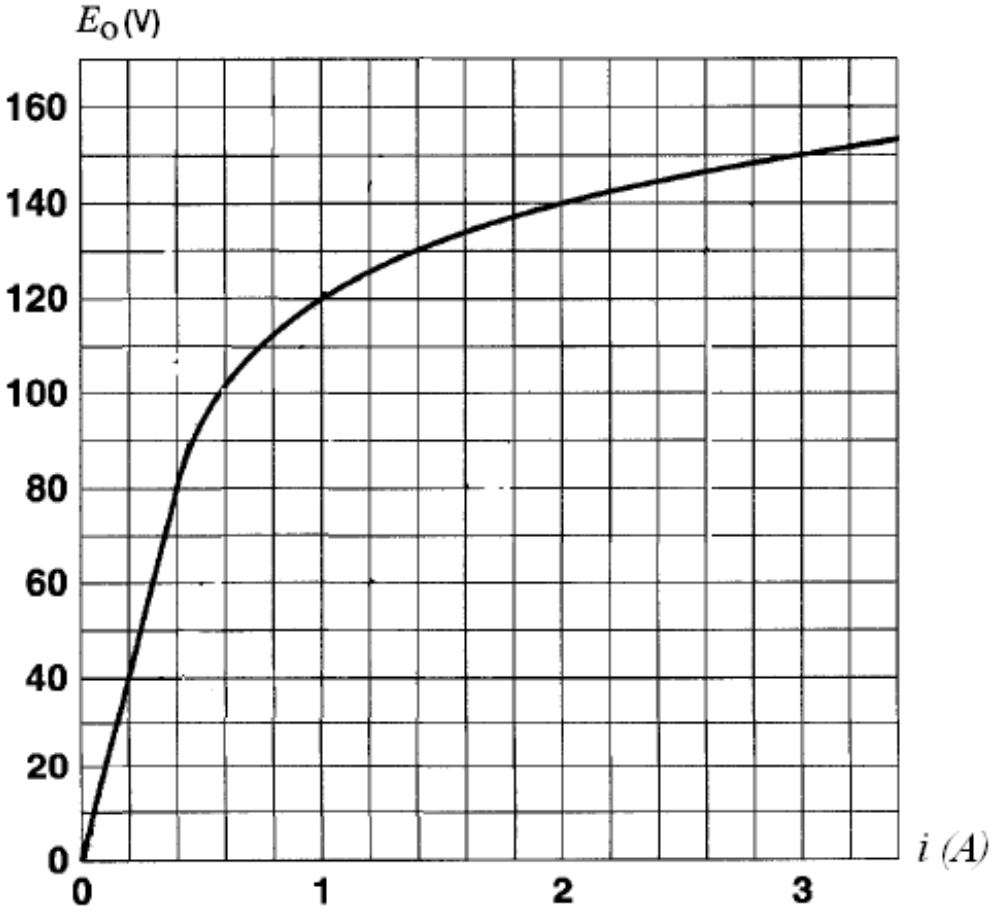
1°. En utilisant la caractéristique à vide, déterminer la f.e.m induite E_0 et le courant d'excitation dans les cas suivants :

a) Sans rhéostat *Rh*.

b) Le rhéostat *Rh* est mis sur la position 70 Ω.

2°. pour une vitesse de 1500 trs/mn, déterminer la valeur de la résistance critique R_{fcr}.

3°. Lorsque le rhéostat *Rh* est mis sur la position 70 Ω, quelle sera alors la valeur de la vitesse critique n_{cr} ?



Problème 2.7 :

Un générateur à courant continu dont l'induit ayant une f.e.m E_0=220 V et une résistance interne R_a=0,2 Ω débite un courant I=50 A lorsqu'il alimente une résistance R connectée en parallèle avec un moteur M.

Le moteur, de résistance interne R_M=0,2 Ω, absorbe une puissance P_M=8400 W.

Calculer:

1°. la tension U aux bornes du générateur.

2°. la puissance électrique utile PU fournie par le générateur au circuit extérieur;

3°. l'intensité IM du courant dans le moteur;

4°. la force contre-électromotrice E' du moteur ;

5°. l'intensité IR du courant dans la résistance R;

6°. la valeur de la résistance R.

Problème 2.8 :

On dispose d'une génératrice à courant continu dont la plaque signalétique porte les indications suivantes: n_n=1500 trs/mn; U_n= 220V; I_n=12A

En excitation séparée, et à la vitesse nominale, on a relevé les caractéristiques à vide $E_0(i)$ et en charge U(I) suivantes:

i (A)	0	0.25	0.5	0.75	1	1.5
E_0 (V)	20	180	238	270	284	300

I (A)	0	5	10	15	20
U (V)	278	260	242	216	186

A-Génératrice à excitation séparée

1°. Déterminer le courant d'excitation lors de l'essai en charge.

2°. Tracer U(I), $E_0(i)$ et $\Delta U(I)$ à 1500 trs/mn

B-Génératrice à excitation Shunt

1°. Quelle est la valeur de r de la résistance de l'enroulement inducteur sachant qu'en excitation shunt à 1500 tr/mn la tension à vide U_0=294V.

2°. Donner la valeur de la résistance critique du circuit inducteur R_{fcr} provoquant le désamorçage à 1500 tr/mn.

3°. Quelle sera la valeur du rhéostat d'excitation Rh_{cr} qui provoque le désamorçage à 1000 tr/mn

4°. Tracer la caractéristique en charge U(I) à 1500 tr/mn lorsque le rhéostat d'excitation vaut 100 Ω, En déduire le courant maximal de l'induit.

Corrigés :

Corrigé prob 2.1 :

1°/ On a: 2 côtés de bobine/encoche, 48 encoches, 4 spires/bobine et chaque spire comprend 2 conducteurs. Le nombre total de conducteurs sur l'induit est donc:

Nb cotés = 48 x 2 = 96 → nb de bobines = 96/2 = 48 bobines

nb de spires = 48 x 4 = 192 spires

Nb cond = 192 x 2 cond/spire = **384 cond**

2°/ La f.e.m induite de l'induit est:

E_0 = (p/a).N.n.Φ = (3/3) x 384 x (600/60) x 0,04 = **153,6 V**

Corrigé prob 2.2 :

On a : E_0 = 220 V pour i= 3,5 A. R_a= 90 mΩ.

La tension d'induit U lorsque la génératrice débite 56 A dans le circuit de charge est :

$$U = E_0 - R_a.I = 220 - 56 \times 0,09 = 215\ V$$

Corrigé prob 2.3 :

Pour n=1500 trs/mn et i=2 A, on a :

I (A)	0	10	20	30	40
U (V)	240	235	229	222	213

1°/ la RMI est : $\varepsilon(I) = \frac{p}{a}.N.n.\Delta\phi = \frac{p}{a}.N.n.\ \phi_0 - \phi\ = E_0 - E$

Avec : E_0 : f.e.m à vide et E : f.e.m en charge.

D'autre part, on a : $E = E_0 - \varepsilon(I) = U + R_a.I \Rightarrow \varepsilon(I) = E_0 -\ U + R_a.I$

A.N : * Pour I=0, E = E_0 = 240+0,3 x 0 =240 V et ε(I) = 0 V.

* Pour I=10, ε(I) = 240-(235+0,3x10)=240-238 =2 V.

I (A)	0	10	20	30	40
U (V)	240	235	229	222	213
ε(I)	0	2	5	9	15

2°/ **a)** $P_u = U.I = 229 \times 20 = 4580\ W$

b) $P_{jI} = R_a.I^2 = 0,3 \times 20^2 = 120\ W$ et $P_{ji} = V_f.i = 110 \times 2 = 220\ W$

c) $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_{jI} + P_{ji} + P_c} = \frac{4580}{4580 + 120 + 220 + 275} = 88\ \%$

Corrigé prob 2.4 :

on a : E_0= 210 V pour i= 2 A.

R_a = 0,6 Ω et r = 40 Ω.

P_c = 400 W.

Machine compensée, c. à.d ε(I)=0 d'où E=E_0.

Pour I= 45 A, on a :

5°. La tension d'induit est :

$$U = E_0 - R_a.I = 210 - 0,6 \times 45 = 183\ V$$

6°. La puissance utile est :

$$P_u = U.I = 183 \times 45 = 8,235\ KW$$

7°. Les pertes Joule induit et inducteur sont respectivement:

$$P_{jI} = R_a.I^2 = 0,6 \times 45^2 = 1215\ W; P_{ji} = r.i^2 = 40 \times 2^2 = 160\ W$$

8°. Le rendement de la machine est:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u} = \frac{P_u}{P_u + P_{jI} + P_{ji} + P_c} = \frac{8,235}{10,01} = 82,3\ \%$$

Corrigé prob 2.5 :

Sur la plaque signalétique on a: 11,2 Nm/ 1500 tr - 220 V/ 6,8 A - 220 V /0,26 A

Pour le fonctionnement nominal ; on aura :

5°. La puissance mécanique consommée est :

$$P_m = \Gamma_n.\Omega_n = \Gamma_n.2\pi.n_n = 11,2 \times 2\pi \times \frac{1500}{60} = 1759\ W$$

6°. La puissance consommée par l'excitation est :

$$P_{ji} = V_f \times i = 220 \times 0,26 = 57\ W$$

7°. La puissance utile est :

$$P_u = U \times I = 220 \times 6,8 = 1496\ W$$

8°. Le rendement nominal est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_m + P_{ji}} = \frac{1496}{1759 + 57} = 82,4\ \%$$

