



People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
University of Science and Technology of Oran - Mohamed BOUDIAF
Faculty of Electrical Engineering
Vice-Dean, Postgraduate, Scientific Research and External Relations
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف
كلية الهندسة الكهربائية
نيابة عمادة الكلية لما بعد التدرج والبحث العلمي والعلاقات الخارجية



Département d'Electrotechnique

Polycopié Pédagogique

MACHINES ELECTRIQUES APPROFONDIES

Préparé par: Dr KADA BELGHITRI NAOUAL (MCB)

Cours destiné aux étudiants de :

Master 1 : Machines électriques

Commande électrique

Réseaux électriques

Électrotechnique industrielle

Experts:

Dr BENDIABDALLAH Azzeddine.

MCA

Mr ILES Nasreddine

MAA

Année Universitaire : 2024/2025...

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement mes anciens enseignants, Mr BENDIABDALLAH A. et Mr ILES N. , tous deux enseignants à l'USTOMB, pour avoir accepté d'expertiser ce polycopié de cours. Je les remercie également pour leurs conseils, leurs critiques ainsi que pour le temps précieux qu'ils ont consacré à corriger et à améliorer ce document.

Ma reconnaissance est adressée également à ma collègue et amie Mme OUALI A. pour son soutien, son aide et ses conseils.

Je remercie également Mr BENNOUZA N. , pour l'intérêt qu'il a porté à ce document et ses conseils constructifs.

Mme KADA BELGHITRI NAOUAL

AVANT PROPOS

Ce polycopie de cours est destiné à la formation harmonisée des étudiants en Master1 académique de toutes les options en électrotechnique (Machines électriques, réseaux électriques, électrotechnique industrielle et commande électrique). C'est un recueil de cours détaillé qui explique les phénomènes électromagnétiques qui régissent les machines électriques tournantes. Il permet aux étudiants ainsi qu'à toute personne intéressée, d'approfondir leurs connaissances de bases des machines électriques et de compléter leur formation dans les domaines déjà abordés en licence en module d'électrotechnique approfondie.

Il est toutefois recommandé que les étudiants aient des connaissances préalables en circuits électriques triphasés à courants alternatifs, en circuits magnétiques et quelques bases en machines électriques à courants continu et alternatif (fonctionnement moteur et génératrice).

A la fin de ce cours, l'étudiant sera capable d'établir les équations générales de conversion d'énergie électromécanique appliquées aux machines synchrones, asynchrones et à courant continu et saura déterminer leurs caractéristiques en régimes statiques ou variables. Ce qui permet notamment de prendre en compte l'association des machines aux convertisseurs statiques.

Ce document répond au exigences du canevas ministériel officiel.

La matière technique et pédagogique de ce document est le fruit de plusieurs années d'expérience et d'enseignement dans le domaine de électrotechnique. Le présent cours est enseigné au niveau du département d'électrotechnique à la faculté de Génie Électrique de l'Université des Sciences et de la Technologie *MOHAMMED BOUDIAF* d'Oran.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES

INTRODUCTION.....	2
1-CLASSIFICATION DES MACHINES ÉLECTRIQUES.....	2
2-LES MACHINES TOURNANTES A COURANT ALTERNATIF.....	2
3-LA PLAQUE SIGNALÉTIQUE.....	3
4-TECHNOLOGIE DES MACHINES ÉLECTRIQUES.....	4
5- CONSTRUCTION DES MACHINES TOURNANTES A COURANT ALTERNATIF.....	5
5-1-Le stator.....	5
5-2-Le rotor.....	6
5-3-Les encoches.....	7
6-BOBINAGES DES MACHINES TOURNANTES.....	7
6-1-Le bobinage concentrique.....	8
6-2-Le bobinage distribué.....	8
6-2-1-Paramètres principaux d'un bobinage.....	9
6-2-2-Schéma d'emplacement d'un bobinage.....	10
7-LOIS GÉNÉRALES DE CONVERSION ÉLECTROMAGNÉTIQUE.....	10
7-1-Loi de Lenz-Faraday.....	11
7-2-Loi de Laplace.....	11
7-3-Le champs magnétique tournant.....	12
CONCLUSION.....	13

CHAPITRE II. LES MACHINES SYNCHRONES

INTRODUCTION.....	14
1-CONSTRUCTION DES MACHINES SYNCHRONES.....	14
2-L'ALTERNATEUR.....	15
2-1-Symbole de l'alternateur.....	15
2-2-Principe de fonctionnement.....	15
2-3-Expression de la f.e.m induite.....	16
3-ESSAIS DE L'ALTERNATEUR AUTONOME.....	16
3-1-Essai a vide.....	17
3-2-Essai en charge.....	18
3-3-Essai en court circuit.....	20
4-MODÉLISATION DE L'ALTERNATEUR.....	21
4-1-Modèle de ben-Eschenburg.....	21
4-1-1-Détermination des paramètres synchrones.....	22
4-1-2-Determination de la fem selon la charge.....	23
4-2-Modèle de Potier.....	24
4-2-1-Determination des paramètres de Potier.....	25
5-BILAN DES PERTES.....	26

6-LIMITES DE FONCTIONNEMENT D'UN ALTERNATEUR.....	28
7-COUPLAGES DES ALTERNATEURS SUR LE RÉSEAU.....	28
8-LE MOTEUR SYNCHRONE.....	29
8-1-Principe de fonctionnement.....	29
8-2-Modele équivalent du moteur synchrone.....	29
8-2-1-Détermination de la FCEM du moteur.....	30
8-3-Démarrage des moteurs synchrones.....	31
8-4-Essais sur le moteur synchrone.....	31
8-4-1-Essai a vide.....	31
8-4-2-Essai en charge.....	32
8-5-Expression du couple électromagnétique.....	33
8-6-Bilan des puissances du moteur synchrones.....	35
CONCLUSION.....	35

CHAPITRE III. LES MACHINES ASYNCHRONES

INTRODUCTION.....	36
I-CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ.....	36
I-1-Le stator.....	36
I-2-Le rotor.....	37
2-SYMBOLS.....	38
3-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	39
3-1-Le glissement.....	39
3-2-La fréquence des courants rotoriques.....	39
4-ESSAIS DU MOTEUR ASYNCHRONE.....	40
4-1-L'essai à vide.....	40
4-2-L'essai en charge.....	41
4-3-L'essai en court-circuit (rotor calé).....	42
5-MODÈLE ÉQUIVALENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A ROTOR BOBINÉ.....	42
6-DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS DU MODÈLE SIMPLIFIÉ.....	46
6-1-Essai à vide.....	46
6-2-Essai en régime de court-circuit (rotor bloqué).....	46
6-3-Essai en charge.....	48
7-ETUDE DU COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE.....	49
8-BILAN DES PUISSANCES DU MAS.....	50
9- DÉMARRAGE DES MOTEURS ASYNCHRONES.....	51
9-1-Démarrage par action sur le rotor.....	51
9-2-Démarrage par action sur le stator.....	53
9-2-1-Rhéostat de démarrage du stator.....	53
9-2-2-Transformateur abaisseur.....	53
9-2-3-Démarrage Etoile-Triangle.....	53
9-2-4-Démarrage par gradateur alternatif.....	54
10-FREINAGE DE LA VITESSE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE.....	54
10-1-Freinage par injection de continu dans le rotor.....	54
10-2-Freinage à contre-courant.....	54
10-3-Freinage avec rhéostat rotorique.....	54
CONCLUSION.....	54

CHAPITRE IV. LES MACHINES A COURANT CONTINU

INTRODUCTION.....	55
1-CONSTRUCTION.....	55
1-1-L'inducteur.....	55
1-2-L'induit.....	56
1-3- Collecteur - balais.....	57
1-4- Les Voies d'enroulement.....	57
2-LA GÉNÉRATRICE A COURANT CONTINU.....	58
2-1 -Symbole.....	58
2-2-Principe de fonctionnement.....	58
2-3- La FEM induite.....	59
2-4-Phénomène de commutation.....	59
2-5-Modes d'excitation des GCC.....	60
2-5-1-Génératrice à excitation séparée.....	60
2-5-2-Génératrice à excitation shunt.....	61
2-5-3-Génératrice à excitation série.....	61
2-5-4- Génératrice à excitation composée.....	62
2-6-Amorçage des génératrices a courant continu.....	63
2-7-Essais de la génératrice a courant continu.....	64
2-7-1-Essai a vide.....	64
2-7-2-Essai en charge.....	65
3-LE MOTEUR A COURANT CONTINU.....	66
3-1-Symbole.....	66
3-2-Principe.....	67
3-3-Types de moteurs.....	67
3-3-1 Le moteur a excitation indépendante.....	67
3-3-2-Le moteur shunt.....	67
3-3-3-Le moteur série.....	68
3-3-4-Le moteur composé.....	68
3-4-Caractéristiques des MCC.....	69
3-5-Bilan des puissances du MCC.....	70
3-6-Problème du démarrage.....	71
CONCLUSION.....	72
RECUEIL D'EXCERCICES CORRIGÉS	72

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nos jours, personne ne peut nier le rôle des machines électriques dans notre quotidien. Elles sont devenues des éléments clés de l'infrastructure moderne, influençant la production, la distribution et la consommation d'énergie, tout en permettant des avancées technologiques dans de nombreux secteurs. Ce sont des dispositifs réversibles qui convertissent l'énergie d'une forme à une autre. Ces machines peuvent être classées en deux grandes catégories: Les moteurs électriques, qui transforment l'énergie électrique en mouvement mécanique, et les générateurs électriques, qui produisent de l'énergie électrique à partir d'une source d'énergie mécanique.

L'étude des machines électriques est très importante pour un ingénieur électrotechnicien, afin qu'il puisse comprendre les phénomènes qui les régissent. En effet, comprendre leur fonctionnement permet de faciliter leur mise en œuvre et leur maintenance. Ceci permet également une bonne modélisation de ces systèmes. Le développement technologique dans le domaine des machines électriques ne cesse de croître. Des machines dites spéciales voient le jour à chaque instant. Mais cela n'a pas pour autant détrôné les machines classiques. C'est pour cela que ce polycopié a été consacré à ce type de machines; d'une part parce qu'elles sont toujours d'actualité. Et d'autre part parce qu'elles sont la base des machines spéciales.

Les applications des machines électriques sont vastes et touchent presque tous les aspects de la vie moderne. Dans l'industrie et l'automatisation, les moteurs électriques sont au cœur des chaînes de production, des robots industriels et des systèmes automatisés. Ils permettent un contrôle précis des mouvements et des vitesses, contribuant à l'efficacité et à la productivité. Dans les transports, les moteurs électriques alimentent des véhicules électriques, des trains, des tramways, et même des avions dans certains cas. Ces technologies contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans nos foyers, les machines électriques se retrouvent dans des appareils tels que les réfrigérateurs, les lave-linge, les aspirateurs, les ventilateurs et de nombreux autres équipements. Dans les centrales de production d'énergie, les générateurs électriques, qu'ils soient à base de moteurs à combustion ou d'énergies renouvelables (éolien, hydroélectrique, solaire), jouent un rôle clé dans la fourniture d'électricité pour les réseaux de distribution.

Leur principe de fonctionnement est basé sur l'électromagnétisme. Les champs magnétiques sont les principaux responsables de la conversion de l'énergie. À cet effet, le premier chapitre de ce document a été consacré aux principes fondamentaux de l'électromagnétisme et à la technologie utilisée pour la production de ces champs.

Le deuxième chapitre a été dédié aux machines synchrones dans leurs deux modes de fonctionnement. Mais une attention particulière a été apportée aux alternateurs triphasés, car leur utilisation est plus répandue. Les applications du moteur synchrones sont restreintes à cause de son instabilité en charge.

Au troisième chapitre, il a été question du moteur asynchrone qui est le moteur le plus utilisé, parce qu'il présente une fiabilité et des gammes de couples et de vitesses très étendues.

Au dernier chapitre la machine à courant continu a été étudiée en détails dans ses deux modes de fonctionnement, et pour tous les modes d'excitation.

CHAPITRE 1

***GENERALITES SUR LES MACHINES
ELECTRIQUES***

INTRODUCTION

Les machines électriques sont des dispositifs électromécaniques réversibles qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (générateur) ou l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur). Cette conversion se fait par l'intermédiaire du champ magnétique. Elles sont utilisées dans plusieurs domaines tel que l'industrie, l'électroménager, le transport, la traction...etc. Il en existe deux types, les machines rotatives ou tournantes et les machine linéaires qui génèrent une translation. Dans ce chapitre nous allons nous intéresser aux machines tournantes en général.

1-CLASSIFICATION DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Il existe plusieurs types de machines classées généralement selon le type d'énergie mise en jeu lors du fonctionnement. Elles sont classées comme suit :

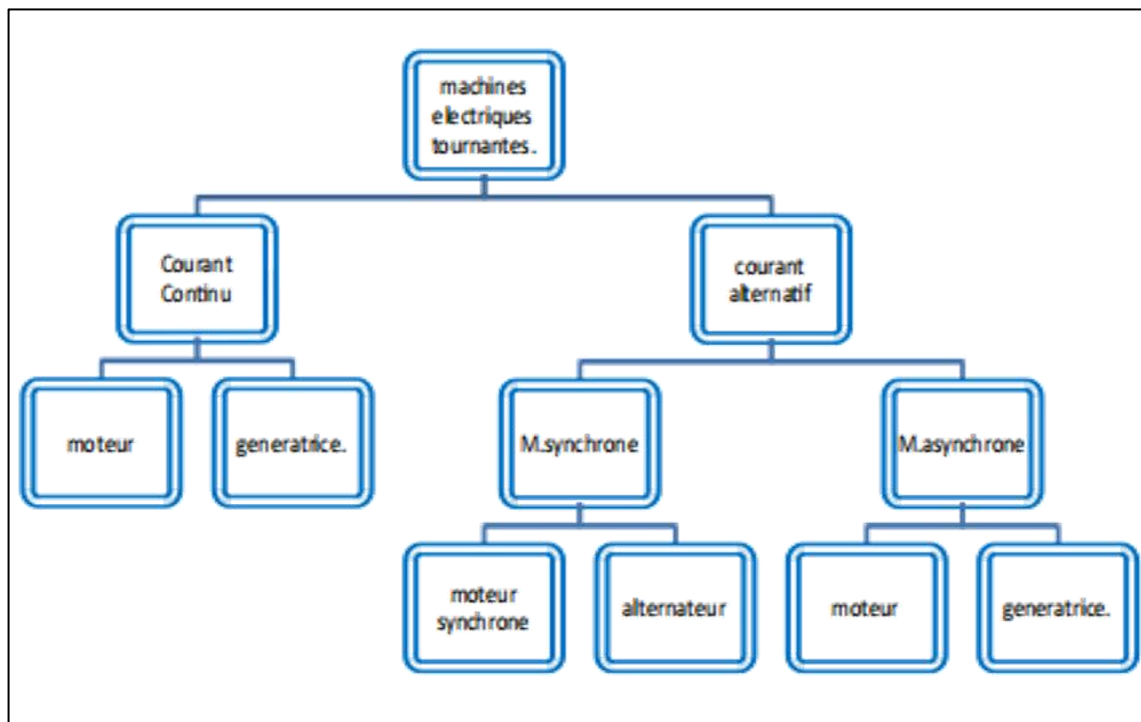


Figure I-1. Classification des machines tournantes.

2-LES MACHINES TOURNANTES A COURANT ALTERNATIF

Il existe deux types principaux de machines électriques tournantes à courant alternatif; les machines **synchrones** et les machines **asynchrones**.

Les machines **synchrones** sont appelées ainsi parce que la vitesse de leur rotor est égale à la vitesse du champs magnétique tournant. Cette dernière est liée à la fréquence du réseau par la relation:

$$n = ns = \frac{60f}{p} \tag{I-1}$$

Ou n est la vitesse du rotor et ns la vitesse du champ magnétique tournant en tours/ minute.

ns est appelée vitesse de synchronisme.

f la fréquence du réseau d'alimentation en Hertz.

p est le nombre de paires de pôles de l'inducteur.

La machine asynchrone a une vitesse différente de la vitesse de synchronisme, généralement

$$n < ns.$$

Le tableau (I-1) suivant montre les différentes vitesses synchrones pour les deux valeurs usuelles de fréquence.

Tableau I-1-Tableau des vitesses de synchronismes des machines synchrones

Nombre de paires de pôles	P=1 (une paire de pôles). 2 pôles (bipolaire)	P=2 (2 paires de pôles) 4 pôles (tétrapolaire)	P=3 (3 paires de pôles) 6 pôles (hexapolaire)	P=4 (4 paires de pôles) 8 pôles (octopolaire)
Ns(tr/min) pour 50Hz	3000	1500	1000	750
Ns(tr/min) pour 60Hz	3600	1800	1200	900

3-LA PLAQUE SIGNALÉTIQUE

Toute machine électrique est munie d'une plaque signalétique qui indique les caractéristiques nominales électriques de la machine, tous les renseignements utiles y sont répertoriés. Une plaque signalétique porte généralement les indications suivantes:

- Le numéro du modèle propre au constructeur.
- La puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur.
- Le facteur de puissance.
- Les tensions d'alimentation.
- Les intensités en ligne en fonction du couplage étoile ou triangle.
- Le rendement qui permet de connaître la puissance électrique absorbée par la machine.
- La vitesse de rotation nominale de l'arbre moteur.
- La fréquence des tensions qui doivent alimenter la machine.
- Le nombre de phases.
- La température ambiante maximum.
- Le service de marche.
- La classe d'isolation les indices de protection IP, et IK indiquant par trois chiffres la résistance du moteur à la pénétration des poussières, à l'eau et aux chocs mécaniques.
- La masse de la machine.

- Différentes normes, permettant aux constructeurs d'harmoniser la construction des moteurs en termes de support, diamètre, hauteur, axe, . . .

En d'autres termes la plaque signalétique est « la carte d'identité » de la machine.

L'image ci-dessous (figure I-2) représente la plaque signalétique d'une machine électrique à courant alternatif. Les grandeurs nominales sont définies par leurs dimensions (unités). Par exemple on reconnaît la vitesse grâce à l'unité tr/min ici c'est 1440tr/min. Cette vitesse n'appartient pas au tableau des vitesses qu'on a cité plus haut donc c'est un moteur asynchrone.



Figure I-2. Plaque signalétique d'une machine asynchrone

On y trouve aussi la classe d'isolation, la température ambiante tolérée en degrés Celsius, la fréquence en Hertz, le nombre de phases...etc. La puissance de sortie (en kW), le facteur de puissance, les tensions simple et composée (en Volt), ainsi que les courants de ligne et de phase (en Ampere) y sont mentionnés.

4-TECHNOLOGIE DES MACHINES ÉLECTRIQUES

Les machines électriques comportent :

1. **Des matériaux magnétiques** chargés de conduire et canaliser le flux magnétique. On les retrouve principalement dans les culasses rotoriques et les culasses statoriques ainsi que les dents et les pôles .
2. **Des matériaux conducteurs** chargés de conduire et canaliser les courants électriques (les conducteurs, les barres et les bobinages).
3. **Des isolants** entre les conducteurs et entre les conducteurs et les encoches.
4. **Un « contenant »** ou la carcasse qui constitue la boîte dans laquelle sont insérées toutes les autres parties de la machine.
5. **Un ventilateur** qui joue le rôle de système de refroidissement.
6. **Un système bague-balais** qui permet de transmettre l'énergie électrique au rotor.

