

TABLE DE MATIERES

	Pages
INTRODUCTION GENERALE	5
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES MACHINES A COURANT CONTINU (MCC)	6
1.1 : Généralité.....	7
1.2 : Génératrice à courant continu.....	8
1.3 : Moteur à courant continu.....	8
1.4 : Constitution et principe de fonctionnement d'une machine à courant continu.....	9
1.4.1 : Descriptif des constituants.....	9
1.4.2 : Stator.....	10
1.4.2.1 : Répartition du champ créé par l'inducteur dans l'entrefer (e).....	11
1.4.2.2 : Flux inducteur sous un pôle.....	13
1.4.2.3 : Alimentation de l'inducteur.....	13
1.4.3 : Rotor.....	14
1.4.3.1 : Le Collecteur.....	14
1.4.3.2 : Force contre électromotrice (f_{cem}) aux bornes d'une bobine.....	16
1.5 : Caractéristiques d'une machine à courant continu.....	18
♣ Pertes et rendement.....	18
CHAPITRE II : MODELES ET CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE A COURANT CONTINU	20
2.1 : Récapitulatif de la machine à courant continu.....	21
2.2 : Machine à excitation séparée en régime permanent.....	22
2.2.1 : Caractéristiques couple / vitesse $T_u = f(\Omega)$	23
2.2.2 : Fonctionnement général dans les quatre quadrants.....	25
CHAPITRE III : DETERMINATION EXPERIMENTALE DES ELEMENTS DU MODELE DE LA MACHINE A COURANT CONTINU	26
3.1 : Essais des machines électriques à courant continu.....	27
3.1.1 : Introduction.....	27
3.1.2 : Vérification de l'exactitude de connexion des parties des enroulements des machines à courant continu.....	28
3.1.2.1 : Caractéristique externe d'une génératrice à excitation série.....	29
3.1.2.2 : Caractéristique de vitesse d'un moteur compound à compoundage additif.....	30
3.2 : Détermination de la résistance d'induit R et de la constante K	31
3.2.1 : Détermination de la résistance d'induit R seule.....	31
3.2.1.1 : Première méthode.....	31
3.2.1.2 : Deuxième méthode.....	31
3.2.2 : Mesure de la résistance des enroulements.....	32
3.2.3 : Détermination de la constante K seule.....	34
3.2.4 : Détermination conjointe de R et K	34
3.3 : Détermination de l'inductance d'induit L	35
3.3.1 : Méthode de la pente du courant d'induit.....	35
3.3.2 : Méthode directe.....	35
3.3.3 : Généralité de la commutation et échelle des étincelles.....	36
3.3.3.1 : Etincelles d'origine électromagnétique.....	36

3.3.3.2 : Moyens de lutte contre les étincelles d'origine électromagnétique.....	37
3.3.3.3 : Causes d'étincelles d'origine mécanique.....	38
3.4 : Méthodes expérimentales d'analyse et de réglage de la commutation.....	38
3.4.1 : Généralité.....	38
3.4.2 : Courbe de potentiel de balai.....	39
3.4.3 : Méthode de zone sans étincelles.....	41
3.5 : Déduction pratiques concernant les études théoriques et expérimentales de la commutation.....	44
3.6 : Pertes d'énergie et rendement des machines électriques.....	46
3.6.1 : Remarques préliminaires.....	46
3.6.2 : Classification des pertes.....	46
3.6.2.1 : Pertes mécaniques.....	47
3.6.2.2 : Pertes principales dans le fer.....	49
3.6.2.3 : Pertes principales dans le cuivre.....	51
3.6.2.4 : Pertes supplémentaires	53
3.6.2.5 : Pertes totales dans une MCC et son rendement	53
3.6.2.6 : Variation du rendement d'une MCC avec la charge et rendement maximal.....	55
3.6.2.7 : Détermination expérimentale du rendement d'une MCC.....	56
3.7 : Détermination du rendement par la méthode directe.....	57
3.8 : Rendement par la méthode des pertes séparées.....	60
3.9 : Détermination du rendement par méthode de charge mutuelle (récupération).....	63
3.10 : Rendement par la méthode de CARDEW-FONTAINE.....	67
3.11 : Méthode de moteur auxiliaire.....	71
3.12 : Comparaison quantitative des méthodes analytiques et expérimentales.....	74
CHAPITRE IV : IMPLICATION PEDAGOGIQUE.....	76
4.1 : Essai de détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation indépendante.....	77
4.2 : Essai de détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation en dérivation.....	79
4.3 : Essai de détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation en série.....	81
Conclusion.....	84
CONCLUSION GENERALE.....	85
ANNEXE.....	86
BIBLIOGRAPHIE.....	97

INTRODUCTION GENERALE

Les machines électriques tournantes sont des convertisseurs d'énergie. Les solutions techniques associées à la fonction CONVERTIR de la chaîne d'énergie sont appelés ACTIONNEURS. Ces actionneurs ont pour rôle de fournir une énergie mécanique à l'effecteur (fonction TRANSMETTRE) en vue de réaliser la fonction principale du système. Ces actionneurs sont de différents types en fonction de la nature de l'énergie fournie par la fonction DISTRIBUER.

On distingue donc :

- Courant et tension continus : Machine à Courant Continu (MCC)
- Courant et tension alternatifs : Machine à Courant Alternatif (Machine Asynchrone ; Machine Synchrone).

Dans le présent travail, nous nous intéressons uniquement à l'étude et à la réalisation des essais expérimentaux sur une machine électrique à courant continu ; non seulement au cours de son montage, mais aussi pour vérifier qu'elle satisfait aux conditions prévues dans les calculs théoriques ou à celles promises par le constructeur au client ; il s'agit des essais de réception.

Cette machine électrique fut la première mise en service et pendant longtemps, a été la principale solution pour obtenir la conversion électromécanique du fait de sa simplicité de fonctionnement. De plus, la simplicité de sa commande par le fait de la variation de vitesse, fut un argument très important dans le développement de cette machine. Néanmoins, cette machine présente de nombreux inconvénients, avec en particulier son coût élevé et la maintenance nécessaire à cause des balais frottant sur le collecteur. Aujourd'hui, les moteurs à courant alternatifs sont préférés dans la plupart des applications, mais encore très utilisées dans le domaine de la faible puissance ou de la très forte puissance. Il est à noter qu'aucun système développé de nos jours, n'est développé dans le domaine des fortes puissances avec pour actionneur principal une MCC. Les seules applications de fortes puissances utilisant la technique de la MCC, sont les Métro de Paris et la TGV Sud-Est (Paris-Lyon).

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES MACHINES A COURANT CONTINU (MCC)

1.1 : Généralité

Une machine à courant continu (MCC) est un convertisseur d'énergie. Elle réalise la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et la transformation inverse.

Dans le premier cas, la machine est un générateur ; dans le deuxième cas, c'est un moteur.

Elle est réversible : une même machine fonctionne suivant les circonstances en générateur ou en moteur.

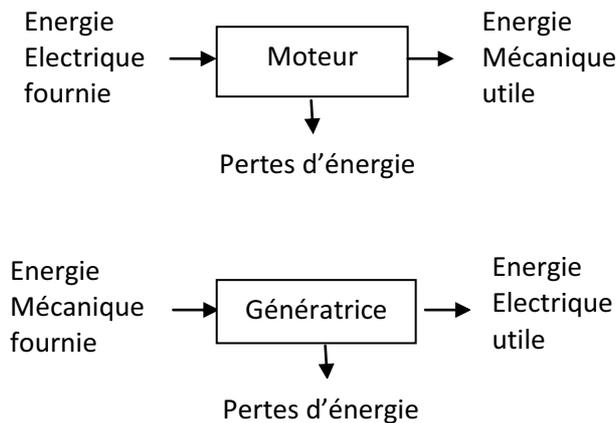


Fig. 1.1 : Les deux conversions d'une machine à courant continu

La figure 1.1 symbolise les deux possibilités de conversion.

L'énergie mécanique est présentée sous forme d'un couple, de moment Γ , susceptible de tourner à la vitesse angulaire Ω ; l'énergie électrique pour sa part, se manifeste sous forme de tension et de courant continu.

La machine à courant continu (MCC) est constituée essentiellement :

- D'un stator inducteur, en général fixe, comportant les enroulements excitateurs, qui produisent un champ magnétique dans les entrefers ;
- D'un rotor induit, mobile, qui est le siège de la force électromotrice (fém) sinusoïdale redressée par un redresseur mécanique appelé système balais-collecteur ;
 - Les deux sont séparés par un entrefer.
- D'un collecteur, dont les lames sont soudées aux conducteurs de l'induit et de balais qui sont les liaisons entre le circuit mobile et le circuit extérieur fixe.

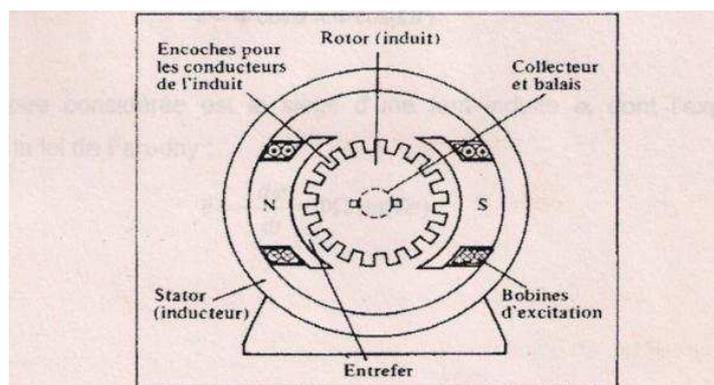


Fig. 1.2 : coupe schématique d'une machine à courant continu

1.2 : Génératrice à courant continu

Les génératrices à courant continu entraînées par une source d'énergie mécanique, peuvent fournir un courant continu à une charge selon leurs modes d'excitation suivants :

- Génératrice à excitation séparée ;
- Génératrice à excitation shunt ou dérivation ;
- Génératrice à excitation compound ou composée ;
- Génératrice à excitation série.

Les caractéristiques de ces génératrices à courant continu diffèrent de leurs schémas de principe.

1.3 : Moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu, comme les génératrices, se classent selon le mode de branchement de l'enroulement d'excitation par rapport à l'induit. On a donc des moteurs à excitation en dérivation, série et composée. Tous ces moteurs qui ont des caractéristiques différentes sont largement utilisés dans des domaines divers. Mais le principe de base de ces moteurs est le même processus énergétique caractérisé par les équations des forces électromotrices et des couples.

Domaines d'utilisation:

Pour les moteurs shunts, la vitesse constante les fait utiliser dans la commande des machines-outils (tours, perceuses, etc.), dans les appareils de levage, ainsi que dans les métiers de tissage. Ils ont les principales propriétés suivantes :

- Faible couple de démarrage ;
- Ne supportent pas les grandes surcharges ;
- Vitesse constante quelle que soit la charge ;
- Ne s'emballe pas à vide.

Dans un moteur shunt, il peut y avoir un grave inconvénient si le circuit de l'inducteur se rompt. En effet, le moteur n'étant plus excité, il n'y a plus de force contre électromotrice ($f_{cém}$), l'intensité devient très importante dans l'induit et ce dernier grille. On ajoute souvent un deuxième dispositif de sécurité contre les surintensités du courant d'alimentation qui, sans griller l'induit, risquent d'endommager l'isolant de l'enroulement.

Le moteur shunt est employé surtout en traction électrique (locomotives, tracteurs...) et pour actionner les appareils de levage (grue et palans, ponts roulants...).

Par contre le moteur série est utilisé pour entraîner des machines dans lesquelles le couple résistant augmente rapidement avec la vitesse (ventilation, pompes centrifuges...). Là encore, il se produit une forte chute de vitesse aux fortes charges favorables à la bonne utilisation de la puissance installée.

En résumé, les caractéristiques d'un moteur série sont les suivantes :

- Fort couple de démarrage ;
- Vitesse variable avec la charge ;
- Tendance à s'emballer ;
- Supporte les surcharges.

1.4 : Constitution et principe de fonctionnement d'une machine à courant continu

Comme l'ensemble des actionneurs électriques appelés aussi machines tournantes, la MCC est composée d'une partie fixe appelée stator (Statique) ou inducteur, et d'une partie mobile tournante appelée rotor (Rotation) ou induit, séparées par un entrefer (espace mécanique composé d'air). L'alimentation électrique sous forme d'une tension et courant continu doit être fournie à l'induit.

Etant donné que l'induit est en mouvement de rotation, il est nécessaire de disposer d'un système appelé balais-collecteur (appelé aussi collecteur mécanique ou redresseur mécanique) permettant son alimentation (fig. 1.2).

1.4.1 : Descriptif des constituants

L'inducteur d'une machine à courant continu crée une induction magnétique fixe dans l'espace à partir d'un bobinage (bobines excitatrices) parcouru par un courant d'excitation continu i_{ex} ou à partir d'aimants permanents. Les caractéristiques électrique et mécanique de la machine sont liées à l'amplitude du flux inducteur, l'inducteur magnétique devra être la plus élevée ; de l'ordre de Tesla dans les machines de grande taille. Un circuit magnétique permet de créer facilement une induction importante avec peu de conducteurs et de courant. L'induit est constitué d'un circuit magnétique encoché où sont placés des conducteurs axiaux parcourus par un courant noté I . Le circuit magnétique du rotor est feuilleté (afin de limiter les courants de Foucault) puisque l'induction magnétique fixe créée par l'inducteur, donne une induction magnétique variable dès que l'induit tourne. L'alimentation des conducteurs mobiles de l'induit se fait à travers des contacts glissants dans un organe appelé collecteur.

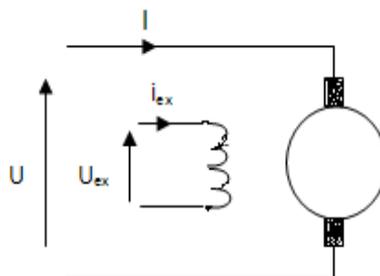
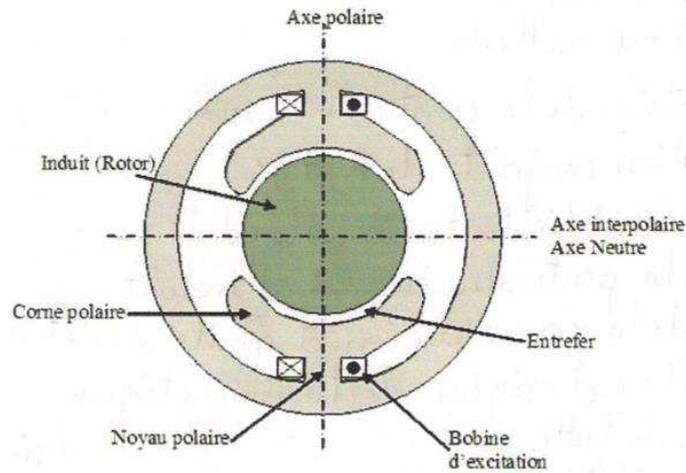
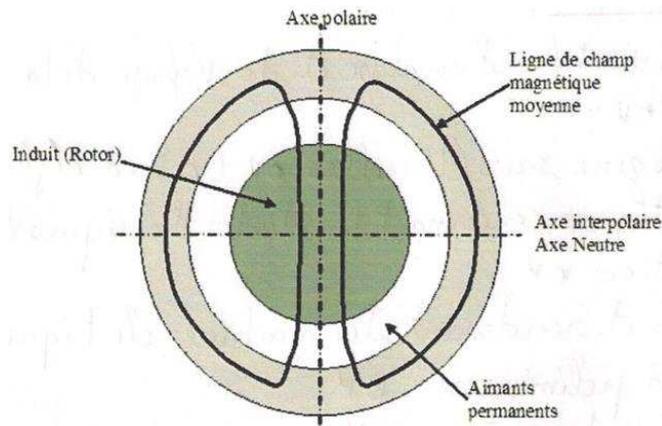


Fig. 1.3 : Représentation d'une machine à courant continu



La figure 1.4 ci-dessus, représente la coupe transversale schématique d'une MCC bipolaire, où le nombre de paires de pôles noté p vaut 1.



La figure 1.5 ci-haut, représente une MCC bipolaire à aimants permanents.

1.4.2 : Stator

L'induction magnétique est créée par des bobines d'excitation avec N_{ex} spires en série placés autour des noyaux polaires du stator, figure 1.6 ; et parcourues par le courant i_{ex} . Comme l'induction est perpendiculaire à un circuit magnétique non saturé, et que l'entrefer est faible, l'induction magnétique peut être considérée comme radiale dans l'entrefer et nous négligerons sa variation avec le rayon.

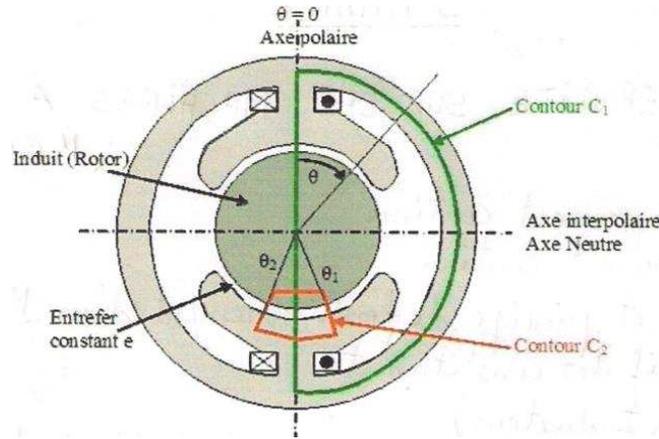


Fig. 1.6 : Contours et notations pour déterminer le flux inducteur

Le circuit magnétique, réduit au niveau des bobines d’excitation (noyau polaire), s’élargit ensuite pour augmenter le flux dans l’entrefer. Pour déterminer les caractéristiques de la MCC, il faut connaître l’induction magnétique à la périphérie du rotor, là où sont placés les conducteurs de l’induit.

1.4.2.1 : Répartition du champ créé par l’inducteur dans l’entrefer (e)

Nous allons donc déterminer la répartition de l’induction magnétique en un point **M** de la périphérie du rotor, repéré par l’angle θ de la (figure 1.6). Les angles sont considérés comme positifs dans le sens horaire, et l’axe polaire est pris comme référence ($\theta=0$). L’induction dans l’entrefer sera considérée positive lorsqu’elle entre dans le rotor et négative dans le cas contraire. Nous allons considérer un contour fermé **C₂** dans un pôle (fig. 1.6) et y appliquer le **théorème d’Ampère**.

$$\oint_{C_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 \tag{1.1}$$

On néglige la circulation du champ magnétique **H** dans le circuit magnétique du rotor et du stator comparée à l’entrefer.

La relation (1.1) traduit :

$$\oint_{C_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 = \frac{b(\theta)}{\mu_0 \mu_r} A + \frac{b(\theta_1)}{\mu_0} e + \frac{b(\theta)}{\mu_0 \mu_r} B - \frac{b(\theta_2)}{\mu_0} e \tag{1.2}$$

μ_r : perméabilité relative du circuit magnétique

Or, compte tenu de l’hypothèse $\mu_r = \infty$ et on a :

$$\oint_{C_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 = \frac{b(\theta_1)}{\mu_0} e - \frac{b(\theta_2)}{\mu_0} e \tag{1.3}$$

Cette relation permet d’écrire : $b(\theta_1) = b(\theta_2)$

Ce qui signifie que, sous un pôle, l'induction magnétique est constante. Pour déterminer l'amplitude de l'induction magnétique sous un pôle, et en considérant les hypothèses précédentes, on applique encore le théorème d'Ampère au contour C_1 .

$$\oint_{C_1} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2N_{ex} I_{ex} \simeq \frac{b(0)}{\mu_0} e - \frac{b(\pi)}{\mu_0} e \tag{1.4}$$

La machine étant bipolaire, on a : $b(0) = -b(\pi)$ (1.5)

Donc, l'induction maximale notée b_{max} est obtenue par la relation suivante :

$$b_{max} = \frac{N_{ex} \cdot I_{ex} \cdot \mu_0}{e} \tag{1.6}$$

Pour les machines de moyenne et forte puissances, elle est créée par les N_{ex} spires de l'inducteur ; et pour les machines de faible puissance, elle est créée par des aimants permanents.

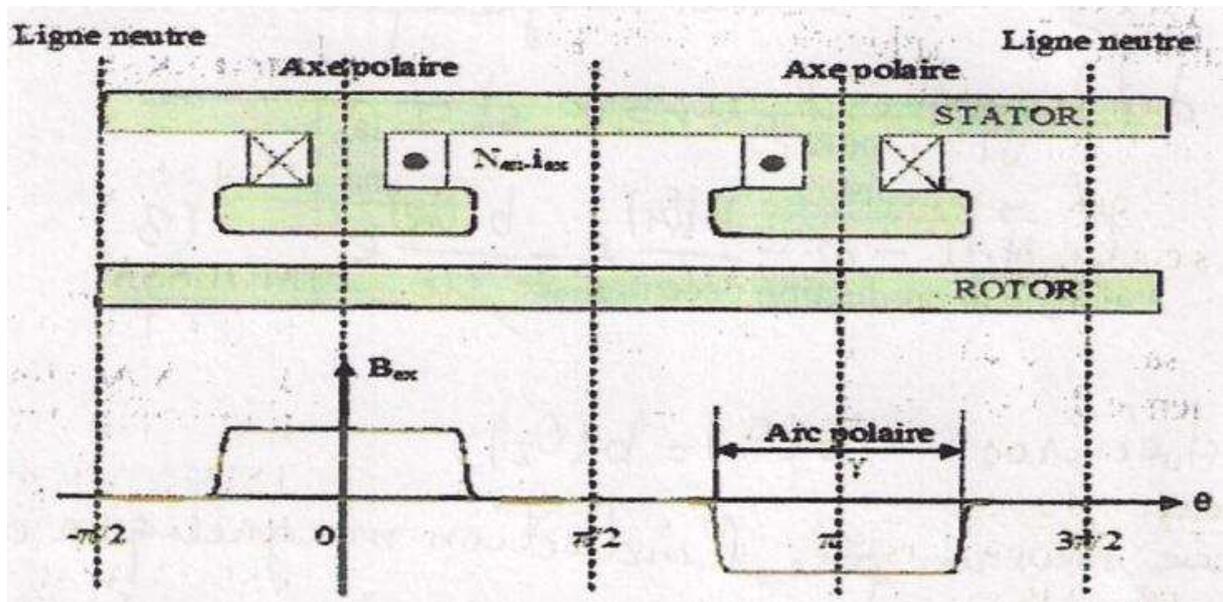


Fig. 1.7 : Répartition de l'induction magnétique $B_{ex}(\theta)$ de l'inducteur dans l'entrefer

1.4.2.2 : Flux inducteur sous un pôle

Le flux inducteur sous un pôle est une des grandeurs fondamentales de la MCC pour déterminer ses caractéristiques électriques et mécaniques. Il est donné de façon générale par :

$$\phi = \int \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad (1.7)$$

Soit dans le cas d'une machine à p paires de pôles, de longueur active L_z (profondeur de son circuit magnétique), R le rayon du rotor et en notant B_{ex} l'induction supposée constante sous un pôle,

On a :

$$\phi = \int_{-\frac{\pi}{2p}}^{\frac{\pi}{2p}} \int_0^{L_z} B(\theta, Z) R d\theta dZ = \frac{\pi}{p} B_{ex} R L_z \quad (1.8)$$

Le flux total sous tous les pôles, noté Φ_t de même polarité, pour une machine à p paires de pôles est donc :

$$\Phi_t = p \cdot \phi = \pi \cdot B_{ex} \cdot R L_z \quad (1.9)$$

1.4.2.3 : Alimentation de l'inducteur

L'inducteur est alimenté principalement de façon indépendante ou séparée, c'est-à-dire par une alimentation supplémentaire, présentée à la figure 1.8 ci-dessous. Ce mode d'alimentation conduit à une souplesse pour commander la machine. Le courant d'excitation est de quelques ampères et la puissance de l'excitation représente quelques pourcents de la puissance de la machine.

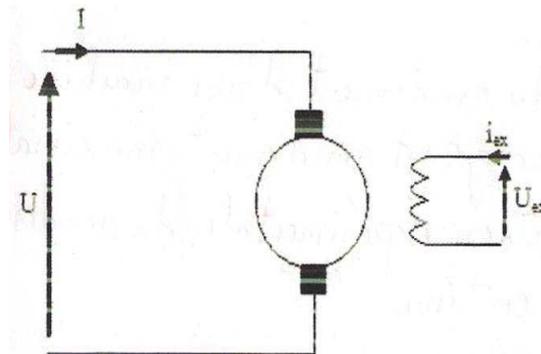


Fig. 1.8 : Alimentation d'une machine à courant continu dans le cas d'une excitation séparée

1.4.3 : Rotor

L'induit de la machine à courant continu est son rotor, où a lieu la conversion électromécanique. Les conducteurs sont placés suivant les génératrices dans des encoches réalisées dans le circuit magnétique feuilleté (figure 1.9).

L'alimentation de ces conducteurs est particulière puisque le courant dans les conducteurs doit s'inverser lorsqu'il traverse la ligne neutre. Comme l'induction magnétique change en effet de sens d'un pôle à l'autre, le courant doit également s'inverser pour que la force reste dans le même sens sur toute la périphérie du rotor, afin de provoquer la rotation du rotor. L'alimentation de l'induit étant une source continue, un organe particulier assure cette ondulation automatique du courant, c'est le COLLECTEUR. On parle aussi d'onduleur mécanique ou commutateur mécanique du courant.



Figure 1.9: Photographie de l'induit d'une machine à courant continu

1.4.3.1 : Le Collecteur

Le collecteur est la pièce maîtresse de l'induit d'une MCC, en alimentant automatiquement et correctement les conducteurs de l'induit.

Le collecteur représenté sur la figure 1.10, solidaire du rotor, est constitué d'une succession de lames conductrices en Cuivre ou en Laiton, isolées entre elles par une pièce isolante généralement en mica. Les lames sont reliées (soudées) aux conducteurs de l'induit via une partie appelée **talon**. Des balais fixes en graphite frottent sur le collecteur. Un ressort maintient la pression des balais sur le collecteur.



Figure 1.10 : Photographie du système balais-collecteur d'une machine à courant continu

La figure 1.11 ci-après indique le fonctionnement d'un collecteur en considérant seulement deux lames reliées à une bobine à pas diamétral.

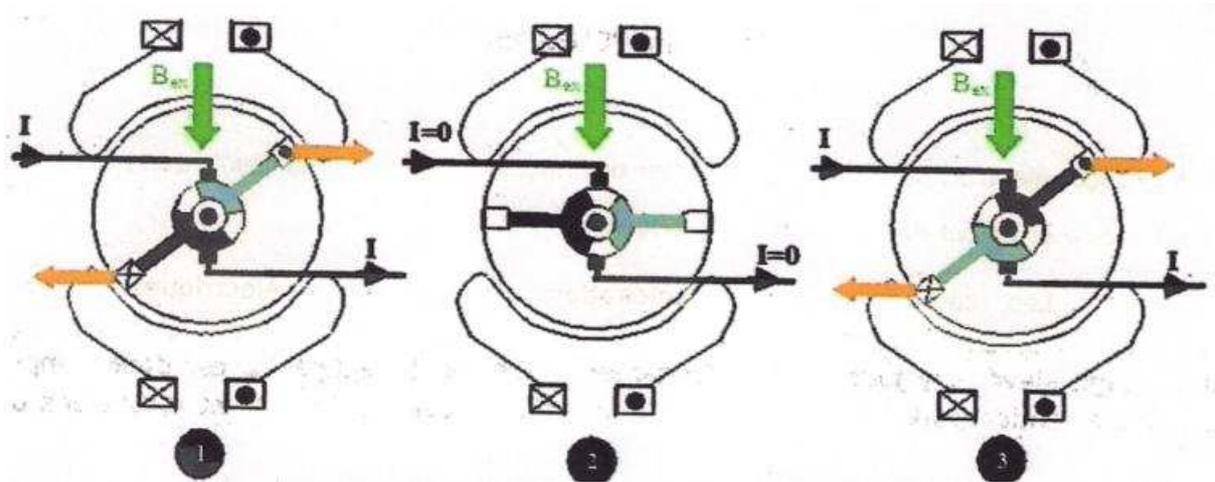


Figure 1.11 : Principe de fonctionnement d'une machine à courant continu

Cette figure illustre comment le collecteur change automatiquement le sens du courant dans les conducteurs lorsque ceux-ci passent par la ligne neutre.

Dans la position 1 : Le balai du haut frotte sur la lame reliée au conducteur gris qui est alors alimenté par un courant qui circule vers l'arrière de la machine. Ce courant revient via la tête de bobine par le conducteur noir. Il passe alors par la lame du collecteur noire puis le balai du bas. Sous l'effet du couple, le rotor tourne et les conducteurs se retrouvent sur l'axe neutre (position 2). Aucun des conducteurs n'est alors alimenté puisque les balais frottent sur l'isolant électrique (le mica) entre les deux lames du collecteur. Le courant est bien nul dans les conducteurs lorsqu'ils sont sur la ligne neutre.

Dans la position 3 : Le rotor a encore tourné et le conducteur gris se retrouve sous l'autre pôle par rapport à la position 1. Il est maintenant alimenté par un courant ($-I$) imposé par l'extérieur via le balai du bas qui frotte sur la lame du collecteur grise. C'est le collecteur noir qui est alimenté par le courant I via le balai du haut. Les courants dans les conducteurs ont bien été inversés lors de leur passage par la ligne neutre, alors que le courant extérieur alimentant les deux balais fixes n'a pas changé de sens.