Corrigé prob 2.6 :

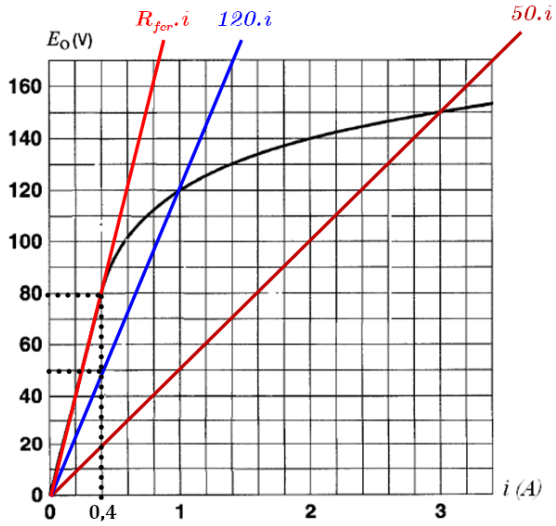
1°. En utilisant la caractéristique à vide, on a :

a) *Pour Rh=0* Ω, R_f= r+*Rh* = 50+0 = 50 Ω

La droite inducteur (R_f .*i*) coupe la caractéristique E_0 *(i) au point : (E_0 =150V, i=3A)*

b) *Pour Rh* = 70 Ω, R_f= r+*Rh* = 50+70 = 120 Ω

La droite inductrice (Rf.i) coupe la caractéristique E_0 *(i) au point :(E_0 =120V, i=1A)*



2°. Pour une vitesse de 1500 trs/mn, la valeur de la résistance critique ***R_{fcr}*** est telle que la droite de l'inducteur est tangente à la caractéristique ***E_0(i).***

Dans ce cas, on a : Pour *i=0,4 A, E_0= 80 V, donc : R_{fcr} = (80/0,4) = 200 Ω.*

3°. Lorsque le rhéostat *Rh* est mis sur la position 70 Ω, on a : R_f *= 120* Ω.

La valeur de la vitesse critique n_{cr} est tel que la droite de l'inducteur est tangente à la nouvelle caractéristique E_{02}(i) obtenue à la vitesse n_{cr}. Dans ce cas:

$$Pour\ i = cte, on\ a : \begin{cases} n_1 \rightarrow E_{01} \\ n_{cr} \rightarrow E_{02} \end{cases} \Rightarrow n_{cr} = n_1.\frac{E_{02}}{E_{01}}$$

$$A.N : Pour\ i = 0,4A, on\ a : \begin{cases} 1500 \rightarrow E_{01} = 80V \\ n_{cr} = ? \rightarrow E_{02} = 48V \end{cases} \Rightarrow n_{cr} = 1500 \times \frac{48}{80} = 900\ trs/mn$$

Corrigé prob 2.7 :

Générateur : E_0= 220 V, R_a = 0,2 Ω ,
Charge : Résistance R : U, I_R
Moteur M : R_M = 0,2 Ω , U, P_M = 8400 W
Pour I= 50 A, on a :

1°. La tension d'induit est :

$$U = E_0 - R_a.I = 220 - 0,2 \times 50 = 210\,V$$

2°. La puissance utile est :

$$P_u = U.I = 210 \times 50 = 10,5\,KW$$

3°. Le courant absorbé par le moteur est :

$$I_M = \frac{P_M}{U} = \frac{8400}{210} = 40\,A$$

4°. La f.c.e.m du moteur est :

$$E' = U - R_M.I_M = 210 - 0,2 \times 40 = 202\,V$$

5°. L'intensité du courant dans la résistance R est :

$$I_R = I - I_M = 50 - 40 = 10\,A$$

6°. La valeur de la résistance R est :

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{210}{10} = 21\,\Omega$$

Corrigé prob 2.8 :

A-Génératrice à excitation séparée

1°. Lors de l'essai en charge, et lorsque I = 0 A, on a : U = E_0 = 278 V. Cette f.e.m correspond à un courant d'excitation i ∈ [0.75 ; 1 A]. cette valeur est obtenue graphiquement à partir de la caractéristique à vide E_0 = f(i). on obtient :*(Pour E_0 = 278 V, i = 0.9 A)*

2°. La chute de tension totale ΔU est donnée par :

$$\Delta U = E_0 - U = 278 - U$$

I (A)	0	5	10	15	20
U (V)	278	260	242	216	186
ΔU(V)	0	18	36	62	92

Les caractéristiques: U(I), E_0(i) et ΔU(I) à 1500 trs/mn, sont représentées sur papier millimétré.

B-Génératrice à excitation Shunt

1°. En excitation shunt et à vide la résistance du circuit d'inducteur est ajusté à sa valeur minimale qui est égale à celle du bobinage inducteur ***r***.

Sachant de plus que dans ces conditions on a ***I_0 = i*** (excitation shunt à vide) et que l'équation de la génératrice s'écrit :

U_0 = E- R_a .I_0= r.i, or : ***I_0<< I_{nom}*** d'où, on peut écrire :*U_0 = E_0 = r.i*

D'où, à 1500 tr/mn, on a E_0 = 294 V → à partir de E_0(i), on obtient i = 1.25A

La valeur de la résistance de l'enroulement inducteur r est tel que :

$$r = \frac{U_0}{i} = \frac{294}{1,25} = 235\,\Omega$$

2°. Pour une vitesse de 1500 trs/mn, la valeur de la résistance critique ***R_{fcr}***est telle que la droite de l'inducteur est tangente à la caractéristiqu***e E_0(i).***

Dans ce cas, on a : Pour ***i=0,2 A, E_0= 150 V***, donc : $R_{fcr} = \frac{150}{0,2} = 750\,\Omega$

3°. Le calcul de la valeur du rhéostat de champ **Rh** qui provoquerait le désamorçage à 1000 tr/mn passe tout d'abord par celui de la résistance critique à cette même vitesse R'_{fcr}. On a :

$$R'_{fcr} = R_{fcr} \cdot \frac{1000}{1500} = 500\ \Omega$$

Donc à 1000 tr/mn, le désamorçage est provoqué pour une résistance du circuit inducteur(r+Rh)≥R'_{fcr} d'où : $Rh_{cr} = R'_{fcr} - r = 551 - 235 = 265\ \Omega$

4°. Lorsque le rhéostat d'excitation vaut 100 Ω, on a:

$$R_f = r + Rh = 235 + 100 = 335\ \Omega$$

L'intersection de la droite des inducteurs (***R_f.i***) et la caractéristique à vide ***E_0 (i)*** donne ***E_0= 274 V.***

La caractéristique en charge U(I) à 1500 tr/mn est prédéterminée graphiquement (construction de Picou) moyennant les caractéristiques ***E_0 (i) et R_f.i.***

Le courant maximal de l'induit est : ***I_{max} = 20A***

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 3 : MOTEURS A COURANT CONTINU

1. Introduction 42

2. Principe de fonctionnement moteur 42

3. Modèle et équations d'un moteur à cc 43

4. Moteur à excitation shunt 43

4.1. PROBLEME D'EMBALLEMENT 44

4.2. DEMARRAGE D'UN MOTEUR SHUNT 44

4.3. FONCTIONNEMENT SOUS TENSION CONSTANTE 45

4.4. FONCTIONNEMENT SOUS TENSION REGLABLE 48

4.5. BILAN DES PUISSANCES ET RENDEMENT 49

5. Moteur à excitation série 49

5.1. SCHEMA ET EQUATION DE FONCTIONNEMENT 49

5.2. CARACTERISTIQUE DE VITESSE 50

5.3. CARACTERISTIQUE DE COUPLE 50

5.4. CARACTERISTIQUE MECANIQUE 51

5.5. PROBLEME D'EMBALLEMENT 51

5.6. DEMARRAGE D'UN MOTEUR SERIE 52

5.7. BILAN DES PUISSANCES ET RENDEMENT 52

6. Moteur compound 52

6.1. CARACTERISTIQUE DE VITESSE 53

6.2. CARACTERISTIQUE DE COUPLE 54

Problèmes chapitre 3 55

Corrigés 58

Chapitre 3

MOTEURS A COURANT CONTINU

1. Introduction

Le moteur à courant continu était l'actionneur électromécanique le plus employé dans les applications générales des entraînements des machines et dans les applications à vitesse variable (la traction avec les locomotives, la propulsion avec les navires, et les servomécanismes de grandes performances avec les machines-outils et les robots).

Depuis quelques années, à cause des coûts de fabrication élevés, d'un entretien important (avec le collecteur et les balais) et l'apparition des groupes moto-variateurs alternatifs performants, le moteur à courant continu est délaissé dans certaines applications.

Cependant il garde une place importante dans les applications industrielles ou le positionnement et la précision sont importants.

2. Principe de fonctionnement moteur

L'inducteur de la machine étant excité, suite à l'alimentation du circuit d'induit par une tension continue, des forces de Laplace s'exerceront sur les conducteurs de l'induit et l'entraîne en rotation : c'est le fonctionnement moteur. La rotation de l'induit engendre la naissance d'une f.c.e.m qui tend à réduire le courant dans l'induit (Loi de Lenz) :

$$E' = \frac{P}{a}.N.n.\phi = k.n.\left(\phi_0 - \Delta\phi\right) = E'_0 - \varepsilon(I) \qquad (3.1)$$

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il suffit d'inverser soit le sens du courant dans le circuit d'inducteur ou bien dans celui de l'induit.