5- CONSTRUCTION DES MACHINES TOURNANTES A COURANT ALTERNATIF.

Les machines tournantes comportent plusieurs éléments indispensables à leur fonctionnement, et la figure I-3 montre en détail ces éléments pour une machine asynchrone.

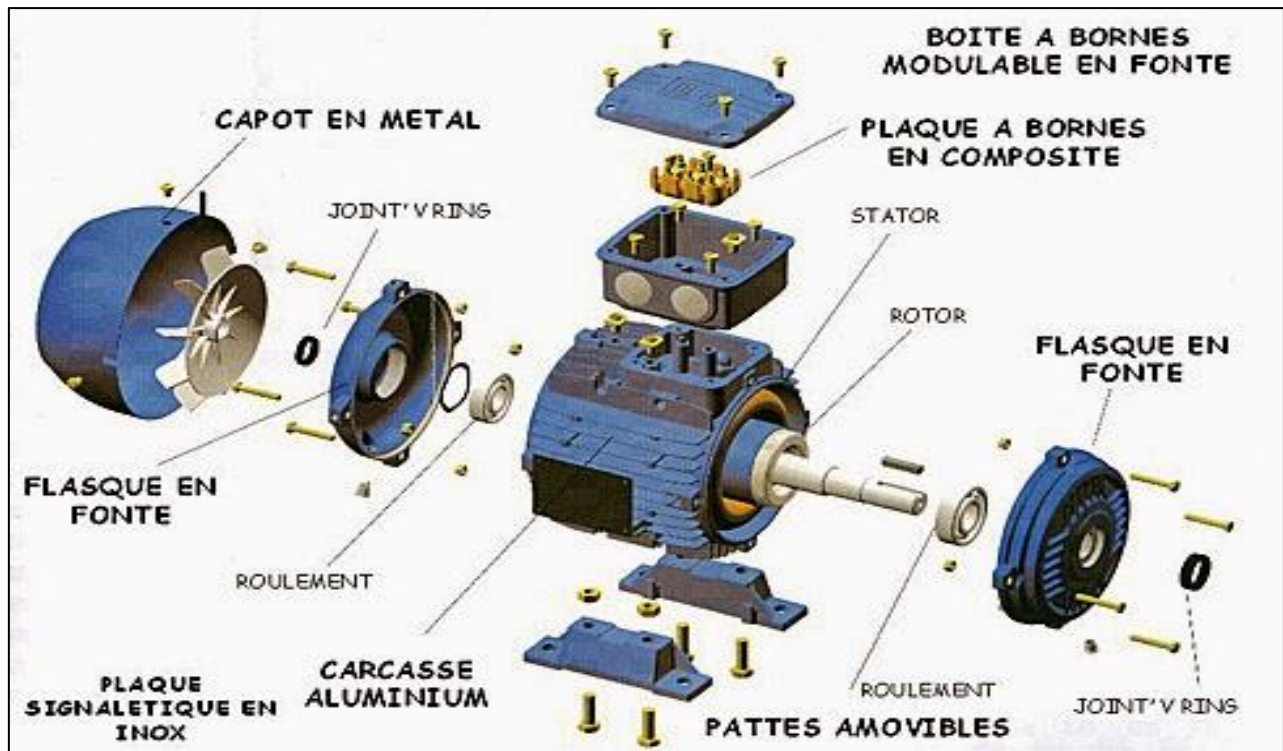


Figure I-3. Construction d'une machine électrique

Une machine à courant alternatif tournante est constituée de deux éléments principaux le stator et le rotor comportant des encoches dans lesquels sont logés les conducteurs. L'ensemble de ces conducteurs est appelé bobinage.

5-1--Le stator

C'est une structure cylindrique creuse et fixe, elle est formée à partir de tôles ferromagnétiques empilées, séparées par un isolant afin de minimiser les pertes par courant de Foucault. Le stator comporte des encoches internes dans lesquels sont logés des conducteurs. Les conducteurs sont isolés par rapport aux encoches par des isolant, généralement des feuilles de Mica. Le Mica est un minéral qui a des caractéristiques de flexibilité, d'élasticité et de résistance thermique ainsi que des propriétés d'isolation électrique et thermique.



Figure I-4. Stator d'une machine à courant alternatif avec bobinage et isolation en Mica.

5-2-Le rotor

C'est aussi une structure en tôles ferromagnétiques empilées et sa forme est cylindrique. C'est la partie mobile de la machine, et qui tourne autour d'un axe. Il comporte des parties saillantes ou des encoches dans lesquels on insère le bobinage. L'extrémité du bobinage est fixée à l'arbre qui comporte un système bague-balais pour assurer l'échange d'énergie électrique entre le rotor et l'extérieur.



Figure I-5. Rotor à pôles saillants

Le rotor et le stator sont séparés par un vide appelé entrefer qui assure le passage du champ magnétique entre eux et permet au rotor de tourner librement sans toucher le stator. Il doit être très petit (de l'ordre de 0.2-0.4 mm).

5-3- Les encoches

Il existe plusieurs formes d'encoches elles peuvent être rondes carrées ou coniques ...

Le choix d'un type d'encoches se fait selon le volume de la machine, sa puissance, son mode de fonctionnement ...etc.

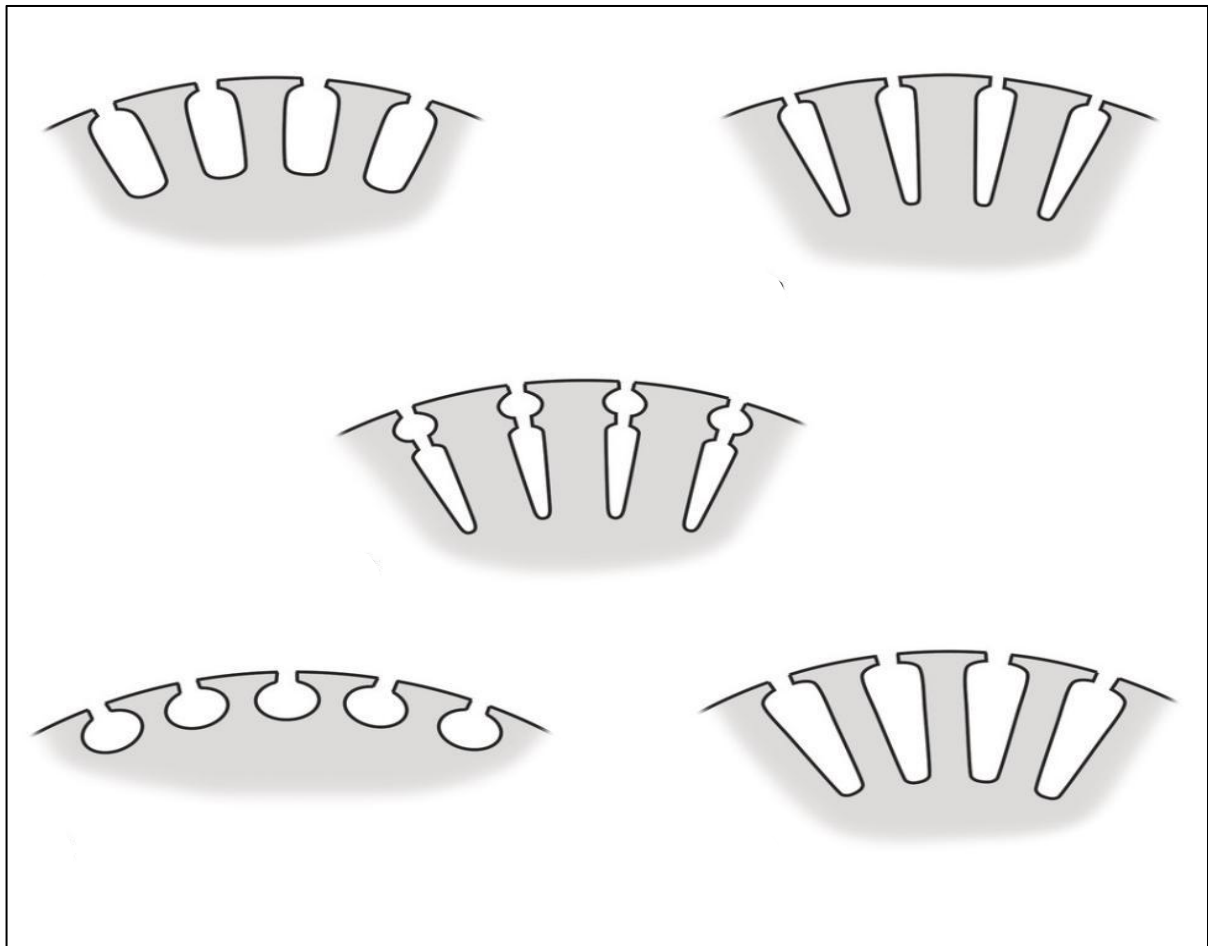


Figure I-6. Différents types d'encoches rotoriques

5-BOBINAGES DES MACHINES TOURNANTES

Afin d'assurer une bonne répartition de la masse du stator ou du rotor, et assurer une bonne répartition des champs magnétiques et des forces magnétiques, le bobinage doit être effectué d'une façon rigoureuse et selon des règles précises.

Selon la machine on distingue deux types principaux de bobinage:

6-1-Le bobinage concentrique

C'est un bobinage à bobines séparées, il est enroulé autour de l'axe du pôle et les spires n'ont pas la même largeur. Il est utilisé dans les machines à pôles saillants. Il présente un coût très réduit et une simplicité de réalisation et de maintenance.

6-2-Le bobinage distribué

On l'appelle aussi enchevêtré ou réparti. Dans ce type de bobinage, les spires ont la même dimension et sont décalées selon un modèle définis. Il peut être imbriqué, ondulé, simple ou multiple...etc. Sa réalisation par contre, est très compliquée et très coûteuse.

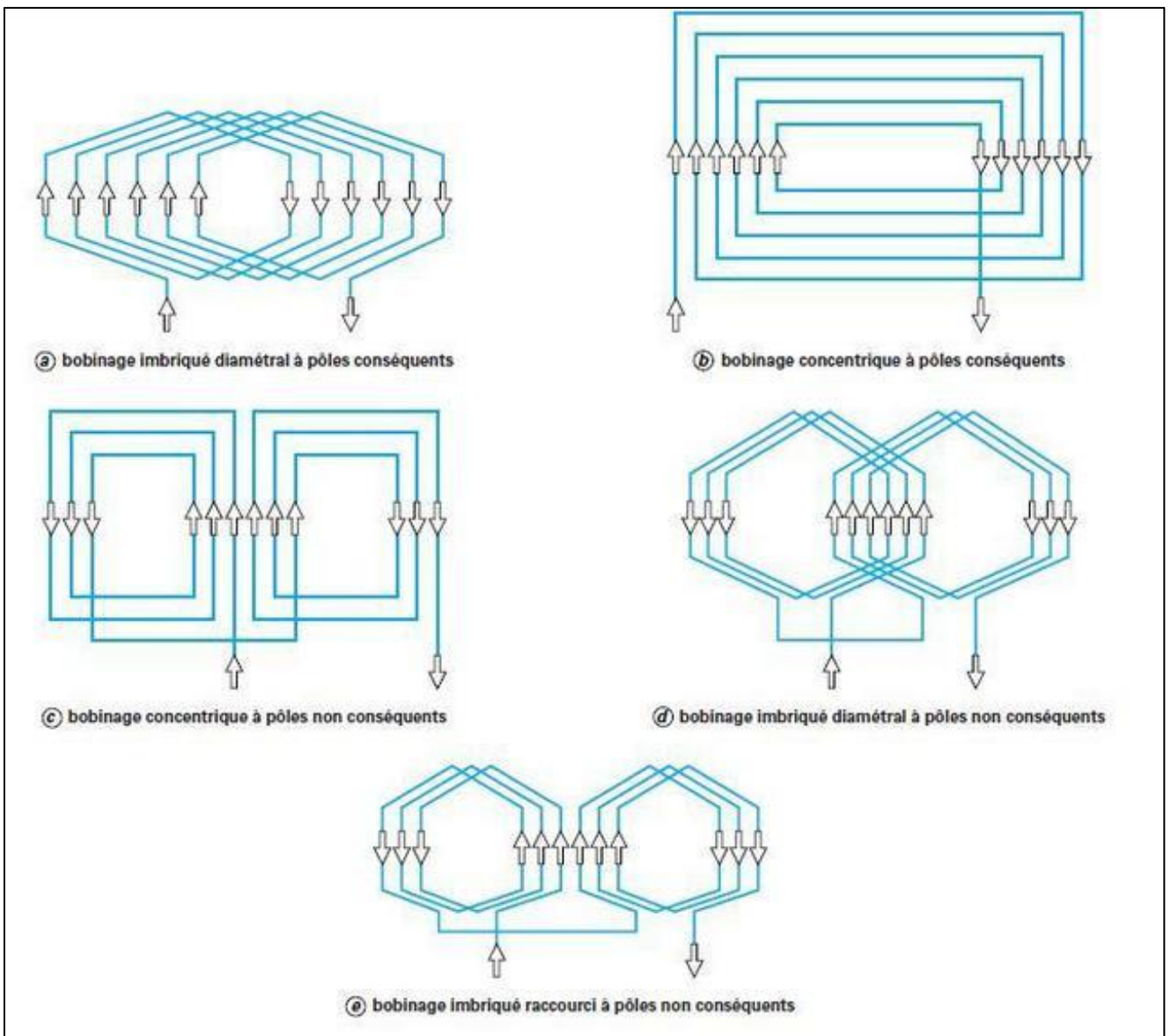


Figure I-7. Bobinages des machines tournantes.

6-2-1-Paramètres principaux d'un bobinage distribué

Le bobinage distribué peut être effectué en connaissant les paramètres suivants;

Le nombre total d'encoches noté Z

Le nombre de paires pôles noté p et le nombre de pôles noté $2p$

Le nombre de phases noté m

Le nombre de voies parallèles noté a .

Le nombre d'étages ou de couches des encoches. En général on utilise deux étages pour les machines classiques .

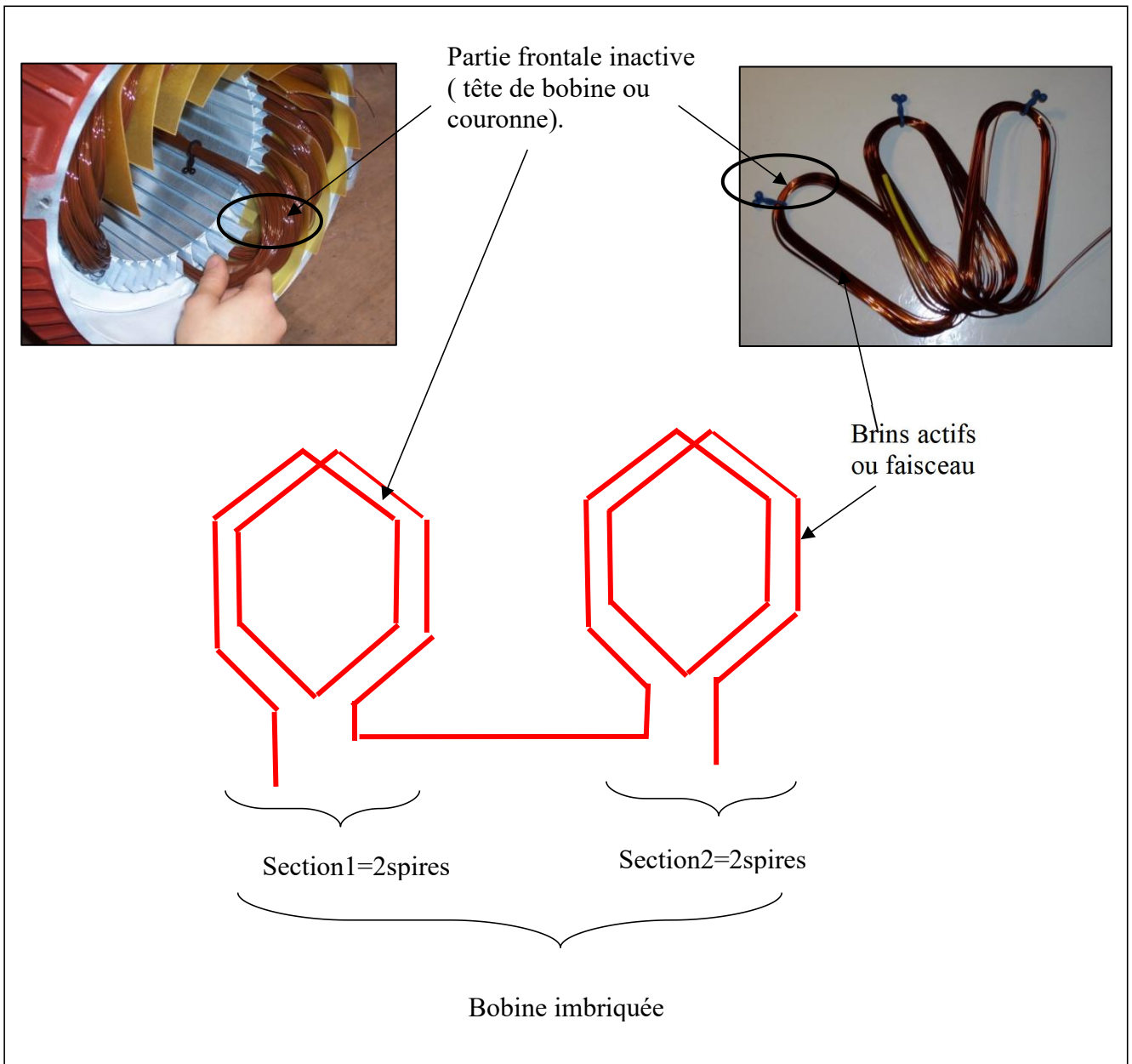


Figure I-8. Enroulement imbriqué

En ayant ces données tous les autres paramètres pourront être calculés à savoir;
(Remarque: les paramètres sont calculés en nombre d'encoches.)

Le pas polaire τ c'est le nombre d'encoches entre deux pôles successifs noté τ tel que

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad (\text{I-2})$$

Le pas d'enroulement y c'est le nombre d'encoches entre le début et la fin d'une section tel que

$$y = \tau \mp \varepsilon \quad (\text{I-3})$$

Si l'enroulement est à pas total (entier ou diamétral) alors $\varepsilon=0$ et $y=\tau$.

Si l'enroulement est à pas raccourci alors:

$$y = \tau - \varepsilon \quad (\text{I-4})$$

Dans la plupart des cas, on utilise le pas raccourci et on définit le coefficient de raccourcissement β tel que :

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (\text{I-5})$$

Le nombre de bobines par phase N_e tel que :

$$N_e = 2p \quad (\text{I-6})$$

Le nombre d'encoches par pôle et par phase noté q tel que :

$$q = \frac{Z}{2p.m} \quad (\text{I-7})$$

Le décalage entre phases noté D tel que :

$$D = \frac{Z}{p.m} \quad (\text{I-8})$$

6-2-2-Schéma d'emplacement d'un bobinage dans les encoches

Pour bien comprendre ce schéma nous allons prendre un exemple.