1.4.3.2 : Force contre électromotrice (fcem) aux bornes d'une bobine

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique, il apparaît une force contre électromotrice e à ses bornes. C'est la loi de FARADAY-LENZ. Elle s'exprime par :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \tag{1.10}$$

En notant $S(t)$ la surface embrassée par le flux et compte tenu de la relation (1.7),

On obtient :

$$\phi(t) = B_{ex} \cdot S(t) \tag{1.11}$$

Avec $S(t) = R \cdot L_z \cdot \theta(t) = R \cdot L_z \cdot \Omega(t)$; ici R est la résistance de l'induit

Par conséquent :

$$e = - \frac{d\phi(t)}{dt} = -B_{ex} \cdot \frac{dS(t)}{dt} = -B_{ex} \cdot R \cdot L_z \cdot \Omega \tag{1.12}$$

Le flux maximal embrassé par la spire composée des 2 conducteurs (conducteur aller et retour), qui correspond à la surface maximale s'exprime par :

$$\phi_{ex} = B_{ex} \cdot \pi \cdot R \cdot L_z$$

Avec $S_{max} = \pi \cdot R \cdot L_z$

Ce qui donne :

$$e_{max} = - \frac{\phi_{ex}}{\pi} \cdot \Omega$$

Et $e(t) = - \frac{\phi_{ex}}{\pi} \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t)$;

D'où :

$$e(t) = - \frac{\phi_{ex}}{\pi} \cdot \Omega \cdot \cos(\theta) \tag{1.13}$$

Ce résultat montre que la force contre électromotrice induite est sinusoïdale et est proportionnelle au flux maximal sous un pôle ϕ_{max} et à la vitesse angulaire de rotation Ω .

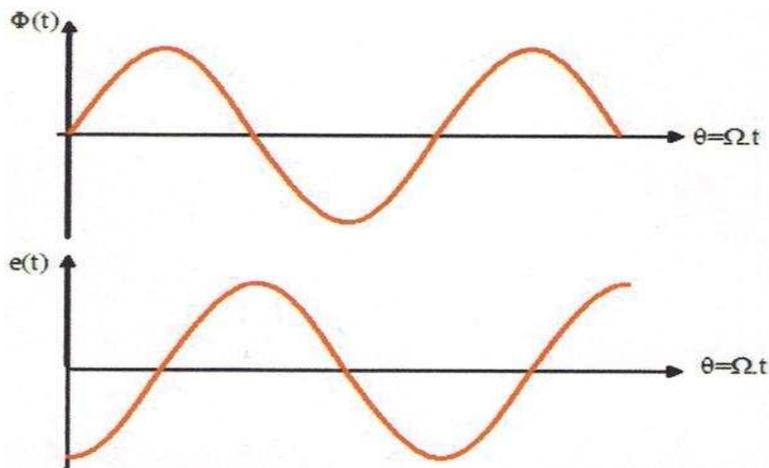


Figure 1.12 : Représentation temporelle du flux embrassé par une spire et de la force contre électromotrice créée à ses bornes

Considérons maintenant une machine à courant continu élémentaire comportant 2 spires décalées de $\frac{\pi}{2}$ telle que le montre la figure 1.13.

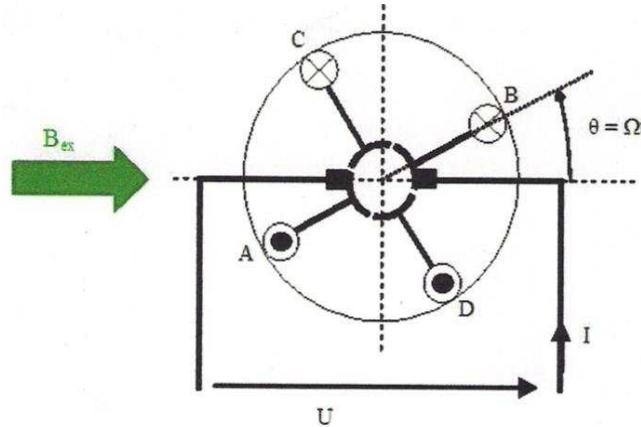


Figure 1.13 : Schéma de principe d'une machine à courant continu à 2 spires

- La fcém u vue de la source de tension d'alimentation lorsque les conducteurs A et B sont traversés par le courant I , c'est-à-dire pour $\theta \in [-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4}]$ vaut donc :

$$u = - e_{AB} = \frac{\phi_{ex}}{\pi} \cdot \Omega \cdot \cos(\theta) \quad (1.14)$$

- La fcém u vue de la source de tension d'alimentation lorsque les conducteurs C et D sont traversés par le courant I , c'est-à-dire pour $\theta \in [\frac{\pi}{4}; \frac{3\pi}{4}]$ vaut donc :

$$u = - e_{CD} = \frac{\phi_{ex}}{\pi} \cdot \Omega \cdot \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \quad (1.15)$$

- La fcém u vue de la source de tension d'alimentation lorsque les conducteurs A et B sont traversés par le courant $-I$, c'est-à-dire pour $\theta \in [\frac{3\pi}{4}; \frac{5\pi}{4}]$ vaut donc :

$$u = + e_{AB} = - \frac{\phi_{ex}}{\pi} \cdot \Omega \cdot \cos(\theta) \quad (1.16)$$

- La fcém u vue de la source de tension d'alimentation lorsque les conducteurs C et D sont traversés par le courant $-I$, c'est-à-dire pour $\theta \in [\frac{5\pi}{4}; \frac{7\pi}{4}]$ vaut donc :

$$u = + e_{CD} = - \frac{\phi_{ex}}{\pi} \cdot \Omega \cdot \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \quad (1.17)$$

1.5 : Caractéristiques d’une machine à courant continu

Une machine à courant continu fonctionne selon ses caractéristiques, que ce soit à vide (force contre électromotrice à vide) ou en charge (force contre électromotrice en charge).

Le fonctionnement à vide d’une machine à courant continu signifie qu’aucun courant ne circule dans l’induit ($I = 0$). Contrairement en charge, $I \neq 0$.

Son couple électromagnétique est donc proportionnel au produit du flux sous un pôle et du courant circulant dans l’induit.

Soit :
$$\Gamma_e = k\phi (i_{ex}).I$$

Avec :
$$k = \frac{p}{a} N \cdot \frac{1}{2\pi}$$

- p : nombres de paires de pôles ;
- a : nombres de paires de voies d’enroulement ;
- N : nombre total de conducteurs actifs de l’enroulement.

♣ **Pertes et rendement**

Les pertes dans une machine à courant continu ont diverses origines :

- Pertes joules dans l’inducteur $P_{j_{ex}} = R_{ex} \cdot I_{ex}^2$; sauf pour les machines à aimants permanents ;
- Pertes joules dans l’induit $P_{j_{ind}} = R \cdot I^2$;
- Pertes aux contacts balais-collecteur $P_{balais} = U_{balais} \cdot I$;
- Pertes fer P_{fer} et pertes par hystérésis P_h dans le rotor liées à l’induction variable (pertes par courant de Foucault) ;
- Pertes mécaniques $P_{méc}$ sur l’arbre de la machine.

La figure 1.14 illustre ces différentes pertes en FONCTIONNEMENT MOTEUR sans les pertes joules dans l’inducteur.

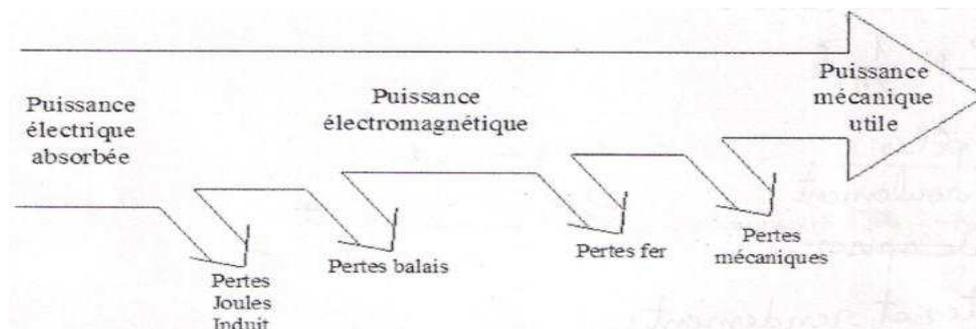


Figure 1.14 : Bilan de puissance pour une machine à courant continu

Si Γ_u est le couple utile sur l'arbre, le rendement en fonctionnement moteur est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{\Gamma_u \cdot \Omega}{\Gamma_u \cdot \Omega + R_{ex} \cdot I_{ex}^2 + R \cdot I^2 + U_{balais} \cdot I + P_{fer} + P_{méc}} = \frac{\Gamma_u \cdot \Omega}{U \cdot I + R_{ex} \cdot I_{ex}^2} \quad (1.18)$$

N.B : Le rendement d'une MCC n'est pas aussi bon que celui des machines alternatives (synchrones ou asynchrones). Hors excitation, des moteurs de quelques dizaines de kilowatts présentent des rendements de l'ordre de 75% à 95%. En incluant l'excitation, les rendements sont plus proches de 60% à 90%.

Chapitre II

MODELES ET CARACTERISTIQUES DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

2.1 : Récapitulatif de la machine à courant continu

Si la machine à courant continu est une machine relativement complexe avec son collecteur, ses pôles de commutation, ses enroulements de compensation, ses équations de fonctionnement restent très simples surtout lorsque la réaction magnétique d'induit ne modifie pas le flux inducteur.

Le tableau 2.1 regroupe les relations d'une machine à courant continu en régimes moteur ou générateur.

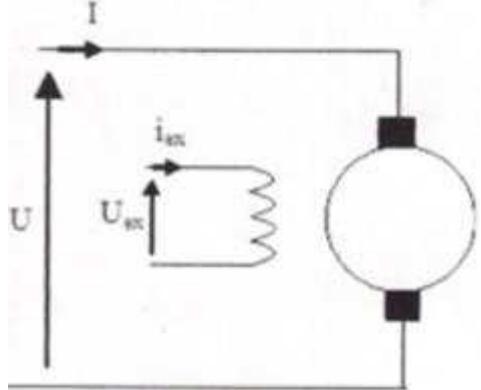
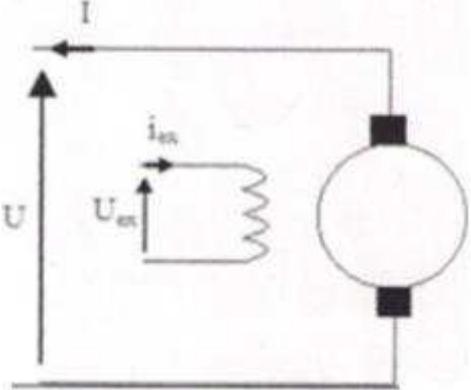
Fonctionnement Moteur	Fonctionnement Générateur
	
<p><u>En régime permanent</u></p> <p>Equations électriques : $U = E + R \cdot I$ </p> <p>Equations mécaniques : $\Gamma_e = \Gamma_r$ </p> <p>Equations électromécaniques : $E = k \cdot \Phi(i_{ex}) \cdot \Omega$ </p>	<p><u>En régime permanent</u></p> <p>Equations électriques : $U = E - R \cdot I$ </p> <p>Equations mécaniques : $\Gamma_e = \Gamma_r$ </p> <p>Equations électromécaniques : $E = k \cdot \Phi(i_{ex}) \cdot \Omega$ </p>
<p><u>En régime transitoire :</u></p> <p>Equations électriques : $U = E + R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt}$ </p> <p>Equations mécaniques : $\Gamma_e = \Gamma_r + J \frac{d\Omega}{dt}$ </p> <p>Equations électromécaniques : $\Gamma_e = k \cdot \Phi(i_{ex}) \cdot I$ </p>	<p><u>En régime transitoire :</u></p> <p>Equations électriques : $U = E - R \cdot i(t) - L \frac{di(t)}{dt}$ </p> <p>Equations mécaniques : $\Gamma_e = \Gamma_r - J \frac{d\Omega}{dt}$ </p> <p>Equations électromécaniques : $\Gamma_e = k \cdot \Phi(i_{ex}) \cdot I$ </p>

Figure 2.1 : Equations de fonctionnement d'une MCC en régimes permanent et transitoire

- L : Inductance propre de l'induit, elle joue un rôle uniquement en régime transitoire ;
- Γ_r : Couple résistant sur l'arbre, incluant les frottements de type visqueux et le couple résistant de la charge qui comprend le couple de frottement sec ;
- J : Inertie de la ligne d'arbre, elle intervient seulement en régime transitoire mécanique.

2.2 : Machine à excitation séparée en régime permanent

Ce mode d'excitation est de loin le plus répandu car c'est le plus souple pour le pilotage de la machine à courant continu en vitesse, en position ou en couple. Une machine à courant continu à aimants permanents est assimilable à une machine à excitation indépendante (séparée) fixe.

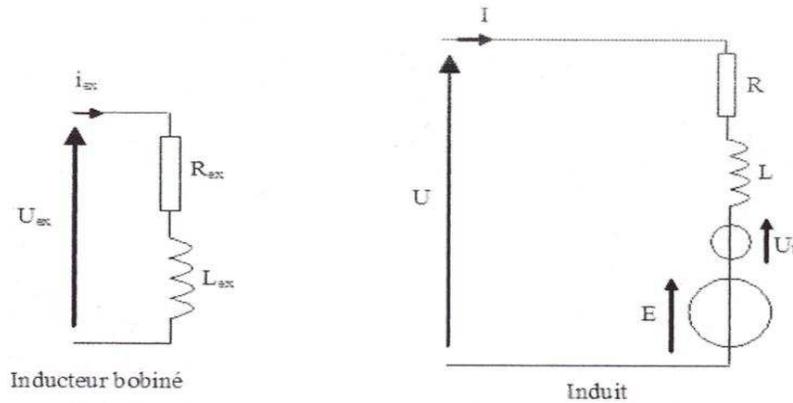


Figure 2.2 : Schéma équivalent d'une machine à courant continu (induit et inducteur bobinés)

Le courant d'excitation est en général la valeur assignée pour bénéficier du couple maximum.

En supposant que la réaction magnétique d'induit n'a pas d'influence sur le flux inducteur, et en négligeant la chute de tension aux bornes des balais (de l'ordre de 0,6 V pour des balais en graphite, et de 1,5 V pour des balais en carbone), les équations de fonctionnement en régime permanent s'écrivent simplement :

$$U = K\Omega + RI \tag{2.1}$$

$$\Gamma_e = \Gamma_u = KI \tag{2.2}$$

Avec $K = k\phi (i_{ex_{nom}})$

$i_{ex_{nom}}$: Valeur nominal du courant d'excitation

La figure 2.3 donne le schéma électrique équivalent :

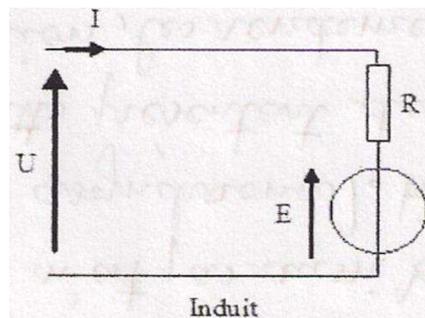


Figure 2.3 : Schéma équivalent d'une MCC

2.2.1 : Caractéristiques couple / vitesse $\Gamma_u = f(\Omega)$

Du point de vue utilisateur, la caractéristique intéressante est la caractéristique mécanique $\Gamma_u = f(\Omega)$ (couple utile Γ_u en fonction de la vitesse Ω). Le point de fonctionnement est en effet donné par l'intersection de cette courbe et de la caractéristique mécanique de la charge $\Gamma_r(\Omega)$. Le couple utile est celle disponible sur l'arbre.

On a :

$$\Gamma_u = \Gamma_e - \frac{\text{pertes rotor}}{\Omega} \tag{2.3}$$

Γ_e : Couple électromagnétique

Si on néglige les pertes au rotor, et en assimilant le couple utile au couple électromagnétique, on obtient :

$$\Gamma_u = \frac{KU}{R} - \frac{K^2}{R} \Omega \tag{2.4}$$

Ces caractéristiques forment une famille de droites parallèles (voir figure 2.4) pour différentes valeurs de la tension d'induit U.

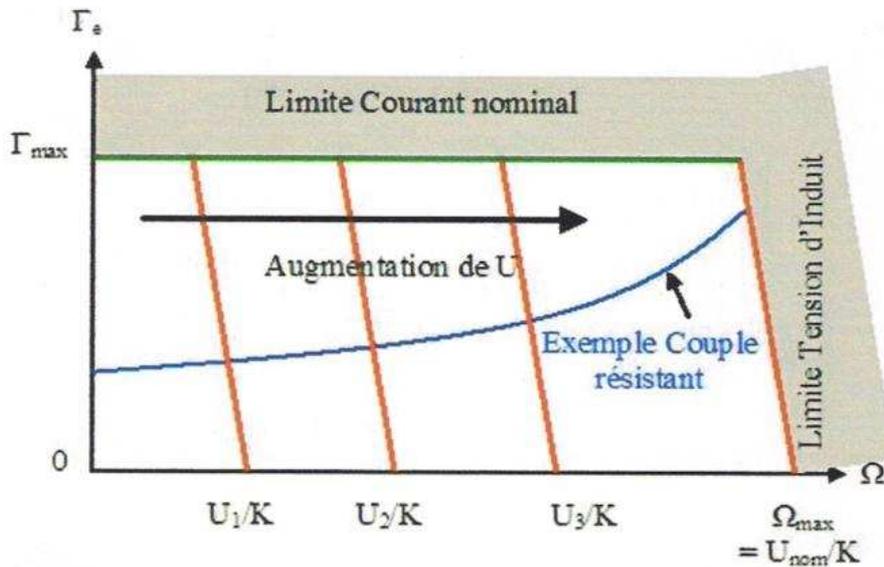


Figure 2.4 : Caractéristique couple / vitesse d'une MCC à excitation séparée nominale

Les limites de ces caractéristiques sont données par les grandeurs nominales de la machine à courant continu : courant d'induit nominal (couple maximum) et la tension d'induit nominale (vitesse maximale).

On a selon la formule (2.1), $U = K\Omega + RI$

N.B : La vitesse de rotation Ω est donc fixée par la tension d'induit U , si on néglige la chute de tension due à la résistance d'induit.

Soit : $\Omega = \frac{U}{K}$

Comme $K = k\phi (i_{ex\,nom})$, alors $\Omega = \frac{U}{k\phi (i_{ex\,nom})}$

Cependant la relation (2.4) devient :

$$\Gamma_u = \Gamma_e = \frac{k\phi(i_{ex})U_a}{R} - \frac{(k\phi(i_{ex}))^2}{R} \Omega \tag{2.5}$$

En négligeant les pertes au rotor, la caractéristique limite est une hyperbole d'équation :

$$\Gamma_u = \Gamma_e = \frac{U_{nom} \cdot I_{nom}}{\Omega} - \frac{R I_{nom}^2}{\Omega} \tag{2.6}$$

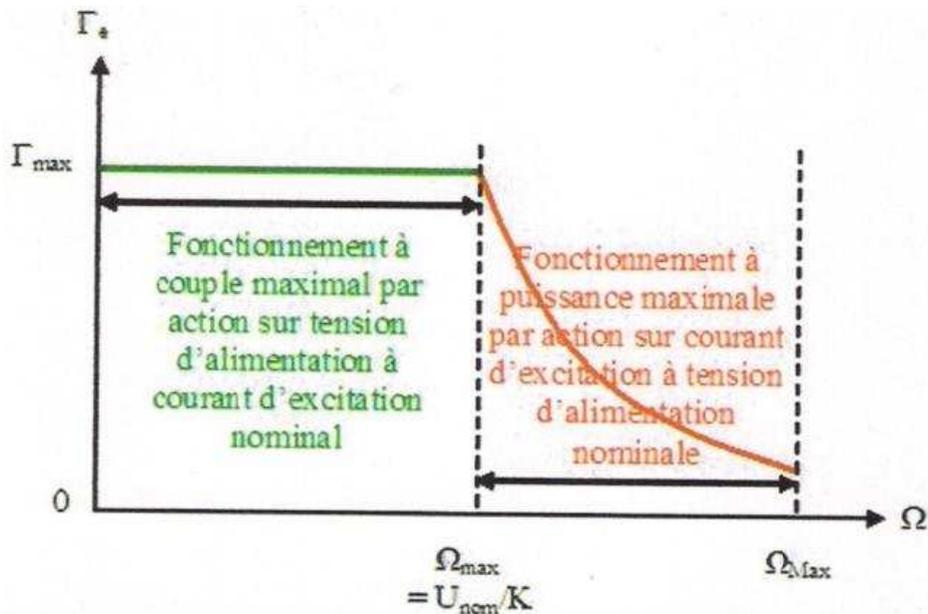


Figure 2.5 : Caractéristique couple / vitesse d'une MCC à excitation séparée avec action par la tension d'induit puis par le courant d'excitation

La commande par le courant d'excitation est utilisée pour élargir la plage de variation de la vitesse sans accroître la puissance de l'alimentation. Cette méthode est appelée **DEFLUXAGE** de l'inducteur, qui n'est pas possible avec une machine à aimants permanents.

2.2.2 : Fonctionnement général dans les quatre quadrants

La MCC est totalement réversible, son courant ou sa tension peut être positifs ou négatifs. Il est donc possible de la faire fonctionner dans les quatre quadrants du plan $\Gamma_e = f(\Omega)$; pour des vitesses et des couples électromagnétiques positifs ou négatifs.

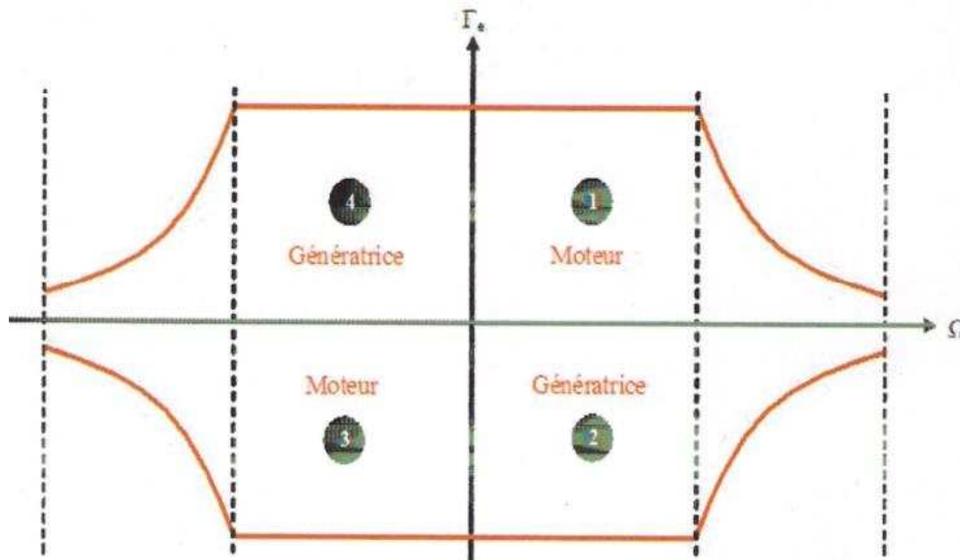


Figure 2.6 : Caractéristique couple / vitesse quatre quadrants à excitation séparée

Remarque :

- ✓ Si l'alimentation n'est pas réversible, c'est-à-dire avec des convertisseurs statiques non réversibles, seul fonctionnement dans le quadrant 1 est possible, mais celui dans le quadrant 3 est possible en inversant l'induit ou l'inducteur.
- ✓ Si l'alimentation n'est pas réversible en courant, c'est-à-dire qu'avec des convertisseurs statiques réversibles en tension, pour le freinage dans les quadrants 2 et 4, il suffit de relier l'induit à des résistances, dimensionnées pour dissiper toute l'énergie. Cette méthode s'appelle « **freinage rhéostatique** ».

Ces différents fonctionnements dans les quatre quadrants peuvent être illustrés par une locomotive électrique qui monte puis descend en freinant électriquement.

Chapitre III

DETERMINATION EXPERIMENTALE DES ELEMENTS DU MODELE DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

En vue de réaliser un asservissement ou une régulation de vitesse, de position ou de couple, il est nécessaire de pouvoir dimensionner les éléments constituant le modèle d'une machine à courant continu. Ces paramètres permettront de prévoir les évolutions temporelles des grandeurs électriques et mécaniques. Les équations régissant le fonctionnement de la machine à courant continu associée à sa charge sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} U = E + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \\ E = K\Omega(t) \\ J \frac{d\Omega(t)}{dt} = \Gamma_e - \Gamma_r - f\Omega - C_0 \\ \Gamma_e = Ki(t) \end{array} \right.$$

Ces paramètres sont :

- La résistance d'induit **R** ;
- La constante de force électromotrice (fém) ou de couple **K** ;
- L'inductance de l'induit de la machine à courant continu **L** ;
- Le moment d'inertie du rotor **J** ;
- Le coefficient de frottement visqueux **f** ;
- Le couple de frottement sec **C₀** .

Les méthodes proposées ci-dessous s'appliquent essentiellement à une machine à courant continu à excitation indépendante ou à aimants permanents.

3.1 : Essais des machines électriques à courant continu

3.1.1 : Introduction

On est amené à faire des essais sur une machine électrique pour vérifier qu'elle satisfait aux conditions prévues dans les calculs, ou à celles promises par le constructeur au client. On parle d'essais de réception.

Dans les « essais de réception », on détermine surtout le rendement de la machine pour quelques valeurs de la puissance.

Ainsi, la courbe du rendement nous permet de définir la puissance optimale fournie de la machine.

Les essais de réception se réalisent généralement sur des machines neuves ou sur des machines qui ont subi des réparations. On a à faire :

- Une mesure de la résistance d'isolement ;
- Une mesure de la résistance des enroulements à intensité et température nominale ;
- Un essai de fonctionnement.

On fait souvent : un « essai de régulation », qui consiste à étudier la variation de la tension aux bornes des génératrices ou de la vitesse des moteurs avec la charge, dans des conditions déterminées ; une « épreuve diélectrique » complétée quelques-fois par un essai d'isolement entre les divers enroulements ou entre ceux-ci et la masse, et pour les machines à collecteurs, un essai de la « commutation » et plus généralement des essais sur la tenue des balais.

Les essais peuvent être directs ou indirects.

Dans les essais directs, on place la machine dans les conditions voulues et on relève directement les grandeurs qui intéressent. Le plus souvent pour l'essai de machines puissantes, on emploie des méthodes indirectes, dans lesquelles on veut obtenir les résultats.

Dans les essais des machines électriques, on a à faire surtout :

- Des mesures électriques,
- Des mesures mécaniques,
- Des mesures cinématiques,
- Des mesures thermiques.

Nous nous proposons d'étudier les méthodes les plus intéressantes employées dans les essais des machines électriques, soit pour obtenir des résultats pratiques, soit pour vérifier les propriétés des machines étudiés dans les cours d'Electrotechnique.

3.1.2 : Vérification de l'exactitude de connexion des parties des enroulements des machines à courant continu

Dans un essai de machine, on a le plus souvent à faire fonctionner ensemble au moins un moteur et une génératrice. Lorsqu'on essaie une génératrice, on doit l'entraîner à l'aide d'un moteur, qui sera de préférence un moteur à courant continu à excitation shunt ou séparée. Ces types de moteurs permettent d'obtenir une vitesse pratiquement constante et facilement réglable. Si on essaie un moteur, sa charge pourra être obtenue facilement en lui faisant entraîner une génératrice, qui débitera sur un rhéostat. La génératrice sera habituellement à courant continu, à excitation séparée ou shunt. Le générateur shunt s'amorce facilement et, pour les deux types de génératrices, on peut régler facilement la charge.

Avant de faire l'essai d'une machine, il convient de prendre certaines précautions; ainsi on vérifiera la position et la pression des balais et leur rodage; s'il s'agit d'une machine neuve, on la fera tourner pendant un certain temps, pour roder les paliers; on vérifiera que le graissage se fait convenablement et qu'il n'y a pas de grippage, que le collecteur tourne rond et que la commutation est bonne à toutes les charges, si on peut faire fonctionner la machine en charge.

De plus, on doit vérifier les connexions avec soin et, en tout cas, fermer les interrupteurs avec prudence et se tenir prêt à couper si on constate n'importe quelle anomalie.

On choisira les rhéostats de démarrage R_d , de débit et d'excitation en tenant compte du courant maximum et minimum.

Dans l'inducteur d'un moteur shunt, on n'introduit ni interrupteur, ni fusible, pour les motifs suivants :

- Ne pas se servir d'un plot mort pour couper le courant car le moteur risque un accident mécanique ; ainsi on amènera le rhéostat au plot mort seulement après que le courant aura été coupé à l'aide d'un interrupteur ;
- Ne pas couper l'excitation d'un moteur sans couper en même temps le courant dans l'induit, car le moteur s'emballerait ou il s'arrêterait. Dans ce cas, le moteur sera mis en court-circuit et son induit risque de chauffer exagérément.

3.1.2.1 : Caractéristique externe d'une génératrice à excitation série

Caractéristique en charge : c'est la courbe $U = f(I)$, (la vitesse de rotation N et la résistance du circuit inducteur étant maintenues constantes).