La relation fondamentale de la dynamique pour le moteur en rotation s'écrit :

$$J\frac{d\Omega}{dt} = \sum couples = \Gamma_{em} - \Gamma_u - \Gamma_p \qquad (3.2)$$

Avec:

Γ_{em} : le couple électromagnétique;

Γ_u : le couple de charge;

Γ_p : le couple de perte;

Γ_r : le couple résistant;

Hypothèse

Pour simplifier l'étude, on suppose que la machine est parfaitement compensée (la réaction magnétique de l'induit est négligée $\varepsilon(I)=0$) ; il en découle :

(flux en charge = flux à vide), c.à.d : $\phi_{ch} = \phi_0 = \phi$, alors : $E'_{ch} = E'_0 = E'$.

3. Modèle et équations d'un moteur à cc

En considérant l'hypothèse précédente, le modèle de l'induit se simplifie pour devenir :

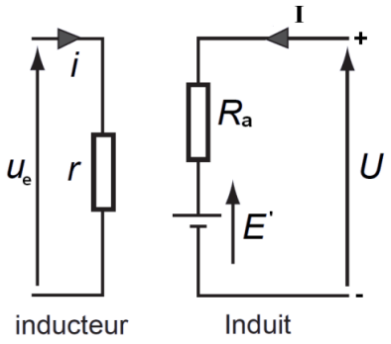


Figure 3.1. Modèle équivalent d'un moteur à cc

Au niveau de l'induit, on a:

$$U = E' - R_a.I \tag{3.3}$$

Le couple électromagnétique est :

$$\Gamma_{em} = \frac{E'.I}{\Omega} = \frac{k.n.\phi.I}{2\pi.n} = \frac{k\phi}{2\pi}.I \tag{3.4}$$

Sur l'arbre moteur, le couple utile s'écrit :

$$\Gamma_u = \Gamma_{em} - \Gamma_p = \frac{p_c}{\Omega} \tag{3.5}$$

La vitesse de rotation est donnée par la relation :

$$n = \frac{E'}{k\phi} = \frac{U - R_a.I}{k\phi} \tag{3.6}$$

4. Moteur à excitation shunt

- Le circuit inducteur (*Rh + r)* est branché en parallèle avec l'induit, d'où l'appellation shunt.
- Le courant induit est *I*= I_a - *i*, légèrement inferieur à $I_a$de la ligne.

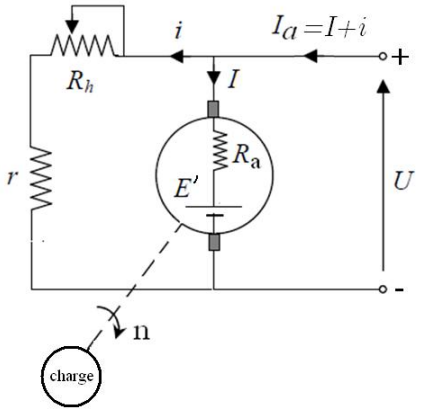


Figure 3.2. Moteur à excitation shunt

La tension d'alimentation U est commune pour les deux circuits ; induit et inducteur, ce qui donne :

$$i = \frac{U}{Rh + r} \tag{3.7}$$

La vitesse de rotation étant donnée par la relation (3.6). Cette dernière relation montre que la vitesse varie en fonction de trois grandeurs; la tension U, le flux ϕ (donc le courant d'excitation) et le courant de charge I.

4.1. Problème d'emballement

Théoriquement, dans la relation (3.6); si l'intensité du courant dans l'inducteur s'annule (donc le flux) ; la vitesse va tendre vers l'infini. Pratiquement, la machine garde un flux rémanent qui n'est pas nul, mais égale à une valeur trop faible ($\phi=\phi_r$). Suite à une coupure dans le circuit d'excitation, et en présence de la tension U, la vitesse de rotation du moteur prend une valeur importante et on risque de détériorer les organes mécaniques de la machine. Ce phénomène est appelé ***emballement***.

Une coupure dans le circuit d'excitation avec présence de l'alimentation de l'induit, entraîne alors l'emballement du moteur. Pour éviter ce risque, il faut toujours alimenter l'inducteur avant l'induit et ne jamais ouvrir le circuit inducteur lorsque le moteur est en fonctionnement.

4.2. Démarrage d'un moteur shunt

a) Problématique

D'après la relation (3.3), l'intensité du courant dans l'induit est :

$$I = \frac{U - k.n.\phi}{R_a} \tag{3.8}$$

Au démarrage, la vitesse de rotation est nulle (n=0) donc E'=0. Le courant de démarrage n'est limité que par la résistance de l'induit qui est généralement faible :

$$I_{dém} = \frac{U}{R_a} \tag{3.9}$$

De même, le couple de démarrage est aussi très important et pas forcément toléré par les organes mécaniques:

$$\Gamma_{dém} = \frac{k\phi}{2\pi}.I_{dém} = \frac{U.k\phi}{2\pi.R_a} \tag{3.10}$$

Donc, si on applique la pleine tension aux bornes de l'induit, le courant sera trop fort et on risque de détériorer l'induit. Pour limiter le courant de démarrage $I_{dém}$, on utilise généralement un démarreur, un variateur de vitesse ou on insère un rhéostat de démarrage Rh_d en série avec l'induit de la machine. La procédure de démarrage s'effectue de telle sorte qu'on démarre avec Rh_d maximale, puis au fur et à mesure que la vitesse augmente, on diminue Rh_d jusqu'à ce qu'elle sera court-circuitée.

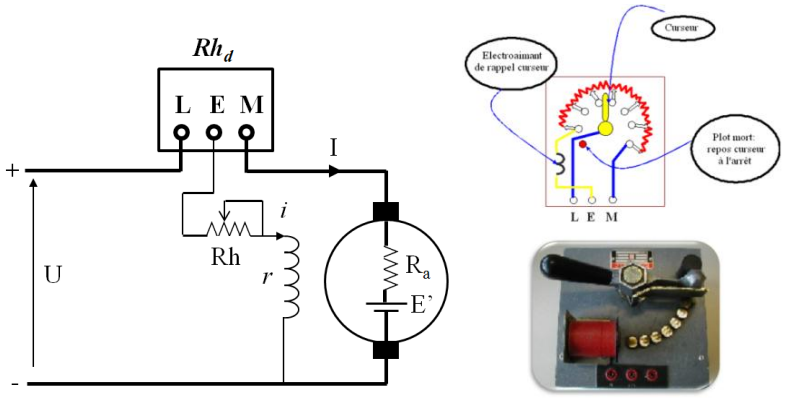


Figure 3.3. Moteur à excitation shunt muni d'un rhéostat de démarrage

b) Choix de la valeur du rhéostat de démarrage

On a déjà vu que Γ et *I* sont proportionnels, donc $\Gamma_{dém}$ et $I_{dém}$ sont aussi proportionnels et par conséquent :

$$\begin{cases} I_{dém} = \dfrac{U}{R_a + Rh_d} \\ \Gamma_{dém} = \dfrac{k\phi}{2\pi}.I_{dém} = \Gamma_n.\dfrac{I_{dém}}{I_n} \end{cases} \quad (3.11)$$

Pour garantir le décollage ; on a toujours intérêt à démarrer avec : $I_{dém} > I_n$.

En effet le moteur ne peut démarrer que si $\Gamma_{dém} > \Gamma_{rdém}$ (couple résistant de décollage).

Pour ce faire, il faut:

- Maintenir le flux Φ à sa valeur maximale.
- Admettre un courant supérieur à I_{nom}, généralement ($\mathbf{I_{dém} \in [1.5 \div 2.5].I_n}$).

La valeur du rhéostat de démarrage doit être :

$$\left(\frac{U}{2,5.I_n} - R_a\right) \leq Rh_d \leq \left(\frac{U}{1,5.I_n} - R_a\right) \quad (3.12)$$

Au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse, la f.c.e.m augmente et le courant se stabilise à sa valeur nominale :

$$I = \frac{U - E'}{R_a + Rh_d} \quad (3.13)$$

4.3. Fonctionnement sous tension constante

a) Caractéristique de vitesse

Lorsque la charge augmente (I augmente), la vitesse varie selon la loi (3.6) :

Si on maintient le courant d'excitation *i* à une valeur donnée, le flux inducteur sera par conséquent ϕ= *cte*.

R et *U* étant aussi constants. La caractéristique de vitesse aura donc la forme d'une droite de pente négative très faible:

$$n = \frac{U}{k\phi} - \frac{R_a}{k\phi}.I = n_{oo} - A.I \quad (3.14)$$

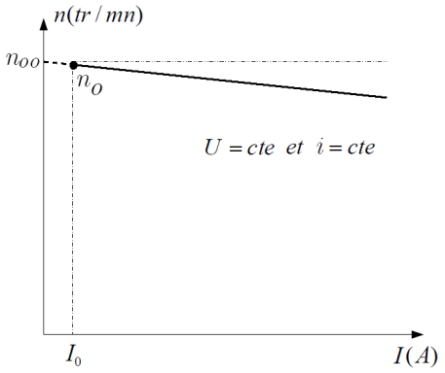


Figure 3.4. Caractéristique de vitesse d'un moteur shunt

Remarque :

- A vide le moteur absorbe un courant I_0 très faible et sa vitesse donnée par (3.14) est $n_0 < n_{00}$
- En charge lorsque I augmente, la vitesse n diminue légèrement.