Soit le stator d'une machine triphasé ($m=3$) bipolaire ($2p=2$), qui comporte 18 encoches ($Z=18$) avec un facteur de raccourcissement de $7/9$ ($\beta=7/9$). Représenter le schéma d'emplacement de ce bobinage dans les encoches à deux étages et son schéma panoramique.

On calcule :

$$N_e = 2p = 2$$

$$q = \frac{Z}{2p.m} = \frac{18}{2.3} = 3$$

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{18}{2} = 9$$

$$\beta = \frac{y}{\tau} \Rightarrow y = \beta \cdot \tau = \frac{7}{9} \cdot 9 = 7$$

Les entrées des bobines sont notées A B C et les sorties X Y Z .

Pour placer la phase suivante, il faut calculer D le décalage entre phases:

$$D = \frac{Z}{p.m} = \frac{18}{3} = 6$$

La phase 1 dans l'encoche 1

La phase 2 dans l'encoche 1+6=7

La phase 3 dans l'encoche 7+6=13

Le tableau suivant montre une représentation linéarisée du périmètre interne du stator où chaque encoche est représentée par une cellule du tableau qui est numérotée. On l'appelle schéma d'emplacement.

Tableau I-2. Tableau d'emplacement des conducteurs dans les encoches

Pôle Nord (pas polaire τ=9)									Pôle Sud (pas polaire τ=9)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A ₁	A ₁	A ₁				B ₁	B ₁	B ₁	X ₂	X ₂	X ₂				Y ₁	Y ₁	Y ₁
A ₂				B ₂	B ₂	B ₂	X ₁	X ₁	X ₁				Y ₂	Y ₂	Y ₂	A ₂	A ₂

6-LOIS GÉNÉRALES DE LA CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE.

Toutes les machines électriques tournantes sont basées sur les deux principes de conversion de l'énergie électromagnétique.

7-1-La loi de Lenz-Faraday (générateur)

Un conducteur de longueur l soumis à un champ magnétique B qui se déplace à une vitesse v , induit une force électromotrice E .

$$E = B.l.v \tag{I-9}$$

La f.e.m E est une tension mesurée en Volts. De plus, le déplacement d'un courant électrique ou d'un aimant situés dans le voisinage d'un circuit fermé y développe un courant induit qui tend à s'opposer à la variation du flux inducteur.

7-2-La loi de Laplace (moteur)

Un conducteur de longueur l traversé par un courant I et soumis à un champ magnétique d'induction B engendrera une force magnétique Fe .

$$Fe = B.l.I \tag{I-10}$$

Fe est une force mécanique mesurée en Newtons.

7-3- Le champ magnétique tournant

Le fonctionnement des machines tournantes à courant alternatif, génératrices et moteurs est fondé sur le principe des champs magnétiques tournants. On appelle champ magnétique tournant tout champ dont les vecteurs représentatifs ont un mouvement de rotation autour d'un axe. On peut créer un champ tournant de plusieurs façons différentes :

- En prenant un aimant et en le faisant tourner à une vitesse constante.
- En prenant une bobine alimentée par un courant continu et en la faisant tourner à une vitesse constante.
- On peut également obtenir un champ tournant en alimentant, par un système triphasé de tensions équilibrées trois bobines disposées géométriquement à 120° l'une de l'autre (décalage dans l'espace et dans le temps de 120°).

7-3-1-Champs tournants créés par une armature bipolaire

Les trois bobinages sont identiques et décalés les uns par rapport aux autres d'un angle (mécanique) de $2\pi/3$. Les courants qui les traversent forment un système triphasé équilibré :

$$\begin{cases} i_1(t) = \hat{I}\cos(\omega t) \\ i_2(t) = \hat{I}\cos(\omega t - 2\pi/3) \\ i_3(t) = \hat{I}\cos(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (\text{I-11})$$

Chaque point du bobinage du stator est situé à l'angle $\theta_1 = \omega t$ par rapport à l'axe du bobinage 1.

Il est aussi situé à l'angle $\theta_2 = \omega t + 4\pi/3$ par rapport à l'axe du bobinage 2, et à l'angle $\theta_3 = \omega t + 2\pi/3$ par rapport à l'axe du bobinage 3.

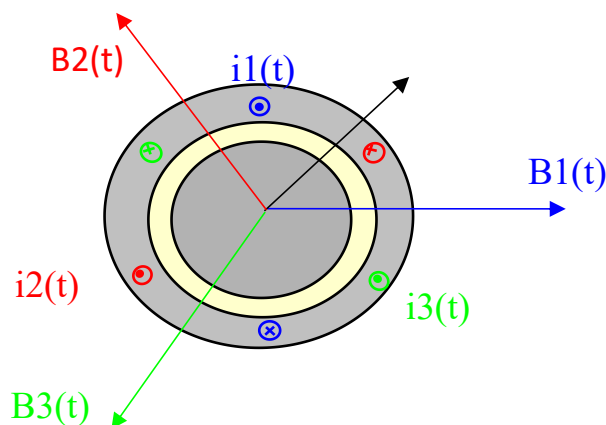


Figure I-9. Champ tournant statorique

Les trois bobinages créeront les champs respectifs $B_1(t)$, $B_2(t)$, $B_3(t)$ d'expressions:

$$B_1(\theta, t) = k i_1(t) \cos(\theta) = k \hat{I} \cos \omega t \cos(\theta)$$

$$B_2(\theta, t) = k i_2(t) \cos(\theta + 4\pi/3) = k \hat{I} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos(\theta + 4\pi/3) \quad (I-12)$$

$$B_3(\theta, t) = k i_3(t) \cos(\theta + 2\pi/3) = k \hat{I} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos(\theta + 2\pi/3)$$

Tel que k est le coefficient constant qui dépend des dimensions des conducteurs et leur nombre

Le champ résultant sera :

$$B(t) = B_1(t) + B_2(t) + B_3(t) \quad (I-13)$$

$$B(t) = k \cdot \hat{I} \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\theta) + k \cdot \hat{I} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) + k \cdot \hat{I} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (I-14)$$

$$\text{Or} \quad (\cos a)(\cos b) = \frac{1}{2} [\cos(a + b) + \cos(a - b)] \quad (I-15)$$

L'équation (I-14) devient:

$$B(t, \theta) = \frac{k \cdot \hat{I}}{2} [\cos(\omega t + \theta) + \cos(\omega t - \theta)] + \frac{k \cdot \hat{I}}{2} [\cos\left(\omega t + \theta + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \theta - \frac{6\pi}{3}\right)] + \frac{k \cdot \hat{I}}{2} [\cos\left(\omega t + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \theta - \frac{6\pi}{3}\right)] \quad (I-16)$$

Les trois termes de gauche forment un système triphasé équilibré donc leur somme est nulle. Les termes de droite sont identiques et s'additionnent. On aura alors:

$$B(t, \theta) = \frac{3}{2} k \cdot \hat{I} \cdot \cos(\omega t - \theta) \quad (I-17)$$

Cette armature crée donc un champ tournant unique tournant à la vitesse ω , dont l'axe coïncide avec l'axe du bobinage lorsque le courant qui le traverse est maximal.

CONCLUSION

Les machines électriques tournantes sont des dispositifs électromécaniques dont le fonctionnement est basé sur le champs magnétique. Un bon choix des dimensions de toutes les parties de la machine et leurs matériaux assure leur bon fonctionnement et leur efficacité. Le bobinage des machines électriques est aussi important du fait que la répartition du champs magnétique repose sur cette étape. Un bon calcul du bobinage détermine les performances des machines électriques.

CHAPITRE II

LES MACHINES SYNCHRONES

INTRODUCTION

La machine synchrone est réversible et peut fonctionner en générateur d'énergie électrique alternative, on l'appelle alors alternateur. Dans le cas où elle absorbe de l'énergie électrique et la transforme en énergie mécanique on l'appelle moteur synchrone.

La machine synchrone fonctionne généralement en alternateur et toutes les centrales de production d'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés. Par contre on trouve de moins en moins d'applications pour le moteur synchrone, sauf pour des applications spécifiques qui exigent une vitesse constante. On l'utilise surtout comme compensateur synchrone.

1-CONSTRUCTION DES MACHINES SYNCHRONES

Comme déjà cité au premier chapitre, il existe deux types de construction pour ces machines; à pôles lisses et à pôles saillants.

Remarque: la notion de pôle lisse ou saillant concerne le rotor seulement.

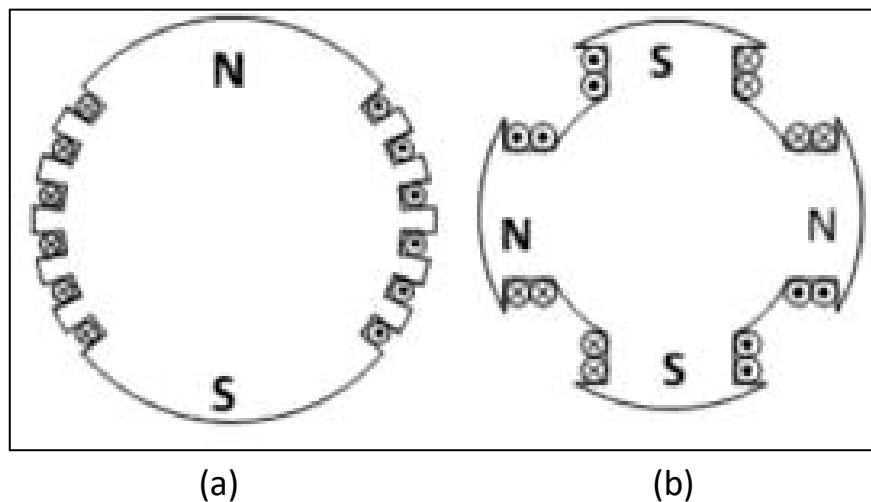


Figure II-1. Types de rotors des Machines Synchrones.

(a): 1 paire de pôles, rotor à pôles lisses.

(b): 2 paires de pôles, rotor à pôles saillants

Mais dans tous les cas le rotor est alimenté (excité) par une tension continue délivrée à travers le système bague balais. Les rotors à pôles lisses sont préconisés pour les machines à grandes vitesses, parce qu'ils présentent moins de frottement avec l'air et donc moins de bruit et de vibrations. En revanche les rotors à pôle saillants sont préférables lors de vitesses moins importantes.

2-L'ALTERNATEUR

L'alternateur est tout simplement un générateur à courant alternatif, généralement triphasé. C'est un système électromécanique qui converti l'énergie mécanique en énergie électrique en utilisant le champs magnétique. La plupart du temps, on trouve les alternateurs dans les centrales de production d'énergie électrique couplés au réseau. Mais on peut les trouver aussi dans certaines applications restreintes comme dans les voitures.

2-1 Symbole de l'alternateur

Dans les schémas électriques, on symbolise l'alternateur synchrone à rotor bobiné par le symbole suivant:

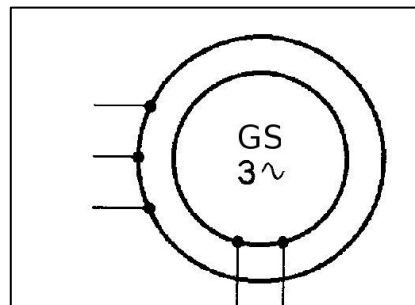


Figure II-2. Symbole de l'alternateur

2-2-Principe de fonctionnement

La machine synchrone est constituée de deux circuits électriques indépendants :

— Le circuit inducteur : il est constitué d'un bobinage placé sur le rotor et traversé par un courant continu d'excitation I_e . C'est lui qui permet la création des pôles magnétiques dits rotoriques et la création d'un flux magnétique dans la partie ferromagnétique. Ce bobinage est parfois remplacé par des aimants permanents, surtout dans le domaine des petites et moyennes puissances.

— Le circuit d'induit : il est constitué des trois bobinages triphasés, de constitution symétrique, placés sur le stator de façon répartie, et par lesquels transite la puissance électrique de la machine.

Il est à noter que si les enroulements statoriques sont fixes, l'enroulement de l'excitation est tournant. Pour une machine bipolaire, c'est-à-dire à 2 pôles au rotor. On alimente les bobines rotoriques par un courant continu, à l'aide du système bagues balais. On remarque alors la création d'un flux magnétique φ et si on fait tourner le rotor à une vitesse égale à la vitesse de synchronisme ns , alors il y aura création d'un système de forces électromotrices triphasées équilibrées E_1, E_2, E_3 au niveau des enroulements du stator selon la loi de Faraday tel que :

$$E_{1,2,3} = B \cdot l \cdot v \quad (\text{II-1})$$

2-3- Expression de la FEM induite

La f.e.m E est proportionnelle au flux magnétique, au nombre de conducteurs et à la vitesse rotorique tel que:

$$E = 2,22 \cdot K_f \cdot K_b \cdot f \cdot N \cdot \phi \quad (\text{II-2})$$

Avec :

K_f : Coefficient de forme (le champ n'est pas sinusoïdal K_f peut être >1)

K_b : Coefficient de bobinage ($K_b < 1$)

f : Fréquence en hertz (Hz)

N : Nombre de conducteurs

Φ : Flux sous un pôle (weber)

Si on considère que K est une constante égale à $2,22 \cdot K_f \cdot K_b$: coefficient de Kapp de la machine synchrone (1,6 à 2,9). on aura:

$$E = k \cdot f \cdot N \cdot \phi \quad (\text{II-3})$$

3-ESSAIS DE L'ALTERNATEUR AUTONOME

En général l'alternateur fonctionne branché sur un réseau électrique, mais pour les essais on préfère les faire lorsque l'alternateur est découplé du réseau. C'est ce qu'on appelle un alternateur autonome.

Un alternateur peut être considéré comme un système ayant des entrées et des sorties variables. L'étude doit se faire comme en mathématique, en étudiant deux paramètres et en fixant les paramètres restants.

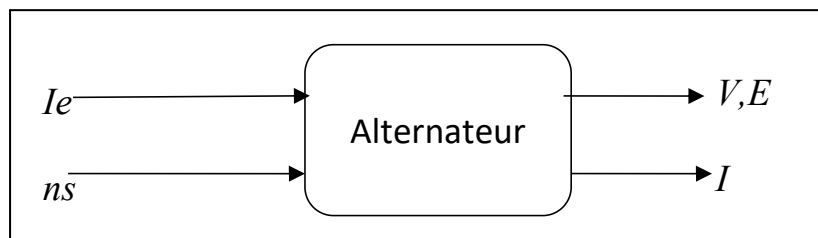


Figure II-3. Schéma bloc d'un alternateur.

Les paramètres d'entrée sont le courant d'excitation I_e et la vitesse de rotation ns , et les grandeurs de sortie sont la tension aux bornes (E à vide et V en charge) et le courant de charge I .

Comme pour toutes les machines électriques il est indispensable de faire des essais sur l'alternateur afin de balayer toutes les charges possibles.

L'essai à vide $I=0$. (sans charge)

L'essai en charge $I = I_{\text{nominal}}$ (charge nominale)

L'essai en court circuit $I = I_{\text{cc}}$ (charge élevée).

3-1-Essai à vide

Dans cet essai, la vitesse n_s est constante et est égale à la vitesse de synchronisme. Le courant de charge est nul, on aura donc comme variables I_e et E .

La caractéristique à vide sera alors: $E=f(I_e)$. On l'appelle aussi caractéristique interne.

3-1-1-Schéma expérimental

Le schéma expérimental de cet essai se présente comme sur la figure II-4

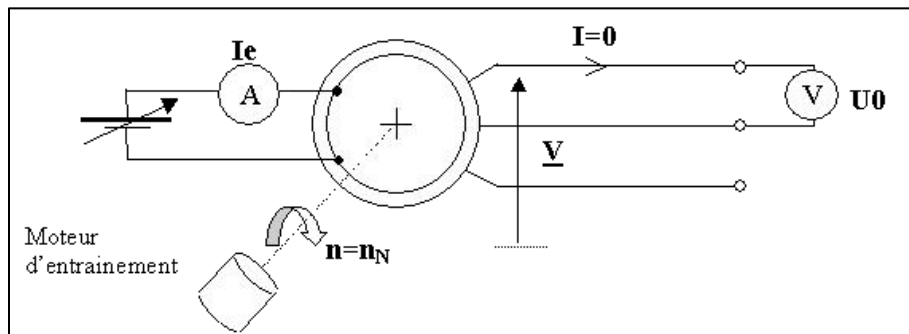


Figure II-4. Essai à vide de l'alternateur

3-1-2-Caractéristique à vide

Nous faisons varier le courant d'excitation I_e , et nous relevons les valeurs de E , la tension à vide aux bornes d'une phase. Nous obtiendrons la caractéristique à vide suivante:

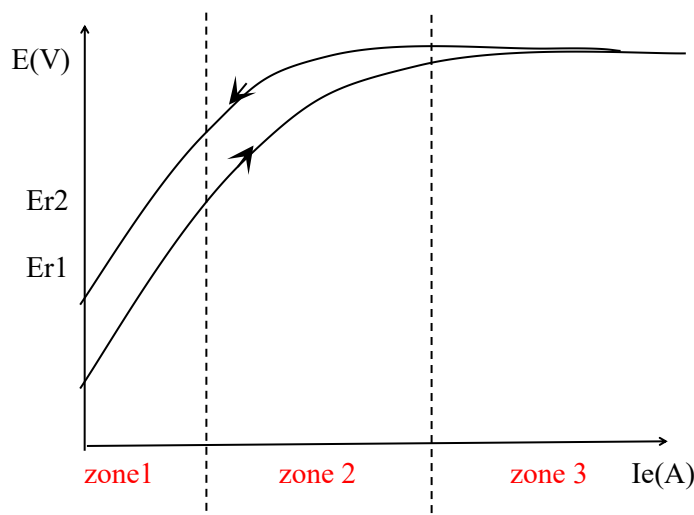


Figure II-5. Caractéristique interne de l'alternateur

La courbe est identique à la courbe d'aimantation du circuit magnétique. Elle commence par une petite tension non nulle E_{r1} qui est induite par le flux rémanent emmagasiné par le circuit magnétique précédemment. Et c'est ce même phénomène qui engendre le décalage de la courbe vers le haut lors de la diminution du courant d'excitation. Dans ce cas la tension sera E_{r2} pour un courant d'excitation nul. La courbe est divisée en trois zones:

La zone1 est la zone linéaire où l'alternateur n'est pas saturé, la fem est proportionnelle au courant d'excitation.

La zone2 est appelée la zone utile de fonctionnement, elle se situe au voisinage du coude.

La zone3 est la zone de saturation où la fem devient constante quel que soit le courant d'excitation qu'on lui injecte.

On préfère faire fonctionner l'alternateur dans la zone 2 parce que la tension est assez élevée et les pertes fer sont réduites.

3-2-Essai en charge

Dans ce cas et comme son nom l'indique, l'essai concerne les paramètres de la charge à savoir; La tension U (composée) ou V (simple) en fonction du courant de charge I . En gardant bien sûr la vitesse constante et le courant d'excitation à sa valeur nominale.