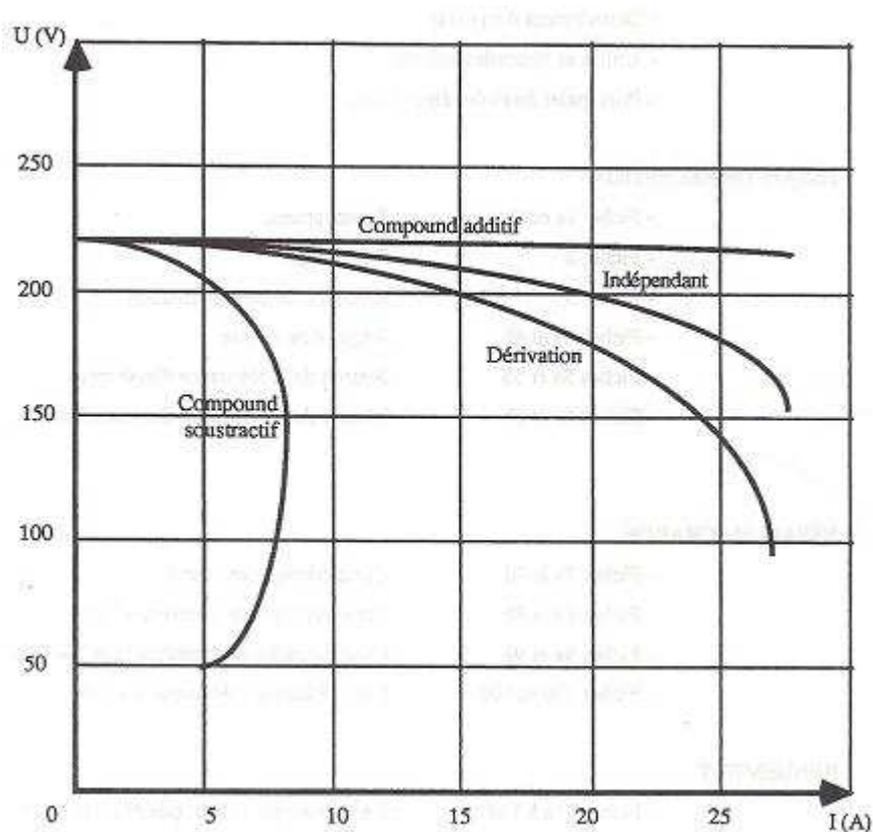


Figure 3.1 : Caractéristique en charge $U = f(I)$

Exploitation des caractéristiques :

Si l'on désire obtenir une tension pratiquement constante quelle que soit l'intensité absorbée par le circuit d'utilisation, l'étude des diverses courbes ci-dessous nous amène à choisir la génératrice à excitation compound additif.

- Méthode directe :

Si l'amorçage d'une génératrice série ne se produit pas, même pour un rhéostat R_h en court-circuit, on essaiera d'augmenter la vitesse dans les limites admissibles. Si on n'obtient pas le résultat voulu, il y a lieu de modifier les connexions entre l'inducteur et l'induit, celles-ci étant probablement mauvaises, ou changer le sens de rotation de la machine. Dans le cas d'une génératrice compound, il peut être intéressant de changer le sens de l'enroulement série, pour étudier l'effet de compoundage différentiel.

3.1.2.2 : Caractéristique de vitesse d'un moteur compound à compoundage additif

C'est la courbe de la vitesse en fonction du courant absorbé par l'induit du moteur $n = f(I)$ pour différentes charges, pour une tension d'alimentation $U =$ constante.

Dans le cas où l'on ne désire tracer que la caractéristique de vitesse $n = f(I)$, on peut charger le moteur avec une génératrice sans montage balance.

Trace de la caractéristique $n = f(I)$

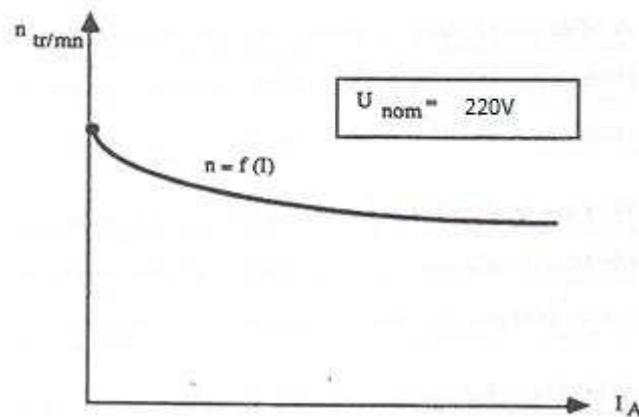


Figure 3.2 : Caractéristique de vitesse $n = f(I)$

On peut conclure que : la caractéristique $n = f(I)$ nous montre que la vitesse du moteur compound diminue lorsque la charge augmente.

En effet si l'on considère la relation :

$$n = \frac{U - (r + R_S)I}{N (\Phi_{série} + \Phi_{shunt})} \text{ avec } U, R_S, N \text{ et } \Phi_{shunt} : \text{ constants}$$

- 1) Pour les valeurs très faibles de la charge, le flux dans l'enroulement série est très faible et c'est le flux de l'enroulement shunt qui limite la vitesse du moteur : le moteur compound ne s'emballe pas à vide. Il se comporte alors comme un moteur à excitation shunt ;
- 2) Dès que la charge augmente, le courant absorbé croît ainsi que le flux dans l'inducteur série : la vitesse diminue mais dans des proportions moindres que pour un moteur série du fait de l'inducteur shunt ;
- 3) Pour les fortes charges, le courant absorbé continue à augmenter alors que le flux résultants des deux enroulements inducteurs est constant du fait de la saturation : la vitesse de rotation diminue plus lentement d'une façon presque linéaire.

N.B : Avec le moteur compound à flux additif, on a supprimé les inconvénients présentés au niveau de la vitesse par les moteurs shunts et série :

- il ne s'emballe pas à vide comme le moteur série ;

- sa vitesse est mieux adaptée aux variations d'intensités, ce qui n'est pas le cas du moteur shunt.

Il peut être intéressant, à titre de renseignement, de déterminer aussi la caractéristique de vitesse du moteur avec compoundage différentiel. Il suffit, pour cela d'établir les connexions du circuit de l'enroulement de compoundage, puis les inverser de façon que la vitesse soit supérieure, quand l'interrupteur de court-circuit est ouvert à celle obtenue quand elle est fermée.

3.2 : Détermination de la résistance d'induit R et de la constante K

La détermination de la résistance d'induit **R**, de la constante de force électromotrice (fém) **K** et de l'inductance d'induit **L** permettra de déterminer les évolutions des grandeurs électriques dans une machine à courant continu. La détermination des grandeurs électriques peut se faire séparément ou bien de manière conjointe.

3.2.1 : Détermination de la résistance d'induit R seule

En vue de simplifier les méthodes, on suppose dans cette partie que le courant d'induit **I** est parfaitement continu.

3.2.1.1 : Première méthode

Une première méthode consiste à mesurer la résistance d'induit à l'aide d'un ohmmètre branché aux bornes de l'induit. Le principe de fonctionnement d'un ohmmètre, est de mesurer la tension aux bornes de la résistance. L'ordre de grandeur du courant est de quelques centaines de microampères. Ce courant est très faible par rapport au courant circulant réellement dans l'induit en fonctionnement nominal, ne permet pas d'obtenir une valeur de résistance fiable et précise : Il peut arriver de trouver des rapports de 10 entre la résistance mesurée et la résistance réelle. De plus, le système balai-collecteur, de nature non linéaire, peut fausser les mesures. En effet la résistance de l'induit dépend de la position des balais par rapport au collecteur et de l'usure des balais. Une méthode un peu plus précise consiste à faire plusieurs essais pour différentes positions du rotor, et d'en effectuer une moyenne.

Cependant, avec cette méthode, il est impossible de tenir compte de l'influence de la température des conducteurs qui chauffent lorsqu'ils sont parcourus par le courant d'induit nominal. Par conséquent, cette méthode n'est que très rarement utilisée.

3.2.1.2 : Deuxième méthode

La seconde méthode consiste à alimenter la machine à courant continu sous une tension continue réduite et un courant parfaitement continu (par une alimentation stabilisée, par exemple) et de bloquer son rotor ($\Omega = 0$). Avec cette technique, et conformément à la relation électrique suivante :

$$U = E + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = K\Omega(t) + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = RI \quad (3.1)$$

La tension d'alimentation est directement égale au produit **RI**. Une mesure de la tension d'alimentation **U** et du courant **I** permet rapidement de déterminer la valeur de la résistance d'induit **R**.

Cette méthode ne permet cependant pas de s'affranchir du non linéarité du système balai-collecteur. Donc, obtenir une valeur proche de la réalité, il est conseillé de réaliser plusieurs essais pour différentes positions du rotor, et d'en effectuer une moyenne.

Cependant, pour tenir compte de l'effet de la température sur la valeur de la résistance, il est possible d'alimenter la machine à courant continu à vide, pendant quelques secondes ou quelques minutes, dans le but d'atteindre la température.

3.2.2 : Mesure de la résistance des enroulements :

1) Principe

On mesure la résistance des enroulements du moteur à l'intensité nominale et à la température ambiante (θ_{ambiante}) par la méthode voltampèremétrique à courant continu :

$$R_{\theta_{\text{ambiante}}} = \frac{U}{I_{\text{nominale}}} .$$

Puis on détermine par le calcul, la résistance à la température nominale :

$$R_{\theta_{\text{nominale}}} = R_{0^{\circ}\text{C}} (1 + a \cdot \theta_{\text{nominale}}) .$$

Nota : a = coefficient de température (pour le cuivre a = 0,004).

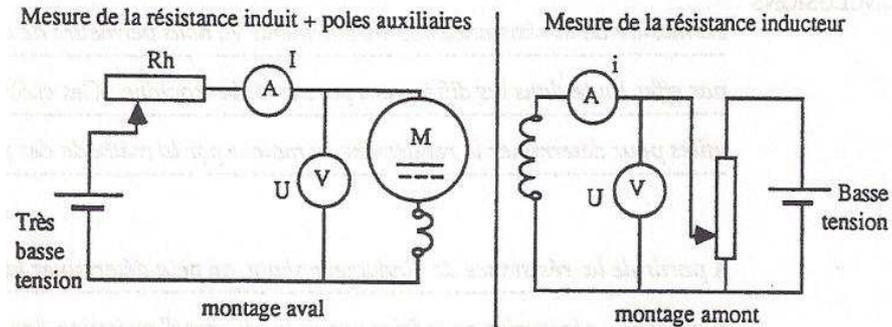
La température nominale de fonctionnement dépend de la classe d'isolement du moteur (voir plaque signalétique de la machine).

Nous allons prendre une machine au laboratoire d'Electrotechnique de l'E.N.S.E.T dont les données de la plaque signalétique sont les suivantes.

LEROY SOMMER
 MACHINE A COURANT CONTINU
 Type LSCI 32 SCI N°650240/4
 Excitation: Shunt;
 Protection: IP 23; Service: S1;
 Puissance nominale : 3kW ;
 Vitesse de rotation nominale : 1500tr/min ;
 Rendement nominal : 85% ;
 Inducteur : 220V ; 0,7A ; Classe : F ;
 Induit : 220V ; 15A ; Classe : F.

La première manipulation est la mesure des résistances des enroulements. On mesure la résistance du circuit induit + pôles auxiliaires et celle de l'inducteur.

2) Schémas de branchement



Suivant la valeur de la résistance à mesurer, on utilise le montage amont ou aval (position du voltmètre par rapport à la source de tension) afin de limiter l’erreur introduite par la résistance interne des appareils de mesures.

Les résultats de cette expérience sont portés dans le tableau de mesures ci-dessous.

3) Mode opératoire

On règle l’intensité à sa valeur nominale puis on relève la tension correspondante aux bornes du voltmètre.

Les résistances à mesurer étant très faibles, on alimentera le montage en très basse tension.

Dans le cas de l’induit, on effectue la mesure induit calé.

4) Tableau 1 : mesure de la résistance d’induit + pôles auxiliaires et inducteur

Enroulements	U [V]	I [A]	R [Ω]
Induit + pôles auxiliaires	6,3	5,2	1,21
	13	10	1,3
	19	15	1,26
Inducteur	72	0,2	360
	144	0,4	360
	252	0,7	360

Les résistances cherchées seront les moyennes des valeurs mesurées, soit :

- $r_a = 1,26 \Omega$: résistance des enroulements d’induit + pôles auxiliaires ;
- $R_{ex} = 360 \Omega$: résistance de l’enroulement de l’inducteur.

5) Conclusion

La mesure de la résistance des enroulements va nous permettre de calculer les pertes par effet Joule dans les différentes parties de la machine. Ces calculs nous seront utiles pour déterminer le rendement du moteur par la méthode des pertes séparées.

A partir de la résistance de l'inducteur série on peut déterminer la valeur du rhéostat d'excitation nécessaire pour faire varier le courant d'excitation dans un rapport donné.

3.2.3 : Détermination de la constante K seule

Une méthode permettant de déterminer la constante de fém K (égale à la constante de couple si $E = K\Omega$ et $T_e = KI$) consiste à tracer la caractéristique $U = f(\Omega)$ pour la MCC à vide. En effet, en supposant un courant d'induit nul [$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = 0$], la tension d'alimentation est directement proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor et respecte la caractéristique de la figure suivante.

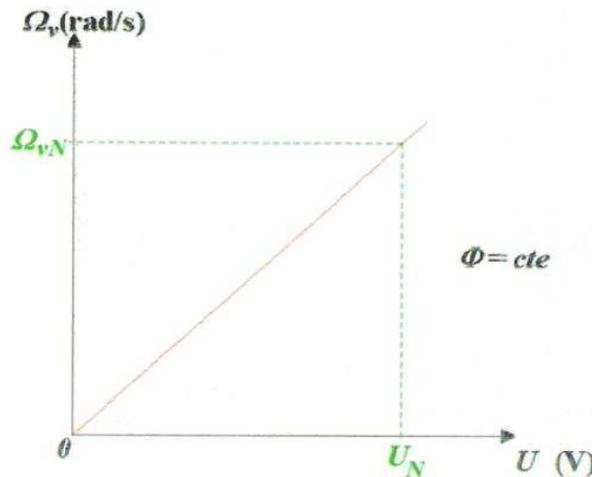


Figure 3.3 : Caractéristique Tension / Vitesse d'une MCC à vide

3.2.4 : Détermination conjointe de R et K

Une méthode précise qui permet de déterminer conjointement les valeurs de la résistance électrique d'induit R et de la constante de fém K, consiste à réaliser 2 essais pour deux tensions d'induit (U_1 et U_2), et de mesurer les 2 vitesses (Ω_1 et Ω_2) ainsi que les 2 courants absorbés (I_1 et I_2). On obtient alors un système d'équations à 2 inconnues (K et R), tel que :

$$\begin{cases} U_1 = K\Omega_1 + RI_1, \\ U_2 = K\Omega_2 + RI_2. \end{cases}$$

Ce système d'équations a pour solution :

$$\begin{cases} K = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 \Omega_1 - I_1 \Omega_2}; \\ R = \frac{U_1 \Omega_2 - U_2 \Omega_1}{I_1 \Omega_2 - I_2 \Omega_1}. \end{cases}$$

Cette méthode fournit des résultats précis, à condition de réaliser des mesures précises sur la vitesse de rotation et sur le courant d'induit.

En effet, en général, la valeur de la résistance d'induit R est assez faible, de l'ordre de la centaine de milli ohms pour les machines de moyenne puissance, et des mesures imprécises peuvent fournir des résultats aberrants tels qu'une résistance négative.

L'effet de la température sur la résistance peut être pris en compte en alimentant la machine à courant continu quelques minutes précédant les 2 essais.

3.3 : Détermination de l'inductance d'induit L

L'inductance de l'induit L joue un rôle très important dans l'évolution des grandeurs électriques et mécaniques dans une machine à courant continu. En effet, elle fixe les ondulations du courant dans l'induit de la MCC, et permet de limiter les ondulations de couple.

3.3.1 : Méthode de la pente du courant d'induit

Cette méthode consiste à alimenter la MCC par un hacheur série (convertisseur statique), et de mesurer l'ondulation du courant d'induit ΔI . On s'assurera d'être dans le cadre d'une conduction continue du courant d'induit et on négligera l'influence de la résistance d'induit R . Cette ondulation vérifie en effet la relation suivante :

$$\Delta I = I_{max} - I_{min} = \frac{U \cdot \alpha (1 - \alpha)}{L \cdot f} \quad , \quad (3.2)$$

Où : α est le rapport cyclique.

Cet essai sera réalisé si possible pour $\alpha = 0,5$; c'est-à-dire pour l'ondulation maximale du courant d'induit.

Si la conduction continue n'est pas possible avec seulement l'inductance d'induit L , on place en série avec l'induit de la machine à courant continu, une inductance supplémentaire L_b dont on connaît précisément sa valeur. L'inductance de l'induit L est donc la différence entre l'inductance totale calculée et l'inductance L_b .

3.3.2 : Méthode directe

Pour déterminer l'inductance d'induit, on réalise le montage ci-dessous et on effectue un essai en basse tension alternative (on réalise cet essai en basse tension pour éviter de détériorer le moteur car il n'est absolument pas revu pour ce type de manipulation). Cet essai va nous permettre de déterminer le module du courant d'induit pour les mêmes raisons citées précédemment. La plate forme d'essai est comme ceci :

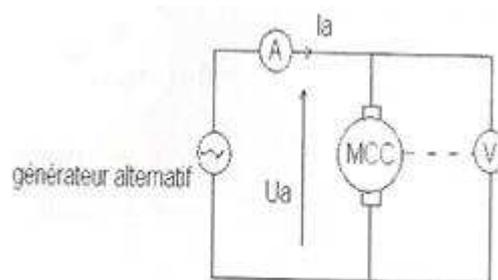


Figure 3.4 : MCC alimenté par une source alternative

On relève sa valeur pour deux points de fonctionnements :

Soit : $z = \frac{U}{I}$ avec $X = L \omega = \sqrt{Z^2 - R^2}$.

3.3.3 : Généralité sur la commutation et échelle des étincelles

La commutation est l'ensemble de phénomènes liés à la variation du courant dans les conducteurs de l'enroulement d'induit lorsqu'ils passent par la zone où ils sont court-circuités par les balais appliqués au collecteur.

La commutation est considérée comme bonne lorsque la variation du courant dans les sections n'est pas accompagnée d'étincelles entre les balais et le collecteur et que la surface de ce dernier reste propre et non endommagée lorsque la machine travaille de façon continue.

Au contraire, elle est considérée comme insatisfaisante si des étincelles se forment aux balais avec endommagement visible de la surface du collecteur qui perturbe le bon fonctionnement de la machine.

L'une des principales tâches de l'analyse des processus de commutation est l'éclaircissement des causes d'étincelles entre le balai et le collecteur. Les étincelles peuvent être provoquées par des causes qui diffèrent par leur nature, notamment mécaniques et électriques. Les causes d'origine mécanique sont liées à l'exécution imparfaite du collecteur et des balais qui se font sentir surtout pendant la rotation du collecteur à différentes vitesses : ce sont la forme elliptique du collecteur, l'usure de certaines lames du collecteur provoqué par l'échauffement et par les forces centrifuges, l'équilibre insuffisant statique et dynamique du collecteur, les vibrations des balais dans leurs cages, etc.

Indiquons parmi les causes d'origine électrique : l'accroissement de la tension entre les lames du collecteur au-delà des limites admissibles et, dans le cas le plus grave, l'apparition d'un flash au collecteur.

L'analyse des causes d'origine électrique des étincelles représente la tâche la plus difficile, cette analyse pouvant être entreprise seulement lorsque les causes mécaniques des étincelles peuvent être considérées comme exclues.

Selon la norme soviétique 183-55, les étincelles au collecteur doivent être évaluées par le degré de formation d'étincelles sous le bord de sortie du balai selon l'échelle des étincelles indiquée dans le Tableau 3.

3.3.3.1 : Etincelles d'origine électromagnétique

Les points de vue sur les causes d'origine électromagnétique qui jouent le rôle principal dans la formation des étincelles ont changé au cours des années. Au début, on pensait que les étincelles étaient provoquées par une densité excessive du courant sous le balai. Mais l'expérience a montré que lorsque le balai glisse sur un collecteur, avec une section en commutation de résistance pratiquement ohmique, des étincelles n'apparaissent pas même lorsque la densité du courant atteint en moyenne 255A/cm^2 et 350 à 400A/cm^2 sous le bord de sortie du balai [4].

L'autre hypothèse serait que la formation des étincelles est due à la présence d'une certaine tension d'ouverture entre le bord du balai et la lame de sortie du collecteur. Cela donne à penser que les étincelles apparaissent lorsque le circuit court-circuité par le balai, à l'instant

d'ouverture, possède une réserve suffisante d'énergie électromagnétique égale à $\frac{1}{2} L_r i_k^2$; où i_k est le courant de commutation complémentaire à l'ouverture du circuit court-circuité. Alors le courant au moment de court-circuitage passe seulement par un nombre restreint de contacts qui apparaissent initialement entre le balai et la lame. Cela accroît fortement la densité du courant et la tension en ces points et, si l'énergie dégagée est suffisamment importante, le bord d'entrée du balai s'échauffe et commence à former des étincelles.

Tableau 3 : Classes de commutation (échelle des étincelles)

Degré de formation d'étincelles	Caractéristique des étincelles	Etat du collecteur et des balais
1	Absence d'étincelles (commutation sombre)	Absence de noircissures sur le collecteur et de brûlures aux balais
$1^{1/4}$	Faibles étincelles ponctuelles sous une petite partie du balai	Absence de noircissures sur le collecteur et de brûlures aux balais
$1^{1/2}$	Faibles étincelles sous une grande partie du balai	Apparition des traces de noircissure sur le collecteur facilement à enlever avec de l'essence ainsi que des traces de brûlures aux balais
2	Etincelles sous tout le bord du balai. Sont admises seulement lors des courts appels de courant de charge et lors d'une surcharge	Apparition des traces de noircissure sur le collecteur impossible à enlever avec de l'essence ainsi que des traces de brûlures aux balais
3	Fortes étincelles sous tout le bord du balai avec grandes étincelles qui se détachent	Noircissures multiples sur le collecteur impossibles à enlever avec de l'essence ainsi que la brûlure et la destruction des balais

N.B : Le degré de formation d'étincelles (classe de commutation) dans les machines à collecteur doit être indiqué dans les normes pour différents genres de machines et en l'absence de normes, dans les cahiers de charge des machines. Si le degré de formation d'étincelles dans les machines à collecteur à courant continu n'a pas été stipulé, en régime nominal du travail de la machine, il ne doit pas être supérieur à $1^{1/2}$.

3.3.3.2 : Moyens de lutte contre les étincelles d'origine électromagnétique

Nous avons montré précédemment que la cause principale d'étincelles d'origine électromagnétique est le courant complémentaire de commutation i_k :

$$i_k = \frac{\sum e}{R_k} = \frac{e_r + e_k}{R_k}, \quad (3.3)$$

R_k : résistance de tout le circuit en commutation,
 e_r : force électromotrice de réactance,
 e_k : force électromotrice de commutation.

Il en découle de la formule (3.3) qu'on peut diminuer le courant i_k et par conséquent améliorer la commutation de la façon suivante :

- En diminuant le fém. e_r , étant donné qu'elle rend plus mauvaises les conditions de commutation ;
- En créant dans la zone de commutation un champ de commutation de grandeur et polarité que la fém e_k puisse équilibrer la fém e_r .
- En augmentant la résistance du circuit de la section en commutation par l'emploi du balai à grande résistance de contact.

3.3.3.3 : Causes d'étincelles d'origine mécanique

Elles sont conditionnées d'une part par les défauts du collecteur et de toute la partie tournante et, d'autre part, par les défauts des balais et des portes –balais. Parmi les premiers, il faut noter :

- l'excentricité du collecteur sur l'arbre ;
- le mauvais équilibrage des parties tournantes ;
- la non uniformité de la surface du collecteur ;
- les bords saillants des cales entre les lames ;
- le mauvais usinage du collecteur ;
- l'émergence des lames ; etc.

Parmi les autres défauts, il faut noter :

- la fixation insuffisamment précise d'un porte-balais sur son axe ;
- la répartition non uniforme des axes suivant la périphérie du collecteur ;
- la fixation insuffisamment rigide de la couronne ;
- le mauvais choix de la marque du balai, etc.

L'expérience montre que l'état des porte-balais et des balais a une grande influence sur la commutation ; c'est surtout le contact balais-collecteur qui joue un rôle primordial pour connaître la nature et les caractéristiques de ce contact.

3.4 : Méthodes expérimentales d'analyse et de réglage de la commutation

3.4.1 : Généralité

L'analyse théorique et classique de la commutation est fondée sur plusieurs hypothèses qui facilitent l'analyse, mais qui ne sont pas entièrement prouvées. Pour cette raison, les déductions obtenues, bien qu'elles soient exactes du point de vue qualitatif, ne permettent pas de faire des calculs quantitatifs exacts.

On n'arrive donc pas à déterminer le nombre exact de spires du pôle auxiliaire, à établir la valeur précise de l'entrefer sous le pôle auxiliaire, la forme de la pièce polaire, etc. On n'est obligé pas de résoudre tous ces problèmes lors de l'étude expérimentale de la commutation

en introduisant les facteurs correctifs nécessaires dans les données initiales du calcul. On ne peut donc établir les données électriques définitives d'une machine qu'en combinant le calcul et l'expérience. La méthode la plus répandue et utile de l'analyse expérimentale de la commutation est le relèvement des courbes de potentiel sous les balais et des courbes d'excitation complémentaire des pôles auxiliaires.

3.4.2 : Courbe de potentiel de balai

Cette méthode permet de juger, d'après la forme de la courbe de potentiel de balai relevée, le caractère de la commutation, c'est-à-dire de savoir si elle est linéaire, retardée ou avancée. Les courbes de potentiel de balai sont relevées comme le montre la figure 3.5.a.

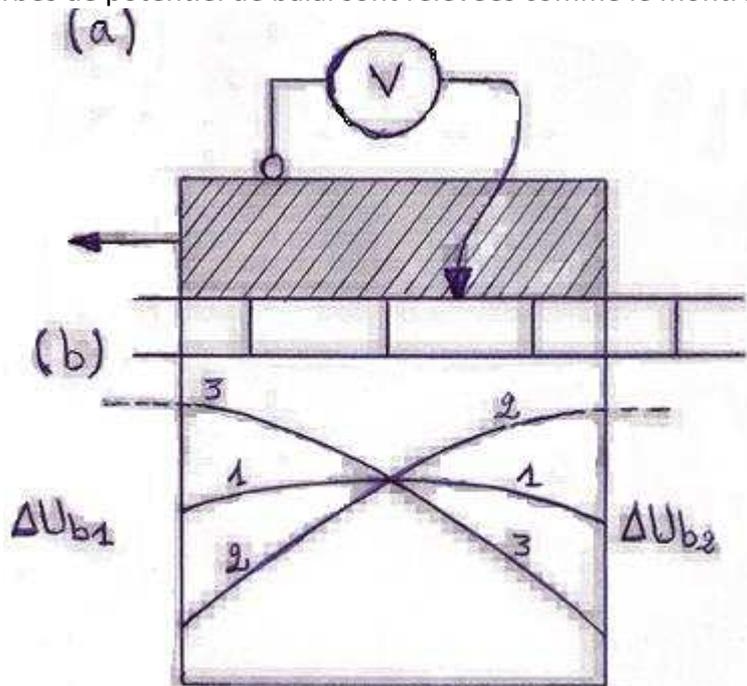


Figure 3.5 : Schéma permettant de relever les courbes de potentiel des balais

Le voltmètre doit être choisi de façon à pouvoir mesurer des tensions ne dépassant pas 3V. Une borne du voltmètre est connectée directement au balai et l'autre est reliée à un fin contact métallique ou de charbon déplacé sur la périphérie du collecteur le long de la monture du balai.

- Si la commutation est linéaire, la densité de courant sous le balai est partout la même (voir figure 3.6 ci-dessous) ; la chute de tension de contact ΔU_b a donc la même valeur le long de tout le balai et la courbe de potentiel représente presque une droite parallèle à l'axe des abscisses (courbe 1 sur la figure 3.5.b).
- Lors de la commutation retardée la densité de courant et la tension dans le contact sont plus grandes au bord de sortie du balai qu'à celui d'entrée, c'est-à-dire que $\Delta U_{b2} > \Delta U_{b1}$. Dans ce cas on obtient la courbe 2 sur la figure 3.5.b.
- La courbe 3 correspond à une commutation avancée.

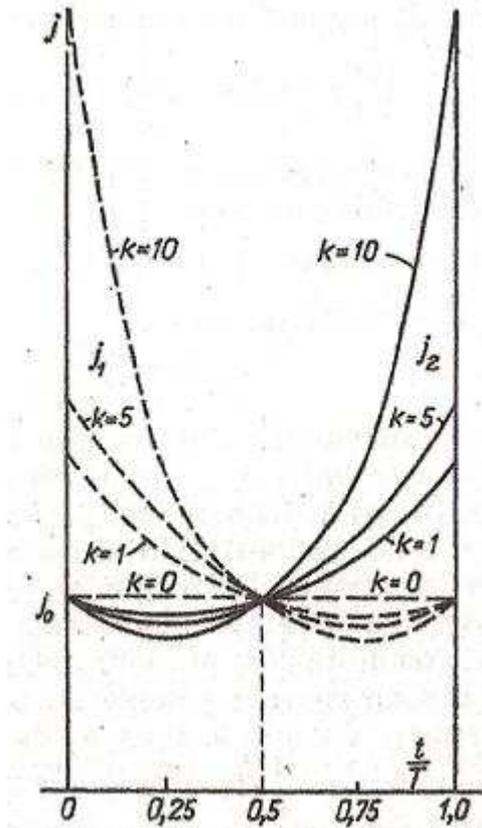


Figure 3.6 : Variation de la densité des courants sous les bords d'entrée et de sortie des balais lors de la commutation par résistance en tenant compte de R_S et de ρ (R_S et ρ représentent respectivement la résistance de la section et celle des ailettes).