En conclusion, à tension d'induit et excitation constantes ; un moteur shunt (ou à excitation séparée) présente une vitesse presque constante.

b) Caractéristique de couple

En fonction de la charge, le couple s'écrit:

$$\Gamma_{em} = \frac{k.\phi}{2\pi}.I = k_m.I \qquad (3.15)$$

La caractéristique de couple a la forme d'une droite de pente positive $k_m = \frac{k.\phi}{2\pi}$.

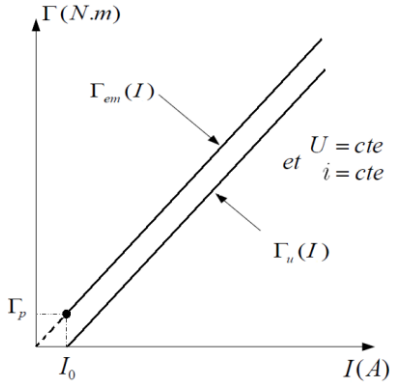


Figure 3.5. Caractéristique de couple d'un moteur shunt

Remarque :

- A vide le moteur absorbe un courant I_0, la puissance utile est nulle, le couple est par conséquent égal à : $\Gamma_{em0} = \frac{k.\phi}{2\pi}.I_0 = \Gamma_p$, avec Γ_p :couple de pertes constantes
- En charge lorsque I augmente, le couple électromagnétique augmente proportionnellement.

  Sachant que : $\Gamma_u = \Gamma_{em} - \Gamma_p$; la caractéristique de couple utile Γ_u est aussi une droite // à Γ_{em} qui sort de I_0 , puisque à vide le couple utile est nulle.

c) Caractéristique mécanique

En remplaçant le courant I par son expression (3.8) dans la relation (3.15), on obtient :

$$\Gamma_{em} = \frac{U.k\phi}{2\pi R_a} - \frac{(k\phi)^2}{2\pi R_a}.n = \Gamma_{dém} - B.n \qquad (3.16)$$

La caractéristique mécanique (3.16) est une droite de pente négative $\frac{(k\phi)^2}{2\pi R_a}$ très proche de la verticale, et de valeur à l'origine : $\Gamma_{dém} = \frac{U.k\phi}{2\pi R_a}$

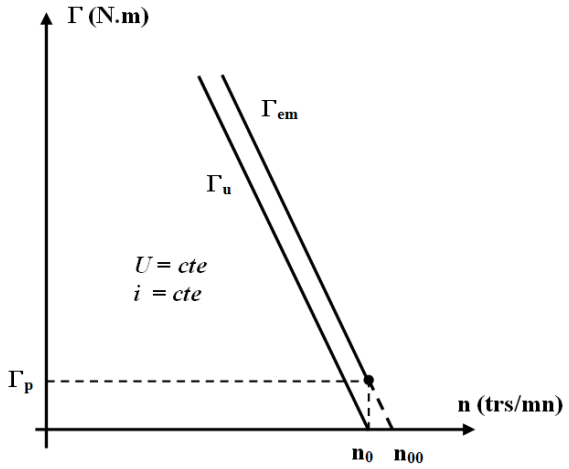


Figure 3.6. Caractéristique mécanique d'un moteur shunt

La caractéristique mécanique peut être déterminée à partir des deux caractéristiques électromagnétiques, soit :

$$Pour\ I_1\ donné \left| \begin{array}{l} n = f(I) \ \rightarrow n_1 \\ \Gamma_{em} = f(I) \rightarrow \Gamma_{em1} \end{array} \right.$$

En pratique, on relève généralement la caractéristique ***n=f(I)*** et on déduit les deux autres. Connaissant U et R_a. Pour chaque couple de valeurs (***I, n***) ; on détermine le couple de la manière suivante :

$$\Gamma_{em} = \frac{k.\phi}{2\pi}.I = \frac{U.I - R_a.I^2}{2\pi.n}.60 \qquad \text{Avec : } n \text{ en trs/mn}$$

d) Point de fonctionnement en charge

- La caractéristique mécanique de la charge $\Gamma_r = f(n)$ est une donnée, et elle dépend uniquement de la nature de la charge.
- Le point de fonctionnement est donné par l'intersection des deux caractéristiques $\Gamma_r = f(n)$ et $\Gamma_u = f(n)$, car en régime permanent, on a égalité entre ces deux couples.

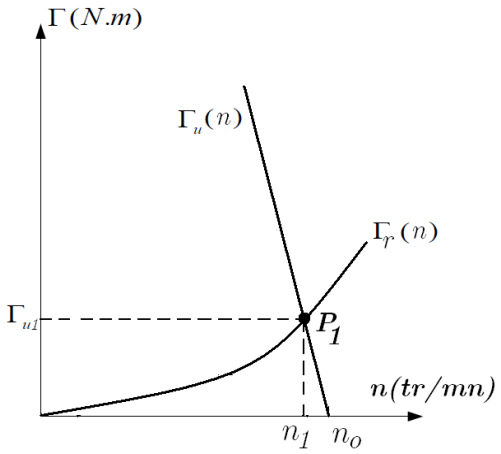


Figure 3.7. Détermination de point de fonctionnement

4.4. Fonctionnement sous tension réglable

a) Caractéristique de vitesse

D'après la relation (3.14), lorsqu'on fait diminuer la tension d'alimentation c'est la valeur n_{00} qui va changer (diminue) et la pente reste la même. On peut donc, déduire les caractéristiques de vitesse pour différentes valeurs d'alimentation à partir de l'une d'entre elles qu'a été tracée, et ceci par translation.

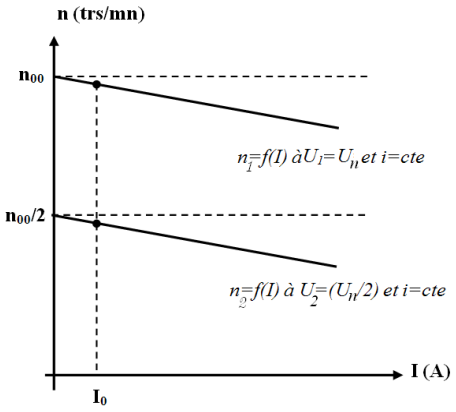


Figure 3.8. Caractéristique de vitesse à tension variable

b) Caractéristique mécanique

De la même manière que précédemment, on peut déduire la caractéristique mécanique pour différentes valeurs de la tension d'alimentation.

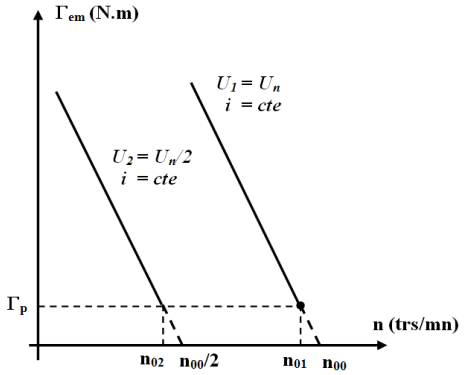


Figure 3.9. Caractéristique de couple à tension variable

4.5. Bilan des puissances et rendement

Pour un moteur shunt, les différentes puissances et pertes sont :

- ✓ Puissance absorbée : $P_a = U.I_a = U.(I+i)$
- ✓ Pertes par effet joule dans l'induit : $P_{jl} = R_a.I^2$
- ✓ Pertes par effet joule dans l'inducteur : $P_{ji} = U.i = (r+Rh).i^2$
- ✓ Puissance électromagnétique : $P_{em} = P_a – (P_{jl}+P_{ji}) = E'.I = \Gamma_{em}.\Omega$
- ✓ (Pertes fer + pertes mécaniques), ou pertes constantes: $p_c = p_{fer}+p_m$

$p_c = U.(I_0+i)-R_a.I_0^2-U.i = U.I_0-R_a.I_0^2$

- ✓ Puissance utile : $P_u = P_a - \Sigma Pertes = P_{em} – p_m = \Gamma_u.\Omega$

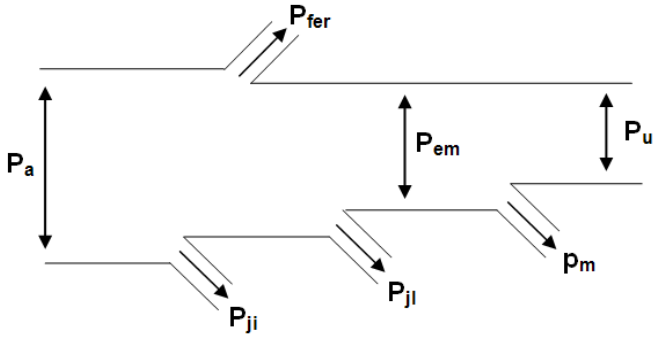


Figure 3.10. Bilan de puissance d'un moteur shunt

Le rendement d'un moteur shunt est donc :

$$\eta(\%) = \frac{P_u}{P_a}.100 = \frac{U.I - R_a.I^2 - p_c}{U.I_a}.100 \qquad (3.17)$$

5. Moteur à excitation série

5.1. Schéma et équation de fonctionnement

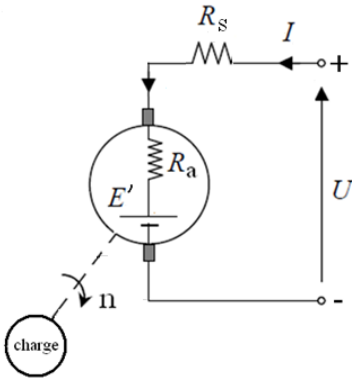


Figure 3.11. Moteur à excitation série

Le courant d'excitation étant lui-même le courant dans l'induit et le flux au sein de la machine est produit par l'enroulement série de résistance Rs.