3-2-1-Schéma expérimental

Le schéma expérimental pour un essai en charge est montré sur la figure II-6

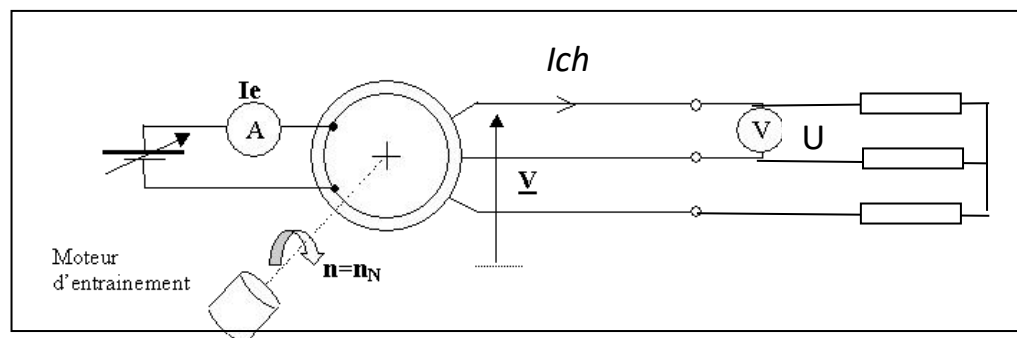


Figure II-6. Essai en charge de l'alternateur

Le stator dont les enroulements sont maintenant traversés par des courants triphasés, crée un champ magnétique tournant à la fréquence de synchronisme n_s .

Si le circuit magnétique n'est pas saturé, ce champ s'ajoute à chaque instant à celui du rotor qui tourne à la même vitesse. Il en résulte une modification de la valeur du champ total et donc de celle du flux. C'est le phénomène de la réaction magnétique d'induit.

On fait varier la charge et par conséquent I et on relève la tension correspondante. On obtient la caractéristique $V=f(I)$.

Cet essai permet de déterminer les limites de l'alternateur c'est-à-dire jusqu'à quelle charge il peut fonctionner normalement sans décrocher (perdre son synchronisme). Le but final est de déterminer la chute de tension absolue ou relative ΔV .

$$\Delta V\% = \frac{E_v - V}{E_v} \cdot 100 \quad (\text{II-4})$$

On l'appelle aussi la régulation.

3-2-2- Caractéristique en charge

Appelée aussi caractéristique externe, elle représente $V=f(I_{ch})$.

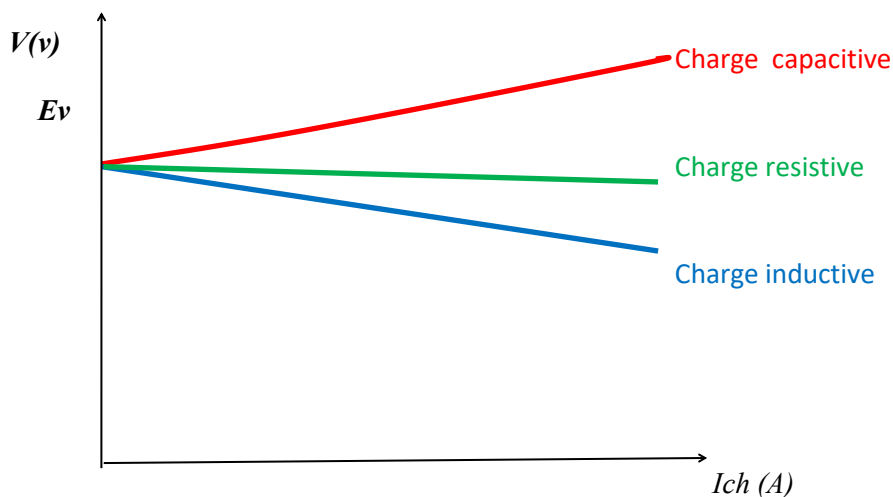


Figure II-7. Caractéristique en charge de l'alternateur

Pour une charge résistive ($\varphi=0$), Nous remarquons que la chute de tension augmente avec la croissance du courant de charge. Cette chute est la somme d'une chute résistive due à la résistance interne du bobinage statorique et une chute inductive de la réactance synchrone due à la réaction magnétique d'induit.

Pour une charge inductive ($\cos\varphi$ en arrière), la réaction d'induit est longitudinale démagnétisante (en opposition avec le flux inducteur). Le flux résultant sera donc plus faible diminuant automatiquement la valeur de la tension aux bornes de la machine.

Pour une charge capacitive ($\cos\varphi$ en avance), la réaction d'induit est longitudinale magnétisante (de même sens que le flux inducteur). Le flux rotorique résultant sera donc plus important en augmentant automatiquement la valeur de la tension aux bornes de l'alternateur.

3-2-3- Caractéristiques de réglage

L'essai en charge provoque une réaction magnétique d'induit qui fait varier le courant d'excitation censé être constant. C'est pour cela qu'il s'est avéré nécessaire de relever une autre caractéristique pour régler ce courant d'excitation en fonction du courant de charge $I_{ch}=f(I_e)$.

Cette caractéristique est obtenue en gardant la tension délivrée constante et bien sur à vitesse constante. Le schéma expérimental restera le même. La figure (II-8) illustre cette caractéristique.

Le facteur de puissance a une influence sur l'allure de la courbe. Pour une charge inductive, la valeur du courant augmente, et au contraire pour une charge capacitive elle diminue. Pour une charge résistive elle reste quasiment constante, sauf pour les valeurs plus importantes du courant excitation où elle augmente légèrement.

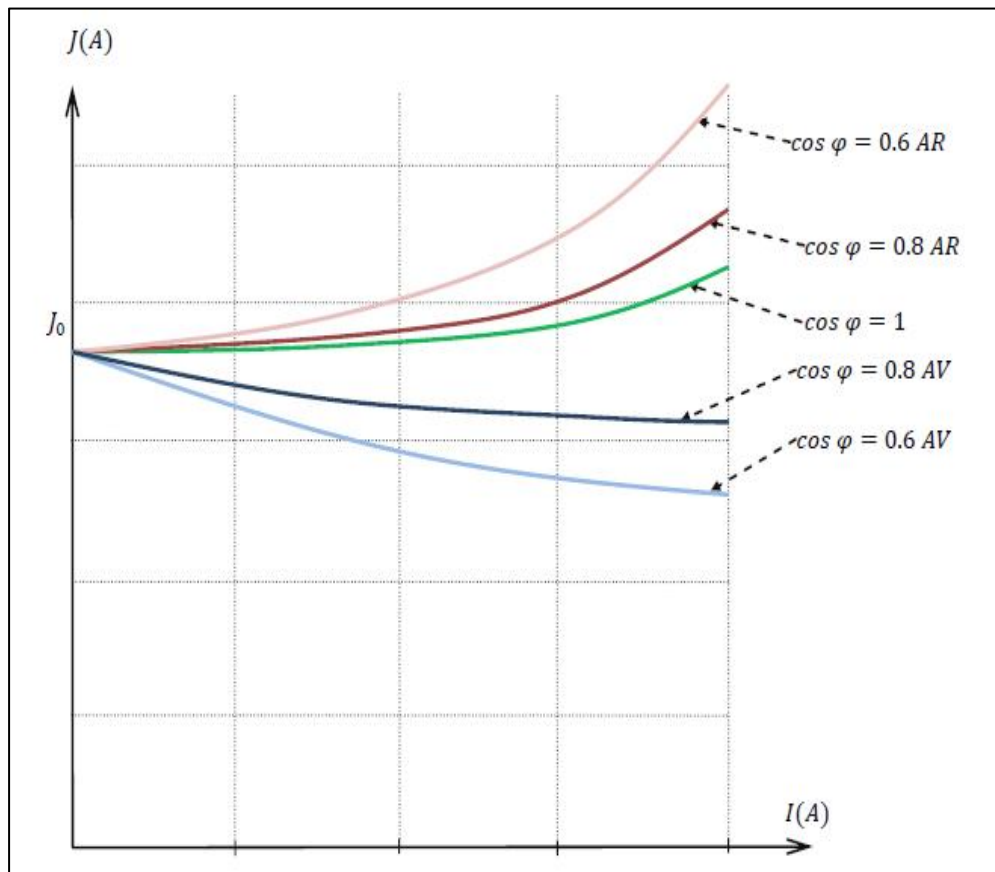


Figure II-8. Caractéristique de réglage

3-3-Essai en Court-Circuit

Dans cet essai, le rotor sera court-circuité et on relève la caractéristique $I_{cc}=f(I_e)$ en gardant la vitesse constante et la tension V nulle (court circuit).

3-3-1-Schéma expérimental

Le schéma expérimental de cet essai se présente comme sur la figure II-9.

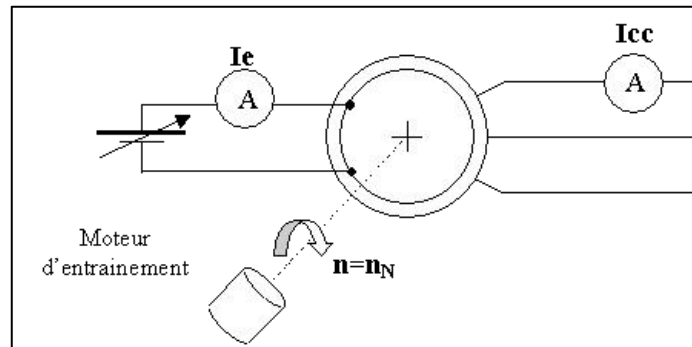


Figure II-9: Essai en court circuit

3-3-2-Caractéristique en court circuit

Cette caractéristique représente une droite qui passe par l'origine et montre une proportionnalité entre le courant de court circuit par phase J_{cc} et le courant d'excitation I_e .

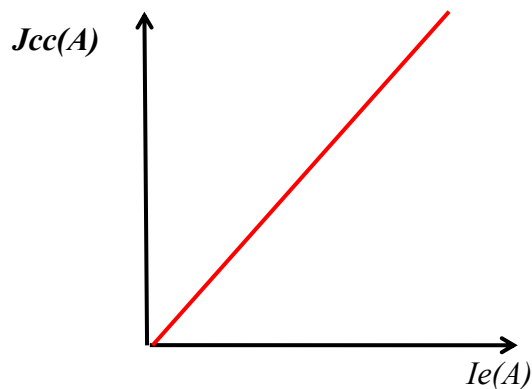


Figure II-10. Caractéristique en court circuit

4-MODÉLISATION DE L'ALTERNATEUR

La modélisation d'un alternateur triphasé est compliquée. Elle doit être effectuée sur une phase pour simplifier les calculs. Dans tout ce qui suit, nous raisonnerons sur une phase de la machine. On utilise des grandeurs vectorielles parce qu'on est en courant alternatif.

4-1-Le modèle de Behn-Eschenburg.

Dans ce cas, on considère que la machine est à pôles lisses et non saturée. On l'appelle aussi modèle synchrone. Le bobinage de la phase A est équivalent à une source de tension représentant la f.e.m à vide de l'alternateur, une résistance et une inductance. La figure II-11 montre le schéma électrique équivalent de Behn- Eschenburg.

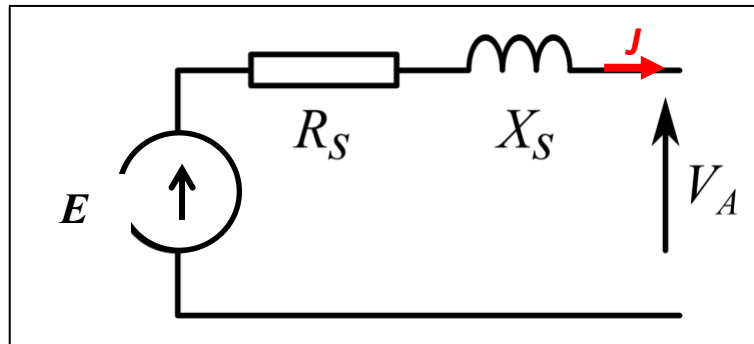


Figure II-11. Modèle synchrone de l'alternateur

En appliquant la loi des mailles, on obtient :

$$\vec{E} = R_s \vec{J} + X_s \vec{J} + \vec{V}_A \quad (\text{II-5})$$

R_s est la résistance d'enroulement d'une phase, elle est déterminée par la méthode Volt-Ampèremétrique (en courant continu).

X_s est appelée réactance synchrone et elle est considérée comme constante tant que la machine n'est pas saturée.

$$\vec{Z}_s = \vec{R}_s + \vec{X}_s \quad (\text{II-6})$$

Avec Z_s est l'impédance synchrone qui sera déterminée expérimentalement.

$$|Z_s| = \sqrt{X_s^2 + R_s^2} \quad (\text{II-7})$$

A partir du modèle de Behn-Eschenburg, il est possible de prédéterminer la fem E et le courant d'excitation pour un point de fonctionnement donné.

4-1-1-Détermination expérimentale des paramètres synchrones

La détermination expérimentale des paramètres du schéma équivalent synchrone de Behn- Eschenburg nécessite trois essais, à savoir:

- La méthode volt-ampérométrique pour la détermination de R_s .
- L'essai à vide pour avoir la caractéristique interne $E=f(I_e)$.
- L'essai en court circuit pour avoir la caractéristique $I_{cc}=f(I_e)$.

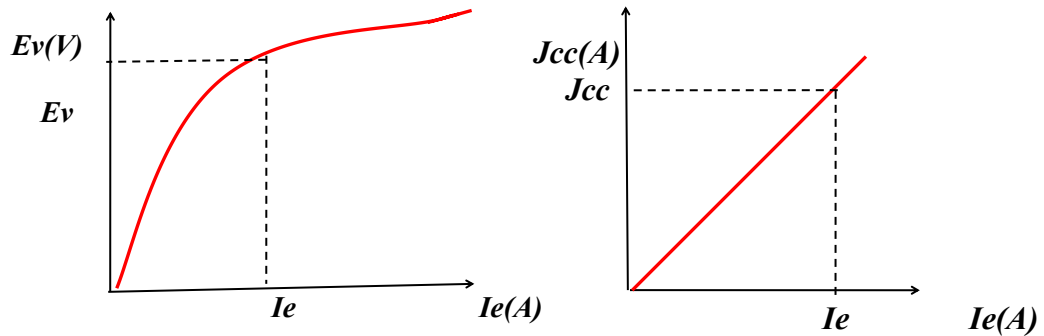


Figure II-12. Détermination de l'impédance synchrone

Pour un courant d'excitation donné, généralement nominal, le module de l'impédance synchrone est donné par la relation :

$$Z_s = \frac{E_v}{J_{cc}} \Big|_{I_e=const} \quad (II-8)$$

Dans la plupart des cas la résistance de l'enroulement statorique R_s est très petite devant X_s et on peut la négliger. On aura alors :

$$X_s = \frac{E_v}{J_{cc}} \Big|_{I_e=const} \quad (II-9)$$

4-1-2-Détermination de la f.e.m selon la charge.

La charge influe directement sur le flux principal (réaction magnétique d'induit) et par conséquent le courant d'excitation réel de la machine. La f.e.m induite aux bornes de l'alternateur se trouve donc affectée. La chute tension est alors variable selon la charge et le type de charge.

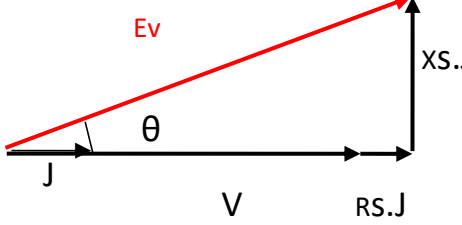
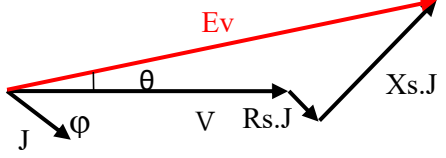
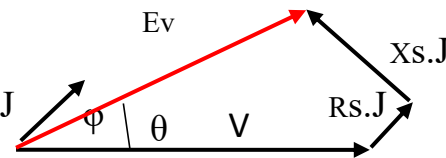
Pour une charge résistive la tension à vide est légèrement supérieure à la tension en charge.

Pour une charge capacitive le champs magnétique de réaction magnétique d'induit est magnétisant , ce qui augmente la valeur de la tension de charge.

Pour une charge inductive, le champs de réaction magnétique d'induit est démagnétisant , causant une diminution de la tension.

Le tableau suivant (II-1), nous montre comment calculer la f.e.m selon la charge graphiquement par un calcul vectoriel.

Tableau II-1. Calcul de la f.e.m induite de l'alternateur selon la charge.

<p>Charge resistive ($\varphi=0$)</p>		$E_v = \sqrt{(V + R_s J)^2 + (X_s J)^2}$
<p>Charge inductive $\cos\varphi$ AR</p>		$E_v = \sqrt{(V \cos\varphi + R_s J)^2 + (V \sin\varphi + X_s J)^2}$
<p>Charge capacitive $\cos\varphi$ AV</p>		$E_v = \sqrt{(V \cos\varphi + R_s J)^2 + (V \sin\varphi - X_s J)^2}$

On peut ainsi facilement déterminer la chute de tension et l'angle de charge entre la fem et la tension. Dans le cas de l'alternateur, la f.e.m est toujours en avance par rapport à la tension de la charge.

4-2-Le modèle de POTIER

Le modèle de Behn-Eschenburg est très intéressant par sa simplicité. Cependant, il peut conduire à des erreurs importantes et il n'est valable que lorsque la machine n'est pas saturée. On lui préfère alors le modèle de Potier.

Ce modèle est caractérisé par deux paramètres le coefficient d'équivalence α et la réactance de fuite λ . Le schéma électrique équivalent est le même que celui de Behn-Eschenburg mais cette fois la réactance synchrone n'est plus constante mais variable à cause de la non linéarité du circuit magnétique on l'appelle alors réactance de fuite λ_s .

Les équations sont :

$$\begin{cases} \vec{I}_r = \vec{I}_{ex} - \alpha \vec{J} \\ \vec{E}_v = \vec{V} + R_s \vec{J} + \lambda_s \vec{J} \end{cases} \quad (II-10)$$

(avec I_{ex} en quadrature avance sur E_v - déphasage 90°)

Le calcul de la f.e.m E dans ce cas va se faire graphiquement aussi par la représentation vectorielle.