La méthode exposée ci-dessus permet de juger avec une certaine approximation de la valeur du champ de commutation car la courbe 2 de la figure 3.5.b, indique que le champ de commutation est faible et la courbe 3 indique que le champ de commutation est trop fort.

Les principaux défauts de cette méthode sont les suivants :

1. Il est difficile de fabriquer un porte-balai qui assure une pression uniforme sur toute la surface du balai puisque la tension ΔU_b dépend de la force avec laquelle le balai est serré contre le collecteur au point donné ;
2. La tension ΔU_b est proportionnelle à la densité de courant seulement pour des petites densités et puis croît beaucoup plus lentement.

Pour cette raison, la méthode de la courbe de potentiel de balai permet de faire seulement une évaluation qualitative du phénomène de commutation.

3.4.3. Méthode de zone sans étincelles Cette méthode, proposée par Trettine et mise au point par V. Kassianov et M. Kostenko, s'est avérée très efficace lors du réglage expérimental de la commutation. La méthode consiste à exciter l'enroulement des pôles auxiliaires aussi par une source spéciale de courant continu et de relever les courbes de cette excitation complémentaire qui permettent de trouver la zone de fonctionnement sans étincelles et de déterminer avec la précision nécessaire le nombre optimal de spires du pôle auxiliaire ainsi que la valeur de l'entrefer δ_{aux} . Pour relever les courbes d'excitation complémentaire, on peut se servir du schéma représenté sur la figure ci-après.

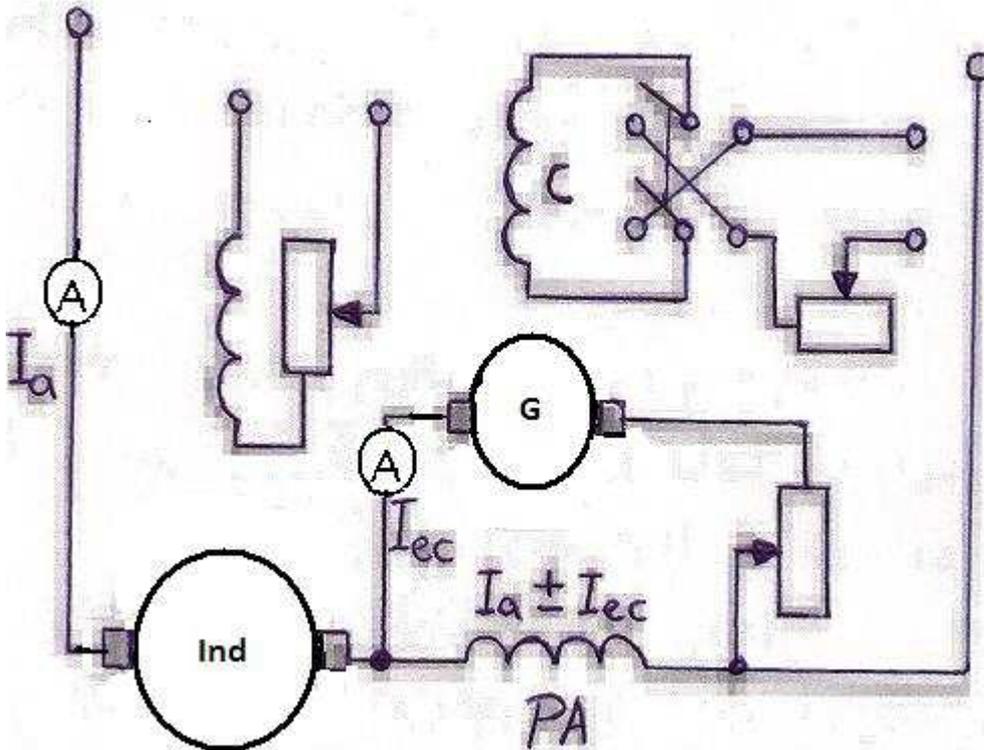


Figure 3.7 : Schéma permettant de relever les courbes d'excitation complémentaire

Ici **Ind** est l'induit de la machine essayée, **PA** est l'enroulement des pôles auxiliaires, **G** est la génératrice à courant continu à excitation indépendante pour excitation complémentaire des pôles auxiliaires, **C** est le commutateur servant à changer le sens de courant dans le circuit d'excitation et aussi la polarité de la génératrice **G**.

Pendant les essais, la machine ne peut fonctionner en charge et en court-circuit, car pour la même valeur du courant I_a dans le circuit de l'induit de la machine, les conditions de commutation sont pratiquement les mêmes dans les deux cas.

On relève d'abord les courbes d'excitation complémentaire pour une marche à vide ($I_a = 0$). Dans ce cas, la fém de réactance $e_r = 0$. En alimentant les pôles auxiliaires avec un courant passant tantôt dans un sens, tantôt dans un autre nous pouvons régler la valeur de ce courant $\Delta I_{e,c} = \pm \frac{I_{e,c}}{I_n} 100\%$ pour laquelle commencent les premières étincelles perceptibles.

Les étincelles sont provoquées par la fém non compensée (excédentaire) $\Delta e = \pm e_k$ créée dans la section en commutation par le champ des pôles auxiliaires. Si l'on néglige le phénomène d'hystérésis, les courants d'excitation complémentaire de différents signes

provoquant les premières étincelles sous les balais doivent être égaux lors de la marche à vide (portions de droite $OA = OB$ sur la figure 3.8). L'expérience prouve que la machine commence à produire des étincelles pour $\Delta_e \approx 1$ à $1,5 \text{ V}$ en fonction principalement de la marque des balais et de la pression exercée sur ces derniers.

Dans les machines de faible puissance $\Delta I_{e,c} = 10$ à 25% et dans les machines de moyenne et grande puissance $\Delta I_{e,c}$ est compris entre 6 et 10% .

Si une machine à courant continu avait un champ de commutation choisi de façon qu'à toutes les charges, il compenserait entièrement le champ de réactance de commutation, c'est-à-dire aurait la même valeur et la même forme que ce dernier ; la fém de réactance e_r et la fém de commutation e_k seraient toujours en équilibre. Dans ce cas, les courbes d'excitation complémentaire se trouvaient à la même distance de ce dernier (lignes pointillées sur la figure 3.8.a). Dans le cas où l'excitation complémentaire des pôles d'une machine réelle augmente la différence entre les fém e_r et e_k , il peut rendre la commutation plus mauvaise. De cette façon, lorsqu'il s'agit d'une machine réelle, on peut la charger jusqu'à un courant limite pour lequel on ne peut pas obtenir une commutation suffisante par le réglage des pôles auxiliaires.

D'une façon pareille dans les machines réelles, les courbes d'excitation complémentaire ne sont pas parallèles à l'axe des abscisses mais se coupent aux points C_1 , C_2 ou C_3 selon le rapport des fém e_r et e_k . Si par exemple, les fém e_r et e_k sont compensées de façon plus ou moins exacte, c'est-à-dire que le nombre de spires des pôles auxiliaires est choisi de façon optimale, les courbes d'excitation complémentaire se couperont au point C_1 sur l'axe des abscisses et la ligne médiane de ces courbes coïncidera avec l'axe des abscisses (figure 3.8.a).

Si une machine fonctionne sans excitation complémentaire, c'est la fém de réactance e_r qui prédomine et la commutation est retardée; il faut exciter les pôles auxiliaires dans le sens positif en augmentant le champ créé par eux dans la zone de commutation. Dans ce cas la ligne médiane de la courbe passe au-dessus de l'axe des abscisses vers le point C_2 d'intersection des courbes (figure 3.8.b).

Au contraire, si c'est la fém e_k qui prédomine, il faut exciter les pôles auxiliaires dans le sens négatif en diminuant le champ créé par eux. Dans ce cas, la ligne médiane de la courbe d'excitation complémentaire passera au-dessous de l'axe des abscisses vers le point C_3 d'intersection des courbes (figure 3.8.c).

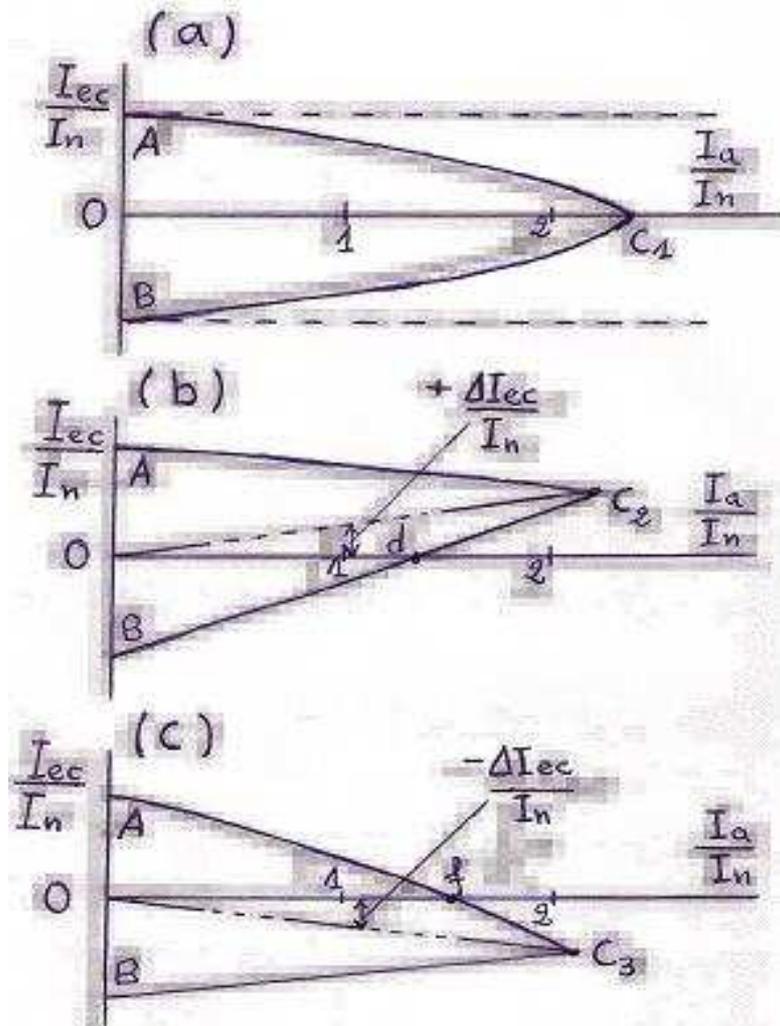


Figure 3.8 : Courbes d'excitation complémentaire

En comparant entre elles les courbes de la figure 3.8, a, b et c, on voit que dans le premier cas la machine peut fonctionner sans étincelles pour des surcharges plus grandes (portion de droite OC_1 sur la figure 3.8, a) que dans les deuxième et troisième cas (portions de droite Od et Of sur la figure 3.8, b et c), c'est-à-dire que la courbe de la figure 3.8, a, est la plus avantageuse.

Le relèvement des courbes d'excitation complémentaire a une grande importance car il permet de :

- déterminer le nombre optimal de spires du pôle auxiliaire w_{aux} pour une valeur donnée de l'entrefer sous le pôle auxiliaire ou la dimension optimale de cet entrefer pour un nombre de spires donné w_{aux} ;
- prévoir dans une certaine mesure les conditions de commutation à régime variable ;
- évaluer la qualité de la commutation et fournissent les données nécessaires pour un choix plus judicieux du nombre de spires (pour une machine de faible puissance) et de l'entrefer sous les pôles auxiliaires (machines de moyenne et de grande puissance).

Admettons que pour un courant de charge donné I_a la vitesse de rotation de la machine n ait augmenté. Dans ce cas les fém e_r et e_k augmentent proportionnellement à la vitesse de rotation et le courant de commutation complémentaire i_k augmente en proportion ; il en résulte que la zone de fonctionnement sans étincelles se rétrécit.

Le second facteur important qui influe sur la commutation est la saturation des pôles auxiliaires. Dans ce cas la fém de commutation e_k cesse de croître proportionnellement au courant I_a et la machine passe dans la zone de la commutation retardée. Pour compenser la fém de réactance e_r et pour obtenir une commutation sans étincelles il faut un courant d'excitation plus fort que pour de faibles charges.

3.5 : Déduction pratiques concernant les études théoriques et expérimentales de la commutation

En se fondant sur les hypothèses théoriques actuelles les plus probables et sur un grand nombre d'études expérimentales détaillées, on peut faire plusieurs déductions générales concernant la commutation lorsque la largeur du balai dépasse celle de la lame de collecteur.

La théorie classique de la commutation basée sur la constance de la résistivité du contact balai-collecteur pendant toute la durée de la commutation ρ_b est en certain désaccord avec la réalité en ce qui concerne la dépendance statique et dynamique de la chute de tension transitoire entre le balai et le collecteur de la densité de courant dans le contact. Mais la division des courants de commutation en deux composantes, la composante linéaire i_1 et la composante supplémentaire i_k est très utile car cette méthode permet de mettre en évidence plusieurs propriétés importantes des machines à courant continu concernant la commutation :

1. Le calcul de la forme du champ de commutation pour obtenir la commutation la plus favorable en tenant compte de l'auto-induction de la section et de l'induction mutuelle des sections voisines ;
2. La détermination de la réaction de commutation du champ dans la zone de commutation et son action magnétisante et démagnétisant sur le champ principal.

Il faut noter que pour de faibles densités de courant, ainsi que lors du relèvement des caractéristiques dynamiques de la chute de tension, les hypothèses de la théorie classique sont suffisamment justifiées, ce qui a une importance décisive pour l'obtention d'une commutation modérément avancée qui, à l'heure actuelle est considérée comme la plus favorable pour obtenir une commutation sans étincelles.

En analysant les conditions de commutation, on distinguera deux classes de machines à courant continu : les machines de faible puissance (inférieur à 100 KW) et les machines de moyenne et de grande puissance (au-dessus de 100 KW).

1. Les premières se distinguent par les petits entrefers des pôles auxiliaires non réglables, et leur exécution est beaucoup moins précise en ce qui concerne les dimensions, le montage des balais dans leurs cages, les valeurs des entrefers, etc. Pour cette raison les machines de même type, puissance, vitesse de rotation et de réglage exécutées selon les mêmes données électriques et d'après les mêmes dessins peuvent présenter des qualités de commutation notablement différentes.

Vu que ces machines sont fabriquées en grande ou en très grande série, les tolérances technologiques admises sont plus grandes et, pour cette raison, on doit y admettre des f_{em} de réactance plus petites. Bien qu'il soit possible expérimentalement d'améliorer dans une certaine mesure les qualités de commutation de ces machines, un tel réglage ne convient pas pour la fabrication en très grande série.

Si l'on considère des machines d'un même modèle, d'une même vitesse de rotation, mais de différentes tensions, par exemple de 110, 220 et 440 V, la commutation est réalisée le plus facilement dans les machines non réglables à tension de 110 V, tandis que la commutation la plus difficile sera dans les machines réglables de 440 V car pour les mêmes conditions de fonctionnement, ces machines auront un nombre de spires des sections court-circuitées w_s quatre fois plus grand.

Mais si on considère une machine à courant continu à vitesse réglable dans le rapport 1 : 2, de 220 V et une machine de 440 V à vitesse non réglable, malgré la puissance deux fois plus petite à la première vitesse les conditions de commutation de la première seront à peu près 2 fois plus difficiles. Les machines les plus difficiles du point de vue commutation sont celles à courant continu de 440 V à vitesses réglables dans les rapports 1 : 3 à 1 : 4 car elles possèdent le plus grand nombre de spires w_s dans les sections court-circuitées et la plus grande f_{em} de réactance moyenne e_r .

Dans les machines à courant continu de grande série avec un faible entrefer sous les pôles auxiliaires, l'influence de la saturation des pôles auxiliaires est relativement grande.

2. Les machines à courant continu de grande puissance ont un entrefer relativement grand sous les pôles auxiliaires, c'est pourquoi la saturation de ces derniers se fait sentir bien moins, surtout lorsqu'il existe un autre entrefer à l'embase du pôle auxiliaire et un enroulement de compensation.

D'autre part, il faut tenir compte du fait que dans les grosses machines à grand nombre de balais par tige de porte-balais on obtient à chaque instant un assez grand nombre de points de contact direct. Les machines qui comportent deux balais dans chaque porte-balais, les balais étant disposés en quinconce, s'approchent le plus des hypothèses de la théorie classique de commutation, car ainsi le nombre de points de contact direct entre le balai et le collecteur augmente.

Dernièrement, on a commencé à utiliser dans les moteurs de traction des locomotives électriques des balais coupés en deux parties et plus résistants transversalement. Ces machines présentent une commutation stable non seulement pour la charge normale mais aussi pour de fortes surcharges momentanées ou prolongées.

Vu que dans les machines à courant continu à grand entrefer et à enroulement à pas brouillé il est plus facile de choisir un champ de commutation des pôles auxiliaires de façon qu'il compense mieux le champ de réaction de la commutation, dans ce dernier cas, on peut augmenter la valeur de la fém de réactance de la commutation et de cette façon améliorer l'utilisation des machines à courant continu.

3.6 : Pertes d'énergie et rendement des machines électriques

3.6.1 : Remarques préliminaires

Une partie de l'énergie fournie par les machines électriques, n'est pas utilisée dans la machine et est dissipée dans l'espace ambiant sous forme de chaleur ; ce sont **les pertes**.

Dans les machines électriques de puissance, les pertes sont relativement faibles. Si on envisage des machines à courant continu de moyenne et de grande puissance, les pertes représentent **10 à 4 %** de la puissance fournie et, dans les machines synchrones de grande puissance refroidies à l'hydrogène, elles ne dépassent pas **1 ou 2 %**. Néanmoins, vu la quantité considérable d'énergie électrique transformée, la question des pertes joue actuellement un très grand rôle car chaque pour cent de pertes correspond en valeur absolue à de très grandes quantités d'énergie non utilisée.

D'autre part, vu que les pertes sont transformées en chaleur, elles échauffent la machine. L'expérience montre que, pour assurer le bon fonctionnement d'une machine pendant une durée d'exploitation normale (**16 à 20 ans**), la température des différentes parties de la machine ne doit pas dépasser certaines limites déterminées. Or, la température de chaque partie d'une machine dépend non seulement des pertes qui s'y produisent, mais aussi du régime de refroidissement. En utilisant tel ou autre système de ventilation, nous pouvons accroître considérablement l'utilisation des matériaux actifs de la machine (**cuivre, fer**) et rendre ainsi la machine plus légère et moins coûteuse. Nous voyons donc que la question des pertes dans une machine est étroitement liée à ses caractéristiques d'exploitation et économiques.

3.6.2 : Classification des pertes

Toutes les pertes d'une machine peuvent être divisées en deux groupes :

- 1)** Pertes principales ;
- 2)** Pertes supplémentaires.

Les pertes principales sont celles qui apparaissent par suite des principaux phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui se produisent dans la machine. Ce sont :

- A.** Les pertes mécaniques :
 - a)** Les pertes dans les paliers ;
 - b)** Les pertes de frottement de balais contre le collecteur ou contre les bagues ;
 - c)** Les pertes de frottement dans l'air y compris les pertes de ventilation.
- B.** Les pertes dans le fer :
 - a)** Les pertes d'hystérésis dans le noyau et dans les dents de l'induit ;
 - b)** Les pertes par courant de Foucault dans les mêmes pièces.

- C. Les pertes dans le cuivre :
- a) Dans l'enroulement d'induit ; dans les enroulements connectés en série avec l'enroulement d'induit : pôles auxiliaires, enroulement de compensation, etc. ;
 - b) Les pertes dans le circuit d'excitation.
- D. Les pertes dans le contact balais-collecteur et balais-bagues.

Par pertes supplémentaires, on entend les pertes dans le fer et dans le cuivre apparaissant dans la machine par suite de phénomènes électromagnétiques secondaires qui y ont lieu. Les pertes supplémentaires sont : les pertes par courants de Foucault dues aux champs de dispersion dans les enroulements et dans les parties métalliques pleines dues aux pulsations dans les dents, les pertes dans les jonctions équipotentielles, etc.

3.6.2.1 : Pertes mécaniques

- ➡ *Pertes dans les paliers de glissement* : Selon la loi générale du frottement, ces pertes s'expriment de façon suivante :

$$P_p = k_f F_t v_t = k_f f_t d_t l_t v_t \quad (3.4)$$

où : k_f : est le coefficient de frottement ; F_t : est la pression totale sur le tourillon ; f_t : est la pression spécifique sur le tourillon, c'est-à-dire la pression rapportée à une unité de projection de la surface du tourillon sur un plan parallèle à l'axe de l'arbre ; d_t et l_t : sont respectivement le diamètre et la longueur du tourillon ; v_t : est la vitesse à la périphérie du tourillon.

Pour la lubrification des paliers, on utilise de l'huile. Au repos, l'huile se trouvant entre les parties frottantes est chassée et le métal du tourillon est en contact direct avec le métal du coussinet.

Lorsque l'arbre tourne, l'huile est entraînée par le tourillon et produit dans l'espace entre la surface de l'arbre et celle du coussinet une pression augmentée qui maintient l'arbre suspendu de sorte qu'entre les surfaces frottantes apparaît une fine pellicule d'huile. Pour que le frottement soit à caractère purement liquide, il est très important de former une pellicule dont l'épaisseur soit supérieure aux rugosités existant sur la surface des pièces en frottement. De nombreuses études ont montré que pour une vitesse $v_t = 0,5$ à 4 m/s, le coefficient de frottement liquide peut être exprimé sous la forme :

$$k_f = \frac{c v_t^{0,5}}{f_t T_t} ; \quad (3.5)$$

où : c : est une constante dont la valeur dépend du genre d'huile et du jeu dans le palier et T_t : est la température du palier en degrés centigrades.

On obtient pour les pertes par frottement dans les paliers les expressions suivantes [4]:

$$P_p(v_t \leq 4) = \frac{c}{T_t} d_t l_t v_t^{1,5} \quad (3.6, a)$$

$$P_p(v_t \geq 4) = \frac{c'}{T_t} d_t l_t v_t \quad (3.6, b)$$

Si les pertes P_p sont exprimées en watts, le diamètre et la longueur du tourillon en centimètres et la vitesse en m/s, on a en moyenne $C = 26$ et $C' = 19,6$.

De l'expression des pertes dans le palier (3.6), on peut tirer une conclusion importante selon laquelle les pertes P_p ne dépendent pas de la pression spécifique, donc ne dépendent pas de la charge de la machine, car conformément à la première loi de frottement $k_f f_t = \text{constant}$. Ces pertes peuvent donc être déterminées lors de la marche à vide de la machine et elles gardent la même valeur pour une vitesse de rotation quelconque quelle que soit la charge tant que le frottement liquide existe dans le palier.

➡ *Pertes dans les paliers de roulement* : Font partie de ce groupe de paliers les roulements à billes utilisés dans les petites machines et les roulements à rouleaux utilisés dans les machines de puissance moyenne. Dans les machines de puissance intermédiaire, on utilise souvent un roulement à rouleaux du côté de la commande. Comparés aux paliers de glissement, les paliers de roulement présentent plusieurs avantages :

- ✓ Un coefficient de frottement beaucoup plus petit (de 10 à 15 fois) ;
- ✓ Des dimensions réduites, ce qui permet de diminuer la longueur de la machine ;
- ✓ Facilite l'entretien, etc.

Les pertes dans les paliers de roulement sont calculées d'après la formule [4]:

$$P_p = k_f \frac{F}{D_b} v_t, \quad (3.7)$$

où : F : Représente la charge sur la bague du palier ; D_b : Le diamètre de la circonférence passant par les centres des billes ou par les axes des rouleaux ; v_t : La vitesse à la périphérie du tourillon. Si F est exprimé en kg, D_b en centimètres et v_t en m/s, on a pour des roulements à billes $k_f = 0,001$ à $0,002$ et pour des roulements à rouleaux $k_f = 0,002$ à $0,003$.

➡ *Pertes par frottement des balais (P_{fb})* : Soit k_f le coefficient de frottement des balais contre le collecteur ou contre la bague ; f_b la pression spécifique exercée sur le balai ; S_b la surface de contact de tous les balais avec le collecteur ou la bague ; v_c la vitesse à la périphérie du collecteur ou de la bague. On a alors

$$P_{fb} = k_f f_b S_b v_c \quad . \quad (3.8)$$

Pour des balais en charbon selon des données expérimentales, on a : $k_f = 0,2$ à $0,3$ pour un collecteur et $0,15$ à $0,20$ pour les bagues de frottement ; $f_b = 0,15$ à $0,25$ kgf/cm² mais dans les machines spéciales, par exemple dans les moteurs de traction, cette valeur peut être beaucoup plus grande et atteindre $0,5$ kgf/cm².

- ➔ **Pertes par ventilation (P_v)** : Les machines électriques bien conçues dégagent à partir des petits volumes de ses matériaux actifs à surface extérieure de refroidissement relativement petite une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. Il faudra employer dans ce cas la ventilation forcée afin d'accroître le coefficient de dispersion de la chaleur.

Dans les machines à ventilateur incorporé on a :

$$P_v = k_v V v^2, \quad (3.9)$$

où: V : est la quantité d'air de ventilation ; v : La vitesse à la périphérie de la ventilation.

Si V est exprimé en m^3/s et v en m/s , on a $k_v = 1,1$. Etant donné que la quantité d'air V est proportionnelle à la vitesse v , les pertes par ventilation seront proportionnelles au cube de la vitesse et par suite au cube de la vitesse de rotation de la machine n . Dans les machines à ventilateur extérieur on a :

$$P_v = k'_v \frac{H}{\eta_v} V \quad (3.10)$$

où : H : est la pression ; pour les machines lentes ($v = 15$ m/s) $H = 30$ à 50 mm d'eau ; dans les machines rapides, $H = 50$ à 100 mm d'eau ; η_v le rendement du ventilateur est d'environ $0,5$ pour les machines lentes et de $0,25$ à $0,30$ pour les machines rapides (turbo-alternateurs). Si V est exprimé en m^3/s , on a $k'_v = 9,81$.

- ➔ **Pertes mécaniques totales (P_m)** : En additionnant toutes les pertes par frottement et les pertes par ventilation de la machine, on obtient :

$$P_m = p_p + p_b + p_v \quad (3.11)$$

3.6.2.2 : Pertes principales dans le fer

➤ *Types de pertes principales dans le fer*

Au cours du fonctionnement, le fer actif des machines électriques est soumis à un cycle d'inversion d'aimantation périodique. Cette inversion d'aimantation peut avoir lieu de deux façons. L'inversion d'aimantation dite **alternative** a lieu dans les transformations où l'induction est répartie pratiquement de façon uniforme suivant la section active du noyau et varie sinusoïdalement dans le temps. Les conditions presque analogues ont lieu dans les dents des induits des machines à courant continu et à courant alternatif. L'inversion d'aimantation dite **tournante** a lieu dans le noyau d'une machine à courant continu qui tourne dans le champ des pôles principaux qui est constant dans le temps. Dans les deux cas les pertes dans le fer comprennent :

- a) Les pertes par hystérésis ;
- b) Les pertes par courants de Foucault.

Nous allons indiquer ici seulement quelques brefs renseignements sur ces pertes.

- 1) *Les pertes par hystérésis (P_h)* : Les pertes par hystérésis par unité de masse lors d'une inversion d'aimantation alternative sont exprimées par une formule empirique proposée par Steinmetz :

$$P_h = C_h f B^\alpha \quad (3.12)$$

où : C_h : est une constante qui dépend de la nuance du fer utilisé ; f : La fréquence d'inversion d'aimantation ; B : La valeur maximum de l'induction magnétique ; et α : L'exposant de l'induction B , déterminé expérimentalement.

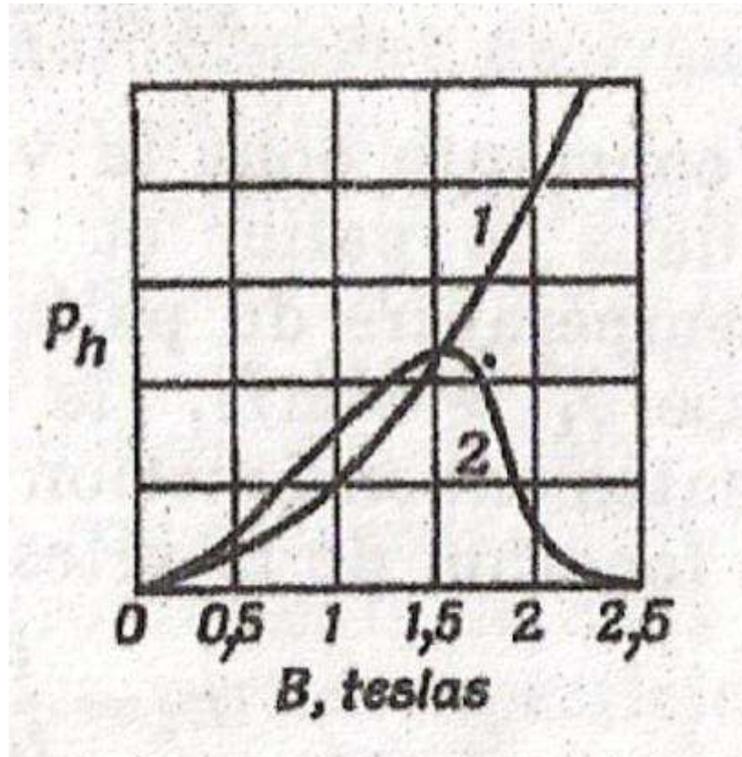


Figure 3.9 : Pertes par hystérésis : aimantation alternative (1) et tournante (2) du fer

- 2) *Pertes par courants de Foucault* : Pendant le cycle d'inversion d'aimantation du fer, des forces électromotrices y naissent dans un sens déterminé généralement d'après la règle de la main droite. Dans le même sens sont dirigés les courants de Foucault. Dans les machines de construction normale ces courants ne sont pas utilisés. En provoquant des pertes d'énergie ils contribuent à échauffer le fer et abaissent le rendement de la machine. Pour réduire l'action nuisible de ces courants, l'induit est réalisé en tôles magnétiques de faible épaisseur (généralement 0,5 mm) isolées les unes des autres et situées dans un plan perpendiculaire à l'axe de la machine.