Le fonctionnement de la machine est régi par les relations suivantes:

$$\begin{cases} U = E'_s + \left(R_s + R_a\right).I = E'_s + R_t.I \\ E'_s = k.n.\phi_s \\ \phi_s = f(I) \end{cases} \quad (3.18)$$

5.2. Caractéristique de vitesse

Si on suppose que le circuit magnétique n'est pas saturable, on aura : $\phi_s = \alpha.I$

Or : $E'_s = k.n.\phi_s = k.\alpha.n.I = U - R_t.I$

En négligeant $R_t.I$ devant U, on aura finalement :

$$n = \frac{E'_s}{k\phi_s} = \frac{U}{k.\alpha.I} \quad (3.19)$$

La caractéristique de vitesse a donc la forme d'une hyperbole.

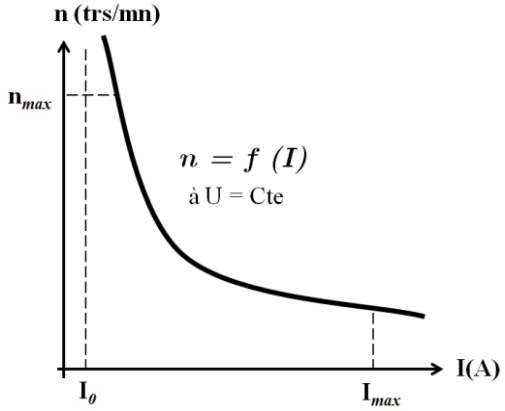


Figure 3.12. Caractéristique de vitesse d'un moteur série

<u>Remarque</u> :

- La relation (3.19) montre que qu'a faible charge, la vitesse du moteur série est excessive. Le moteur série doit toujours démarrer à pleine charge. Il convient bien pour la traction électrique.
- A vide le moteur série absorbe un courant I_0 (très faible) et sa vitesse tend vers l'infini.
- En charge lorsque I augmente, la vitesse n diminue beaucoup.

En conclusion, à tension d'induit constante ; un moteur série présente une vitesse très variable avec la charge.

5.3. Caractéristique de couple

En fonction de la charge, le couple s'écrit:

$$\Gamma_{em} = \frac{E'_s.I}{2\pi n} = \frac{k.\phi_s}{2\pi}.I = \frac{k.\alpha}{2\pi}.I^2 \quad (3.20)$$

La caractéristique de couple a donc la forme d'une parabole qui passe par l'origine.

La caractéristique Γ_u**=f(I)** est obtenue par translation verticale de Γ_{em}**=f(I)** de Γ_p(moment du couple des pertes constantes).

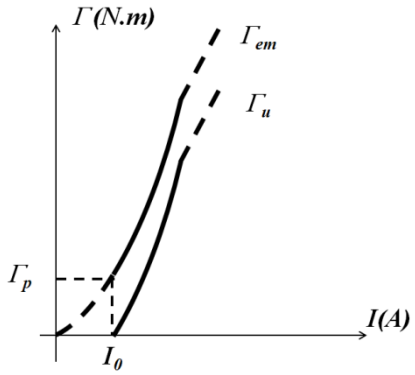


Figure 3.13. Caractéristique de couple d'un moteur série

5.4. Caractéristique mécanique

La caractéristique $\Gamma_{em}=f(n)$ peut être obtenue à partir deux caractéristiques électromécaniques (même démarche à suivre qu'avec le moteur shunt).Toutefois on peut adapter la même hypothèse que précédemment $(\phi_s = \alpha.I)$.

D'après (3.19), on peut écrire : $I = \dfrac{U}{k.\alpha.n}$

En remplaçant le courant I par son expression dans la relation (3.20), on obtient :

$$\Gamma_{em} = \frac{k.\alpha}{2\pi}.I^2 = \frac{U^2}{2\pi.k.\alpha}.\frac{1}{n^2} \qquad (3.21)$$

Le couple varie donc en raison inverse du carré de la vitesse.

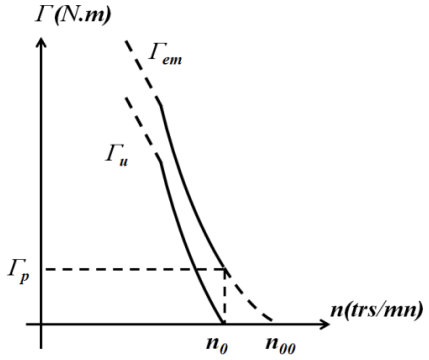


Figure 3.14. Caractéristique mécanique d'un moteur série

5.5. Problème d'emballement

Théoriquement, dans la relation $n \simeq \dfrac{U}{k.\phi_s} = \dfrac{U}{k.\alpha.I}$; si l'intensité du courant s'annule (donc le flux ϕ_s) ; la vitesse va tendre vers l'infini (emballement).De même, si le moteur fonctionne à vide, le courant sera trop faible (I_0) et la vitesse va prendre des valeurs excessives.

Si on démarre le moteur à vide, ou si on enlève brusquement la charge, la vitesse de rotation augmente infiniment. On dit que le moteur s'emballe. C'est pour cette raison que le démarrage doit se faire sous une charge au minimum 25% de la charge nominale.

5.6. Démarrage d'un moteur série

Pratiquement, c'est la même démarche à suivre que pour le moteur shunt. Le démarrage doit se faire à l'aide d'un rhéostat de démarrage Rh_d, qui est calculé avec les mêmes relations vues précédemment. Cependant, on doit préciser que dans ce cas, on a deux résistances en série ; celle de l'inducteur R_s et de l'induit R_a. La valeur du rhéostat de démarrage doit être donc:

$$\left(\frac{U}{2,5.I_n} - \left(R_a + R_s\right)\right) \leq Rh_d \leq \left(\frac{U}{1,5.I_n} - \left(R_a + R_s\right)\right) \qquad (3.22)$$

5.7. Bilan des puissances et rendement

Pour un moteur série, les différentes puissances et pertes sont :

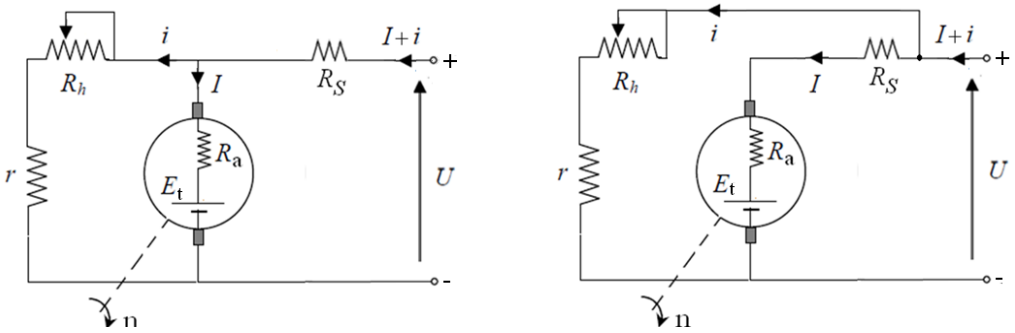
- ✓ Puissance absorbée : $P_a = U.I$
- ✓ Pertes par effet joule dans l'induit : $P_{jl} = R_a.I^2$
- ✓ Pertes par effet joule dans l'inducteur : $P_{ji} = R_s.I^2$
- ✓ Puissance électromagnétique : $P_{em} = P_a – (P_{jl}+P_{ji}) = E'_s.I=\Gamma_{em}.\Omega$
- ✓ (Pertes fer + pertes mécaniques), dites pertes constantes : $p_c=p_{fer}+p_m=U.I_0-R_t.I_0^2$
- ✓ Puissance utile : $P_u = P_a - \Sigma Pertes = P_{em} - p_c = \Gamma_u.\Omega$

Le rendement d'un moteur série est donc :

$$\eta(\%) = \frac{P_a - \sum Pertes}{P_a}.100 = \frac{U.I - R_t.I^2 - p_c}{U.I}.100 \qquad (3.23)$$

6. Moteur compound

Le moteur compound possède deux enroulements inducteurs (shunt et série). Selon la connexion de l'enroulement shunt ; on distingue deux types de montages, courte et longue dérivation.



(a) Montage courte dérivation (b) Montage longue dérivation

Figure 3.15. Moteur à excitation composée (Compound)

Le flux total dans le moteur résulte de l'existence de deux flux inducteur, soit $\phi_t = \phi_{sh} \pm \phi_s$. Pour ce type de moteur, deux modes sont à considérer :

- Le fonctionnement à flux additif ($\phi_t = \phi_{sh} + \phi_s$).

- Le fonctionnement à flux soustractif ($\phi_t = \phi_{sh} - \phi_s$).

En supposant la machine parfaitement compensée et en raisonnant sur le montage LD, le fonctionnement est régi par les relations suivantes:

$$\begin{cases} E'_t = U - \left(R_s + R_a\right).I \\ E'_t = k.n.\phi_t \\ \phi_t = \phi_{sh} \pm \phi_s \end{cases} \quad (3.24)$$

6.1. Caractéristique de vitesse

a) Fonctionnement à flux additif

A flux additif, le flux Φ_s croit avec la charge, alors que Φ_{sh} est constant, par conséquent, le flux Φ_t augmente.