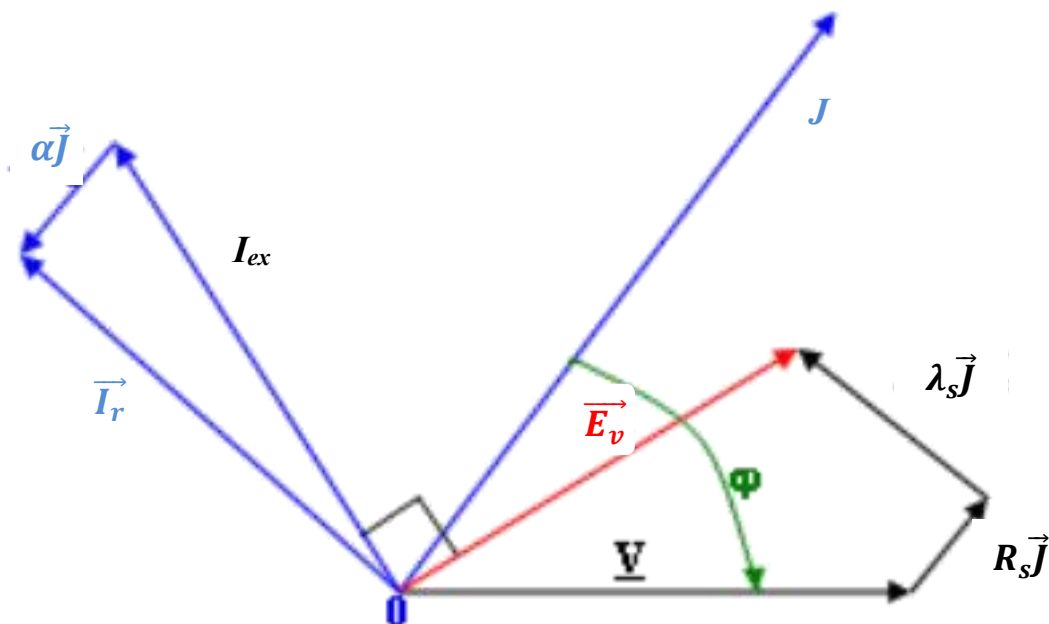


Figure II-13. Diagramme vectoriel de POTIER

4-2-1-Détermination expérimentale des paramètres de Potier.

Pour déterminer les éléments du modèle de Potier, on a besoin de 3 mesures :

- La caractéristique interne E en fonction de I_e .
- Un point de mesure (appelé P sur la construction page ci après) lors d'un essai sur charge purement inductive (essai déwatté selfique).
- Une mesure en court circuit, pour le même courant d'excitation et le même courant en sortie de la machine, que lors de l'essai déwatté selfique.
- On part de la caractéristique $E = f(I_e)$.
- On la prolonge jusqu'à $E = 0V$. On coupe alors l'axe des abscisses au point N_0 .

- On place les points P (essai déwatté selfique) et P₀ (essai en court circuit avec les mêmes courants que l'essai précédent).
- Les mesures effectués ont donné les coordonnées de P et P₀. Le courant en sortie de la machine étant de J.
- On cherche ensuite à placer le point N, qui est obtenu à partir du point P, par une translation d'une distance équivalente à P₀N₀.
- L'étape suivante consiste à tracer la droite D, parallèle à la partie linéaire de la caractéristique interne, passant par le point N. L'intersection de cette droite et de la caractéristique donne le point M.
- On peut alors lire les valeurs de λ., J et α.J tel qu'indiqué sur la construction suivante.

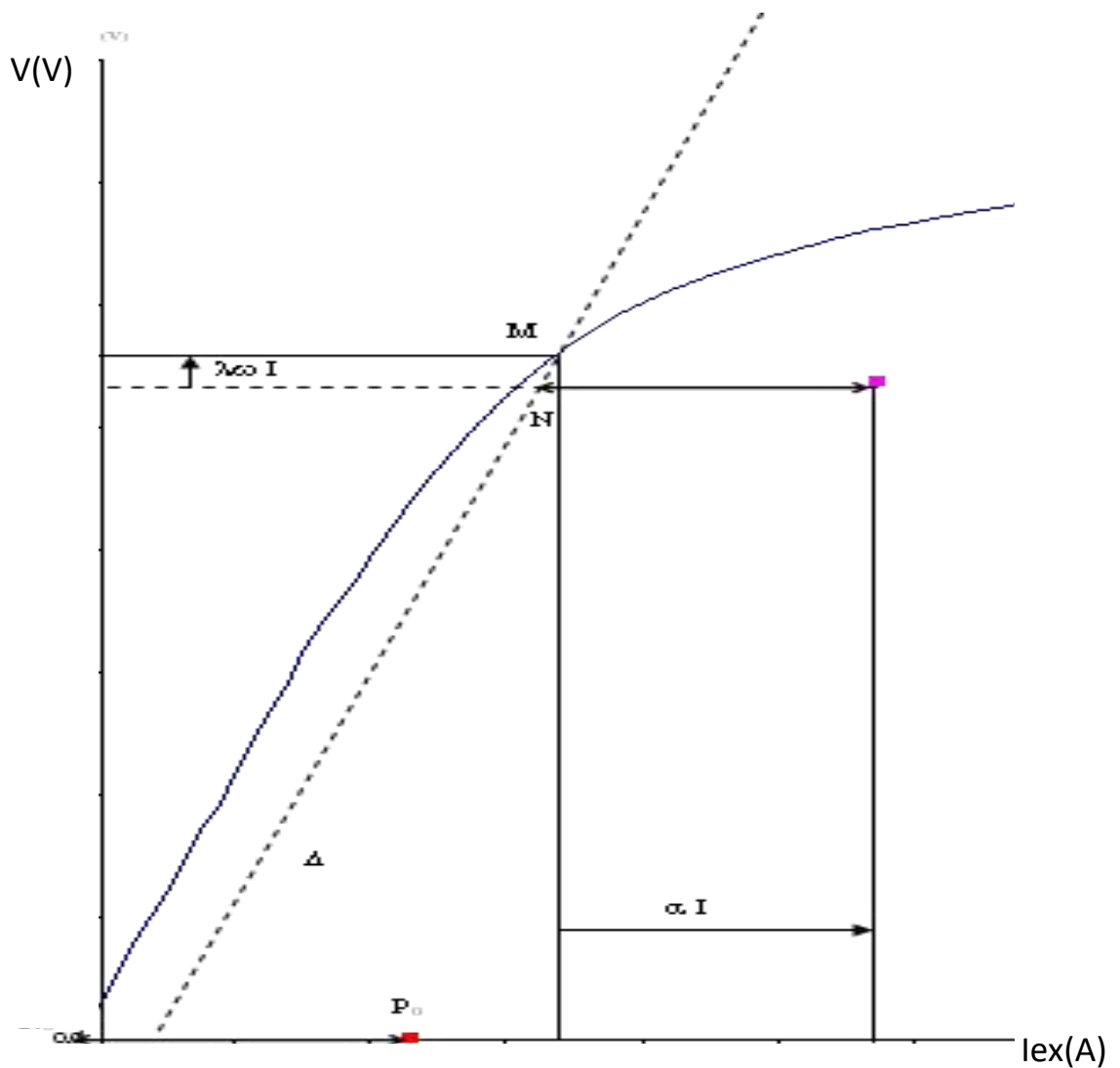


Figure II-14. Détermination des paramètres de POTIER

5-BILAN DES PERTES

Les puissances absorbée, utile ainsi que les différentes pertes de l’alternateur sont montrées sur le diagramme suivant:

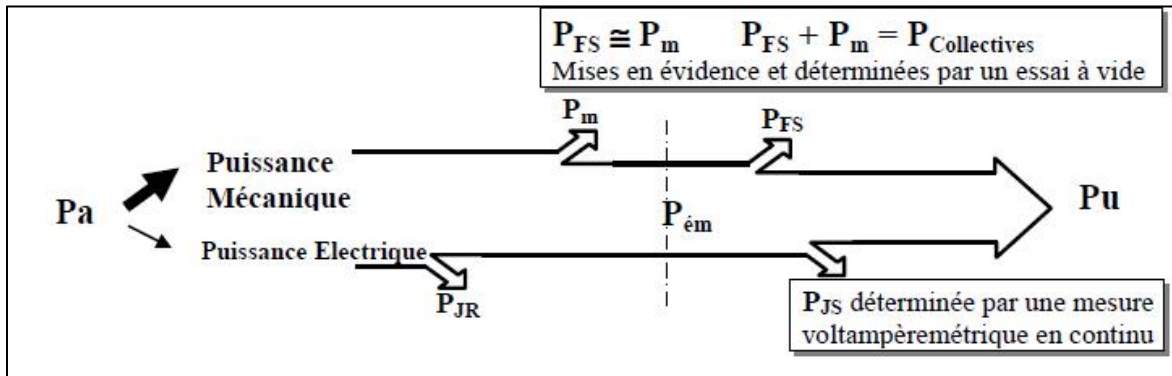


Figure II-15. Bilan des puissances de l’alternateur

- La puissance absorbée :

L'alternateur reçoit une puissance mécanique P_m qui lui est fournie par le système d'entraînement et une puissance électrique d'excitation. Cette dernière est généralement négligeable

$$P_m = C \cdot \omega \tag{II-11}$$

- Les pertes collectives :

Ce sont des pertes mécaniques (P_m), qui dépendent de la fréquence de rotation et les pertes dans le fer (P_f), qui dépendent de la fréquence et de la valeur maximale du flux. Ces pertes seront mesurées au cours d'un essai à vide dans lequel la machine tourne à la vitesse synchrone, sous une tension nominale. Elles ont une valeur constante.

- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :

- Ue : Tension aux bornes de l'inducteur.
- Ie: Intensité du courant d'excitation.

$$\Delta P_{je} = U_e \cdot I_e \tag{II-12}$$

- Les pertes par effet Joule dans l'induit :

- En monophasé :

- R_s : Résistance de l'enroulement induit.

I : Intensité efficace du courant débité par l'induit.

$$\Delta P_j = R_s \cdot I^2 \quad (\text{II-13})$$

- En triphasé :

Rb : Résistance mesurée entre deux bornes de phase de la machine.

I : Intensité efficace du courant de ligne.

$$\Delta P_j = \frac{3}{2} R_b \cdot I^2 \quad (\text{II-14})$$

- **Rendement :**

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{UI\sqrt{3}\cos\varphi + P_m + P_{je} + P_j} \quad (\text{II-15})$$

6- LIMITES DE FONCTIONNEMENT D'UN ALTERNATEUR

La puissance d'un alternateur est limitée par la puissance du moteur d'entraînement. Les courants dans le rotor (courant d'excitation) et dans le stator ne doivent jamais dépasser la valeur nominale indiquées par le constructeur, sinon il y aura un risque de destruction des enroulements par échauffement. En conclusion, lors du fonctionnement de l'alternateur il faudrait veiller à ne pas dépasser les valeurs limites des courants du stator et du rotor. Autrement dit, le constructeur donne la puissance apparente nominale $S_n = \sqrt{P^2 + Q^2}$ car un alternateur produit en même temps des puissances réactive et active en fonction des besoins de la charge à alimenter. Produire trop de puissance réactive revient à surexciter l'alternateur, ce qui risque de détériorer le bobinage du rotor. Produire trop de puissance active revient à augmenter le courant dans le bobinage du stator et risque de le détériorer également. En conclusion, la puissance d'un alternateur est limitée par :

- La puissance du moteur d'entraînement,
- Le courant maximal pouvant circuler dans le stator sans risque d'échauffement exagéré.
- Le courant maximal pouvant circuler dans le rotor sans risque d'échauffement exagéré.
- L'angle électrique θ entre V et E ; au delà de $\pi/2$, l'alternateur devient instable et décroche.

7- COUPLAGE DES ALTERNATEURS SUR LE RÉSEAU

La plupart des alternateurs fournissent de l'énergie électrique à un réseau avec d'autres alternateurs. Cette mise en parallèle nécessite quelques conditions:

- La fréquence de la tension produite par l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
- La f.é.m. de l'alternateur doit être égale à la tension du réseau.
- L'ordre des phases de l'alternateur et du réseau doit être le même.

8- LE MOTEUR SYNCHRONE

Comme déjà cité précédemment, la machine synchrone est réversible. Elle peut fonctionner en moteur si on lui délivre de l'énergie électrique au niveau du stator.

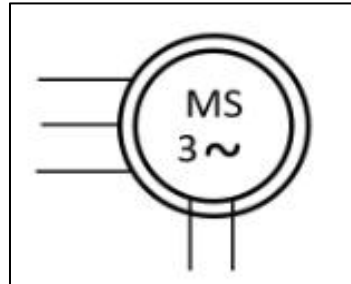


Figure II-16. Symbole du moteur synchrone

8-1-Principe de fonctionnement

Pour simplifier les choses on prend comme exemple une machine bipolaire.

L'induit (stator) comporte trois phases dont les axes sont décalés géométriquement de 120° mécaniques. En plus, si on alimente ces trois phases par un système de courants triphasés équilibrés (déphasage de 120° électriques), il se produit un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme comme démontré au chapitre I. L'inducteur alimenté en courant continu produira à son tour un champ magnétique rotorique qui tend à suivre le champ statorique tournant ce qui fera tourner le rotor à la même vitesse.

8-2-Modele équivalent du moteur synchrone

Le modèle de Behn-Eschenburg reste valable pour le moteur à une différence près; le courant change de signe puisque le moteur va absorber du courant et la f.e.m devient une f.c.e.m (force contre-électromotrice) qui s'oppose au courant qui lui a donné naissance.

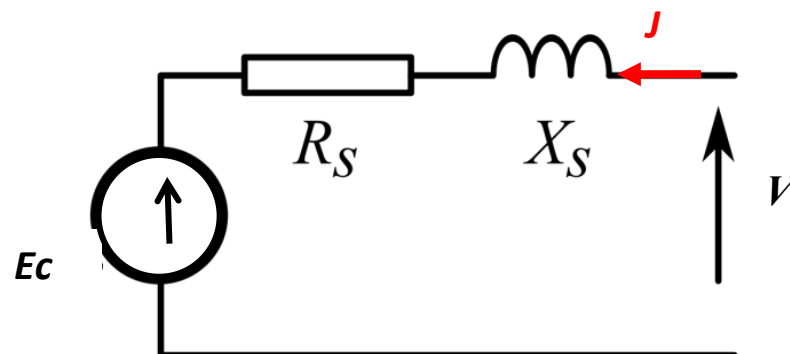


Figure II-17. Schéma équivalent du Moteur synchrone

En appliquant la loi des mailles on obtient :

$$\vec{V} = R_s \vec{J} + jX_s \vec{J} + \vec{E}_c \tag{II-16}$$

8-2-1-Détermination de la FCEM du moteur

Le moteur absorbe de énergie électrique et se comporte comme une charge électrique dont le facteur de puissance varie en fonction du courant d'excitation. Il peut se comporter comme une inductance , comme une résistance et comme un condensateur. Le tableau suivant donne les diagramme vectoriel pour le calcul de la force contre électromotrice pour chaque cas.

Tableau II-2. Calcul de la f.c.e.m induite du moteur selon la charge.

<p>Comportement résistif ($\varphi=0$)</p>		$E_v = \sqrt{(V - R_s J)^2 + (X_s J)^2}$
<p>Comportement inductif $\cos\varphi$ AR</p>		$E_v = \sqrt{(V \cos\varphi - R_s J)^2 + (V \sin\varphi - X_s J)^2}$
<p>Comportement capacitif $\cos\varphi$ AV</p>		$E_v = \sqrt{(V \cos\varphi - R_s J)^2 + (V \sin\varphi + X_s J)^2}$

8-3-Démarrage des moteurs synchrones

Étant donné que le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant, ce moteur ne peut pas être démarré directement sur le réseau, il faut le faire en respectant les conditions suivantes :

1. Amener l'inducteur à tourner au synchronisme.

Cette étape peut se faire en démarrant le moteur en asynchrone, c'est à dire en court-circuitant le bobinage inducteur sur lui même (sans excitation), lorsque le moteur démarre et atteint presque la vitesse de synchronisme on l'alimente avec une tension continue, à ce moment là le rotor a presque la même vitesse que le champs tournant, et le champs rotorique s'accroche au champs tournant. Certaines machines comportent une cage rotorique qui permet ce démarrage.

2. Régler la f. c. é. m. du moteur à peu près à la valeur de la tension du réseau.

3. S'assurer que la tension du réseau et celle de la machine sont en concordance de phase.

8-4-Essais sur le moteur synchrone

8-4-1-Essai a vide

On démarre le moteur à vide et on mesure la puissance, le facteur de puissance et le courant en fonction du courant d'excitation.

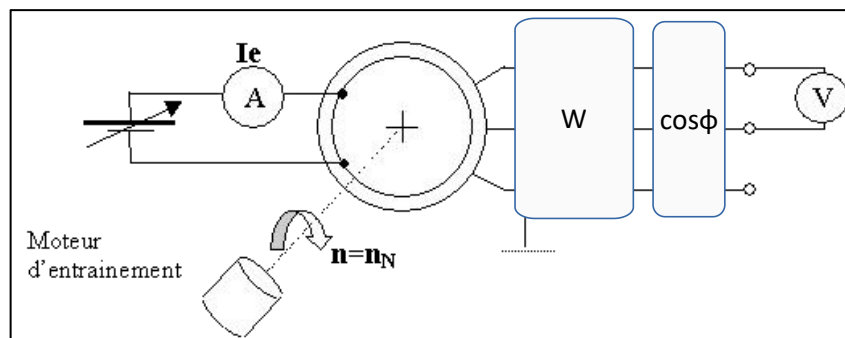


Figure II-18. Essai à vide du moteur

Si le courant est nul dans les enroulements du rotor, la totalité du champ magnétique est produite par le stator. De ce fait, le stator laisse un faible facteur de puissance (F.P.) en arrière. Le moteur se comporte alors comme un moteur asynchrone. A mesure que le courant d'excitation du rotor augmente, il contribue à la production du champ magnétique, ce qui provoque une augmentation du facteur de puissance. Dès l'instant où le rotor produit le champ magnétique nécessaire pour éliminer les effets de la tension induite dans le stator, le facteur de puissance devient unitaire et les courants de ligne atteignent leur valeur minimale.

Si l'on augmente encore le courant d'excitation, le moteur joue le rôle d'un condensateur et le facteur de puissance devient en avance. Le moteur se comporte comme une charge électrique dont le facteur de puissance est réglable par le courant d'excitation.

La possibilité de faire varier le courant d'alimentation des moteurs synchrones permet de les utiliser pour augmenter le facteur de puissance. Lorsqu'ils sont destinés à cet usage, on leur donne le nom de compensateurs synchrones.

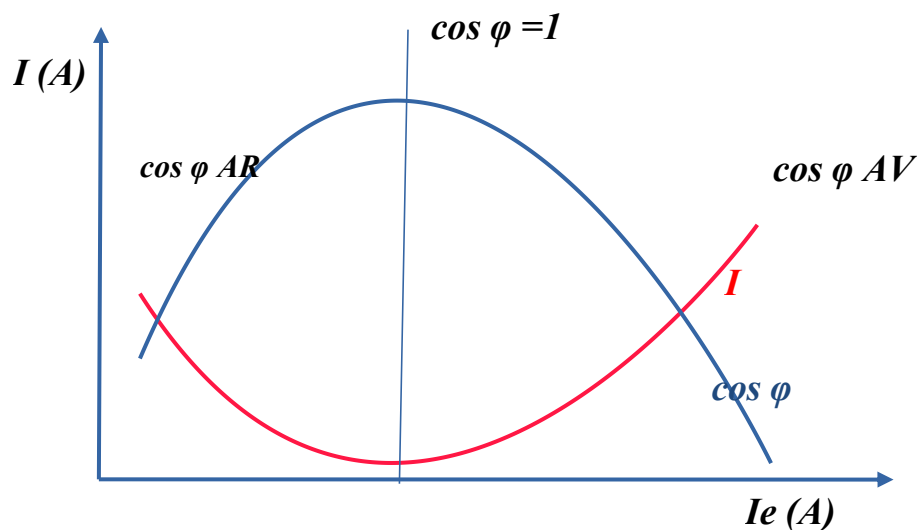


Figure II-19. Caractéristique à vide du moteur

8-4-2-Essai en charge

Le montage sera le même que le précédant en ajoutant une charge mécanique réglable, généralement un générateur qui alimentent une charge électrique variable.