En calculant les pertes par courants de Foucault, nous supposons que :

- a) L'épaisseur de la tôle d'acier Δ est insignifiante par rapport à sa hauteur et à sa longueur ;

- b) L'induction varie dans le temps sinusoïdalement et elle est répartie uniformément suivant l'épaisseur de la tôle; autrement dit, nous négligeons l'effet d'écran des courants de Foucault naissant dans la tôle ; et
- c) La perméabilité de l'acier et sa résistivité restent constantes.

Dans ce cas, la fém induite dans la tôle peut être considérée comme proportionnelle à la fréquence des cycles d'aimantation f et à l'induction B , c'est-à-dire que $e_f = f B$; d'autre part,

$$i_F = \frac{e_f}{r}, \text{ où } r \text{ est constante.}$$

Il en résulte que les pertes par courants de Foucault dans une unité de masse sont exprimées de façon suivante :

$$P_F = i_F^2 r = C_F f^2 B^2, \tag{3.13}$$

C_F : représente une constante qui dépend de la nuance de l'entrefer et de l'épaisseur de la tôle.

➤ *Pertes totales dans le fer* : Les formules (3.12) et (3.13) sont généralement exprimées sous la forme suivante :

$$P_h = \sigma_h \left(\frac{f}{100}\right) B^2 \tag{3.14}$$

et

$$P_F = \sigma_F \left(\frac{f}{100}\right)^2 B^2 \tag{3.15}$$

Les pertes P_h et P_F sont exprimées en w/kg, l'induction B est exprimée en T ; les valeurs des coefficients σ_h et σ_F sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4 : tableau représentatif des valeurs des coefficients σ_h et σ_F

Acier	Epaisseur de la tôle, mm	σ_h	σ_F
Faiblement et moyennement allié...	1,0	4,4	22,4
	0,5	4,4	5,6
	0,35	4,7	3,2
Fortement allié...	0,50	3,0	1,2
	0,35	2,4	0,6

Les pertes totales dans un kg de masse de fer sont donc :

$$P_f = P_h \text{ et } P_F = \sigma_h \left(\frac{f}{100}\right) B^2 + \sigma_F \left(\frac{f}{100}\right)^2 B^2 \tag{3.16}$$

Pour calculer les pertes totales dans l'acier on se réfère généralement aux valeurs des pertes spécifiques dans un kg d'acier de nuance donnée pour la fréquence $f = 50$ Hz et l'induction $B = 1$ T qui varie sinusoïdalement dans le temps.

3.6.2.3 : Pertes principales dans le cuivre

- **Pertes dans le cuivre de l'induit (P_{ca}):** Soit i_a le courant dans une branche de l'enroulement, $2a$ le nombre de branches parallèles de l'enroulement, r'_a la résistance d'une branche et $I_a = i_a 2a$ et $r_a = \frac{r'_a}{2a}$ respectivement le courant dans l'induit et la résistance de l'enroulement d'induit. On a alors

$$P_{ca} = i_a^2 r'_a 2a = \left(\frac{I_a}{2a}\right)^2 r'_a 2a = I_a^2 \frac{r'_a}{2a} = I_a^2 r_a \quad (3.17)$$

Soit ρ_{15} la résistivité du cuivre à la température $T_0 = 15$ °C, N le nombre de conducteurs de l'enroulement d'induit, l_{cond} la longueur d'une demi-spire de l'enroulement, S_{cond} la surface de la section transversale du conducteur, T_a la température de l'enroulement d'induit lors du travail, α le coefficient de température du cuivre égal numériquement à l'accroissement de la résistance du conducteur de 1 ohm, lorsque la température s'élève de 1 °C ; pour les limites des variations de la température qui sont courantes dans la construction des machines électriques, on a en moyenne $\alpha = 0,004$.

Il en résulte que

$$r_a = \rho_{15} \frac{N l_{cond}}{2a S_{cond}} [1 + \alpha (T_a - T_0)] \quad (3.18)$$

Par conséquent,

$$P_{ca} = \left(\frac{I_a}{2a}\right)^2 \rho_{15} \frac{N l_{cond}}{S_{cond}} [1 + \alpha (T_a - T_0)]. \quad (3.19)$$

Si l_{cond} est exprimée en cm et S_{cond} en mm^2 , on a :

$$\rho_{15} = \frac{1}{5700} \text{ ohm mm}^2 \text{ pour } T_0 = 15 \text{ °C.}$$

Selon la Norme soviétique 183-55 les pertes dans le cuivre des machines électriques sont rapportées à la température $T_a = 75$ °C.

- **Pertes d'excitation (P_{exc}):** Selon la Norme soviétique 183-55 les pertes d'excitation comprennent les pertes dans l'enroulement d'excitation et les pertes dans les rhéostats de réglage si ces derniers sont nécessaires pour le fonctionnement de la machine en régime nominal.

Pour cette raison
$$P_{exc} = U_{exc} I_{exc} \quad (3.20)$$

où :

U_{exc} : représente la tension aux bornes du circuit d'excitation et

I_{exc} : Le courant dans le circuit d'excitation.

- **Pertes dans le contact balai-collecteur (P_b):** Si ΔU_b est la chute de tension dans le contact balai-collecteur par paire de balais de différente polarité et $I_a = i_a 2a$ est le courant de l'induit, les pertes dans le contact balai-collecteur peuvent être déterminées d'après la formule :

$$P_b = \Delta U_b I_a. \quad (3.21)$$

3.6.2.4 : Pertes supplémentaires

Les pertes supplémentaires P_s apparaissent dans le fer et dans le cuivre des machines électriques. Certaines pertes supplémentaires prennent naissance déjà lors de la marche à vide, d'autres apparaissent seulement lors de la marche en charge. Nous envisageons ici seulement les machines à courant continu.

A vide les pertes supplémentaires apparaissent :

- Dans les noyaux des pôles principaux et des pôles auxiliaires ainsi que dans la culasse par suite de la pulsation longitudinale du flux provoquée par l'existence des dents de l'induit ;
- Dans les cornes des pôles principaux par suite des oscillations transversales du flux magnétique ;
- Dans l'enroulement de l'induit par suite de la répartition non uniforme du champ magnétique principal dans l'encoche.

Des pertes supplémentaires en charge apparaissent :

- Dans le noyau de l'induit par suite de la distorsion du champ magnétique principal par la réaction d'induit (dans les machines sans enroulement de compensation) ;
- Dans les sections en commutation lors de la variation du flux de distorsion traversant la section en commutation conformément à la variation du courant dans la section depuis $+i_a$ jusqu'à $-i_a$;
- Dans le contact balai-collecteur par suite de la répartition non uniforme de la densité du courant sous le balai lors de la commutation curviligne ;
- Dans les jonctions équipotentielles si la machine les comporte.

Notons que les pertes supplémentaires sont soit impossibles à calculer soit calculées avec une grande approximation. Pour cette raison, la Norme soviétique 183-55 admet pour les machines à courant continu sans enroulement de compensation à charge nominale les pertes supplémentaires égales à 1% de la puissance utile si la machine fonctionne en génératrice et de la puissance fournie si la machine fonctionne en moteur ; pour les machines à courant continu compensées ces pertes sont de 0,5%. A charge variable on admet que les pertes supplémentaires varient proportionnellement au carré du courant.

3.6.2.5 : Pertes totales dans une MCC et son rendement

Connaissant les pertes dans différentes parties de la machine, les pertes mécaniques P_m , les pertes dans le fer P_f , les pertes dans le cuivre de l'enroulement d'induit et des enroulements connectés en série avec ce dernier P_{ca} , les pertes du circuit d'excitation P_{exc} , les pertes du contact balai-collecteur P_b et les pertes supplémentaires P_s , nous pouvons les sommer

$$\sum P = P_m + P_f + P_{ca} + P_{exc} + P_b + P_s \quad (3.22)$$

Si P_1 est la puissance fournie à la machine et P_2 la puissance fournie par la machine, on a

$$P_1 = P_2 + \sum P \quad (3.23)$$

Le rendement de la machine est le rapport entre la puissance utile P_2 qu'elle fournit et la puissance totale P_1 qu'elle absorbe :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.24)$$

La puissance d'une génératrice à courant continu fournie au réseau est

$$P_2 = U_r I_r ;$$

où U_r et I_r représentent respectivement la tension et le courant dans le circuit extérieur de la génératrice. On a alors

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = \frac{U_r I_r}{U_r I_r + \sum P} . \quad (3.25)$$

Vu que $\sum P$ a généralement une faible valeur par rapport à P_2 , on peut représenter l'équation (3.25) sous une autre forme qui, lors du calcul, donne un résultat plus exact

$$\eta_g = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} . \quad (3.26)$$

Si on exprime le rendement en pour cent, on a

$$\eta_g = 100 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \times 100\% . \quad (3.27)$$

La puissance utile P_2 des moteurs à courant continu est celle qu'ils développent sur l'arbre. La puissance fournie par le réseau $U_r I_r$ au moteur, y compris la puissance d'excitation de ce dernier, représente la puissance P_1 et pour cette raison

$$\eta_m = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = \frac{U_r I_r - \sum P}{U_r I_r} \quad (3.28)$$

ou bien

$$\eta_m = 1 - \frac{\sum P}{P_1} . \quad (3.29)$$

Si on exprime le rendement du moteur en pour cent, on a

$$\eta_m = 100 - \frac{\sum P}{P_1} \times 100\% . \quad (3.30)$$

Avec l'accroissement de la puissance des machines à courant continu, la part relative des pertes ($\sum P/P_n$) diminue et le rendement croît en conséquence.

3.6.2.6 : Variation du rendement d'une MCC avec la charge et rendement maximal

Lorsque le régime de fonctionnement d'une machine à courant continu varie, la puissance qu'elle absorbe P_1 ainsi que $\sum P$ varient aussi et, pour cette raison, son rendement varie également.

A vide, quand la puissance appelée par la charge $P_2 = 0$, le rendement $\eta = 0$. Avec l'accroissement de la charge le rendement augmente d'abord assez vite jusqu'à une certaine valeur maximale de la charge et ensuite commence à diminuer. La valeur de la charge pour laquelle le rendement atteint la valeur η_{max} dépend du rapport entre les valeurs des différentes pertes et de leur variation avec la charge.

Examinons les conditions d'obtention de η_{max} pour une génératrice à courant continu à excitation en dérivation qui travaille à une vitesse de rotation constante ($n = \text{constante}$) et à une tension constante ($U = \text{constante}$). Dans ce cas, les pertes à vide (pour $I = 0$) sont constantes :

$$P_0 = P_m + P_f + P_{fb} + P_{exc 0} = \text{constante}, \quad (3.31)$$

où $P_{exc 0}$ sont les pertes d'excitation pour une tension $U = U_r = \text{constante}$ et à courant de charge $I = 0$. Lorsque la génératrice est en charge, des pertes apparaissent dans le circuit de son induit $P_{ca} = r_a I^2$ et aux contacts des balais $P_b = \Delta U_b I$. De plus, pour maintenir la tension $U = U_r = \text{constante}$ lorsque le courant de charge augmente, le courant d'excitation doit augmenter, ce qu'on peut exprimer approximativement par l'équation $i_{exc} = i_{exc 0} + k_1 I$. De cette façon, les pertes dans le circuit d'excitation $i_{exc}^2 r_{exc}$ comprendront une composante constante $P_{exc 0}$ et une composante variable qui sera proportionnelle à I^2 .

Lorsque la machine est chargée, la somme de ces pertes s'exprime par l'équation :

$$\sum P = P_0 + k_2 I + k_3 I^2 \quad (3.32)$$

où k_1, k_2, k_3 sont des constantes, et le rendement par l'équation :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} = \frac{UI}{P_0 + (U + k_2)I + k_3 I^2} \quad (3.33)$$

Pour trouver les conditions pour lesquelles le rendement η est maximum, prenons la dérivée de η par rapport au courant I et égalons-le à zéro :

$$\frac{d\eta}{dI} = \frac{[P_0 + (U + k_2)I + k_3 I^2]U - UI(U + k_2 + 2k_3 I)}{[P_0 + (U + k_2)I + k_3 I^2]^2} = 0 \quad (3.34)$$

d'où l'on tire

$$k_3 I^2 = P_0. \quad (3.35)$$

Donc le rendement atteint sa valeur maximale lorsque les pertes proportionnelles au carré du courant sont égales aux pertes qui ne dépendent pas du courant.

De la même façon on peut trouver les conditions permettant d'obtenir η_{max} lorsque la vitesse de la machine varie.

En étudiant les machines à courant continu, on choisit les rapports entre les pertes constantes et les pertes variables de façon que η_{max} se trouve dans la gamme de charges pour lesquelles la machine puisse travailler pour une longue durée.

3.6.2.7 : Détermination expérimentale du rendement d'une MCC

La détermination expérimentale du rendement d'une machine à courant continu est l'un des éléments importants des essais de celle-ci. La détermination directe du rendement d'après la formule (3.24) par la mesure de la puissance rendue P_2 et de la puissance absorbée P_1 peut être réalisée avec une précision suffisante seulement lorsque le rendement de la machine ne dépasse pas 86% car les erreurs de mesure des puissances P_1 et P_2 déterminent directement l'erreur dans la valeur obtenue du rendement [4].

Lorsque $\eta > 86\%$, le calcul du rendement doit être fait selon les formules (3.26) et (3.29) d'après les données des mesures de différentes pertes ou de leur somme. Dans ce cas, l'erreur de mesure des pertes étant rapportées à la puissance absorbée diminue beaucoup et influe peu sur l'erreur de la valeur résultante du rendement.

A l'heure actuelle, on distingue plusieurs méthodes de détermination expérimentale des pertes et du rendement dans les machines à courant continu. Citons par exemple :

- La méthode des pertes séparées ;
- La méthode de charge mutuelle ;
- La méthode de CARDEW-FONTAINE ;
- La méthode du moteur auxiliaire.

Ces méthodes peuvent se distinguer par le degré de précision.

Lorsqu'on dispose de deux machines identiques, on peut déterminer le rendement par la méthode d'opposition, en couplant mécaniquement et électriquement les deux machines (voir figure 3.10). L'une des machines fonctionne en génératrice et l'autre en moteur. De l'extérieur est fournie (par voie mécanique ou électrique) uniquement la puissance nécessaire pour compenser les pertes des deux machines, car la puissance fournie par la génératrice revient dans le moteur. Connaissant la somme des pertes $\sum P_g$ du groupe, on peut calculer le rendement de chaque machine en admettant que les pertes sont les mêmes dans les deux machines et sont égales à $\sum P_g / 2$.

Pour la machine fonctionnant en génératrice on a :

$$\eta_g = \frac{UI}{UI + \frac{\sum P_g}{2}} \quad (3.36)$$

et pour la machine fonctionnant en moteur on a :

$$\eta_g = \frac{UI - \frac{\sum P_g}{2}}{UI} \quad (3.37)$$

En utilisant la méthode d'opposition pour déterminer le rendement des machines à courant continu à excitation indépendante, on augmentera l'excitation de la génératrice par rapport à celle du moteur de façon que dans le circuit principal des deux machines circule un courant I et aux bornes des machines couplées électriquement existent la tension nominale U_n .

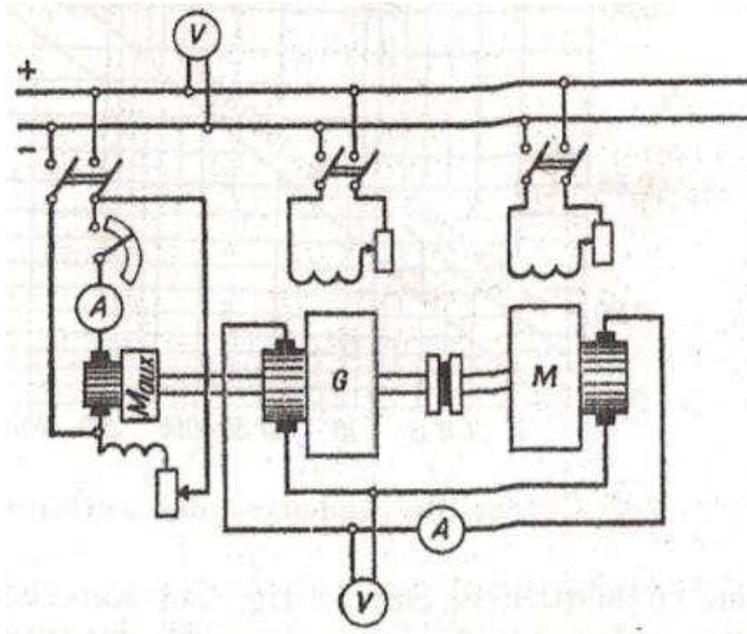


Figure 3.10: Schémas pour déterminer le rendement par la méthode de récupération

Dans ce cas, les pertes mécaniques, les pertes dans le cuivre du circuit principal, les pertes dans le fer et les pertes aux contacts des balais sont compensées mécaniquement par le moteur auxiliaire M_{aux} qui fait tourner le groupe et les pertes pour l'excitation sont compensées directement par le réseau de courant continu qui alimente les enroulements d'excitation des machines.

3.7 : Rendement par la méthode directe

1 : Principe

La puissance indiquée sur la plaque signalétique d'un moteur est toujours la puissance utile ; c'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur. La puissance absorbée par le moteur à la fois dans l'induit et dans l'inducteur est une puissance électrique. La différence entre ces deux puissances est due aux diverses pertes d'origines électriques ou mécaniques qui apparaissent lors de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique dans le moteur.

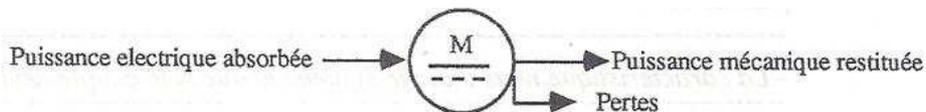


Figure 3.11 : Phénomène de transformation d'énergie

Le rendement du moteur pour une tension d'alimentation à une charge donnée est déterminé par :

$$\eta = \frac{\text{Puissance mécanique restituée}}{\text{Puissance électrique absorbée}}$$

On mesure la puissance absorbée avec un voltmètre et un ampèremètre :

$$P_{\text{absorbée}} = U_{\text{ nominale}} \cdot I_{\text{absorbée}}$$

où $U_{\text{ nominale}}$: la tension nominale aux bornes du moteur ; $I_{\text{absorbée}}$: le courant absorbé .
On détermine la puissance mécanique restituée à partir du couple utile du moteur (T) et de la vitesse de rotation (n) :

$$P = T \cdot \omega \text{ [W]}, \quad (3.38)$$

où : $T = g l$: valeur du couple en Newton-mètre ; g : valeur du poids de réglage en Newton ;
 l : longueur en mètre du bras de levier qui correspond à l'équilibre ; n : vitesse de rotation en rd/s. Rendement par la méthode directe vaut:

$$\eta = \frac{T \cdot \omega}{U_{\text{ nominale}} \cdot I_{\text{absorbée}}}$$

2 : Schéma de branchement

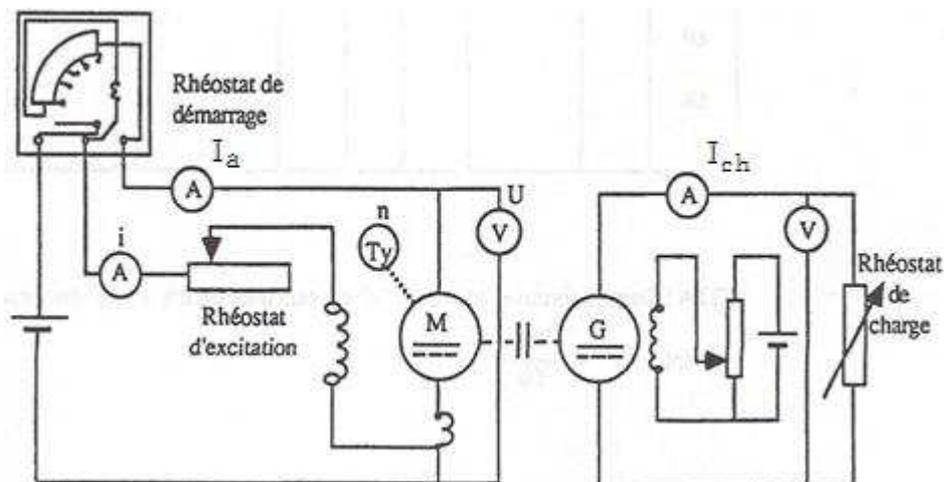


Figure 3.12 : Mesure de rendement par méthode directe

3 : Mode opératoire

Après avoir réglé la charge qui correspond au régime de fonctionnement pour lequel on veut déterminer le rendement, on rétablit l'équilibre du levier de la dynamo balance avec le poids de réglage. En effet, le moteur est chargé par une dynamo-balance à excitation indépendante (amorçage indépendant du sens de rotation) qui débite dans un rhéostat de charge. On équilibre à l'arrêt le levier de la dynamo-balance à l'aide du contre poids après avoir ôté le poids de réglage du levier. On démarre alors le moteur alimenté à sa tension nominale, et on vérifie aussitôt si le sens de rotation déplace le levier vers le haut. Dans le cas contraire, il faut inverser le sens de rotation du moteur ; on replace le poids de réglage sur le levier et on règle la vitesse à une valeur proche de sa valeur nominale.

On charge le moteur à l'aide de la génératrice. Après avoir réglé la charge qui correspond au régime de fonctionnement pour lequel on veut déterminer le rendement ; on rétablit l'équilibre du levier de la dynamo-balance avec le poids de réglage.

On mesure alors :

- ❖ L'intensité totale absorbée par le moteur : « I_a »
- ❖ La tension d'alimentation du moteur : « U »
- ❖ La force qui correspond au poids de réglage : « g »
- ❖ La longueur du bras de levier qui correspond à l'équilibre : « l »
- ❖ La vitesse de rotation du moteur : « n »
- ❖ Le courant appelé par la charge : « I_{ch} ».

Les résultats de l'expérience sont portés dans le tableau de mesures suivant.

Tableau 5 : données des mesures du rendement par méthode directe
 $n = 1500 \text{ tr/min}$, $U = 220 \text{ V}$.

I_a	P_a [W]	l [m]	T [N.m]	I_{ch} [A]	P_u [W]	η %
1,81	398,2	0	0	0	0	0
3,61	794,2	0	0	1,52	0	0
4,41	970,2	0,23	4,6	2,52	708,84	73,06
5,29	1163,8	0,29	5,8	4	893,75	76,79
8,18	1799,6	0,485	9,16	6,1	1494,72	83,05
12,18	2679,6	0,735	14,7	9,5	2265,68	84,55
14,38	3163,6	0,88	17,6	11,2	2712,07	85,72
15,88	3493,6	0,955	19,1	12,4	2943,67	84,25
18,2	4004	0	0	14	0	0

N.B : Dans la formule $\omega = 2\pi n$, « n » est exprimée en tr/s (si « n » est mesurée en tr/min, la formule devient : $\omega = \frac{2\pi n}{60}$).

Le rendement de la machine varie en fonction de la charge ; en l'occurrence du courant appelé par la charge. Ainsi, le rendement maximum est obtenu lorsque le courant appelé par la charge est de 11,2 A.

La courbe représentative obtenue à partir des résultats insérés dans le tableau ci-dessous est la suivante :

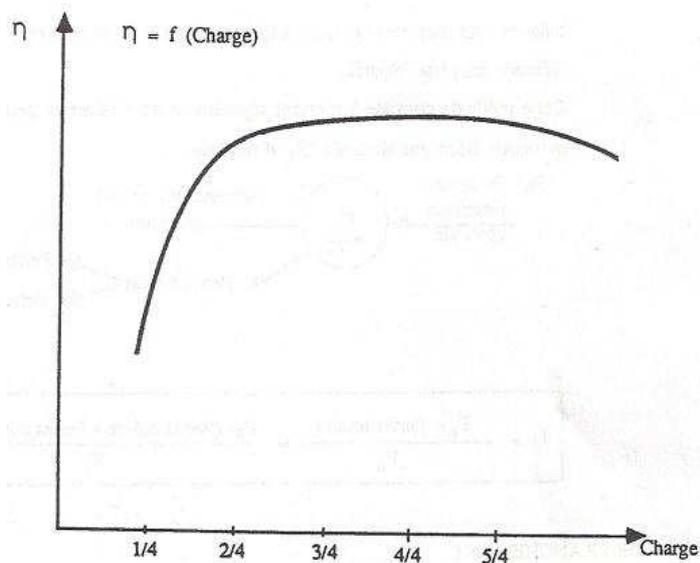


Figure 3.13 : Courbe de rendement par méthode directe

Interprétation des résultats et conclusion

Le rendement de la machine à étudier n'est déterminable que dans la gamme de charge égale à (0,25 – 1) de la nominale. Cette constatation est évidente, car la puissance rendue P_2 est déterminée à partir de la longueur « l » du bras de levier qui équilibre la dynamo-balance, ce bras étant gradué à partir de l'axe de la machine. Alors :

- Lorsque la longueur nécessaire pour équilibrer le couple résistant est inférieure ou égale au rayon extérieur augmenté de la carcasse statorique de la dynamo-balance, le rendement de la machine est alors incalculable. Dans notre cas on peut déterminer seulement le rendement pour la longueur du bras supérieure ou égale à 0,23m. Ce qui correspond au rendement supérieur à 73% ;
- Lorsqu'on surcharge la machine, la longueur nécessaire pour équilibrer le couple résistant est supérieure à la longueur du bras du levier, parce que le bras et le poids « g » sont calculés pour le fonctionnement nominal de la machine à titre d'économie. Par conséquent, cette méthode est inadaptable pour calculer le rendement lorsqu'on surcharge la machine.

Conclusion Cette courbe nous montre que le rendement passe par son maximum entre 3/4 et 4/4 de la charge nominale, démontrant ainsi qu'il est préférable d'utiliser un moteur à sa puissance nominale de fonctionnement.

La méthode directe est une méthode rapide qui permet de déterminer le rendement réel d'un moteur dans un minimum de temps ; cependant, elle est peu précise et n'est utilisée que dans le cas de machines dont le rendement maximum est inférieur à 0,9. Cette méthode de détermination directe du rendement peut être réalisée avec précision seulement lorsque le rendement de la machine est autour de 70 à 80%. Dans notre cas, autour du point de fonctionnement nominal, la précision est de 3,3%. La courbe du rendement est fonction de la puissance absorbée par le moteur ; elle est appelée courbe de tarage.

3.8 : Rendement par la méthode des pertes séparées

1: Principe

Cette méthode consiste à mesurer séparément la puissance électrique absorbée P_a d'une part, et les différentes pertes de la machine d'autre part. La puissance utile qui est la puissance mécanique restituée est alors la différence entre la puissance électrique absorbée P_a et la somme des pertes totales. Le rendement du moteur étudié est le rapport entre la puissance mécanique restituée et la puissance absorbée.

$$\eta_m = \frac{P_a - \sum P}{P_a} \quad . \quad (3.39)$$

2: Mode opératoire

On tire la tension continue à partir d'une génératrice à courant continu, entraînée par un moteur asynchrone triphasé. L'essai de cette machine se fait en deux temps : essais à vide et en court-circuit.

1^{ère} cas : l'essai à vide, on détermine les pertes constantes et les pertes joules ;

2^{ème} cas : l'essai en court-circuit, on cherche les pertes cuivre de la machine.

Le schéma de branchement de cette méthode se présente comme celle du montage indiqué ci-dessous.

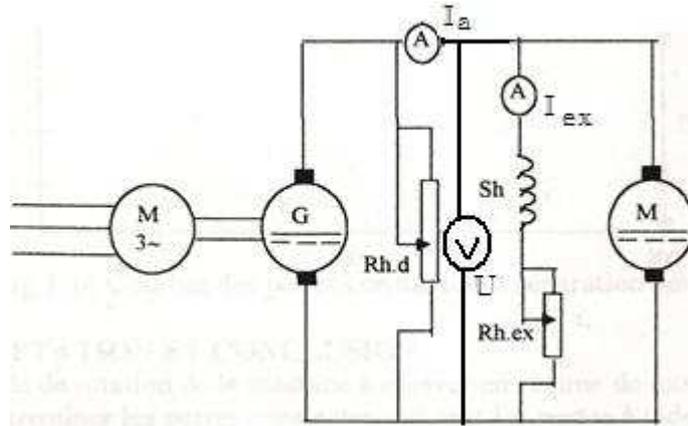


Figure 3.14 : Schéma de branchement de l'essai en régime de moteur non chargé

On prélève alors les valeurs correspondantes de :

- La tension d'alimentation du moteur « U » ;
- L'intensité totale absorbée par le moteur « I_a » ;
- L'intensité du courant d'excitation du circuit inducteur « I_{ex} » ;
- La vitesse de rotation du moteur « n ».

On calcule ensuite :

- La puissance absorbée par le moteur « p_a » ;
- Les pertes Joule du moteur « p_j » ;
- Les pertes mécaniques « $p_{méc}$ » ;
- Les pertes d'excitation du moteur « p_{ex} » ;
- Les pertes supplémentaires du moteur « p_S » ;
- Le facteur de charge du moteur « k_{ch} » ;

On en déduit :

- Les pertes constantes du moteur « p_{cst} » ;
- Les pertes totales du moteur « $\sum P$ » ;
- Le rendement du moteur « η_m ».