On peut alors écrire : $E'_t = k.n.\phi_t = k.n.\left(\phi_{sh} + \phi_s\right) = U - R_t.I$

La vitesse de rotation varie selon la loi (3.25):

$$n = \frac{E'_t}{k\phi_t} = \frac{U - R_t.I}{k.\left(\phi_{sh} + \phi_s\right)} \quad (3.25)$$

Donc, lorsque le courant absorbé croit, le flux Φ_t augmente et la vitesse n diminue beaucoup.

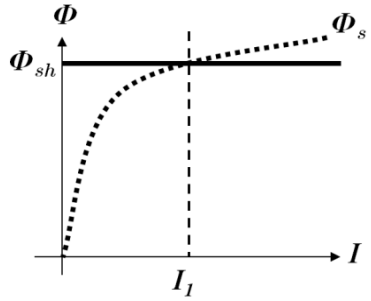
b) Fonctionnement à flux soustractif :

A flux soustractif, le flux Φ_t diminue avec la charge.

La vitesse de rotation est dans ce cas :

$$n = \frac{E'_t}{k\phi_t} = \frac{U - R_t.I}{k.\left(\phi_{sh} - \phi_s\right)} \quad (3.26)$$

Selon la variation de flux Φ_s; le dénominateur $k.(\Phi_{sh} - \Phi_s)$peut être **positif**, **négatif** ou **nul**:



- $I < I_1 \; alors \;\; k.\phi_t > 0 \; et \; n > 0$
- $I = I_1 \; alors \;\; k.\phi_t = 0 \; et \; n \to \infty$
- $I > I_1 \; alors \;\; k.\phi_t < 0 \; et \; n < 0$

Lorsque la charge augmente et pour $I<I_1$, trois cas peuvent se présenter :

- Si $k.\phi_s = R_t.I$ (1) ; la vitesse n reste constante $\forall$ la charge
- Si $k.\phi_s < R_t.I$ (2) ; la vitesse diminue avec la charge
- Si $k.\phi_s > R_t.I$ (3) ; la vitesse augmente avec la charge

La caractéristique de vitesse pour un moteur compound est donc de la forme :

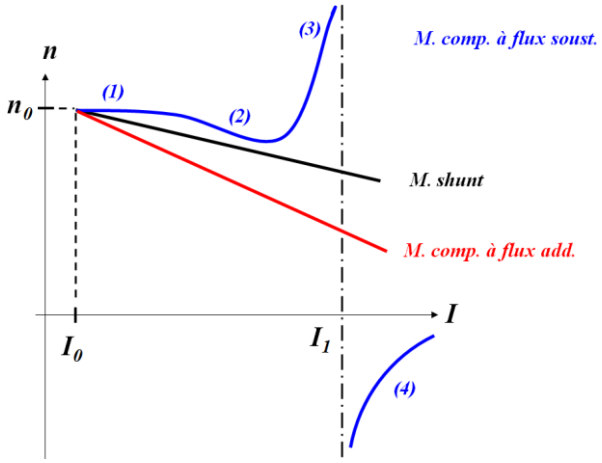


Figure 3.16. Caractéristique de vitesse d'un moteur compound

A flux additif, le moteur ne pose pas de problème (pas d'emballement), alors qu'à flux soustractif, on risque d'avoir l'emballement (le flux total peut tendre vers 0).

6.2. Caractéristique de couple

Si on suppose que le flux série varie selon la loi : $\phi_s = \alpha.I$

Le couple électromagnétique s'écrit alors:

$$\Gamma_{em} = \frac{k.\phi_t}{2\pi}.I = \frac{k.\phi_{sh}}{2\pi}.I \pm \frac{k.\alpha}{2\pi}.I^2 = k_1.I \pm k_2.I^2 \qquad (3.27)$$

La relation (3.27) est une équation du second degré de la forme ($y=a.x^2+b.x$) dont le signe du coefficient *a* dépend du mode de fonctionnement (flux *add.* ou *soust.*).

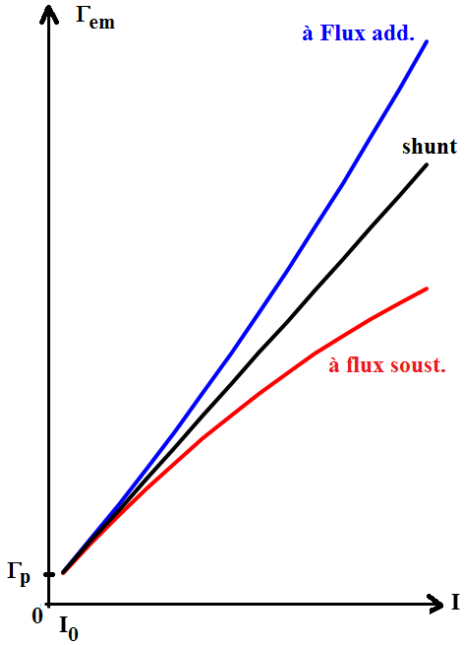


Figure 3.17. Caractéristiques de couple d'un moteur compound

Problèmes chapitre 3

Problème 3.1

Le disque du lecteur CD-ROM d'un PC est entraîné en rotation par un petit moteur à courant continu à aimants permanents. En fonctionnement nominal, on a relevé pour l'induit du moteur : U = 13,5 V ; I = 3 A ; n = 6000 tr/min ; Ra = 0,1 Ω

1°- Etablir le schéma équivalent de l'induit et donner la relation entre la tension U et le courant I.

2°- Montrer que, les relations donnant la f.c.e.m. **E'** et le couple électromagnétique Γ_{em} peuvent s'écrire **:** $E' = k.\Omega$ *et* $\Gamma_{em} = k.I$

3°- Pour le fonctionnement nominal :

a) Calculer la f.c.e.m. E' et déduire la valeur de la constante ***k***.

b) Déterminer le couple électromagnétique Γ_{em}

c) Sachant que le couple des pertes Γ_p vaut 6.10^{-3} N.m, déduire alors la valeur du couple utile Γ_u

d) Calculer les puissances absorbée P_a et utile P_u et déterminer le rendement η(%) du moteur.

Problème 3.2

Un moteur à excitation shunt fonctionne sous une tension constante de 220 V. Les résistances d'induit et d'inducteur sont respectivement R_a=0,2 Ω et r = 110 Ω. Les pertes constantes sont P_c = 760 W.

1°- Le moteur tourne à la vitesse n=1500 tr/min lorsqu'il absorbe un courant induit I=75A. Calculer alors :

a) La f.c.e.m E' et déduire la constante kϕ de la relation ($E' = k\phi.\Omega$).

b) La puissance absorbée P_a et les différentes pertes de la machine.

c) La puissance mécanique utile P_u en déduire le rendement η(%)

d) le couple utile Γ_u du moteur.

2°- Pour que l'intensité au démarrage soit de 160 A, on insère un rhéostat de démarrage Rh_d en série avec l'induit de la machine. Déterminer alors :

a) Le courant sans rhéostat de démarrage.

b) La valeur du rhéostat de démarrage Rhd.

c) Le couple de démarrage $\Gamma_{dém}$

3°- Lorsque le moteur consomme un courant induit I=40 A :

a) Calculer la f.c.e.m E' en déduire la vitesse de rotation correspondante.

b) Comparez les pertes constantes aux pertes Joule et calculer le rendement.

4°- Pour un courant I=75A, on veut régler la vitesse de rotation à 1650 tr/min en utilisant un rhéostat d'excitation.

a) Calculer la nouvelle valeur de la constante $k\phi$

b) Le flux restant proportionnel à l'intensité du courant d'excitation, quelle valeur de résistance Rh faut-il donner à ce rhéostat ?

Problème 3.3

Un moteur à courant continu à excitation séparée est alimenté sous 240 V. Le circuit inducteur absorbe 250 W et les pertes collectives sont de 625 W.

La résistance d'induit vaut 0,5 Ω

1°- En fonctionnement nominal, le moteur consomme 42 A avec une vitesse de rotation de 1200 tr/min. Calculer :

a) La f.c.e.m E'

b) La puissance absorbée, la puissance électromagnétique et la puissance utile

c) Le couple utile et le rendement

2°- Le moteur consomme dans ce cas un courant d'induit I = 30 A.

a) Quelle sera la vitesse de rotation ?

b) Que devient le couple utile à cette nouvelle vitesse ?

c) Calculer le rendement.

Problème 3.4

Un moteur à courant continu à excitation indépendante a les caractéristiques suivantes : La tension d'alimentation de l'induit : U=160V et la résistance de l'induit est R_a=0,2 Ω.

1°- La f.c.e.m E' du moteur vaut 150V lorsque la vitesse de rotation est n=1500 tr/min. Déduire alors la relation entre E' et n (en tr/mn).

2°- Donner l'expression du courant induit I en fonction de n (en tr/min).

3°- Exprimer le couple électromagnétique Γ_{em} en fonction de I.

4°- Montrer que le couple électromagnétique s'écrit sous la forme :

Γ_{em}=764–0,477.n

5°- On néglige les pertes collectives. Justifier qu'alors: $\Gamma_u = \Gamma_{em}$

6°- Calculer la vitesse de rotation à vide n_0.

7°- Le moteur entraîne maintenant une charge dont le couple résistant Γ_r varie proportionnellement avec la vitesse (20 N.m à 1000 tr/min).

7.1°- Calculer la vitesse de rotation du moteur en charge :

a) Par une méthode graphique

b) Par un calcul algébrique

7.2°- En déduire le courant induit et la puissance utile du moteur.