La figure (II-20) illustre les courbes produites par le courant d'un moteur synchrone pour différentes valeurs de charge en fonction du courant d'excitation. C'est des courbes en forme de V qu'on appelle communément courbes de MORDEY, à différentes puissances tel que $P_0 < P_1 < P_2$.

On remarque que le minimum de puissance, pour chaque cas correspond à la valeur de facteur de puissance unitaire. Les courbes sont décalées vers la droite à mesure que la puissance augmente.

Cela veut dire que pour avoir un comportement résistif pour deux charges différentes, tel que $P_2 > P_1$, il faut augmenter le courant d'excitation.

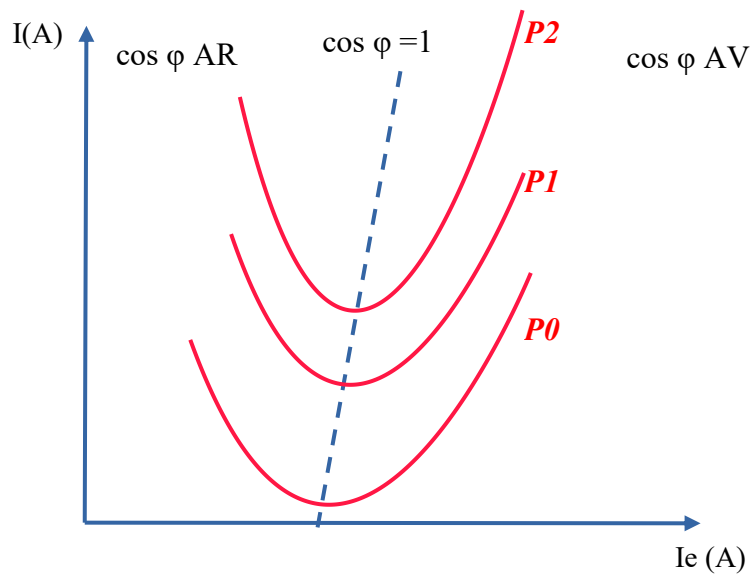


Figure II-20 . Courbes de MORDEY ou courbes en V

8-5-Expression du couple électromagnétique

On considère un comportement inductif du moteur où le courant est en retard par rapport à la tension.

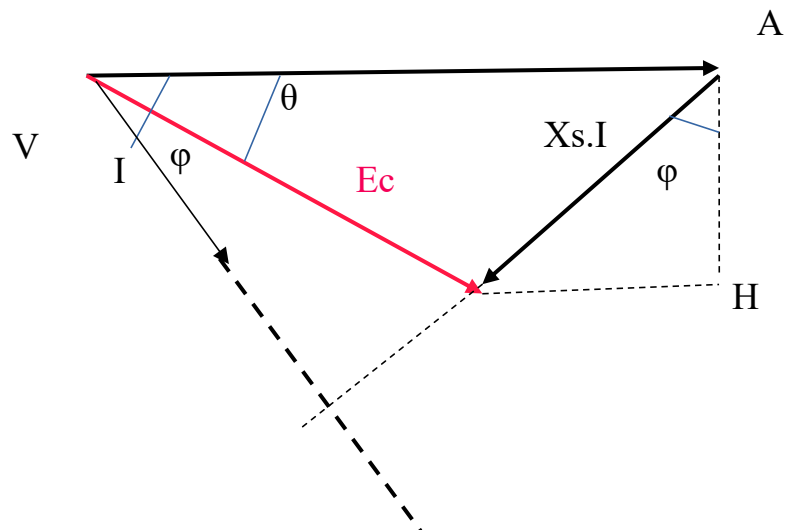


Figure II-21. Diagramme vectoriel du moteur

Sur le diagramme vectoriel, on détermine le segment AH:

$$AH = X_s \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (\text{II-17})$$

D'autre part:

$$P = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad \text{donc} \quad I = \frac{P}{3 \cdot V \cdot \cos\varphi} \quad (\text{II-18})$$

En remplaçant (II-17) dans (II-16), on obtient:

$$AH = X_s \cdot \frac{P}{3 \cdot V \cdot \cos\varphi} \cdot \cos\varphi = P \cdot \frac{X_s}{3 \cdot V} \quad (\text{II-19})$$

D'après le diagramme on a :

$$AH = E_c \cdot \sin\theta \quad (\text{II-20})$$

La puissance électromagnétique est égale à la puissance électrique (pas de pertes):

$$P \cdot \frac{X_s}{3 \cdot V} = E_c \cdot \sin\theta \quad (\text{II-21})$$

$$P = \frac{3 \cdot V \cdot E_c}{X_s} \sin\theta \quad (\text{II-22})$$

On obtient la formule du couple suivante, où θ est appelé l'angle interne:

$$C = \frac{3 \cdot V \cdot E_c}{X_s \cdot \omega_s} \sin\theta \quad (\text{II-23})$$

Pour le cas special $\theta = \frac{\pi}{2}$, on aura:

$$C_{max} = \frac{3 \cdot V \cdot E_c}{X_s \cdot \omega_s} \quad (\text{II-24})$$

8-6-Bilan des puissances du moteur synchrones

Dans ce cas les puissances s'inversent par rapport au bilan de l'alternateur. Le moteur absorbe de l'énergie électrique du réseau et la convertie en énergie mécanique. On aura le bilan suivant:

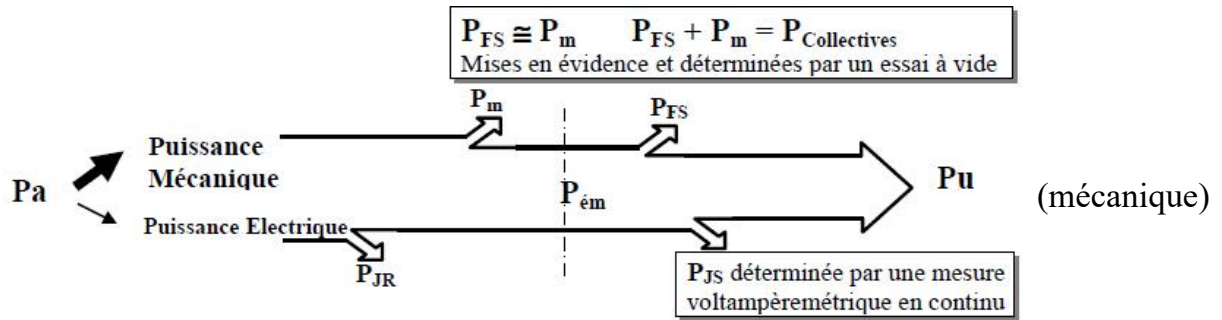


Figure II-22. Bilan des puissances du moteur synchrone

Les différentes pertes seront déterminées de la même façon que pour un alternateur, ainsi que le rendement.

CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la machine synchrone dans ses deux modes de fonctionnement: alternateur et moteur. On y a traité le modèle simplifié de la machine sans saturation et avec saturation. On a également abordé les essais expérimentaux, les méthodes de calcul des différents paramètres ainsi que les bilans des puissances. L'alternateur est communément utilisé pour produire de l'énergie électrique dans un réseau. Il est toujours couplé à ce dernier, sauf pour des cas spéciaux. De plus, grâce à ses propriétés magnétiques, le moteur synchrone est spécialement utilisé comme compensateur synchrone.

CHAPITRE III

LES MACHINES ASYNCHRONES

INTRODUCTION

Les machines asynchrones sont principalement utilisées en moteur, et c'est les moteurs électriques les plus répandus dans l'industrie. Ils ont l'avantage d'être très robustes, peu onéreux, et d'être alimentés directement par le réseau. Comme leur nom l'indique, leur vitesse est différente de celle du champ tournant, et dépend étroitement de la fréquence et de la charge. Ceci permet de les utiliser pour les entraînements à vitesse variable, contrairement aux moteurs synchrones. Dans ce chapitre nous allons aborder les phénomènes électromagnétiques qui régissent ces moteurs. Le fonctionnement en génératrice asynchrone étant peu utilisé, nous ne l'aborderons pas.

1- CONSTITUTION DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ

Le moteur asynchrone est constitué lui aussi d'un stator et d'un rotor. Il possède le même stator que celui d'une machine synchrone, mais son rotor est différent.

1-1-Le stator

Il est identique à celui d'une machine synchrone et il joue le rôle d'inducteur c'est à dire, de créer un champ tournant. Il comporte donc trois enroulements alimentés par un réseau triphasé de fréquence f .

Le champ magnétique tourne à la vitesse de synchronisme n_s . Les enroulements statoriques sont conçus pour fonctionner sous une tension déterminée. De ce fait, en fonction du réseau disponible, on choisira le couplage étoile ou triangle de ces enroulements.

Une tension trop faible entraînerait l'arrêt du moteur ou le non démarrage (couple magnétique trop faible). D'autre part une tension trop forte entraînerait des pertes Joules excessives ce qui provoquerait la destruction des enroulements.

Si la tension nominale du moteur est égale à la tension composée du réseau, on choisit le couplage étoile. En revanche, si sa tension nominale est égale à la tension simple du réseau on choisit le couplage triangle.

Il est important de savoir que si la tension nominale du moteur est différente de la tension simple ou composée du réseau, le couplage est impossible et peut s'avérer dangereux.

Exemple 1:

Un moteur 230V/400V doit être couplé sur réseau 230V/400V.

La tension entre phases est de 400V. Or chaque enroulement a besoin de 230V pour fonctionner. On choisit donc le couplage étoile. Si on utilisait le couplage triangle, chaque enroulement subirait 400V à ses bornes et serait détruit.

Si la tension simple du réseau est égale à la tension nominale du moteur, on choisit le couplage triangle.

Exemple 2:

Un moteur 230V/400V sur un réseau 127V/230V. On choisit le couplage triangle car 230V est la tension entre phases. Or chaque enroulement a besoin de 230V pour fonctionner.

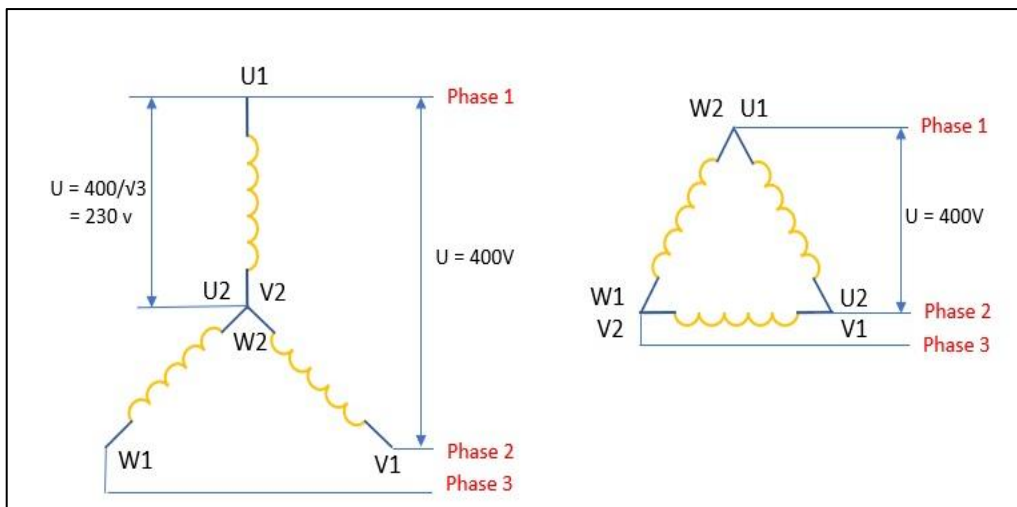


Figure III-1. Couplage du stator au réseau

1-2-Le rotor

C'est l'induit de la machine. Le rotor n'est relié à aucune source de tension extérieure (en fonctionnement normal, il est court-circuité). il en existe deux types :

-Le rotor bobiné .

Il s'agit d'un enroulement triphasé, logé dans des encoches à la périphérie du rotor, dont le nombre de pôles $2p$ est le même que celui du stator, et dont les phases sont couplées en étoile. Les extrémités de l'étoile sont reliées à trois bagues en cuivre calées sur l'arbre(figure III-2).

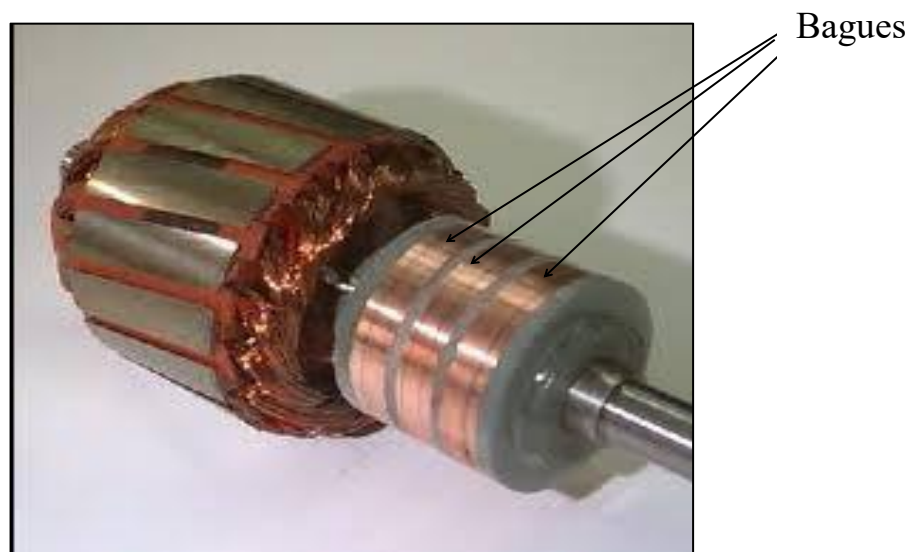


Figure III-2. Rotor bobiné

Ces bagues frottent sur des balais fixes, ce qui permet l'insertion d'un rhéostat triphasé en série avec le rotor. Il présente l'avantage de pouvoir modifier la résistance des enroulements rotoriques, donc la caractéristique mécanique, par contre ses contacts glissants (balais frottant sur des bagues) sont fragiles et son coût est élevé. En fonctionnement normal, ces enroulements sont court-circuités.

-Le rotor à cage d'écureuil :

Il est constitué de barres conductrices en aluminium, parallèles entre elles et réunies par deux couronnes également conductrices. Il est robuste et peu coûteux mais ne permet pas d'agir sur la caractéristique mécanique.



Figure III-3. Rotor à cage

2-SYMBOLS

Dans les schéma électriques industriels, le moteur asynchrone est reconnu par les deux symboles suivants :

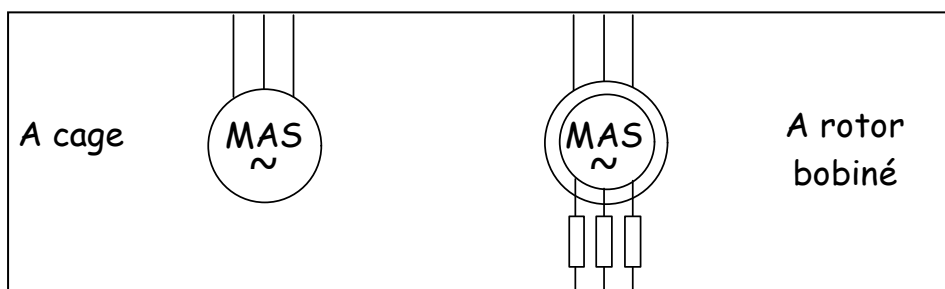


Figure III-4: Symboles des moteurs asynchrones

3-PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les bobinages du stator alimentés en triphasé créent un champ magnétique tournant. Les enroulements du rotor étant court-circuités, ils sont donc le siège de courants induits. Ces courants créent un champ magnétique dans le rotor qui tend à s'aligner avec celui du stator (tournant à la vitesse dite de synchronisme).

De ce fait le moteur est aussi appelé moteur à induction. Si le rotor tournait à la même vitesse que le champ tournant créé par le stator, le rotor ne verrait pas de variation de champ magnétique et les courants induits disparaîtraient. C'est pourquoi le rotor tourne forcément à une vitesse différente du champ tournant d'où le nom de moteur asynchrone (asynchrone : différence de vitesse).

Le coefficient de glissement g quantifie cette différence de vitesse mise en rapport de la vitesse de synchronisme.

3-1-Le glissement

La notion de glissement traduit le décalage entre la vitesse du champs tournant et celle du rotor. Le glissement g d'un moteur asynchrone est donné par le rapport:

$$g = \frac{ns-n}{ns} = \frac{\omega_s-\omega}{\omega_s} \quad (\text{III-1})$$

ns et n sont respectivement les vitesses synchrones et du rotor en tours/minutes.

ω_s et ω sont respectivement les pulsations du courant statorique et rotoriques en radian/seconde.

g n'a pas d'unité. Il s'exprime en général en %.

on aura donc:
$$n = (1 - g). ns \quad (\text{III-2})$$

3-2-Fréquence des courants rotoriques

Le rotor, à p paires de pôles, voit le champ statorique tourner par rapport à lui à la fréquence :

$$n_g = g ns .$$

Ces enroulements voit donc apparaître à leurs bornes des fem de fréquence :

$$f_R . p . n . g = p . g . ns$$

et de pulsations:

$$\omega_R = \omega_g = p . \Omega_g = p . (\Omega_s - \Omega) = p . g . \Omega_s = g . \omega$$

La fréquence des courants rotoriques est:

$$f_R = p.n_g = p.g.n_s = g.f.$$

D'où une nouvelle définition du glissement :

$$g = \frac{f_R}{f} \tag{III-3}$$

4-ESSAIS DU MOTEUR ASYNCHRONE

Comme tous les autres moteurs, les essais sur le moteur asynchrone permettent de déterminer les paramètres du schéma équivalent et d'assurer le bon fonctionnement du système.

4-1-Essai à vide

Le courant à vide I_0 est relativement important (30 à 50% du courant nominal) et le facteur de puissance est faible. Ce courant à vide est donc essentiellement réactif, et correspond à la magnétisation du circuit magnétique. D'autre part, la vitesse de rotation n est pratiquement égale à la vitesse de synchronisme n_s .

Cet essai est généralement utilisé pour estimer les pertes collectives à vide qui restent pratiquement inchangés lors du fonctionnement. On démarre le moteur sans charge; on augmente graduellement la tension U_{10} et on mesure la puissance consommée P_{10} à chaque fois.