Les résultats de ces essais donnant toutes les valeurs mesurés et calculées sont portées dans les Tableaux 6 suivant.

Tableaux 6 : Données des mesures du rendement par la méthode des pertes séparées

Pour l'essai à vide : $U = U_n = 220 \text{ V} = \text{constante}$ et $n = 1500 \text{ tr/min}$.

I_a [A]	I_{ex} [A]	p_a [W]	p_j [W]	p_{ex} [W]	p_S [W]	p_{cst} [W]	$\sum P$ [W]	k_{ch}	η_m %
2,03	0,43	446,6	3,22	87,07	0,34	140	230,6	0,14	48,36

Pour l'essai en court-circuit : $n = 0$ tr/min

I_a [A]	I_{ex} [A]	p_a [W]	p_j [W]	p_{ex} [W]	p_S [W]	p_{cst} [W]	ΣP [W]	k_{ch}	η_m %
2,62	0,41	576,4	6,09	85,05	0,64	140	231,7	0,19	59,8
4,61	0,41	1014	22,3	83,1	2,35	140	247,7	0,33	75,57
6,41	0,41	1410	45,4	83,1	4,8	140	273,3	0,47	80,62
9,42	0,42	2072	102	85	10,8	140	337,8	0,69	83,7
10,2	0,41	2246	121	83,5	12,8	140	357,3	0,74	84,09
11,2	0,41	2464	146,9	81	15,55	140	383,4	0,82	84,43
12,8	0,42	2820	193,7	85,1	20,5	140	439,3	0,94	84,42
14,5	0,42	3170	250,5	85,1	26,5	140	502,1	1,05	84,16
15,3	0,43	3370	279,7	85,1	29,6	140	534,4	1,12	84,14
17,3	0,43	3746	347,2	87,2	36,74	140	611,1	1,24	83,68
18,6	0,43	4098	417,4	87,5	44,16	140	689	1,36	83,18

Les résultats représentés dans le tableau 6, nous permet d'obtenir la courbe du rendement η en fonction du facteur de charge du moteur k_{ch} .

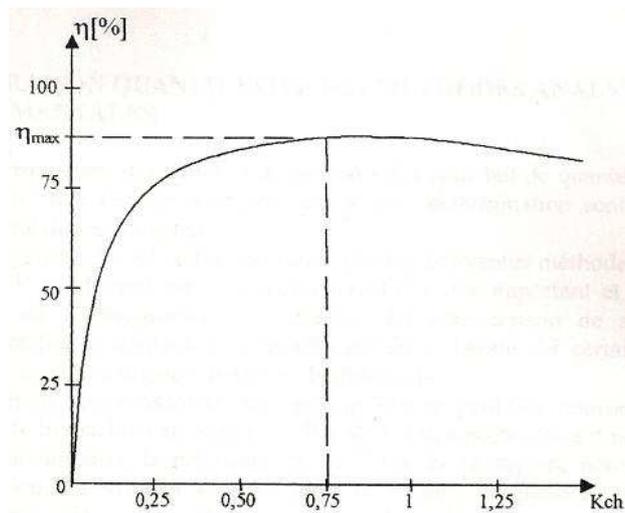


Figure 3.15 : Courbe de rendement par la méthode des pertes séparées

Interprétation et conclusion

Par la méthode des pertes séparées, la figure 3.15 montre que le rendement atteint sa valeur maximale lorsque la puissance absorbée par le moteur est autour de 75% de sa puissance nominale. Sur ce point, les pertes proportionnelles au carré du courant sont approximativement égales aux pertes constantes à vide.

Cette méthode nous donne une précision de 1% autour de son point de fonctionnement nominal en utilisant la formule donnant l'expression du rendement approché suivant :

$$\eta_a = \frac{P_a - P}{P_a} \tag{3.40}$$

où : P_a est la puissance absorbée ; P est la somme des pertes mesurables y comprises les pertes cuivre, pertes mécaniques, pertes fer, telle que :

$$P = P_{cu} + P_{méc} + P_{fer} .$$

Conclusion

La méthode des pertes séparées est très facile à appliquer, elle donne une valeur du rendement proche de sa valeur précise autour du point nominal de la machine. Elle permet de plus, de déterminer le rendement pour un régime quelconque et les erreurs commises dans les mesures des pertes ne se percutent que faiblement sur le rendement. Elle permet aussi de déterminer la gamme des charges pour lesquelles la machine travaille dans le temps maximum, à partir du courant qu'elle absorbe. Par la simplicité des mesures électriques effectuées, cette méthode donne une meilleure précision par rapport aux autres méthodes ; c'est pour cette raison qu'elle est la plus employée.

3.9 : Détermination du rendement par méthode de charge mutuelle (récupération)

1 : Principe

Lorsqu'on dispose de deux machines identiques par leur plaque signalétique, on peut déterminer le rendement par la méthode de charge mutuelle en les couplant mécaniquement et électriquement. Leurs circuits d'induits sont connectés de façon que l'une des machines fonctionne en moteur et l'autre en génératrice. La machine à courant continu que nous étudierons est celle qui fonctionne en génératrice. De l'extérieur est fournie par voie mécanique ou électrique ou les deux en même temps, uniquement la puissance nécessaire pour compenser les pertes des deux machines, car la puissance fournie par la génératrice revient dans le moteur. L'introduction de la puissance complémentaire par voie électrique est la plus simple, dans ce cas la machine qui fonctionne en régime moteur sera branché à un réseau de courant continu, et on branche la génératrice en parallèle avec le moteur. Le montage correspondant est présenté par la figure 3.16. Ce schéma de branchement des machines est appelé : « schéma de charge mutuelle » à alimentation complémentaire à partir du réseau ; souvent on l'appelle encore : « méthode de récupération ».

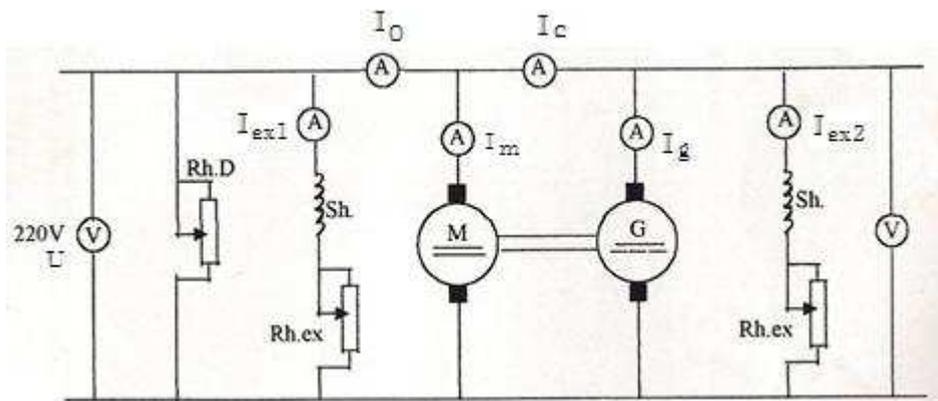


Figure 3.16 : Schéma d'essai des machines par la méthode de charge mutuelle

2 : Hypothèse de travail

Si P_2 désigne la puissance récupérée à la sortie de la génératrice, alors on peut adopter deux hypothèses de travail pour ces deux machines identiques. Soit $P_2 = U_2 \cdot I_2$, la puissance fournie par la génératrice et la puissance $P_1 = U_1 \cdot I_1$, celle absorbée par le moteur.

- **Première hypothèse** : *Les machines sont à égalité des pertes.*

Connaissant la somme des pertes $2\Sigma P$ du groupe, on peut calculer le rendement de chaque machine en admettant que les pertes sont les mêmes dans les deux machines et sont égales à ΣP . Les pertes des deux machines sont représentées par : $2\Sigma P = U_0 \cdot I_0$; ce qui donne :

$$\Sigma P = \frac{1}{2} U_0 \cdot I_0 \quad . \quad (3.41)$$

La puissance appelée par le moteur est :

$$P_1 = U_0 (I_0 + I_C) \quad . \quad (3.42)$$

La puissance fournie par la génératrice est :

$$P_2 = U_2 \cdot I_g \quad . \quad (3.43)$$

Pour la machine fonctionnant en génératrice le rendement est :

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P_g} = \frac{U_2 \cdot I_g}{U_2 \cdot I_g + \frac{U_0 \cdot I_0}{2}} \quad .$$

Posons $U_2 = U_0$, alors :

$$\eta_g = \frac{I_g}{I_g + \frac{I_0}{2}} = \frac{1}{1 + \frac{I_0}{2 \cdot I_g}} \quad .$$

En posant $\frac{I_0}{I_g} = 2 \cdot \varepsilon$, on a :

$$\eta_g = \frac{1}{1 + \varepsilon} \quad . \quad (3.44)$$

Pour la machine fonctionnant en moteur, le rendement est :

$$\eta_m = \frac{P_1 + \Sigma P_g}{P_1} = \frac{U_0 (I_0 + I_g) - \frac{U_0 \cdot I_0}{2}}{U_0 (I_0 + I_g)} = \frac{I_g + \frac{I_0}{2}}{I_0 + I_g} = \frac{1 + \frac{I_0}{2 I_g}}{\frac{I_0}{2} + 1} ;$$

soit donc :

$$\eta_m = \frac{1 + \varepsilon}{1 + 2\varepsilon} \quad . \quad (3.45)$$

- **Deuxième hypothèse** : *Les machines sont à égalité de rendement.*

On a : $\Sigma P = U_0 \cdot I_0 = P_g + P_m$; les pertes des deux machines.

Par hypothèse : $\eta_g = \eta_m = \eta$ avec $\eta^2 = \frac{P_2}{P_1}$;

donc : $\eta = \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^{1/2}$;

$$\eta = \left[\frac{U_0 \cdot I_g}{U_0(I_0 + I_g)} \right]^{1/2} = \left[\frac{I_g}{I_0 + I_g} \right]^{1/2} ;$$

d' où : $\eta = \left[\frac{I_g}{I_0 + I_g} \right]^{1/2} .$

3 : Mode opératoire

Comme il n'y a pas de source de tension continue dans le laboratoire de l'E.N.S.E.T, nous sommes obligés de produire le courant continu en entraînant une machine à courant continu par un moteur asynchrone triphasé. Donc, cette machine à courant continu fonctionne en génératrice et débite une tension continue de 220V après avoir réglé son rhéostat d'excitation. On alimente la machine à courant continu fonctionnant en moteur du groupe de deux machines montées en opposition par la tension obtenue.

- On établit la tension nominale du moteur à l'aide du rhéostat ;
- On règle également la vitesse du groupe à l'aide du rhéostat d'excitation ;
- On règle les F.E.M de façon à assurer la circulation du courant I_c , c'est-à-dire, il faut que la F.E.M de la génératrice soit supérieure à celle du moteur : $E_g > E_m$.

Le coefficient de charge k_{ch} a pour expression :

$$k_{ch} = \frac{0,5 (I_g + I_m)}{I_n} \quad . \quad (3.46)$$

Le schéma équivalent du montage est représenté sur la figure 3.17 et les résultats de l'expérience sont portés dans le tableau 7.

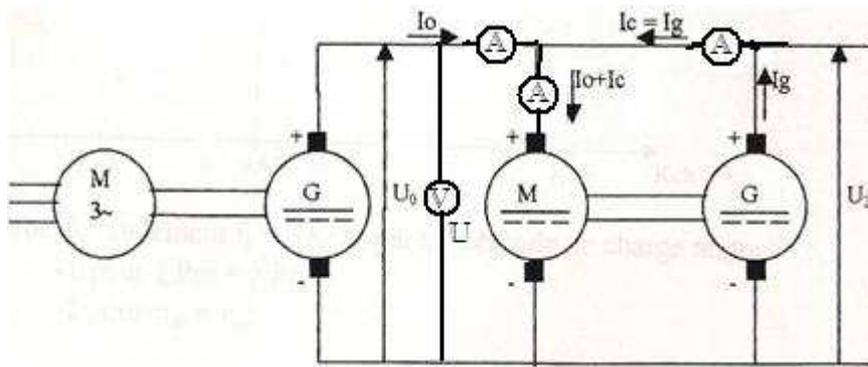


Figure 3.17 : Schéma équivalent de deux machines montées en opposition

Tableau 7 : Résultats de l'expérience de la méthode de charge mutuelle.

$$U = U_n = 220 \text{ V}, n = n_n$$

P_0 [W]	I_0 [A]	I_m [A]	I_g [A]	k_{ch}	$\eta \%$	
					$\eta_m = \eta_g$	$\Sigma P_m = \Sigma P_g$
220	1	0,80	0	0,02	0	0
286	1,30	1,30	0	0,04	0	0
280	1,30	1,80	0,40	0,07	38,09	48,50
308	1,40	2,10	0,70	0,09	50	57,73
330	1,50	3,10	1,50	0,15	66,66	70,71
352	1,60	4,60	2,80	0,24	77,77	79,77
360	1,60	5,10	3,40	0,28	80,95	82,46
396	1,80	6,10	4,40	0,35	83,01	84,24
468	2,10	8,60	6,40	0,5	85,90	86,77
528	2,40	10,8	8,20	0,63	87,23	87,95

Après avoir calculé les rendements suivant les données expérimentales, les courbes de rendement sont présentées par la figure 3.18.

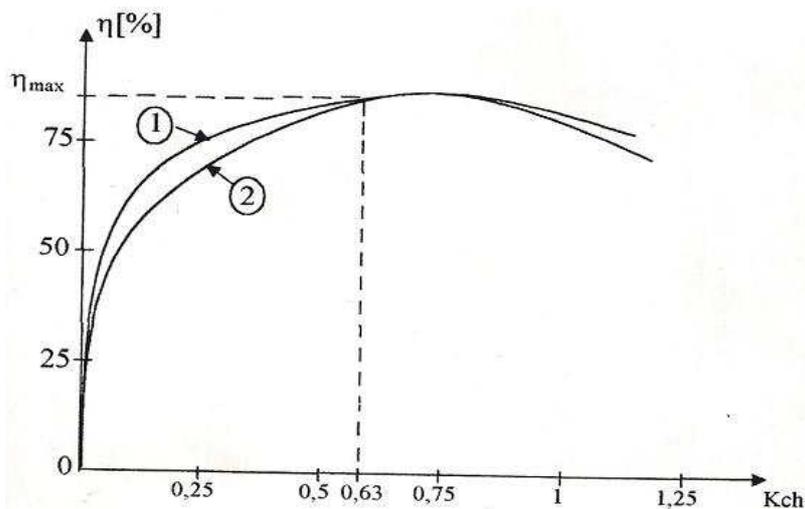


Figure 3.18 : Courbe de rendement $\eta = f(k_{ch})$ par la méthode de charge mutuelle

Interprétation

La figure 3.18 nous montre que le rendement de la machine étudiée fonctionnant en génératrice augmente en fonction du courant délivré par celle-ci, et il atteint une précision de +0,5% par rapport à sa valeur nominale, lorsque le courant délivré par la génératrice est de $0,4 \cdot I_n$; pour la deuxième supposition qui est $\eta_m = \eta_g$. On peut dire que la deuxième hypothèse est plus précise que la première. Cette constatation est évidente parce que si la génératrice délivre des courants vers le moteur, ce dernier est alimenté par deux génératrices en parallèle, et l'énergie fournie par cette génératrice est absorbée par le moteur. Ainsi la génératrice n'absorbe que de l'énergie complémentaire à son fonctionnement, c'est-à-dire l'apport de l'énergie venant de l'extérieur est réduit, d'où l'amélioration de son rendement par cette méthode.

L'égalité du rendement pour ces deux machines n'est satisfaisante qu'au voisinage de sa valeur nominale, c'est-à-dire le rendement du moteur et celui de la génératrice ne sont égaux qu'au voisinage de la puissance nominale. L'hypothèse de travail sur l'égalité des pertes comme les pertes fer pour une même valeur du flux, n'est pas valable pour des fortes charges. Elle ne tient pas compte en particulier des variations du champ entre la marche à vide et la marche en charge. Il y a d'autres pertes dites pertes supplémentaires qui apparaissent, alors que cette méthode n'en tient pas compte.

La valeur du rendement ne cesse d'augmenter jusqu'à 17,6% de la puissance nominale et diminuera ensuite pour les valeurs de la puissance supérieure à celle-ci.

Conclusion

Pour la bonne marche de cette méthode, il faut assurer la circulation du courant entre les deux machines en réglant la F.E.M du moteur inférieure à celle de la génératrice. Le moteur est alimenté par deux génératrices en parallèle dont l'une est à vitesse variable, à tension variable également, il est alimenté en même temps par la source d'alimentation et par la génératrice.

Cette méthode offre des avantages propres parce qu'elle ne dépense que de l'énergie complémentaire du réseau d'alimentation, d'où ses avantages pour les grosses machines en particulier.

L'hypothèse de travail sur l'égalité du rendement n'est satisfaisante qu'au voisinage de P_n , mais elle reste utilisable dans un large domaine comme le cas de la méthode de CARDEW-FONTAINE qui diffère peu de la méthode ainsi explicitée. Elle sera l'objet de l'étude ci-dessous.

3.10 : Rendement par la méthode de CARDEW-FONTAINE

1 : Principe

Comme on a vu dans la méthode de charge mutuelle, lorsqu'on dispose de deux machines identiques, on peut déterminer le rendement en accouplant mécaniquement les deux machines sur un même arbre. L'une des machines fonctionne en génératrice et l'autre en moteur. Ces deux machines sont montées en cascade (figure 3.19). On branche la machine fonctionnant en moteur à un réseau du courant continu.

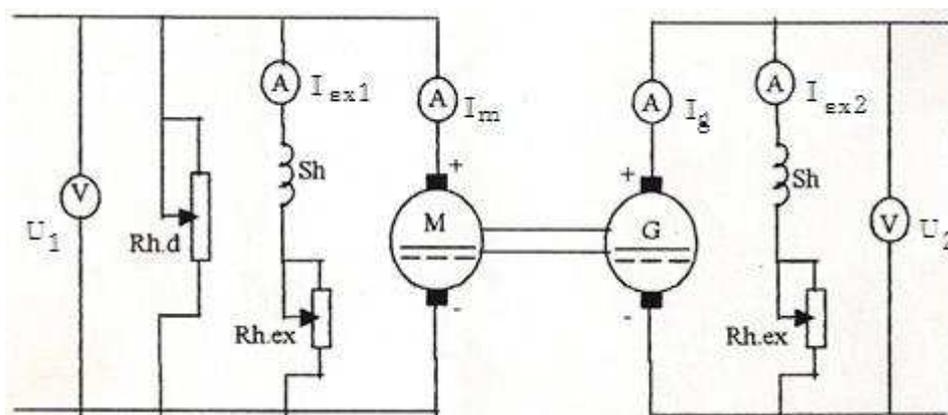


Figure 3.19 : Schéma de montage des machines par la méthode de CARDEW-FONTAINE

2 : Hypothèse de travail

Si $P_2 = U_2 \cdot I_2$ représente la puissance récupérée à la sortie de la génératrice, et $P_1 = U_1 \cdot I_1$ la puissance absorbée par le moteur, on peut avancer deux suppositions pour les deux machines montées en cascade.

Première hypothèse : Les deux machines sont à égalité de rendement.

$$\eta_m = \eta_g = \eta ;$$

$$\eta^2 = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} ,$$

$$\eta_m = \eta_g = \left[\frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} \right]^{1/2} . \quad (3.47)$$

Deuxième hypothèse : Les deux machines ont les mêmes pertes.

$$\Sigma P_1 = \Sigma P_2 .$$

Les pertes totales du moteur sont égales aux pertes totales de la génératrice.

3 : Mode opératoire

La source du courant continu du système étudié provoquant d'une machine à courant continu fonctionnant en génératrice est entraînée par le moteur asynchrone triphasé.

On alimente le groupe sous tension et vitesse nominales, puis on mesure les pertes constantes de la génératrice et on prélève alors les valeurs correspondantes :

- De la tension d'alimentation du moteur U_1 ;
- De l'intensité totale absorbée par le moteur I_1 ;
- De l'intensité absorbée par la génératrice I_2 .

Le rendement du moteur sera calculé à partir de celui de la génératrice par la relation suivante :

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma P} , \quad (3.48)$$

et le rendement du groupe vaut :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \eta_m = \eta_g . \quad (3.49)$$

Le schéma équivalent du montage est le suivant. Les résultats prélevés et calculés des essais par la méthode de CARDEW-FONTAINE sont présentés dans le tableau 8 suivant.

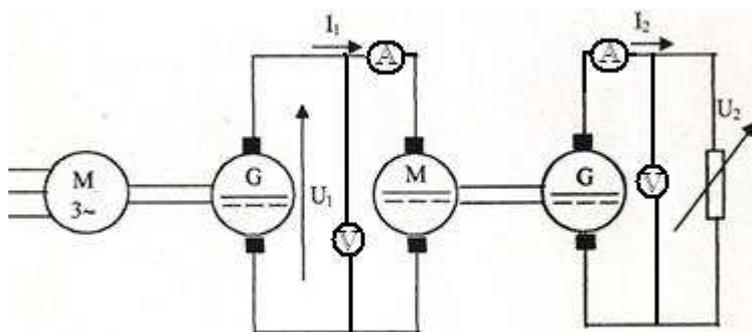


Figure 3.20 : Schéma équivalent de montage de deux machines en cascade.

Tableau 8 : Données des mesures du rendement par la méthode de CARDEW-FONTAINE ; $U_1 = U_2 = U_n = 220 \text{ V}$; $n = n_n = 1500 \text{ tr/min}$.

I_1 [A]	P_1 [W]	I_2 [A]	P_2 [W]	P_{cst} [W]	k_{ch}	$\eta \%$	
						$\Sigma P_m = \Sigma P_g$	$\eta_m = \eta_g$
0	486,2	0	0	140	0	0	0
0,9	684,2	0,8	176	140	0,058	25,72	50,71
3,1	1097,8	2,6	572	140	0,19	52,10	72,18
6,1	1600	5,3	1162	140	0,38	72,62	81,39
8,3	2200	7	1540	140	0,51	70	83,66
9,2	2420	7,9	1730	140	0,57	71,48	84,74
10,4	2640	8,7	1914	140	0,63	72,50	85,14
12,6	3130,6	10,4	2288	140	0,76	73,08	85,58
13,5	3350,6	11,3	2463	140	0,82	73,50	86,22
13,9	3484,6	11,8	2552	140	0,85	73,23	86,41
14,5	3702,6	12,7	2705	140	0,90	73,05	86,94
15,5	4105,2	14,2	2996	140	0,99	72,98	87,14
15,8	4202	15	3063	140	1,02	72,89	88,61

On en déduit de ce tableau, les courbes du rendement pour les deux hypothèses correspondantes.

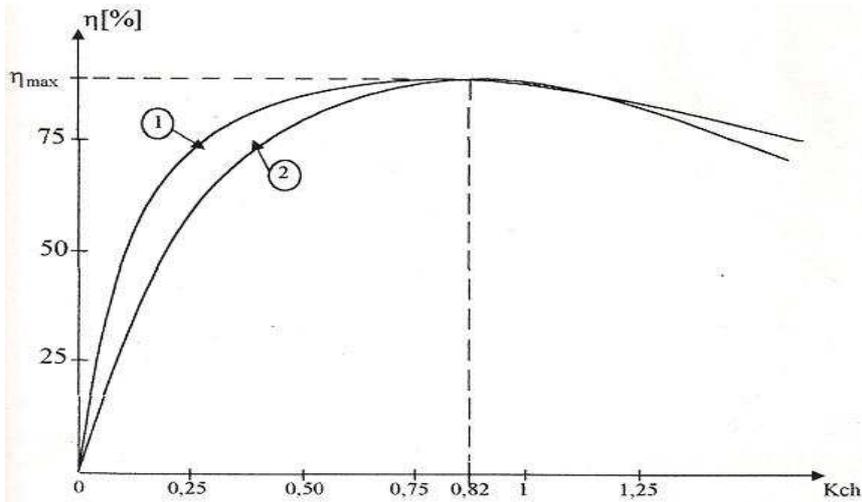


Figure 3.21 : Courbe de rendement de machine fonctionnant en génératrice par la méthode de CARDEW-FONTAINE : 1- pour $\eta_m = \eta_g$ et 2- pour $\Sigma P_m = \Sigma P_g$.

Interprétation et conclusion

En amenant par un moyen approprié les machines dans le même état mécanique et magnétique, il sera possible de réaliser : $P_{méc1} = P_{méc2}$ et $P_{fer1} = P_{fer2}$. Mais l'égalité des pertes totales des deux machines n'est atteinte qu'autour de la puissance nominale de la machine. Dans notre cas, la figure 3.21 nous montre que les rendements de la machine fonctionnant en génératrice, sont confondus seulement si la puissance appelée par la charge est comprise entre $(0,8 \text{ à } 1) P_n$. Donc cette méthode n'est pas valable pour les faibles charges, mais elle est satisfaite si les machines tournent à la même vitesse et sont parcourues par un même courant. Pour l'égalité des pertes, on essaie de la réaliser en plaçant dans le même état magnétique en charge, c'est-à-dire, cette hypothèse est valable seulement pour des pertes mécaniques à vide, car les deux machines tournent à la même vitesse. Mais les pertes, dépendant du courant sont différentes parce que les deux machines ne sont pas parcourues par la même courant de charge.

Notons que cette méthode est caractérisée par la rapidité et la facilité des mesures, la stabilité du montage et sa précision est meilleur bien qu'on travaille sur deux hypothèses qui ne sont pas tout à fait satisfaisantes. On remarque que dans notre cas, l'erreur sur le rendement autour du point nominal est de +0,4% du rendement nominal pour la deuxième hypothèse. Sa valeur maximale correspond à $1,21P_n$.

On peut améliorer cette méthode en ajoutant un moteur auxiliaire qui entraîne ce groupe de machines, le montage obtenu est dit montage de BLONDEL.

3.11 : Méthode de moteur auxiliaire

1 : Principe

Une amélioration du schéma dans le cas de charge mutuelle consiste à se placer à égalité de F.E.M et à assurer la circulation du courant I par une source série placée dans les circuits d'induit des deux machines à courant continu montées en opposition. Il est alors possible de supprimer la source d'énergie aux bornes des induits pour avoir le même courant dans les deux machines. Pour pouvoir maintenir constante la valeur du paramètre vitesse sans avoir à donner à i_{ex1} et i_{ex2} des valeurs différentes, on entraîne ces deux machines à courant continu par un moteur auxiliaire de puissance plus faible. On aboutit alors au montage de BLONDEL (figure 3.22). Dans ce cas, il sera possible de réaliser une égalité des pertes mécaniques, des pertes fer et même des pertes Joules et ces pertes sont compensées mécaniquement par le moteur auxiliaire qui fait tourner le groupe.

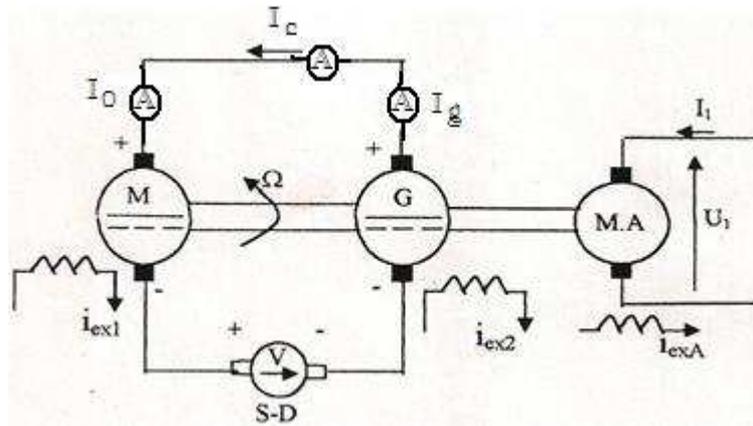


Figure 3.22 : Montage de BLONDEL

2 : Hypothèse de travail

Soient $2P = U_0 \cdot I_0$ les pertes des deux machines, alors : $P = \frac{1}{2} U_0 \cdot I_0$; $P_1 = U_0(I_c + I_0)$ la puissance appelée par le moteur ; $P_2 = U_2 \cdot I_g$ la puissance fournie par la génératrice.

Première hypothèse : égalité des pertes.

$$P_m = P_g = P = \frac{1}{2} U_0 \cdot I_0 .$$

Le rendement du moteur sera

$$\eta_m = \frac{U_0(I_0 + I_c) - \frac{1}{2}U_0 \cdot I_0}{U_0(I_0 + I_c)} ;$$

par approximation : $U_0 = U_2$

$$\eta_m = \frac{I_c + \frac{I_0}{2}}{I_c + I_0} = \frac{1 + \frac{I_0}{2I_c}}{1 + \frac{I_0}{I_c}} ;$$

on pose $2\beta = \frac{I_0}{2I_c}$,

$$\text{d'où} \quad \eta_m = \frac{1+2\beta}{1+\beta} \quad . \quad (3.50)$$

Le rendement de la génératrice sera :

$$\eta_g = \frac{U_2 \cdot I_g}{U_2 \cdot I_g + \frac{1}{2} U_0 \cdot I_0} = \frac{1}{1 + \frac{I_0}{2I_g}} .$$

On pose $2\varepsilon = \frac{I_0}{I_g}$

$$\eta_g = \frac{1}{1+\varepsilon} \quad . \quad (3.51)$$

Deuxième hypothèse : égalité du rendement.

Soit $2P = U_0 \cdot I_0 = P_m + P_g$ les pertes des deux machines.