Problème 3.5

Un moteur à excitation série alimenté sous une tension de 120 V, possède un couple électromagnétique de 20 N.m pour un courant de 10A. Les résistances d'induit et de l'inducteur sont : R_a=0,5 Ω et R_s=0,3 Ω.

La machine est supposée parfaitement compensée et le flux inducteur est $\phi_s=\alpha.I$. Calculer alors :

1°- La f.c.e.m. E' du moteur.

2°- La constante $k' = \frac{k\alpha}{2\pi}$, en déduire la vitesse de rotation du moteur.

3°- Le couple électromagnétique pour un courant de 18 A.

Problème 3.6

Un moteur série alimenté sous une tension constante de 230 V. La résistance d'armature est R_a=0,2Ω et celle de l'inducteur série est R_S=0,1Ω. On suppose que la machine est parfaitement compensée et que le flux inducteur est $\phi_s = \alpha.I$.

1°- Le moteur consomme un courant de 70 A lorsqu'il tourne à une vitesse de 900 trs/mn. Il développe un couple utile de 146 N.m. Déterminer alors :

a) La puissance électrique absorbée et la puissance mécanique utile

b) Le rendement du moteur

c) Les pertes constantes de la machine.

2°- On varie la charge du moteur pour qu'il consomme un courant de 35 A. Déterminer dans ces conditions:

a) La vitesse de rotation du moteur.

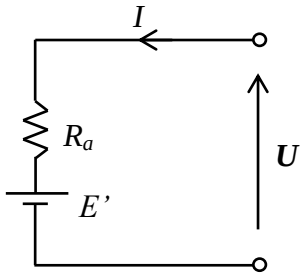
b) La puissance électrique absorbée et la puissance mécanique utile, en déduire le couple utile.

c) Le rendement du moteur

Corrigés

Corrigé Problème 3.1

1°- Le modèle équivalent de l'induit est:



La relation entre la tension U et le courant I est: $U = E' + R_a.I$

2°- Le moteur étudié est à aimants permanents, donc le flux est constant.

- La f.c.e.m. E' s'écrit alors: $E' = \frac{P}{2\pi a}.N.\phi.\Omega = k.\Omega$

  avec : $k = \frac{P}{2\pi a}.N.\phi = k.\Omega$

- Le couple électromagnétique Γ_{em} est :

$$\Gamma_{em} = \frac{E'.I}{\Omega} = \frac{k.\Omega}{\Omega}.I = k.I$$

3°- En fonctionnement nominal, on : U=13,5 V ; I=3 A ; n =6000 tr/min ; R_a = 0,1 Ω

a) La f.c.e.m. E' est :

$$E' = U - R_a.I = 13,5 - 0,1 \times 3 = 13,2\ V$$

La valeur de la constante ***k*** est donc :

$$k = \frac{E'}{\Omega} = \frac{E'}{2\pi.n} = \frac{13,2}{2\pi \times 6000} \times 60 = 0{,}021\ \text{V.rad}^{-1}.s$$

b) Le couple électromagnétique Γ_{em} est :

$$\Gamma_{em} = k.I = 0,021 \times 3 = 0,063\ N.m$$

c) Sachant que le couple des pertes Γ_p de la machine vaut 6x10^{-3} N.m, la valeur du couple utile Γ_u est donc :

$$\Gamma_u = \Gamma_{em} - \Gamma_p = 0,063 - 0,006 = 0,057\ N.m$$

d) Les puissances ; absorbée P_a et utile P_u sont :

$$P_a = U.I = 13,5 \times 3 = 40,5\ W$$

$$P_u = \Gamma_u.\Omega = 0,057 \times \left(\frac{2\pi \times 6000}{60}\right) = 35,8\ W$$

Le rendement η(%) du moteur est alors :

$$\eta\,(\%) = \frac{P_u}{P_a} = \frac{35,8}{40,5} = 88,4\ \%$$

Corrigé Problème 3.2

Moteur à excitation shunt :

U= 220 V. R_a=0,2 Ω et r = 110 Ω. P_c = 760 W.

1°- Le moteur tourne à la vitesse n=1500 tr/min lorsqu'il absorbe un courant I=75A.

1.1°- la force contre électromotrice **E'** est :

$$E' = U - R_a.I = 220 - 0,2 \times 75 = 205\,V$$

La constante kϕ est tel que : $E' = k\phi.\Omega$

$$\Rightarrow k\phi = \frac{E'}{\Omega} = \frac{205}{2\pi.1500} \times 60 = 1,3\,V.rad^{-1}.s$$

1.2°- La puissance totale absorbée est:

$$P_a = U.I_a = U.(I + i)$$

Or, le courant d'excitation est : $i = \frac{U}{r} = \frac{220}{110} = 2\,A$,

Le moteur absorbe donc un courant : $I_a = 75 + 2 = 77\,A$

D'où : $P_a = U.I_a = 220 \times 77 = 16,940\,KW$

Les différentes pertes de la machines sont :

- Pertes joules dans l'induit : $P_{jI} = R_a.I^2 = 0,2 \times (75)^2 = 1,125\,KW$
- Les pertes joules dans l'inducteur :

  $P_{ji} = r.i^2 = 110 \times 2^2 = 0,440\,KW$
- Les pertes constantes : $P_c = 0,760\,KW$

1.3°- La puissance mécanique utile est:

$$P_u = P_a - \sum pertes = 16,940 - (1,125 + 0,440 + 0,760) = 14,615\,KW$$

Le rendement de la machine est donc : $\eta\,(\%) = \frac{P_u}{P_a} = \frac{14,615}{16,940} = 86,27\,\%$

1.4°- Le couple utile est : $\Gamma_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_u}{2\pi.n} = \frac{14615}{2\pi \times 1500} \times 60 = 93\,N.m$

2°- Pour que l'intensité au démarrage soit de 160 A, on insère un rhéostat de démarrage **Rh_d** en série avec l'induit de la machine.

2.1°- Si on démarre le moteur sans rhéostat de démarrage, le courant sera : $I_{dém} = \frac{U}{R_a} = \frac{220}{0,2} = 1100\,A$

2.2°- La valeur du rhéostat à insérer est :

$$Rh_d = \frac{U}{I_{dém}} - R_a = \frac{220}{160} - 0,2 = 1,175\,\Omega$$

2.3°- Le couple de démarrage est :

$$\Gamma_{dém} = k\phi.I_{dém} = 1,3 \times 160 = 208\ N.m$$

3°- Lorsque le moteur consomme un courant induit I = 40 A.

3.1°- La f.c.e.m E' est dans ce cas :

$$E' = U - R_a.I = 220 - 0,2 \times 40 = 212\,V$$

La vitesse de rotation correspondante est donc :

$$\Omega = \frac{E'}{k\phi} = \frac{212}{1,3} = 163\ rad/s \Rightarrow n = 1557\ tr/mn$$

3.2°- Les pertes joules sont :

$$P_j = R_a.I^2 + r.i^2 = 0,2 \times 40^2 + 110 \times 2^2 = 320 + 440 = 760\ W$$

Dans ce cas, on a : $P_j = P_c$

Le rendement de la machine est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_{em} - P_c}{P_{em} + P_j} = \frac{E'.I - P_c}{E'.I + P_j} = \frac{212 \times 40 - 760}{212 \times 40 + 760} = 83,5\ \%$$

4°- On veut régler la vitesse de rotation à 1650 tr/min avec la même intensité I qu'au A en utilisant un rhéostat **Rh** en série avec l'inducteur.

4.1°- La nouvelle valeur de la constante kϕest :

$$k\phi = \frac{E'}{\Omega} = \frac{U - R_a.I}{2\pi.n} = \frac{220 - 0,2 \times 75}{2\pi \times 1650} \times 60 = 1,186\ V.rad^{-1}.s$$

4.2°- Le flux est supposé proportionnel à l'intensité du courant d'excitation ; on peut alors écrire :

$$\begin{cases} i = 2A \rightarrow k\phi = 1,3 \\ i = ? \ \ \rightarrow k\phi = 1,186 \end{cases} \Rightarrow\ i = \frac{1,186}{1,3} \times 2 = 1,825\ A$$

La valeur de la résistance Rh qu'il faut donner à ce rhéostat est tel que :

$$r + Rh = \frac{U}{i} \Rightarrow\ Rh = \frac{U}{i} - r = \frac{220}{1,825} - 110 = 10,53\,\Omega$$

Corrigé Problème 3.3

Un moteur à courant continu à excitation séparée est alimenté sous 240 V. Le circuit inducteur absorbe 250 W et les pertes collectives sont de 625 W. La résistance d'induit vaut 0,5 Ω.