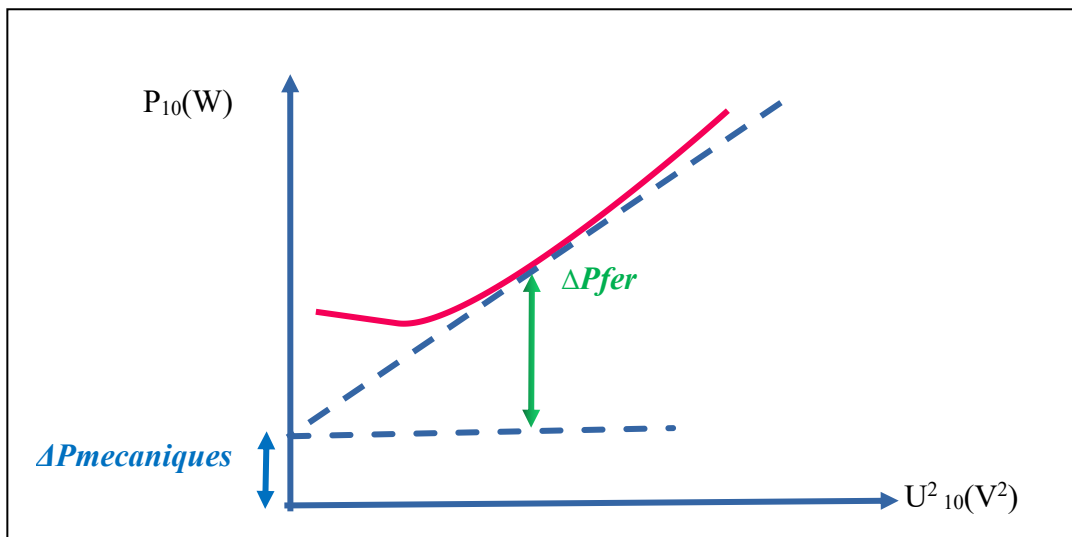


Figure III-6. Méthode des pertes séparées

Lorsque la tension est très petite le flux est très faible et les pertes fer sont dans ce cas presque nuls, la puissance consommée par le moteur est donc due aux pertes mécaniques seulement. On peut donc

estimer la valeur des pertes mécaniques au début de la courbe. Cette valeur restera constante durant toute la période de fonctionnement du moteur.

Les pertes fer étant dépendants du carré de la tension, ils sont donc variables et varient avec celle ci.

On peut ensuite estimer leur valeur pour la tension nominale et leur valeur peut être considérée comme constante durant le fonctionnement.

4-2-Essai en charge

La vitesse de rotation n diminue peu quand la charge augmente mais le moteur peut démarrer seul même en charge.

Dans cet essai, on peut déterminer le courant , le rendement, le couple utile, le glissement et le facteur de puissance en fonction de la puissance utile comme le montre la caractéristique suivante:

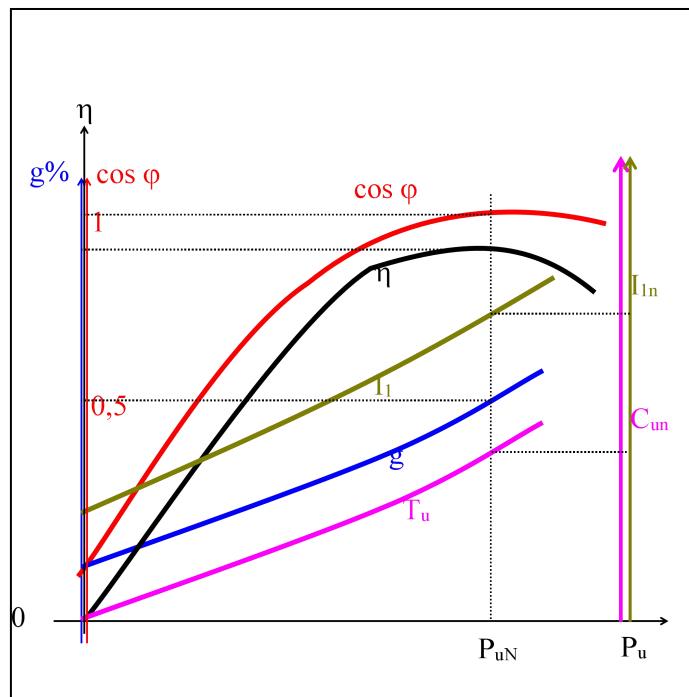


Figure III-7. Caractéristiques en charge du moteur asynchrone

-La caractéristique mécanique du moteur

Pour que le moteur démarre il faut que le couple résistant soit inférieur au couple de démarrage. Dans sa partie utile (partie linéaire), la caractéristique mécanique est pratiquement rectiligne, C_u est une fonction affine de n et le moment du couple utile est proportionnel au glissement g .

$$C_u = K \cdot g \quad \text{ou} \quad C_u = A \cdot n + B$$

A, B et K étant des constantes.

Si le point de fonctionnement P dépasse le maximum de la caractéristique mécanique, le moteur décroche .

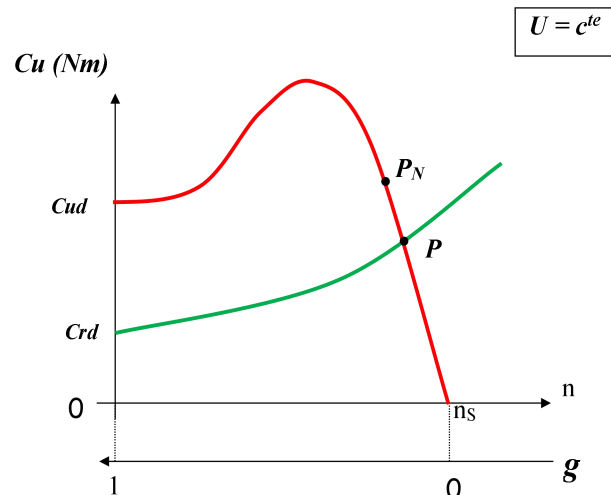


Figure III-8 :Caractéristique mécanique du moteur

C_u est le couple utile.

C_{ud} est le couple utile de démarrage.

C_{rd} est le couple résistant de la charge mécanique.

P_n est le point nominal de coordonnées (n_{sn}, T_{un}) .

4-3-Essai en court-circuit (rotor calé)

Il consiste à effectuer des mesures à rotor bloqué (sous tension réduite et courant nominal). Dans ce cas, le glissement est égal à un. La manipulation se réalise de la façon suivante : On met la commande du frein à 100% (ne pas oublier de mettre en route la ventilation du frein, et effectuer la mesure assez rapidement), puis on augmente très progressivement la tension jusqu'à avoir le courant nominal. Enfin, on mesure les puissances active et réactive.

4-MODÈLE ÉQUIVALENT D'UN MOTEUR ASYNCHRONE A ROTOR BOBINÉ

Ce modèle est établi pour un enroulement d'un moteur à rotor bobiné. Toutes les grandeurs utilisées sont celle d'une phase(courant de phase et tension simple) quelque soit le couplage.

A l'arrêt ($g=1$) , le moteur asynchrone se comporte comme un transformateur.

Pour un moteur en rotation, le modèle est encore utilisable, à condition de tenir compte du fait que g n'est plus égal à l'unité.

Les tensions primaires et secondaires n'ont plus la même fréquence.

r_1, r_2 : sont les résistances de ces enroulements statorique et rotorique respectivement.

l_1, l_2 : sont les inductances de fuites de ces enroulements statorique et rotorique respectivement. .

Les fem induites dans les enroulements primaire et secondaire ont pour expressions :

$$E_1 = K_1 \cdot N_1 \cdot f \cdot \phi \tag{III-4}$$

$$E_2 = K_2 \cdot N_2 \cdot f_R \cdot \phi \tag{III-5}$$

On a $f_R = g \cdot f$ alors:

$$\frac{E_2}{E_1} = g \frac{K_1 \cdot N_1}{K_2 \cdot N_2} = g \frac{n'_1}{n'_2} = g \cdot m \tag{III-6}$$

Où m est l'équivalent d'un rapport de transformation.(rapport de transformation à l'arrêt)
Comme l'analogie est faite avec un transformateur le modèle équivalent est donc le suivant :

$$\begin{cases} \underline{V}_1 - r_1 \underline{I}_1 - j \overset{C}{C}_1 \omega \underline{I}_1 = \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 - r_2 \underline{I}_2 - j \overset{C}{C}_2 \omega_R \underline{I}_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \underline{V}_1 - r_1 \underline{I}_1 - j \overset{C}{C}_1 \omega \underline{I}_1 = \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 - r_2 \underline{I}_2 - j \overset{C}{C}_2 g \omega \underline{I}_2 = 0 \end{cases} \tag{III-7}$$

Le schéma aura cette forme :

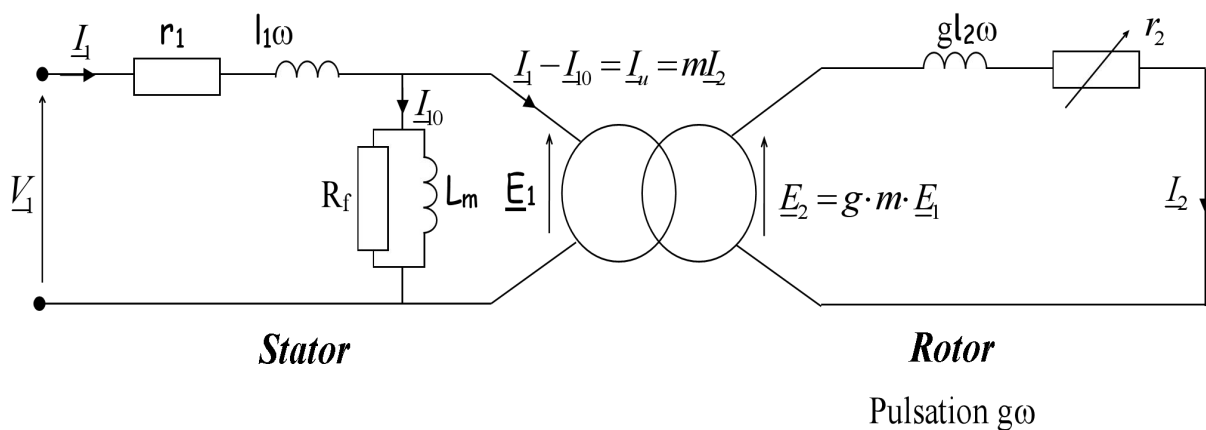


Figure III-9. Schéma équivalent

On divise par g coté rotor :

$$\frac{E_2}{g} - \frac{r_2}{g} I_2 - j C_2 \omega I_2 = 0 \tag{III-8}$$

On obtient le schéma suivant :

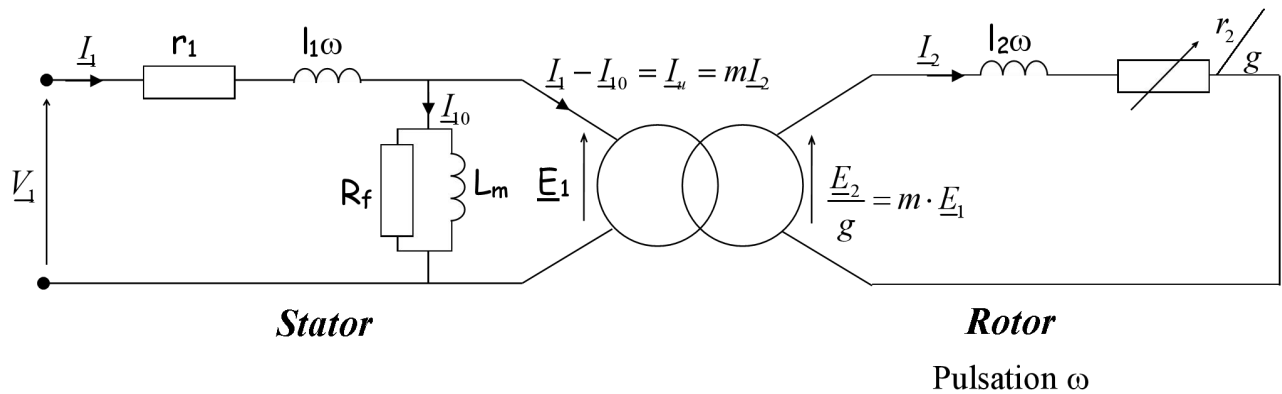


Figure III-10. Schéma équivalent simplifié

5-1-Modèle équivalent simplifié ramené au stator

Comme on a :

$$\underline{E}_2 = (r_2 + j C_2 g \omega) I_2 \tag{III-9}$$

Et en remplaçant E_2 et I_2 par leurs valeurs:

$$\Rightarrow m g \underline{E}_1 = (r_2 + j C_2 g \omega) \frac{I_u}{m} \tag{III-10}$$

Puis en divisant (III-10) par mg , on obtient:

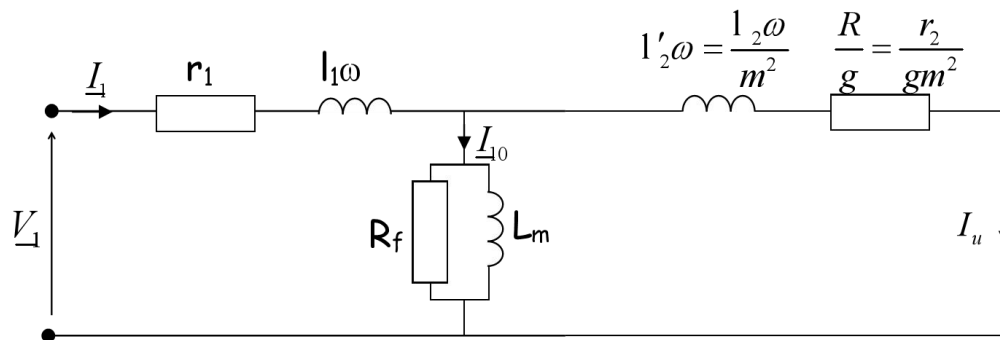
$$\Rightarrow \underline{E}_1 = (r_2 + j C_2 g \omega) \frac{I_u}{m \times mg} \tag{III-11}$$

$$\Rightarrow \underline{E}_1 = \left(\frac{r_2}{gm^2} + j \frac{C_2}{m^2} \omega \right) I_u \tag{III-12}$$

Ce qui fait apparaître:

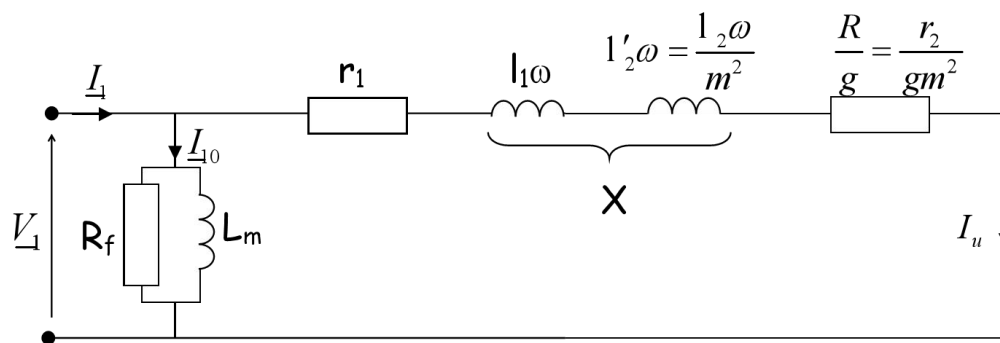
$$\Rightarrow R = \frac{r_2}{m^2} \text{ et } C_2 = \frac{C_2}{m^2} \tag{III-13}$$

Soit en ramenant l'impédance secondaire au stator, cela donne le schéma suivant:



Approximation

On suppose la chute de tension dans r_1 et $l_1\omega$ très faible



Approximation : r_1 négligés

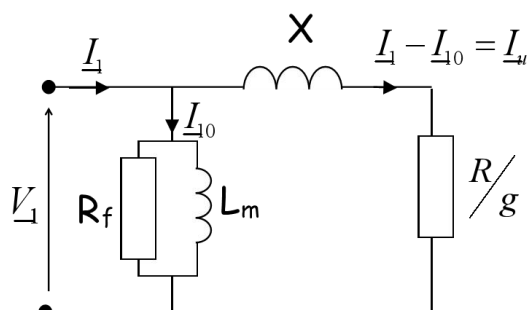


Figure III-11. Schéma équivalent simplifié ramené au stator

6-DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS DU MODÈLE SIMPLIFIÉ

Pour déterminer les différents paramètres électriques du moteur asynchrone, il faut faire les essais suivants :

6-1-Essai à vide

En effectuant un essai à vide, sans charge mécanique, la vitesse est presque égale à la vitesse de synchronisme. Le glissement sera nul ($g=0$) et le modèle d'une phase deviendra:

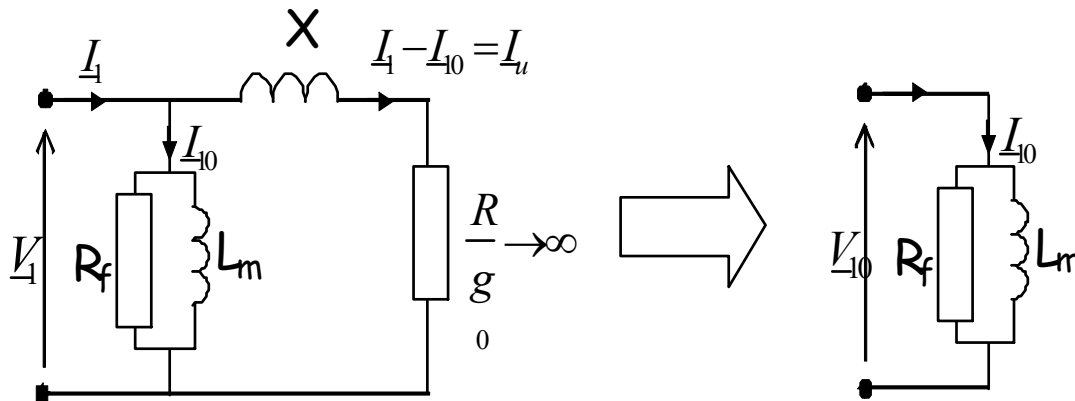


Figure III-12. schéma équivalent à vide

On mesure P_{10} , I_{10} et le $\cos\varphi$ consommés par le moteur, et on en déduit R_f et L_m .