Par hypothèse $\eta_m = \eta_g$, alors :

$$\frac{U_0(I_c + I_g) - P_m}{U_0(I_c + I_0)} = \frac{U_2 \cdot I_g}{U_2 \cdot I_g + P_g} ;$$

On pose $U_2 = U$:

$$[U_0(I_c + I_0) - P_m][U_2 \cdot I_g + P_g] = [U_0(I_c + I_0) - U_2 \cdot I_g]$$

$$U^2 I_g I_c + U P_g I_c + U^2 I_0 I_g + U P_0 I_g - P_m(U I_g + P_g) - U^2 I_c I_g - U^2 I_0 I_g = 0$$

$$U P_g I_c + U P_g I_0 - P_m(U I_g + P_g) = 0$$

On remplace P_m par $U I_0 + P_g$, on obtient :

$$U P_g I_c + U P_g I_0 - (U I_0 + P_g)(U I_g + P_g) = 0$$

$$U P_g I_c + U P_g I_0 - U^2 I_g I_0 - U P_g I_0 + P_g I_g U^2 + P_g^2 = 0$$

On a une équation de second degré en P_g :

$$P_g^2 + U_0(I_c + I_0)P_g - U^2 I_g I_c = 0 \quad (3.52)$$

En résolvant cette équation, nous avons :

$$\Delta = U^2(I_c + I_g)^2 + 4U^2 I_g I_c = 0$$

$$\text{Donc} \quad P_g = \frac{-U(I_g + I_c) + U^2[(I_c + I_g)^2 + 4I_g I_0]^{1/2}}{2}$$

Rappelons que le rendement a pour expression :

$$\eta_m = \eta_g = \frac{UI_g}{UI_g + P_g}$$

Remplaçons P_g par sa valeur :

$$\eta_m = \eta_g = \frac{UI_g}{UI_g - \frac{UI_g}{2} + \frac{U}{2} [(I_c + I_g)^2 + 4I_g I_0]^{1/2} - \frac{UI_c}{2}} = \frac{1}{\frac{1}{2} \left[1 - \frac{I_c}{I_g} \right] + \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{I_c}{I_g} \right)^2 + 4 \frac{I_0}{I_g} \right]^{1/2}}$$

Si l'on pose $\alpha = \frac{I_c}{I_g}$ et $\rho = \frac{I_0}{I_g}$, on obtient l'expression du rendement :

$$\eta_m = \eta_g = \frac{2}{1 - \alpha + [(1 - \alpha)^2 + 4\rho]^{1/2}} \quad (3.53)$$

Les résultats des mesures sont portés dans le tableau 9 ci-après.

Tableau 9 : Données des mesures du rendement des deux machines en opposition en charge ; $U_2 = U_0 = 220 \text{ V}$

I_0 [A]	I_c [A]	I_g [A]	P_0 [W]	$\eta \%$	
				$\frac{\Sigma P_m}{\Sigma P_g}$	$\eta_m = \eta_g$
2,40	8,20	8,20	504	84,84	87,23
3,20	7,10	8,20	672	35,13	83,67
4,10	6,20	8,20	861	97	80
5	5,20	8,10	1050	94,94	76,41
5,80	4,40	8	1218	85,22	73,39
6,60	3,60	8	1386	77,69	70,79
7,40	2,60	8	1554	70,96	68,37
8,20	1,80	7,90	1722	65,99	65,83
9,30	0,90	7,80	1953	60,90	62,65
10	0,10	7,70	2100	53,39	60,62

Les courbes du rendement et de la puissance absorbée en fonction de I_c sont représentées par la figure 3.23.

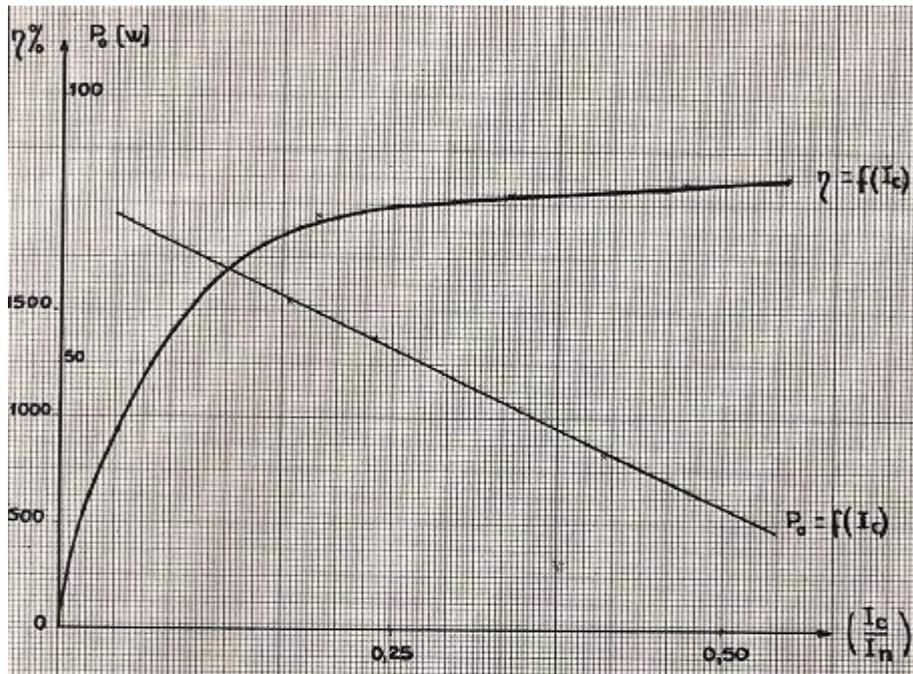


Figure 3.23 : Courbes de rendement et de puissance du réseau en fonction de I_c .

Conclusion

L'insuffisance des machines à courant continu dans le laboratoire électrotechnique de l'E.N.S.E.T et la contrainte mécanique causée par l'alignement des axes des trois machines nous empêchent de réaliser cette étude d'amélioration. Cependant, les hypothèses de travail et l'analyse du fonctionnement de ce montage nous montre que cette méthode se rapproche d'un fonctionnement de la machine en charge dans le but d'utiliser l'énergie à la sortie de la machine fonctionnant en génératrice pour un groupe de deux machines montées sur un même arbre. L'erreur sur les résultats du rendement est presque négligeable, donc on a l'intention d'obtenir le même rendement pour ces deux machines.

3.12 : Comparaison quantitative des méthodes analytiques et expérimentales

La détermination des pertes et du rendement a pour but de quantifier leurs valeurs. Les méthodes qu'on vient de réaliser pour procéder à cette détermination sont nombreuses, d'où la nécessité de les comparer.

Les propriétés d'exploitation évoquées par les différentes méthodes précédentes montrent que le rendement est un indice énergétique très important et caractérise l'économie de la transformation d'énergie. La comparaison de ces méthodes consiste à identifier la méthode la plus efficace en se basant sur certains facteurs à savoir : la précision, l'économie, le temps, la didactique.

La méthode directe est exclue parce qu'elle ne peut être réalisée que lorsque le rendement de la machine est autour de 70 à 80 %. Dans notre cas, autour du point de fonctionnement nominal, la précision est de 3,3 % du rendement nominal. Pour le facteur précision, l'essai doit se faire dans la mesure du possible par la charge mutuelle.

Dans ce cas, on obtient une précision de $\pm 0,2$ % du rendement nominal en réglant le courant délivré par la génératrice à $0,4 I_n$. En disposant d'une machine identique à celle qu'on vient d'étudier, la méthode des pertes séparées peut prendre la place avec une précision de 1 % du rendement nominal.

Pour le facteur économique, la méthode de charge mutuelle donne un gain du temps très appréciable car la consommation en électricité est réduite de 72 % par rapport aux autres méthodes. Cette méthode est conseillée pour les industries productrices des machines à courant continu et plus particulièrement aux essais des grosses machines.

La méthode de CARDEW-FONTAINE est la plus rapide du point de vue temps, sa précision est de $+0,4$ % du rendement nominal. Cette méthode est conseillée pour un travail qui exige la rapidité et l'économie du temps.

Dans le but de découvrir les caractéristiques d'une machine à courant continu, il est conseillé pour une école ou un établissement tel que le lycée technique d'utiliser la méthode des pertes séparées qui n'exige que des mesures électriques simples et faciles.

Ainsi, les erreurs commises lors de la mesure des pertes ne se percutent que faiblement sur le rendement. De plus il est préférable de disposer des machines de types différents pour élargir les données d'étude.

Chapitre IV :

IMPLICATION PEDAGOGIQUE

Vue la nécessité du sujet intitulé « Etudes expérimentales des machines à courant continu », et d'après pas mal de recherches sur le traitement de ce sujet, en voici une liste non exhaustive de travaux pratiques (TP) susceptibles d'être tirés de l'ensemble du travail:

- a. Essais des machines à courant continu ;
- b. Evaluation de la commutation des machines à courant continu ;
- c. Amélioration de la commutation et méthodes d'études de cette dernière ;
- d. Détermination des pertes d'énergie et rendement des moteurs à courant continu.

Par souci de contribuer au développement du niveau d'études au Lycée Technique, une application pédagogique sera primordiale pour l'apprentissage des élèves du Lycée Technique. De ce fait, je propose dans le présent chapitre des séances de TP concernant le moteur à courant continu. Soulignons que cette application pédagogique a pour but de montrer aux élèves comment on passe de la théorie à la pratique. Je propose à ce propos trois thèmes :

- Premier thème : Détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation indépendante ;
- Deuxième thème : Détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation en dérivation ;
- Troisième thème : Détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation en série.

4.1 : Détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation indépendante

Niveau : 3^{ème} année

Matière : Travaux Pratiques

Spécialité : Technologie Electrotechnique

Durée : 4 heures

Objectif :

Après la marche à vide, le moteur entraîne une génératrice-balance qui débite dans un rhéostat de charge. De ce fait, les élèves devront être capables de:

- Faire l'étude du moteur à courant continu à excitation indépendante en charge ;
- Trouver la caractéristique du rendement $\eta = f(I)$.

4.1.1 : Mode opératoire

Pour déterminer le rendement de ce moteur, on utilise la méthode directe (figure 4.1) en mesurant directement le moment du couple-moteur T [N.m] à la dynamo-balance.

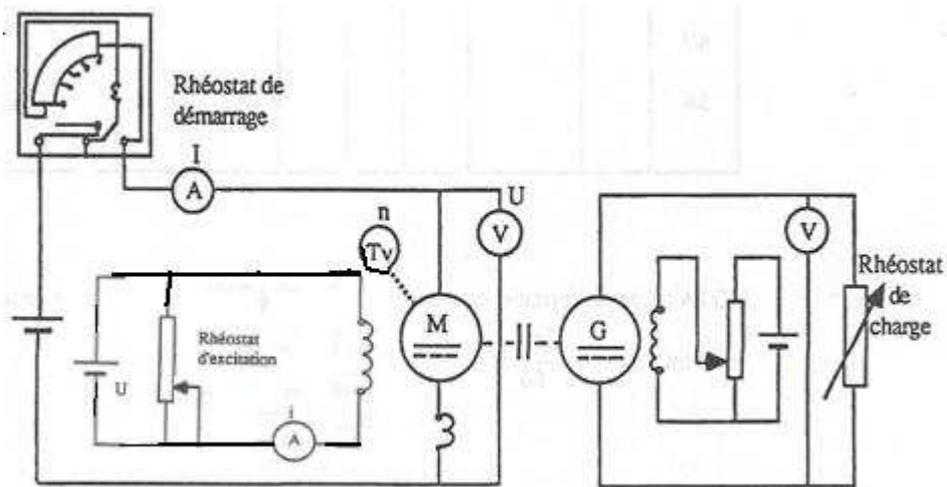


Figure 4.1 : Schéma de montage des essais à vide et en charge

L'équilibre de la balance se fait à l'arrêt, puis on enlève le poids P du bras de levier et on repère la position du contrepoids C pour avoir l'équilibre. On réglera l'intensité d'excitation pour obtenir la vitesse nominale du moteur.

A l'équilibre, on a :

$$M_u = M_r = Pl \quad (4.1)$$

où :

$M_u = M_r$: le moment de couple moteur en moteur en [N.m] ;

$P = 20$ N, le poids P enlevé par le contrepoids C en [N] ;

l : La longueur du bras de levier entre la génératrice et le poids P en [m].

4.1.2 : Matériels

- ✓ Moteur à courant continu LEROY SOMER :
- ✓ Type 132 ;
- ✓ $n = 1500$ tr/min ; $P = 3$ kW ; $\eta = 85$ % ; $U = 220$ V ; $I = 15$ A ; $i = 0,7$ A.
- ✓ Génératrice à courant continu LEROY SOMER :
- ✓ Type 132 ;
- ✓ $n = 1500$ tr/min ; $P = 3$ kW ; $\eta = 75$ % ; $U = 220$ V ; $I = 13,65$ A ; $i = 0,8$ A.
- ✓ un rhéostat de démarrage et un rhéostat de charge successivement de : 1 K Ω et $0,9$ K Ω ;
- ✓ 2 voltmètres de 300 V ; 2 ampèremètres de : 1 A et 10 A ;
- ✓ 2 sources de courant continu à 220 V.

4.1.3 : Mesures

Les grandeurs mesurées sont le courant de l'induit I , le courant de l'inducteur i ; la longueur du bras de levier à l'équilibre l et la vitesse de rotation n .

Les autres grandeurs sont à calculer :

- la puissance de l'inducteur $P_{ex} = U_{ex} I_{ex}$; (4.2)

- la puissance de l'induit $P_{in} = U_{in} I_{in}$; (4.3)

- la puissance absorbée $P_a = P_{ex} + P_{in}$; (4.4)

- le moment du couple mécanique $M = P.I$; (4.5)

- la puissance utile $P_u = M.\omega$; avec $\omega = 2\pi n$; (4.6)

- le rendement $\eta = \frac{P_u}{P_a}$. (4.7)

Les valeurs des grandeurs mesurées et calculées sont consignées dans le tableau 4.1. La courbe du rendement $\eta = f(I)$ sera présentée par la figure 4.1.

Tableau 4.1 : Résultats de mesure et de calcul de l'essai en charge à $U = U_n = 220$ V du moteur à excitation indépendante

I [A]	l [m]	n [tr/min]	M [Nm]	ω [rad/s]	P_{in} [W]	P_a [W]	P_u [W]	η [%]
1,3	0	1500	0	157	286	354	0	0
5	0,26	1460	5,3	153	1100	1131	810	72
7	0,40	1435	8,1	150	1540	1551	1210	78
9	0,55	1430	11	150	1980	1971	1645	83,46
11	0,68	1410	13,7	147	2420	2391	2015	84,27
13	0,82	1400	16,4	146	2860	2811	2400	85,37
15	0,95	1385	19,1	145	3300	3231	2770	85,73

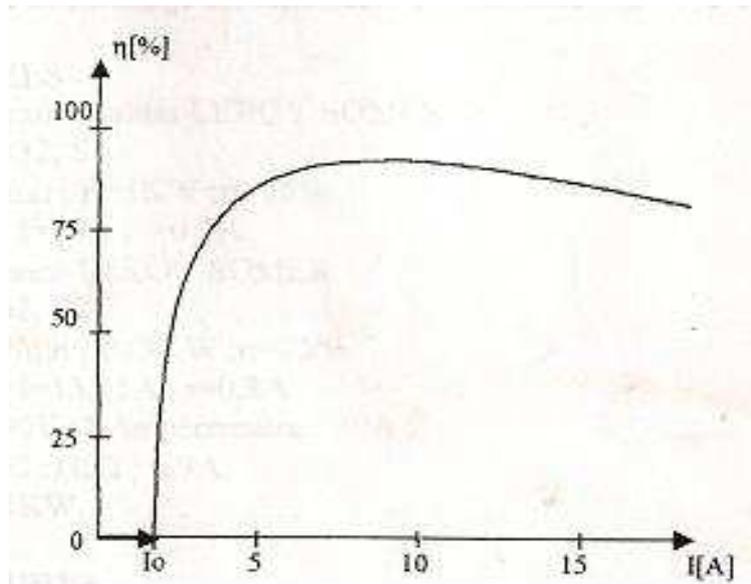


Figure 4.2 : Courbe du rendement par la méthode directe d'un moteur à excitation indépendante.

4.1.4 : Conclusion

Cette courbe nous montre que le rendement passe par son maximum de la charge nominale, démontrant ainsi qu'il est préférable d'utiliser un moteur à sa puissance nominale de fonctionnement.

4.2 : Détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation en dérivation

Niveau : 3^{ème} année

Matière : Travaux Pratiques

Spécialité : Technologie Electrotechnique

Durée : 4 heures

Objectif : Etude du moteur à courant continu à excitation en dérivation ou moteur shunt à vide et en charge avec compensation.

Après cette séquence, les élèves devront être capables de tracer l'allure de la courbe du rendement en fonction du courant de l'induit.

4.2.1 : Mode opératoire

Le circuit inducteur S_h est monté directement sur le réseau d'alimentation et non pas aux bornes de l'induit. On réglera par un rhéostat le courant d'excitation à sa valeur nominale pour le fonctionnement nominal du moteur en charge tout en ayant constante la tension d'alimentation. Le schéma de montage est le suivant.

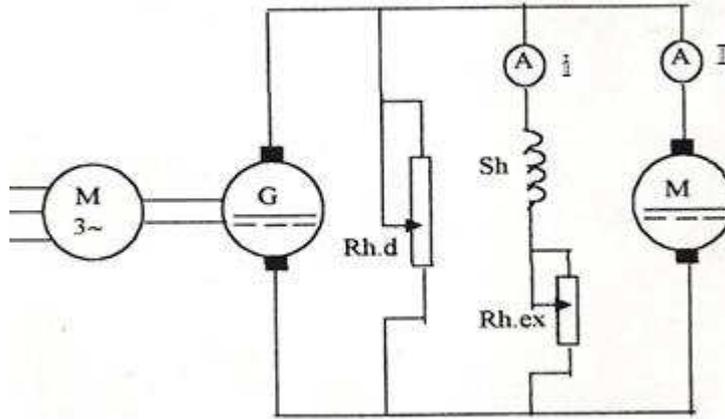


Figure 4.3 : Schéma de branchement de l'essai de moteur en régime non chargé

4.2.2 : Matériels

- ✓ Moteur à courant continu LEROY SOMER :
- ✓ Type C132, S1 ;
- ✓ $n = 1500 \text{ tr/min}$; $P = 3\text{kW}$; $\eta = 75 \%$; $U = 220 \text{ V}$; $I = 15 \text{ A}$; $i = 0,7 \text{ A}$.
- ✓ Génératrice-balance LEROY SOMER :
- ✓ Type C132, S2 ;
- ✓ $n = 1500 \text{ tr/min}$; $P = 3\text{kW}$; $\eta = 75 \%$; $U = 220 \text{ V}$; $I = 13,65 \text{ A}$; $i = 0,8 \text{ A}$.
- ✓ 2 rhéostats d'excitation et un rhéostat de charge de : $1\text{K}\Omega$ et $0,9 \text{ A}$;
- ✓ 2 voltmètres de 300 V ; 2 ampèremètres de : 20 A ;
- ✓ 1 rhéostat de démarrage 220 V ; 4KW .

4.2.3 : Mesures

Le procédé de mesure et de calcul qui aboutit à la détermination du rendement est le même que précédemment.

Tableau 4.2 : Résultats de mesure et de calcul de l'essai en charge à $U = U_n = 220 \text{ V}$ d'un moteur à excitation en dérivation

I [A]	i [A]	l [m]	n [tr/min]	M [Nm]	ω [rad/s]	P_a [W]	P_u [W]	η [%]
2	0,61	0	1500	0	157	440	0	0
5	0,60	0,23	1490	4,7	156	1100	734	66,72
7	0,60	0,33	1480	6,8	155	1540	1055	68,50
9	0,59	0,48	1470	9,7	154	1980	1495	75,50
11	0,59	0,61	1460	12,4	153	2420	1895	78,30
13	0,58	0,75	1450	15,1	152	2860	2300	80,41
15	0,58	0,87	1430	17,4	150	3300	2610	79,09

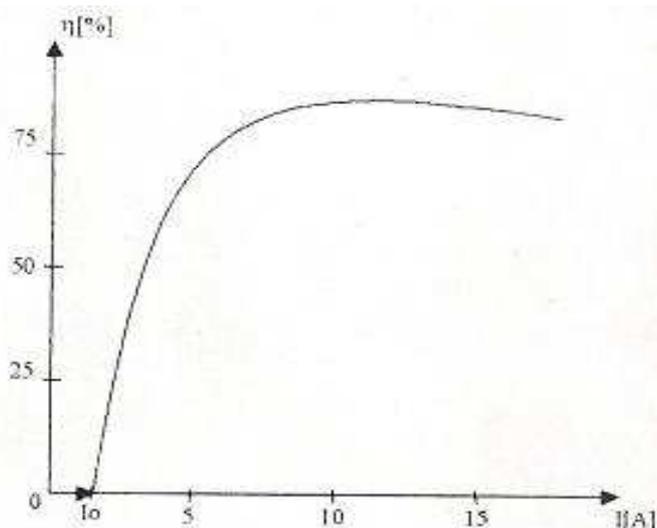


Figure 4.4 : Courbe du rendement par la méthode directe d'un moteur à excitation en dérivation

4.2.4 : Conclusion

Comme l'essai précédent, la courbe du rendement accroît jusqu'au voisinage de la valeur nominale du courant. Elle atteint la valeur maximale pour $I = 13$ A puis diminue légèrement si on augmente la charge jusqu'à la valeur nominale du courant. Le résultat de cet essai est presque analogue pour la détermination du rendement par la méthode des pertes séparées. Ce qui fait que pour le cas de cette machine, il sera mieux d'utiliser l'un des méthodes développées au chapitre 3 pour déterminer son rendement.

4.3 : Détermination du rendement d'un moteur à courant continu à excitation en série

Niveau : 3^{ème} année

Matière : Travaux Pratiques

Spécialité : Technologie Electrotechnique

Durée : 4 heures

Objectif : Etude du moteur à courant continu en excitation série.

Après cette séance, les élèves devront pouvoir déterminer le rendement d'un moteur à courant continu excité en série par la méthode directe et de tracer l'allure de la courbe de sa variation en fonction du courant de l'induit.

4.3.1 : Mode opératoire

Le moteur à excitation série doit toujours être accouplé à une charge (couple résistant) car il s'emballe à vide. Le couple résistant ne doit donc jamais s'annuler parce que lors de l'essai à vide la F.E.M utile est très faible et la vitesse de rotation devient très élevée.

On charge le moteur à l'aide d'une génératrice-balance débitant un courant sur un rhéostat d'absorption et montée en excitation indépendante pour obtenir un fonctionnement en charge dès la mise en marche. La tension d'alimentation est maintenue constante.

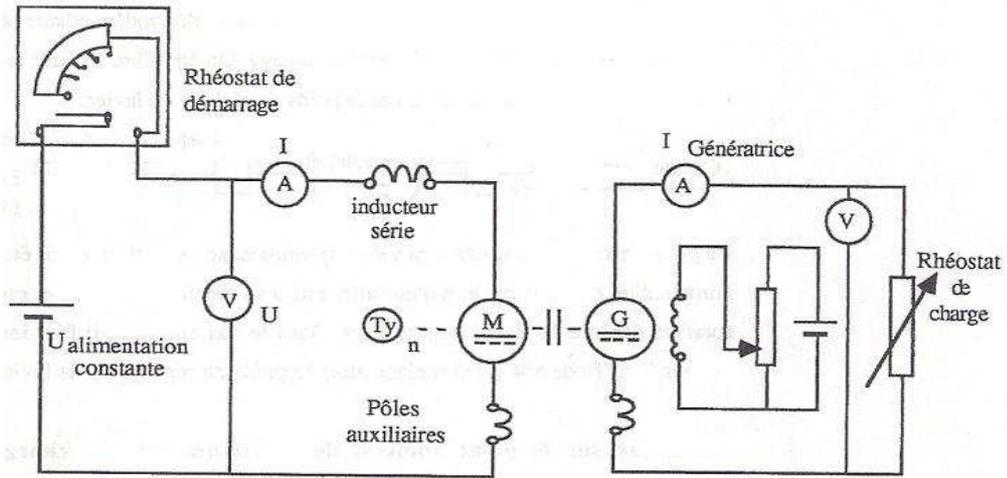


Figure 4.5 : Schéma de montage de l'essai d'un moteur excité en série

4.3.2 : Matériels

- ✓ Moteur à courant continu LEROY SOMER :
- ✓ Type C132, Excitation série C2 ;
- ✓ $n = 1500$ tr/min ; $P_u = 3$ kW ; $\eta = 75$ % ; $U = 220$ V ; $I_n = 25$ A ;
- ✓ Génératrice-balance LEROY SOMER :
- ✓ Type C132, S2 ; Excitation en dérivation ;
- ✓ $n = 1500$ tr/min ; $P_u = 3$ kW ; $\eta = 75$ % ; $U = 220$ V ; $I = 15$ A ; $i = 0,7$ A.
- ✓ 1 voltmètre de 300 V ; 1 ampèremètre de : 50 A ;
- ✓ 1 rhéostat de démarrage 220 V ; 4KW.

4.3.3 : Mesures

On utilise le même procédé de mesure et de calcul que précédemment.

Tableau 4.3 : Résultats de mesure et de calcul de l'essai en charge d'un moteur à excitation série à $U = U_n = 220$ V.

I [A]	M [Nm]	n [tr/min]	ω [rad/s]	P_a [W]	P_u [W]	η [%]
5	4	2100	219,8	1100	879,2	79,92
10	11	1600	167,46	2200	1842,06	83,73
15	19	1300	136,06	3300	2585,14	78,33
20	28	1150	120,36	4400	3370,08	76,59
25	25	1100	115,13	5500	2878,25	52,33

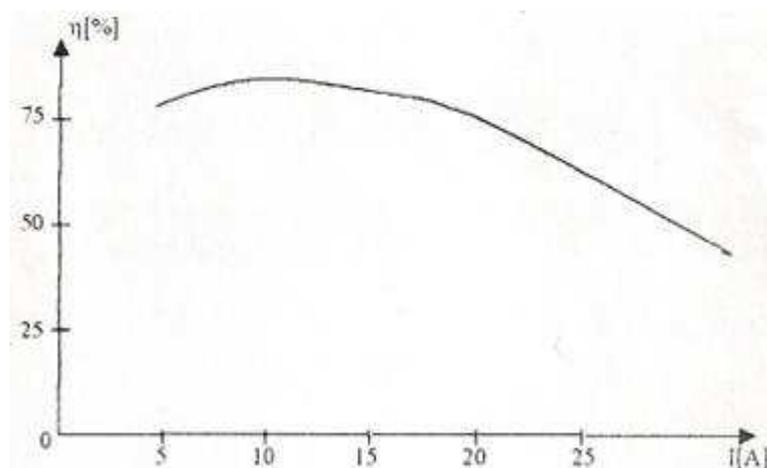


Figure 4.6 : Courbe de rendement d'un moteur excité en série par la méthode directe

4.3.4 : Conclusion

Le rendement de cette machine varie très peu autour de sa valeur nominale pour les valeurs du courant inférieur et légèrement supérieur à sa valeur nominale (15 A). Si la machine est trop chargée, son rendement diminue. Donc la méthode directe est suffisante pour déterminer le rendement de cette machine.

Conclusion

La mise en charge et la détermination directe du rendement des machines à courant continu ne peuvent s'effectuer que pour des machines de petites puissances. La méthode de détermination directe de rendement peut être réalisée avec précision seulement lorsque le rendement nominal de la machine est autour de 70 à 80 %. A l'occasion de cet implication pédagogique et dans la mesure de compléter les méthodes de détermination du rendement développées au chapitre 3, on a effectué par cette méthode la détermination du rendement des trois types de machine à courant continu à excitation : indépendante, en dérivation et en série.

CONCLUSION GENERALE

Dans les machines électriques, les pertes sont relativement faibles. Si on envisage des machines à courant continu de moyenne et grande puissance, les pertes représentent 10 à 14 % de la puissance fournie et dans les machines synchrones de grande puissance refroidies à l'hydrogène, elles ne dépassent pas 1 à 2 %.

On a vu que les machines à courant continu comme les autres machines électriques sont des convertisseurs électromagnétiques effectuant la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Si les machines électriques sont considérées parfaites, on aurait la puissance électrique absorbée est égale à la puissance mécanique restituée. Néanmoins, toutes machines électriques possèdent une consommation propre désignée sous le nom de « pertes ». Ces derniers, dans les machines électriques bien conçues sont dégagés à l'aide d'une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur, à partir des petits volumes de ces matériaux actifs à surface extérieur de refroidissement relativement petite.

Lorsque le régime de fonctionnement d'une machine à courant continu varie, la puissance qu'elle absorbe P_a ainsi que la somme des pertes qu'elle dégage $\sum P$ varient et pour cette raison son rendement varie aussi. A vide, quand la puissance mécanique restituée $P_2 = 0$, le rendement $\eta = 0$. Avec l'accroissement de la charge, le rendement augmente d'abord assez vite jusqu'à une certaine valeur maximale et ensuite diminue légèrement. La valeur de la charge pour laquelle le rendement atteint sa valeur maximale dépend du rapport entre les valeurs de différentes pertes et de leur variation avec la charge. La détermination expérimentale des machines à courant continu, et plus particulièrement celle du rendement, est l'un des éléments importants des essais de celle-ci.

La détermination directe de rendement par la mesure de la puissance rendue P_2 et la puissance absorbée P_a , est limitée pour les machines de petite puissance autour de 80 % car la mesure détermine directement l'erreur dans la valeur obtenue du rendement. Lorsque le rendement de la machine est supérieur à 80 %, la détermination du rendement doit être faite d'après les données de différentes pertes ou de leur somme par les différentes méthodes qui sont : méthode des pertes séparées, méthode de charge mutuelle, méthode de CARDEW-FONTAINE et méthode de moteur auxiliaire. Dans ce cas l'erreur de mesure des pertes rapportée à la puissance absorbée diminue beaucoup et influe peu sur l'erreur de la valeur résultante du rendement.