1°. En fonctionnement nominal, le moteur consomme 42 A avec une vitesse de rotation de 1200 tr/min.

a) La f.c.e.m E' est : $E' = U - R_a.I = 240 - 0,5 \times 42 = 219\ V$

b) La puissance absorbée, la puissance électromagnétique et la puissance utile sont :

$P_a = U.I + u.i = 240 \times 42 + 0,250 = 10,330\ KW$

$P_{em} = E'.I = 219 \times 42 = 9,198\ KW$

$P_u = P_{em} - P_c = 8,573\ KW$

c) Le couple utile est :

$$\Gamma_u = \frac{P_u}{2\pi.n} = \frac{8573}{2\pi \times 1200} \times 60 = 68\ N.m$$

Le rendement est donc : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{8573}{10330} = 83\ \%$

2°. Le moteur consomme dans ce cas un courant d'induit I = 30 A.

a) La vitesse de rotation est dans ce cas :

$$n = \frac{E'}{k\phi} = \frac{U - Ra.I}{k\phi}\ avec\ k\phi = \frac{219}{1200} = 0,1825\ V.tr^{-1}.mn \Rightarrow n = \frac{240 - 0,5 \times 30}{1,825} = 1233\ tr.mn$$

b) Pour cette nouvelle vitesse, le couple utile devient :

$$\Gamma_u = \frac{P_u}{2\pi.n} = \frac{E'.I - P_c}{2\pi.n} = \frac{6125}{2\pi \times 1233} \times 60 = 47,4\ N.m$$

c) Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{U.I + u.i} = \frac{6125}{7450} = 82,2\ \%$$

Corrigé Problème 3.4

Le moteur est à excitation indépendante dont les caractéristiques sont : U = 160 V et R_a = 0,2 Ω

1°. La f.c.e.m E' du moteur vaut 150 V quand la vitesse de rotation est n = 1500 tr/min.

L'excitation étant constante, E' est donc proportionnelle à n selon la relation :

$E' = 0,1.n$ Avec : E' en (V) et n en (tr/min)

2°. l'expression du courant induit I en fonction de n est :

$I = \frac{U - E'}{R_a} = \frac{U - 0,1.n}{R_a} = 800 - 0,5.n$ Avec : I en (A) et n en (tr/mn)

3°. Le couple électromagnétique Γ_{em} est lié au courant I par la relation :

$$\Gamma_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E'.I}{2\pi.n}.60 = \frac{0,1.n}{2\pi.n}.60.I = 0,955.I$$

Avec : Γ_{em} en (N.m) et I en (A)

4°. En remplaçant I par son expression dans la relation du couple, on peut alors déduire :

$\Gamma_{em} = 0,955.I = 0,955.(800 - 0,5.n) = 764 - 0,477.n$ Avec : Γ_{em} en (N.m) et n en (tr/mn)

5°. On sait que : $\Gamma_u = \Gamma_{em} - \Gamma_p$ Avec : $\Gamma_p = \frac{P_c}{\Omega}$

En négligeant les pertes collectives, le couple des pertes est donc nulle, on peut alors écrire : $\Gamma_u = \Gamma_{em}$

6°. La vitesse de rotation à vide est celle lorsque le couple utile est nul, $\Gamma_u = 0$.

D'après la relation $\Gamma_u = \Gamma_{em}$, on aura donc : $\Gamma_{em} = 764 - 0,477.n_0 = 0$

La vitesse à vide est donc :

$$n_o = \frac{764}{0,477} = 1600\ tr/mn$$

Autrement ; on sait qu'à vide I= I_0 et E' = U - $R_a.I_0 \approx$ U =160 V.alors:

$$E' = 0,1.n_o \approx 160\ V \Rightarrow n_o = \frac{160}{0,1} = 1600\ tr/mn$$

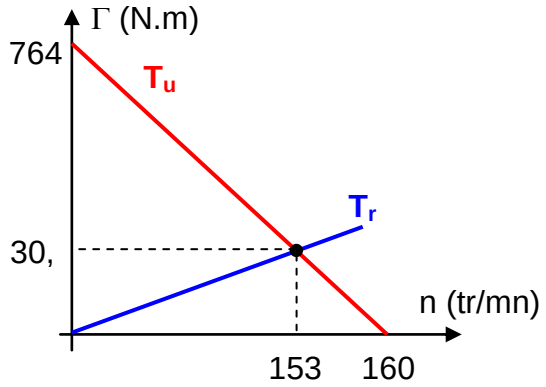
7°. le couple résistant varie proportionnellement avec la vitesse (20 N.m à 1000 tr/min), on peut alors écrire : $\Gamma_r = 0,02.n$ avec Γ_r en (N.m)et **n** en (tr/min)

7.1°- La vitesse de rotation du moteur en charge peut être déterminée:

a) <u>Méthode graphique</u> :

On trace les deux caractéristiques $\Gamma_r(n)$ et $\Gamma_u(n)$.

Avec : Γ_u = 764 – 0,477.n et Γ_r = 0,02.n



L'intersection des deux caractéristiques donne le point de fonctionnement (30,5 N.m ; 1536 tr/mn)

b) <u>Méthode analytique</u>

Au point de fonctionnement, on a : $\Gamma_u = \Gamma_r$, donc : 764 –0,477.n = 0,02.n

D'où : n = 764/0.497 = 1536 tr/min et Γ_u = 764–0,477x1536=30,56 N.m

7.2°- Le courant induit est :

$$I = 800 - 0,5.n = 800 - 0,5 \times 1536 = 32\ A$$

Le courant peut être déterminé en utilisant l'expression du couple, sachant que :

$$\Gamma_{em} = 0,955.I = 30,5\ N.m \Rightarrow I = \frac{30,5}{0,955} = 32\ A$$

La puissance utile est déterminée pat :

$$P_u = \Gamma_u.\Omega = \Gamma_u.\left(\frac{2\pi.n}{60}\right) = 30,5 \times \left(\frac{2\pi.1536}{60}\right) = 4915\ W$$

La puissance utile peut être également déterminée par d'autre méthode, sachant que :

$$P_u = P_{em} - \underbrace{P_c}_{=0} = E'.I = 0,1.n.I = 0,1 \times 1536 \times 32 = 4915\ W$$

Corrigé Problème 3.5

Un moteur à excitation série alimenté sous une tension de 120 V, possède un couple électromagnétique de 20 N.m pour un courant de 10 A. La résistance d'induit est R_a=0,5 Ω et la résistance d'inducteur série R_s=0,3 Ω.

La machine est parfaitement compensée et le flux inducteur est $\phi_s = \alpha.I$.

1°- La f.c.e.m. E' du moteur est :

$$E' = U - \left(R_a + R_s\right).I = 120 - (0,5 + 0,3) \times 10 = 112\ V$$

2°- L'expression du couple électromagnétique Γ_{em} est :

$$\Gamma_{em} = \frac{E'.I}{\Omega} = \frac{k.n.\phi_s}{2\pi.n}.I = \frac{k.\phi_s}{2\pi}.I$$

$$Si : \phi_s = \alpha.I \Rightarrow \Gamma_{em} = \frac{k\alpha}{2\pi}.I^2 = k'.I^2 ; alors : k' = \frac{\Gamma_{em}}{I^2}$$

Pour I=10 A, on a: Γ_{em} = k'.$(10)^2$ = 20 N.m d'où k' = 0,2 (N.m.A^{-2}), L'expression de la f.c.e.m est :

$$E' = k.n.\phi_s = \frac{k.\phi_s}{2\pi}.\Omega = k'.I.\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{E'}{k'.I} = \frac{112}{0,2 \times 10} = 56\ rad/s = 534\, trs/mn$$

3°- Pour I = 18 A, on aura: Γ_{em} = 0,2 x $(18)^2$ = 64,8 N.m

Corrigé Problème 3.6

Un moteur série alimenté sous une tension constante de 230 V. La résistance d'armature est R_a=0,2Ω et celle de l'inducteur série est R_S=0,1Ω. On suppose que la machine est parfaitement compensée et le flux inducteur est ϕ_s=α.I.

1°. Le moteur consomme un courant de 70 A lorsqu'il tourne à une vitesse de 900 trs/mn. Il développe un couple utile de 146 N.m.

a) La puissance électrique absorbée et la puissance mécanique utile sont :

$$P_a = U.I = 230 \times 70 = 16100\,W$$

$$P_u = \Gamma_u.\Omega = 147 \times 2\pi \times \frac{900}{60} = 13760\,W$$

b) Le rendement du moteur est donc :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{13760}{16100} = 85,5\,\%$$

c) Les pertes constantes de la machine sont : $P_c = P_a - P_j - P_u$

Les pertes par effet Joule vaut : $P_j = \left(R + R_s\right).I^2 = 0,3 \times 70^2 = 1470\,W$

D'où : $P_c = 870\,W$

2°. On fait varier la charge du moteur pour qu'il consomme un courant de 35 A.

a) Sachant que la réaction d'induit est négligeable et que le circuit magnétique n'est pas saturable, on peut alors écrire : $\phi_s = \alpha.I \Rightarrow E' = k.\phi_s.n = k.\alpha.I.n$

De l'état précédent, on peut déduire la constante $k.\alpha$

$$\phi_s = \alpha.I \Rightarrow k.\alpha = \frac{E'}{I.n} = \frac{230 - 0,3 \times 70}{70 \times 900} = 3,3 \times 10^{-3}$$

La vitesse de rotation est donc:

$$n = \frac{E'}{k.\alpha.I} = \frac{219,5}{0,0033 \times 35} = 1890\ tr\,/\,mn$$

b) La puissance électrique absorbée et la puissance mécanique utile sont :

$$P_a = U.I = 230 \times 35 = 8050\,W$$

$$P_u = P_{em} - P_c = E'.I - P_c$$

Avec : $E' = U - \left(R + R_s\right).I = 230 - 0,3 \times 35 = 219,5\,V$

$$P_{em} = E'.I = 219,5 \times 35 = 7683\,W$$

D'où : $P_u = 7683 - 870 = 6813\,W$

Le couple utile développé est donc : $\Gamma_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{6813}{2\pi \times 1890} \times 60 = 34\ N.m$

c) Le rendement du moteur est : $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{6813}{8050} = 84,6\,\%$