La méthode théorique est très efficace pour acheter ou vendre une machine en connaissant les grandeurs des matières de sa construction. La connaissance de ces grandeurs est très difficile, ce qui conduit à utiliser l'une des méthodes expérimentales. Pour avoir la valeur du rendement très proche de sa valeur nominale, on emploie la méthode de charge mutuelle qui est la plus précise et plus économique. Pourtant, la méthode de CARDEW-FONTAINE est très rapide pour déterminer ce rendement. Par contre pour faire comprendre aux élèves la détermination du rendement, il est préférable d'utiliser la méthode des pertes séparées pour des machines de grande et moyenne puissance, et la méthode directe pour des machines de faible puissance.

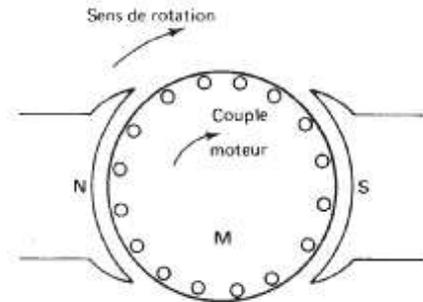
ANNEXE

Les moteurs à courant continu

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotation précises et variables pour l'entraînement d'engins de manutention par exemple.

1. Rappels de physique

En alimentant l'induit par une source de tension séparé, chaque faisceau, placé dans le champ magnétique parcouru par un courant, est soumis à une force, dont la direction est donnée par la règle des trois doigts de la main droite. C'est la réversibilité des machines à courant continu.



1.1 La force contre électromotrice FCEM

$$E' = \frac{p}{a} N n \Phi$$

N: Nombre de conducteurs actifs sous un pôle

n: Vitesse de rotation en tr/s

Φ : Flux sous un pôle

E': Force contre électromotrice en V

p: Nombre de paire de pôle

a: Nombre de paire de voie d'enroulement

1.2 Loi d'Ohm

$$U = E' + RI$$

1.3 Vitesse de rotation

$$n = \frac{a}{p} * \frac{U - RI}{N\Phi}$$

Remarque :

Lorsque le flux est nul la vitesse tend vers l'infini, le moteur s'emballe.

Il ne faut jamais alimenter l'induit d'un moteur à courant continu sans un courant d'excitation.

Si on néglige la chute de tension RI et si le flux est constant on peut considérer que:

$$n = K U$$

Donc que la vitesse est directement proportionnelle à la tension moyenne d'alimentation

1.4 Puissance

Puissance électrique utile

$$P_e = \frac{p}{a} * N n \Phi I = E' I$$

P_e : Puissance électromotrice

n : Vitesse en tr/s

N : Nombre de conducteur actif sous un pôle

Φ : Flux sous un pôle

I : Intensité en A

E' : Force contre électromotrice en V

Puissance électrique absorbée P_a

$$P_a = UI$$

1.5 Couple moteur

Le couple moteur, calculé à partir de la relation:

$$P_e = T \Phi$$

d'où le couple moteur

$$T = \frac{P_e}{\omega} = \frac{\frac{p}{a} N n \Phi I}{2 \pi n} = \frac{p}{a} \frac{N}{2 \pi} \Phi I$$

$$T = K' \Phi I$$

Le couple utile est inférieur du fait des pertes mécaniques

1.6 Rendement

Le bilan des puissances fait apparaître le rendement d'un MCC

Les pertes comprennent:

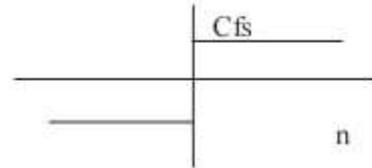
- Les pertes Joules
- Les pertes fer
- Les pertes mécaniques

1.7 Analyse des pertes

a) Les pertes mécaniques

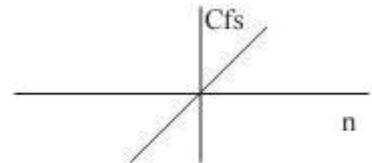
- Frottement sec

Le couple de perte est indépendant de la vitesse sauf à vitesse nulle, il est proportionnel à la pression qui s'exerce sur l'arbre.



- Frottement visqueux

Le couple de perte est proportionnel à la vitesse.



- Frottement fluide (pertes par ventilation)

Le couple de perte est proportionnel au carré de la vitesse.

Si le moteur est à ventilation forcée (ventilation extérieure) on considère qu'il n'y a pas de pertes de ce type dans le moteur.

b) Les pertes magnétiques

- Les pertes par hystérésis

$$p_{fh} = K_h B_{max}^2 \times f = K'_h B_{max}^2 \times \Omega$$

Le couple de pertes par hystérésis est constant.

$$C_{pf_h} = cte$$

- Les pertes par courant de Foucault

$$P_{ff} = k_f B_{max}^2 \times f^2 = k'_f B_{max}^2 \times \Omega^2$$

Le couple de perte par courant de Foucault est proportionnel à la vitesse.

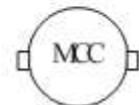
$$C_{pf_f} = K\Phi$$

2. Les différents types de moteurs

On peut réaliser l'excitation des moteurs de plusieurs façons

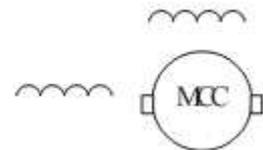
- En dérivation

C'est une excitation séparée, l'inducteur comporte beaucoup de spires de faibles sections.



- En série

L'inducteur est traversé par le courant d'induit, il comporte peu de spires de grosses sections.



- Composé (Compound)

On trouve une partie des enroulements inducteurs en série et une partie en parallèle. On distingue deux types de branchements:



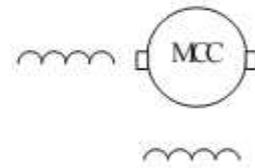
- Courte dérivation

L'enroulement parallèle est aux bornes du moteur



- Longue dérivation

L'enroulement parallèle est aux bornes de la source d'alimentation



On peut réaliser pour chaque type de branchement deux types d'excitations:

Une excitation à flux additif, le flux de l'enroulement série s'ajoute avec celui de l'enroulement parallèle.

Une excitation à flux soustractif, le flux série se soustrait de celui de l'enroulement parallèle.

Le type d'excitation influence le comportement du moteur

2.1 Caractéristiques

Ce sont des courbes qui traduisent graphiquement les relations entre les variables courant absorbé, vitesse et couple moteur.

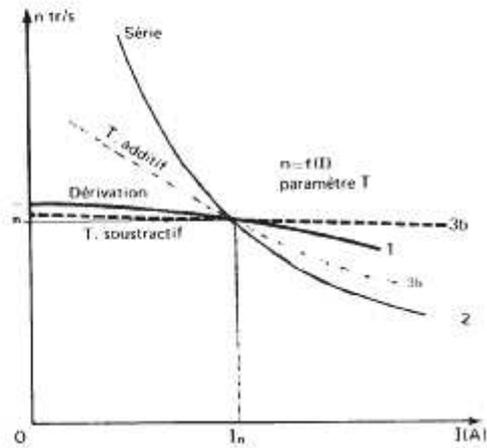
Elles varient selon le type du moteur.

a) Caractéristique de vitesse

$n=f(I)$ avec un couple constant. Elle répond à l'équation

$$n = \frac{U - RI}{k \phi} \quad K = \frac{p}{a} N = \text{cte}$$

- 1: Dérivation
- 2: Série
- 3a: Composé flux additif
- 3b: Composé flux soustractif



b) Caractéristique de couple

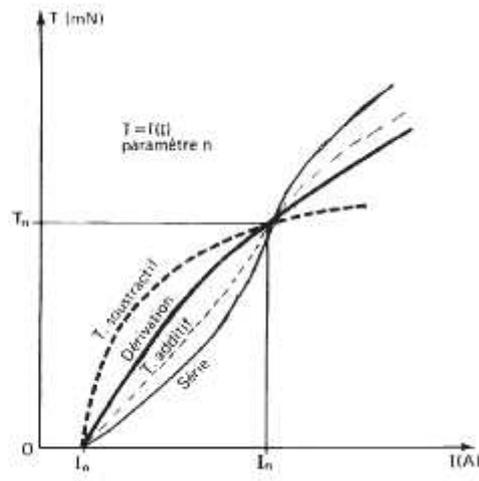
$T=f(I)$ avec une vitesse constante

$$T = K' \phi I$$

Le couple est proportionnel au flux et au courant absorbé.

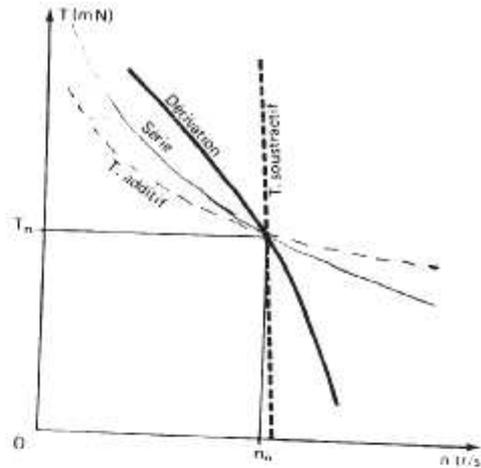
Si on considère le flux sous un pôle constant, le couple est directement proportionnel à l'intensité.

I_0 : Courant à vide



c) Caractéristique mécanique

$T = f(n)$ avec I constant



2.2 Domaine d'application

Excitation	Particularités	Emplois
Dérivation	Moteur auto-régulateur de vitesse. La vitesse est relativement constante quelque soit la charge	Entrainement de machines-outils Remplacé par le moteur asynchrone triphasé
Série	Moteur auto-régulateur de puissance Possède un très grand couple de démarrage mais risque l'emballement à vide La vitesse décroît quand la charge augmente	est le moteur qui convient le mieux en traction électrique
composé Flux additif	Ne s'emballe pas Couple de démarrage meilleur qu'en excitation dérivée	Laminaires, appareils de levage et de manutention utilisé aussi en excitation indépendante
composé Flux soustractif	Risque d'emballement dû fait de l'annulation du flux résultant des enroulements	Pratiquement ce moteur n'est plus utilisé

3. Démarrage

Le courant absorbé par un MCC est:

$$I = \frac{U - E'}{R}$$

A la mise sous tension et au décollage, la vitesse du moteur est nulle donc la FCEM aussi, Le courant n'est donc plus limité que par la valeur de R, résistance d'induit, d'où

$$I = \frac{U}{R}$$

Exemple

MCC 120 V
 P= 3600 W
 R=0.2 Ω

In =

Id =

Cette intensité est de 20 In, c'est beaucoup trop important. Pour limiter cette pointe d'intensité au démarrage on place en série avec le moteur une résistance de démarrage.

On considère que l'intensité de démarrage doit être comprise entre 1 et 2 fois l'intensité nominale.

$$I_d = \frac{U}{R + R_h}$$

Si on choisit un ID de deux In on obtient

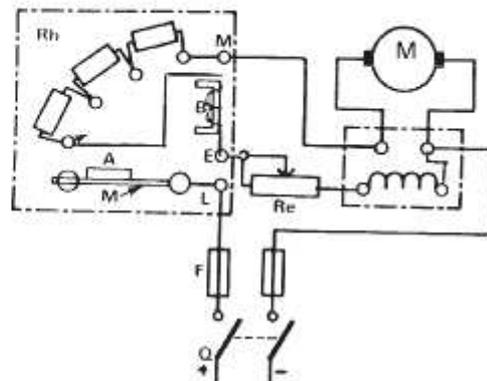
Id =

Soit Rh =

Le Rhéostat comporte, en général, plusieurs plots de façon à diminuer progressivement la résistance Rh, au fur et à mesure que la vitesse augmente.

3.1 Schéma développé

- Q interrupteur de mise sous tension
- F Fusibles de protection
- Rh Rhéostat de démarrage avec plot mort.
- A Armature mobile ou culasse.
- B Bobine à minimum de courant dans le circuit d'excitation et armature fixe.



- A la mise sous tension, le circuit d'excitation est alimenté avec le courant maximum (Rhéostat d'excitation Re au minimum de résistance)

- En déplaçant le curseur du rhéostat de démarrage (Rd), on passe du plot mort à la résistance maximum, en fin de démarrage Rd = 0. La manette mobile M plaque l'armature A sur le noyau B.

En cas de coupure du circuit d'excitation (risque d'emballement du moteur), la manette M est ramenée à zéro par un ressort et le moteur s'arrête. On assure ainsi la protection contre les risques d'emballement du moteur.

3.2 Démarrage semi automatique

a) moteur à excitation dérivation deux sens de marche

Le sens de rotation est dépendant des polarités, pour inverser le sens de rotation il suffit d'inverser le sens du courant soit dans l'inducteur soit dans l'induit.

Schéma de puissance

A la fermeture de KM1 le moteur tourne dans un sens, à la fermeture de KM2 le moteur tourne dans l'autre sens. Dans les deux cas l'inducteur est alimenté sous la même polarité par KM1 ou KM2

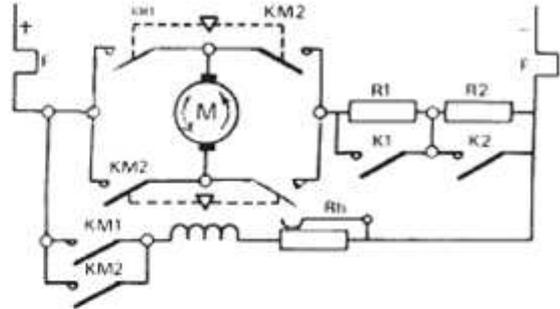
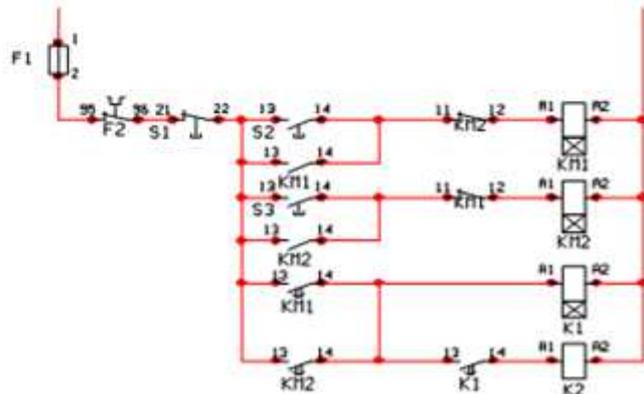


Schéma de commande

Au démarrage Le courant d'excitation doit être maximum, et les résistances R1 et R2 en série avec l'induit. Une temporisation court-circuite les résistances R1 et R2 au fur et à mesure du démarrage.

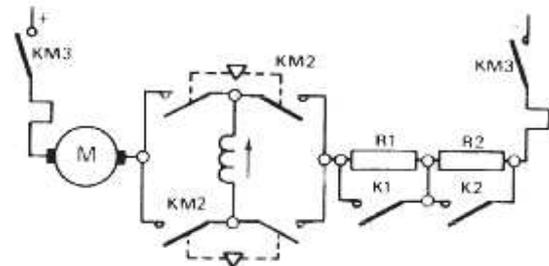


b) Moteur à excitation série

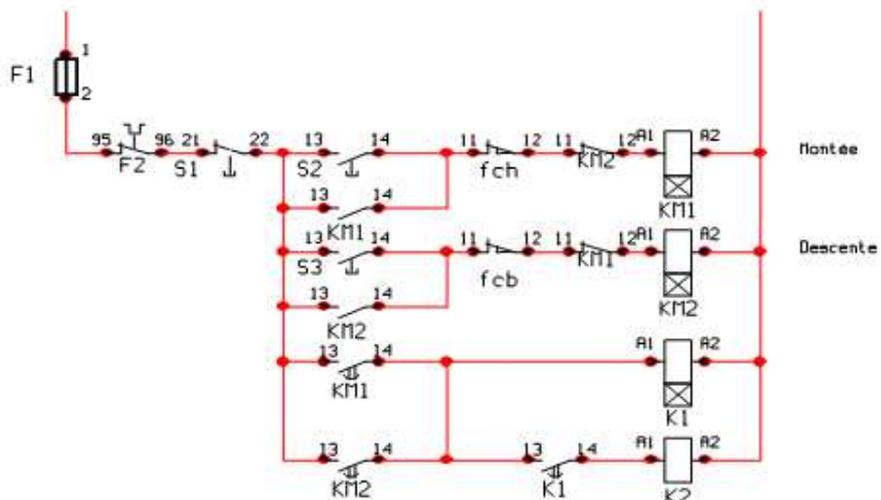
- Schéma de puissance

Le courant est inversé uniquement dans l'inducteur série. Le verrouillage entre KM1 et KM2 doit être électrique et mécanique. Si les deux contacteurs se ferment en même temps l'inducteur est court-circuité et le moteur s'emballe.

- Schéma de commande



Exemple cycle monté descente avec deux fins de courses FCh et FCb



4. Réglage de la vitesse

Le moteur à courant continu offre de grandes possibilités pour obtenir des vitesses de rotation variables. En sachant que $U = E' + RI$, si on néglige RI , R très faible on a sensiblement:

$$U \approx E' = \frac{p}{a} N n \Phi$$

d'où

$$n = \frac{U}{\frac{p}{a} N \Phi}$$

On pose $K = \frac{p}{a} N$

$$n = \frac{U}{K \Phi}$$

On peut modifier n en agissant sur la tension U et sur le flux F (action sur le courant inducteur).

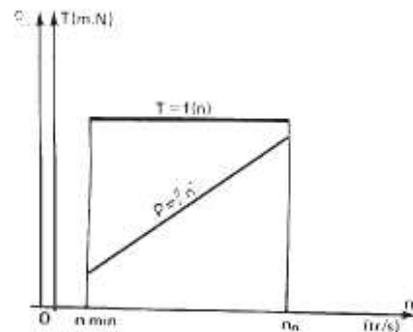
4.1 Action sur la tension d'alimentation

La vitesse est directement proportionnelle à la tension d'alimentation de l'induit.

$$n = \frac{U}{K \phi}$$

Le couple est proportionnel au courant d'excitation or comme il est constant, le couple est constant.

Le fonctionnement est alors dit à couple constant pour une vitesse entre 0 et n nominal.

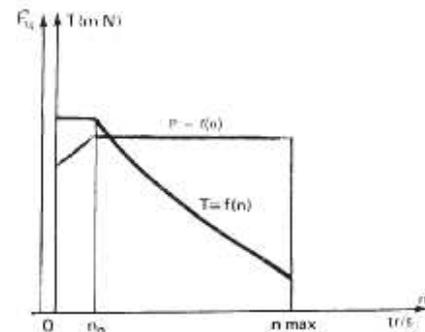


4.2 Action sur le flux

Pour dépasser la vitesse nominale on ne peut plus agir sur la tension d'alimentation ($U = U_n$), on peut diminuer le flux. Si ϕ diminue, n augmente.

Le couple du moteur ($T = K \phi I$), est proportionnel au flux donc si F diminue et si I est constant le couple moteur diminue.

Le fonctionnement est dit à puissance constante



4.3 Alimentation des moteurs

Pour obtenir un fonctionnement à vitesse variable, cela revient à alimenter un moteur à excitation indépendante avec une tension variable de 0 à U_n sur l'induit, et une tension variable sur l'inducteur au-delà de la vitesse nominale.

Il existe différents procédés.

a) Rhéostat en série avec l'induit et inducteur

Valable uniquement pour des petits moteurs (trop de pertes dans les résistances).

b) Couplage série parallèle des induits

c) Tension variable par couplage de batterie d'accumulateurs

Procédé simple mais nécessitant beaucoup de matériel

d) Groupe Ward-Léonard

La tension variable est obtenue par un groupe tournant moteur asynchrone, génératrice dérivation dont on règle le courant d'excitation. Le courant obtenu à tension variable alimente l'induit du MCC. Ce groupe était beaucoup utilisés dans des installations de fortes puissances (extraction minière).

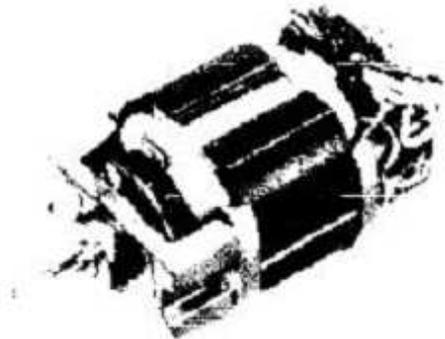
e) Variateur électronique

Ce procédé a tendance à remplacer les autres, moins coûteux et de plus en plus fiable même pour les grosses puissances.

5. Moteurs spéciaux**5.1 Le moteur universel**

Il peut être alimenté en continu ou en alternatif monophasé.

Si on inverse le sens de passage du courant dans l'induit et dans l'inducteur en même temps la vitesse ne change pas de sens. On utilise ce principe avec des moteurs à excitation série, à chaque demie alternance le courant s'inverse dans l'induit et dans l'inducteur, le sens reste le même. On ne peut pas utiliser des moteurs à excitation en dérivation car l'inductance des bobines est trop importante elle déphase le flux.

**a) Caractéristiques**

Le couple au démarrage et le courant d'appel est important. La vitesse varie beaucoup avec la charge.

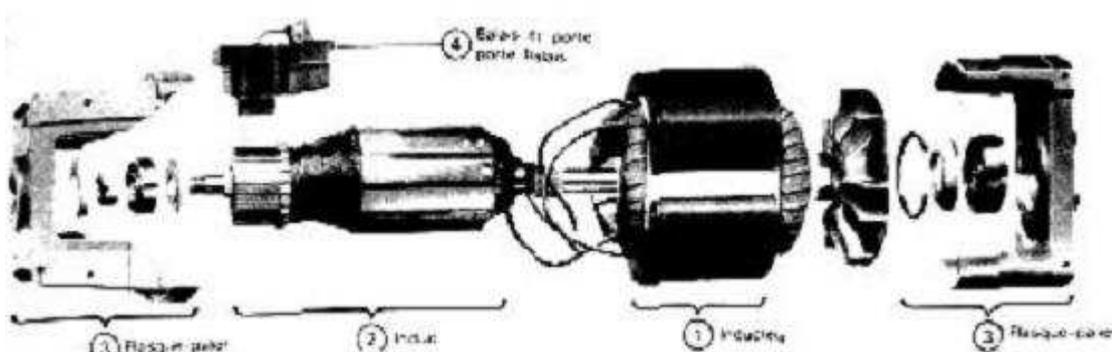
Pour inverser le sens de rotation il faut inverser: Soit l'induit, soit l'inducteur.

Il provoque beaucoup de parasites, d'où la nécessité de relier les balais à la masse par l'intermédiaire de condensateur (l'ensemble condensateur, inducteur formant un filtre).

b) Utilisation

Petite puissance en alternatif (aspirateur, perceuse portative, etc.)

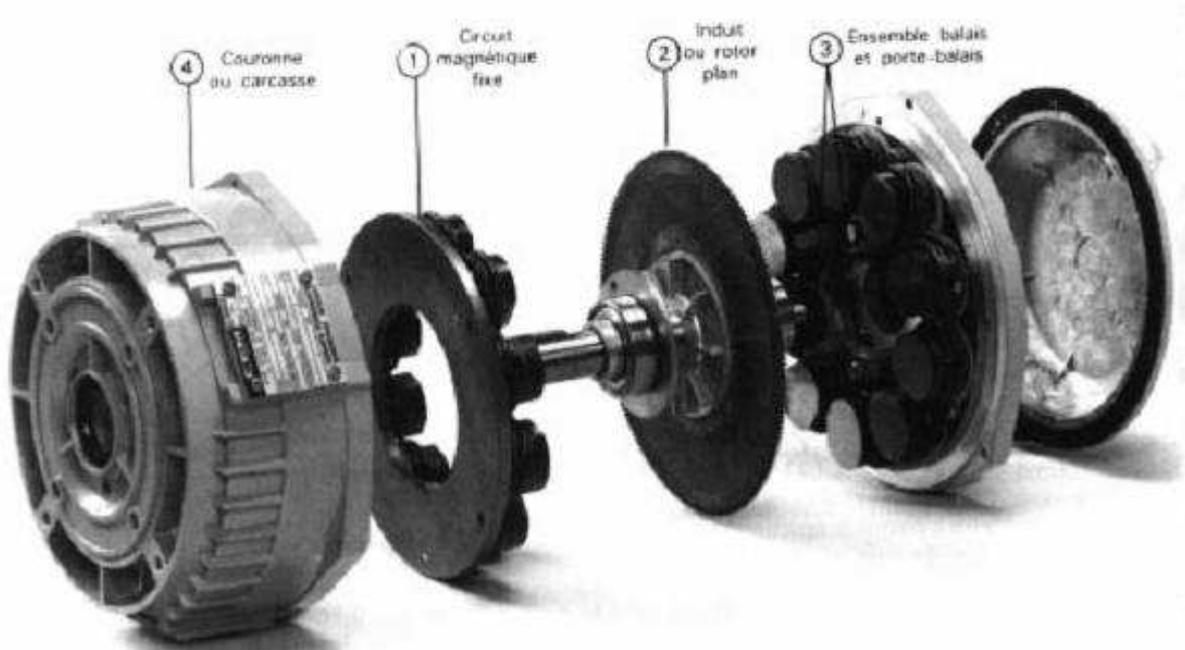
Possibilité de variation de vitesse par triac (cf physique)

**5.2 Moteur à entrefer plan****a) Principe**

C'est un MCC dont les conducteurs induits sont disposés selon des rayons. L'inducteur étant réalisé par des aimants permanents.

b) Caractéristiques

- Moteur à faible inertie, l'induit ne comporte pas de circuit magnétique mais uniquement des conducteurs avec leurs isolants.
- Moteur très plat, l'induit est un disque.
 - Inducteur à aimant permanent, pas de circuit d'excitation
 - La disposition des conducteurs supprime la réaction magnétique d'induit, d'où une bonne commutation.
 - Grande gamme de vitesse, de 1 à 3000 tr/mn

**c) Emploi**

Ils permettent des commandes à inversion rapides et fréquentes, tel que les dérouleurs de bandes magnétiques, servomécanisme, ils sont utilisés pour des climatiseurs, ventilateur, etc.

c) Autres moteurs

Il existe une grande variété de moteurs spéciaux:

- Moteur pas à pas
- Moteur à répulsion
- Micro-moteur à courant continu
- Moteur à Hystérésis
- etc..

BIBLIOGRAPHIE

- [1] - RASOLONIRINA Tina L. Juvence, « COMMANDE PREDICTIVE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU », mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme CAPEN, Editions Université Nord d'Antsiranana (U.N.A), 2004 – 2005 ;
- [2] - RAZAFITSALAMA Falintsoa Fanantenana Asombola, « SIMULATEUR ANALOGIQUE D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU », mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme CAPEN, Editions U.N.A, novembre 2004 ;
- [3] - A. ILIOVICI « LEÇONS SUR LES ESSAIS DE MACHINES ELECTRIQUES A COURANT CONTINU », Editions Eyrolles, 1949 ;
- [4] - M. Kostenko et L. Piotrovski « MACHINES ELECTRIQUES », Tome 1, « MACHINES A COURANT CONTINU, TRANSFORMATEURS »,Troisième Edition, Editions MIR. MOSCOU ;
- [5] - Michel BORNAND « PROBLEMES D'ELECTROTECHNIQUE AVEC LEURS SOLUTIONS », « MOTEURS A COURANT CONTINU et LEUR COMMANDE PAR THYRISTOR », Collection E.E.A, Editions Eyrolles, 1976 ;
- [6] - J. Fourier Grenoble « GENERATRICE et MOTEUR A COURANT CONTINU », fichier PDF ;
- [7] - Fabrice Sincère « MACHINES ELECTRIQUES », fichier PDF, Version 3.0.5, Electrotechnique ;
- [8] - ARMAND « ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTES METHODES DE DETERMINATION DU RENDEMENT DES MACHINES A COURANT CONTINU », Editions U.N.A, 1993 ;
- [9] - ABDALLAH Fahardine « CARACTERISATION DES DIFFERENTES METHODES DE DETERMINATION DES PERTES et DU RENDEMENT DANS LES MACHINES A COURANT CONTINU » Editions U.N.A, 2004 ;
- [10] - H. HUERGA « MOTEUR A COURANT CONTINU », Collection Manuel d'Exploitation.

RESUME :

Par leurs particularités, les machines à courant continu offrent des nombreuses méthodes pour déterminer leurs pertes et leurs rendements. Sachant que le rendement caractérise l'économicité de la transformation d'énergie dans une machine électrique, il représente donc un indice énergétique très important de ses propriétés d'exploitation. Le choix de la méthode à utiliser sera déterminé par nombre de facteurs. Ce travail de Mémoire permet aux électrotechniciens de choisir parmi ces méthodes la mieux adaptée à leurs besoins et à leurs possibilités. Ces méthodes ont chacune ses spécifications propre comme : *la précision, l'économie, le temps et la didactique*. La théorie présente une certaine précision à tous les paramètres de construction d'une machine à courant continu à étudier, d'une part. D'autre part, l'expérience paraît très capitale pour vérifier puis confirmer tout ce qui a été étudié ; afin de faire l'objet de l'enseignement aussi bien au Lycée Technique qu'à l'Université pour la filière Génie-Electrique.

MOTS CLES :

- Machine électrique ;
- Courant continu ;
- Etudes expérimentales ;
- Essais ;
- Commutation ;
- Méthodes ;
- Pertes ;
- Rendement.

Le numero 1 mondial du memoires



www.rapport-gratuit.com

clubmemoire@gmail.com