La puissance consommé par le moteur à vide est due aux pertes joule dans le bobinage statorique et aux perte fer. On aura alors:

$$\begin{cases} P_{10} = 3 \frac{V_1^2}{R_f} & \Rightarrow R_f = 3 \frac{V_1^2}{P_{10}} \\ Q_{10} = 3 \frac{V_1^2}{L_m \cdot \omega} & \Rightarrow L_m = 3 \frac{V_1^2}{Q_{10} \cdot \omega} \end{cases} \quad \text{(III-14)}$$

6-2-Essai en régime de court-circuit (rotor bloqué)

En effectuant un essai à l'arrêt (rotor bloqué) dit essai en court-circuit par analogie avec le transformateur triphasé, sous tension V_1 réduite, le glissement est égale à 1. Le circuit équivalent du moteur asynchrone à rotor calé ou bloqué est donné par la figure III-13:

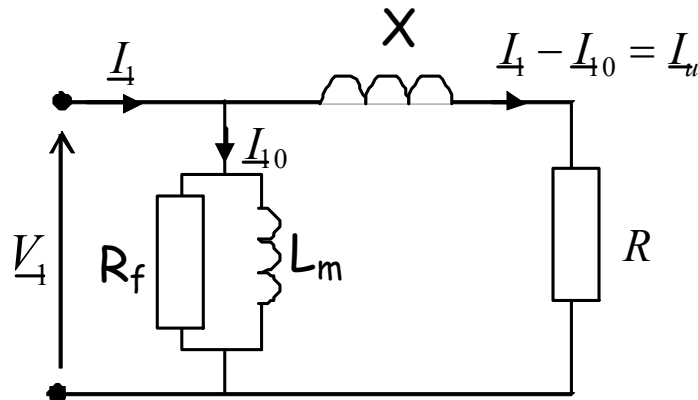


Figure III-13. Schéma équivalent en régime de court circuit

On mesure P_{1cc} , I_{1cc} , $\cos\phi$. Par un bilan des puissances active et réactive (théorème de Boucherot), on détermine les puissances active et réactive dissipées dans Rf et X :

$$\begin{cases} P_{1cc} = P_{0cc} + P_R = 3 \frac{V_{1cc}^2}{Rf} \\ Q_{1cc} = Q_{0cc} + Q_x = 3 \frac{V_{1cc}^2}{X} \end{cases} \quad (III-15)$$

Et comme V_{1cc} est une tension réduite, on aura:

$$P_{1cc} \approx P_R \quad \text{et} \quad Q_{1cc} \approx Q_x \quad (III-16)$$

Et on en déduit :

$$\begin{cases} P_{1cc} = 3 \cdot Rf \cdot I_{1cc}^2 \rightarrow Rf = \frac{P_{1cc}}{3 \cdot I_{1cc}^2} \\ Q_{1cc} = 3 \cdot X \cdot I_{1cc}^2 \rightarrow X = \frac{Q_{1cc}}{3 \cdot I_{1cc}^2} \end{cases} \quad (III-17)$$

6-3-Essai en charge

Le schéma équivalent en charge est représenté par la figure III-14.

Grâce à l'essai en charge, on peut aussi déterminer R et X .

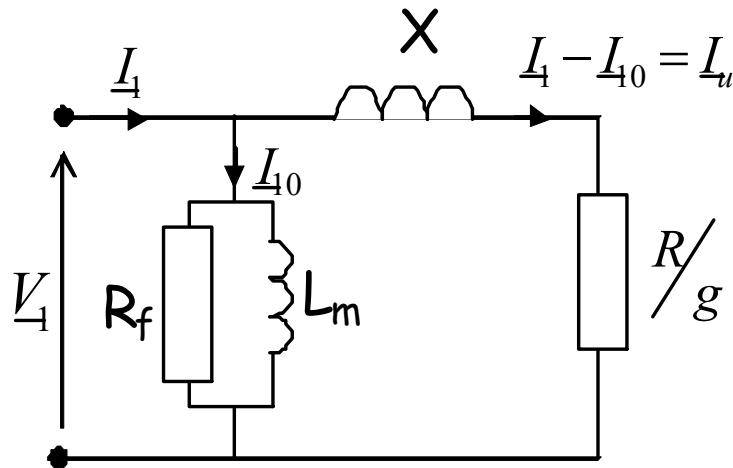


Figure III-14. Schéma équivalent en charge

Par un bilan des puissances active et réactive (théorème de Boucherot), on détermine les puissances active et réactive dissipées dans R et X mais cette fois on ne peut négliger P_{10} et Q_{10} que l'on connaît grâce à l'essai à vide.

$$P_n = P_{10} + P_R$$

$$Q_n = Q_{10} + Q_X \tag{III-18}$$

Et on en déduit :

$$\begin{cases} P_{1n} = P_{10} + 3 \cdot \frac{R}{g} \cdot I_{1n}^2 \Rightarrow R = g \frac{P_{1n} - P_{10}}{3 \cdot I_{1n}^2} \\ Q_{1n} = Q_{10} + 3 \cdot X \cdot I_{1n}^2 \Rightarrow X = \frac{Q_{1n} - Q_{10}}{3 \cdot I_{1n}^2} \end{cases} \tag{III-19}$$

7-LE COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

D'après le modèle équivalent en régime permanent, la puissance électromagnétique est donnée par:

$$P_{em} = 3 \cdot \frac{R}{g} \cdot I_u^2$$

or

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega_s$$

Donc le couple électromagnétique deviendra:

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{3 \cdot \frac{R}{g} \cdot I_u^2}{\Omega_s} \quad (\text{III-20})$$

Comme on a:

$$I_u = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + (X)^2}} \quad (\text{III-21})$$

En combinant les deux équations, (III-20) et (III-21) on aura:

$$C_{em} = \frac{3 \cdot \frac{R}{g} \cdot I_u^2}{\Omega_s} \cdot \frac{V_1^2}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2} \quad (\text{III-22})$$

Et comme: $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$

Le couple électromagnétique devient:

$$C_{em} = \frac{3 \cdot p \cdot V_1^2}{\omega} \cdot \frac{\frac{R}{g}}{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2} \quad (\text{III-23})$$

Et la puissance devient:

$$P_{mec} = (1 - g) \cdot P_{em} = (1 - g) \cdot C_{em} \cdot \Omega_s = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{III-24})$$

8-BILAN DES PUISSANCES DU MOTEUR ASYNCHRONE

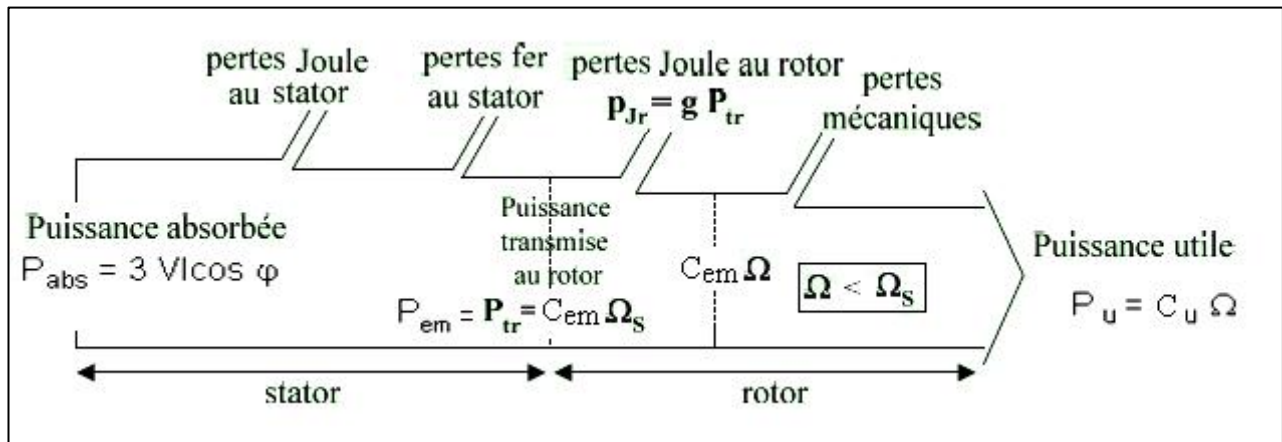


Figure III-15. Bilan des puissances du moteur asynchrone

Quelque soit le couplage, les pertes joules statoriques sont :

$$P_{js} = \frac{3}{2} R_b I^2 \tag{III-25}$$

R_b étant la résistance mesurée entre deux bornes du stator .

La puissance transmise au rotor est :

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \tag{III-26}$$

La puissance est transmise au rotor par l'action du champ magnétique tournant dans l'entrefer à la fréquence f_s , Il lui correspond un couple électromagnétique T_{em} tel que:

$$P_u = C_{em} \cdot \Omega_s \tag{III-27}$$

La puissance mécanique au rotor :

$$P_m = C_{em} \cdot \Omega = C_{em} \cdot 2\pi \cdot n = C_{em} \cdot 2\pi \cdot ns(1 - g) = P_{tr}(1 - g)$$

Donc:
$$P_m = P_{tr}(1 - g) \tag{III-28}$$

$P_{Tr} > P_m$: La différence entre les deux correspond aux pertes rotoriques.

Les pertes joules dans le rotor sont calculés comme suit; si on néglige les pertes magnétiques dans le rotor (faibles fréquences) :

$$P_{jr} = P_{tr} - P_{mec} = C_{em} \cdot \Omega s - C_{em} \cdot \Omega$$

$$P_{jr} = C_{em} \cdot (\Omega s - \Omega) = C_{em} \cdot (\Omega s \cdot g)$$

$$P_{jr} = P_{em} \cdot g \tag{III-29}$$

Du fait des pertes mécaniques (frottements mécaniques, ventilation du moteur), la puissance utile P_U est :

$$P_u = C_u \cdot \Omega \tag{III-30}$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \tag{III-31}$$

Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + pertes} = \frac{P_a - pertes}{P_a} \tag{III-32}$$

$$\sum pertes = P_{fS} + P_{JS} + P_{JR} + P_{méca}$$

Et si on néglige les pertes autres que rotoriques

$$\eta = \eta_{rotor} = \frac{P_M}{P_{tr}} = \frac{(1-g)P_{tr}}{P_{tr}} = 1 - g \tag{III-33}$$

9-DÉMARRAGE DU MOTEUR ASYNCHRONE

9-1-Démarrage par action sur le rotor: Modification du glissement

9-1-1-Rotor bobiné ou à bagues

En modifiant la résistance rotorique, on agit sur le glissement tout en conservant un couple maximal constant.

Le démarrage se fait par insertion en série avec les enroulements du rotor, un rhéostat à plots triphasé monté en étoile.

Sur le premier plot, la résistance R_2 est telle que le couple est maximum pour $g = 1$, et ensuite quand la vitesse augmente on change le plot de façon que le couple varie toujours entre le couple nominal et le couple maximal.

Une autre solution électronique, c'est à partir de montage à thyristor : c'est un hacheur rotorique donnant une "résistance" variable " R_2 " réglable par thyristor.

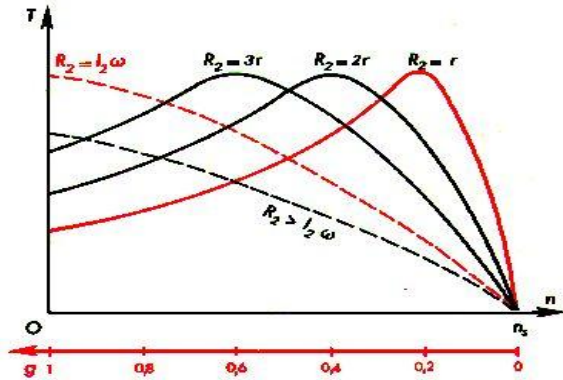


Figure III-16. Démarrage rotorique

9-1-2-Rotor à double cage d'écureuil ou à encoches profondes

Ces moteurs sont plus faciles à démarrer que pour le rotor bobiné. Le rotor est constitué de deux cages de résistances R_a et R_b ($R_b \ll R_a$). Au démarrage presque tout le courant passe dans la cage (R_a), la plus proche de l'entrefer. La résistance du rotor correspond donc à la section de la barre extérieure au moment du démarrage et à la somme des deux sections lorsque la période de démarrage est achevée. Tout se passe comme si la résistance du rotor diminuait au cours du démarrage ; donc on aura le même effet qu'avec l'utilisation d'un rhéostat.

Figure III-17. Démarrage rotorique

On peut aussi remplacer les deux barres par une barre unique s'enfonçant profondément dans le fer. C'est ce qu'on appelle le moteur à encoches profondes.

9-2-Démarrage par action sur le stator

Cette méthode s'applique à tous les types de moteur mais plus particulièrement au moteur à simple cage d'écureuil. Elle consiste à réduire le courant par diminution de la tension d'alimentation.

9-2-1-Rhéostat de démarrage du stator

Méthode peu intéressante, car le couple est affaibli très considérablement.

Si on divise le courant par 2, on divise le couple par 4.

Si on divise le courant par 3, on divise le couple par 9.

9-2-2-Transformateur abaisseur

C'est la meilleure solution que les précédentes, et elle est utilisée pour la petite puissance.

Le couple et le courant sont réduits dans le même rapport. Pour le cas de forte puissance, on utilise un transformateur en étoile.

9-2-3-Démarrage Etoile-Triangle

On considère un moteur dont les phases du stator sont couplées successivement en étoile puis en triangle, à glissement égal, chaque phase sera parcourue par un courant $\frac{1}{\sqrt{3}}$ fois moins élevé lors du couplage en étoile que lors du couplage en triangle.

Figure III-18. Démarrage étoile triangle

Donc, lorsque le moteur a atteint la vitesse convenable, on revient au couplage en triangle.

On sait que le couple est proportionnel au carré du courant et donc, il est trois fois plus petit dans un cas que dans l'autre.

9-2-4-Démarrage par gradateur alternatif

On utilise un gradateur dont les thyristors sont montés en tête-bêche ou à triacs, il permet de faire varier la tension efficace à fréquence constante :

Figure III-18. Démarrage par gradateur.

10-FREINAGE DU MOTEUR ASYNCHRONE

Certaines applications de l'industrie demandent un freinage rapide du moteur. L'arrêt direct de l'alimentation du moteur asynchrone ne permet pas un arrêt instantané du rotor à cause de l'inertie de ce dernier. On a recours alors à plusieurs méthodes de freinage.

10-1-Freinage par injection de continu dans le rotor

Basée sur l'extinction l'alimentation du stator, elle est peu intéressante sauf pour le blocage des machines-outils : frein magnétique.

10-2-Freinage à contre-courant

On inverse deux phases, le champ tournant est inversé, donc, il y a un freinage hyper synchrone, le moteur ralenti. Si on n'arrête pas le moteur, alors il repart dans l'autre sens.

10-3-Freinage avec rhéostat rotorique

La même méthode qui est utilisée pour le démarrage est utilisée pour le freinage mais, dans le sens inverse.

CONCLUSION

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé dans l'industrie et la vie courante. Son étude est donc indispensable et spécialement sa modélisation. Cette dernière ne peut se faire sans les essais classiques à savoir à vide, en charge et en court circuit. Tout ceci a été abordé dans ce chapitre. Il a été question aussi des modes de démarrage et de freinage de ces moteurs.

CHAPITRE IV

LES MACHINES A COURANT CONTINU

INTRODUCTION

Comme toutes les machines tournantes, une machine à courant continu (MCC) est un convertisseur d'énergie réversible qui peut fonctionner en moteur ou en génératrice. Elle est généralement utilisée en moteur. Son principe de fonctionnement est basé sur le champs magnétique, ce qui en fait un convertisseur électromécanique. A cause de

1-CONSTRUCTION

La machine à courant continu est constituée de deux parties; le stator appelé inducteur et le rotor appelé induit séparées par l'entrefer. Le rotor comporte un collecteur dont le rôle est de collecter les tensions induites et de les redresser ce qui en fait le premier redresseur inventé (redresseur mécanique). C'est d'ailleurs la pièce caractéristique de ce type de machines.

Contrairement aux machines à courant alternatif, pour les machines à courant continu on préfère la terminologie inducteur-induit à celle de stator-rotor.

1-1-L'inducteur

C'est la partie fixe du moteur, dont la fonction consiste à créer le champ magnétique d'excitation.

Il est constitué d'un aimant permanent ou d'un électro-aimant dont les enroulements sont parcourus par le courant continu d'excitation. Son circuit magnétique est composé de tôles ferromagnétiques empilées. Il comporte généralement un nombre pair de pôles saillants disposés en alternance comme dans la figure suivante et qui représentent les noyaux des bobines d'excitation.

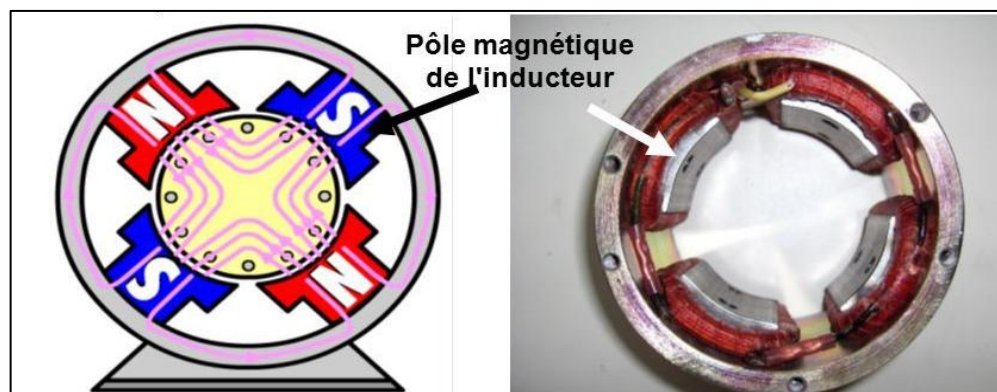


Figure IV-1. Configuration du stator

Les pôles ont une forme spéciale qui permet d'une part de bien fixer le bobinage et d'une autre part de bien distribuer le champs dans l'entrefer pour permettre une bonne transmission de celui-ci au rotor. Le pied de pôle est plus large du coté entrefer, on l'appelle alors épanouissement polaire .

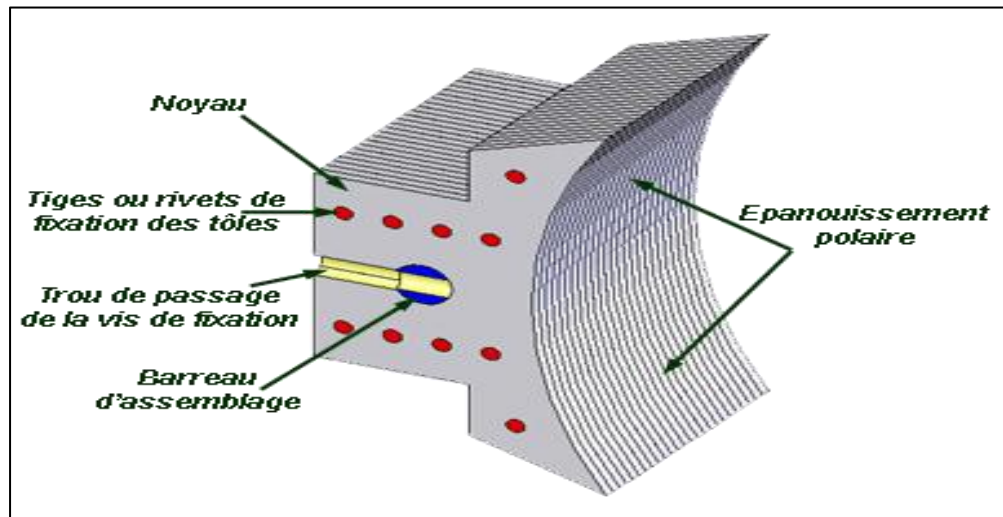


Figure IV-2. Pôle principal d'une Machine à Courant Continu

Dans certains cas, pour améliorer la commutation on insère entre les pôles principaux des pôles auxiliaires. Ces pôles auxiliaires peuvent être des aimants permanents ou des électroaimants parcourus par le courant d'induit.

1-2-L'induit

C'est le rotor de la machine à courant continu. C'est une structure cylindrique en feuilletage de tôles magnétiques qui comporte des encoches. Ces dernières accueillent des conducteurs actifs selon une configuration donnée (bobinage). Il reçoit le champs magnétique provenant du stator pour convertir l'énergie.

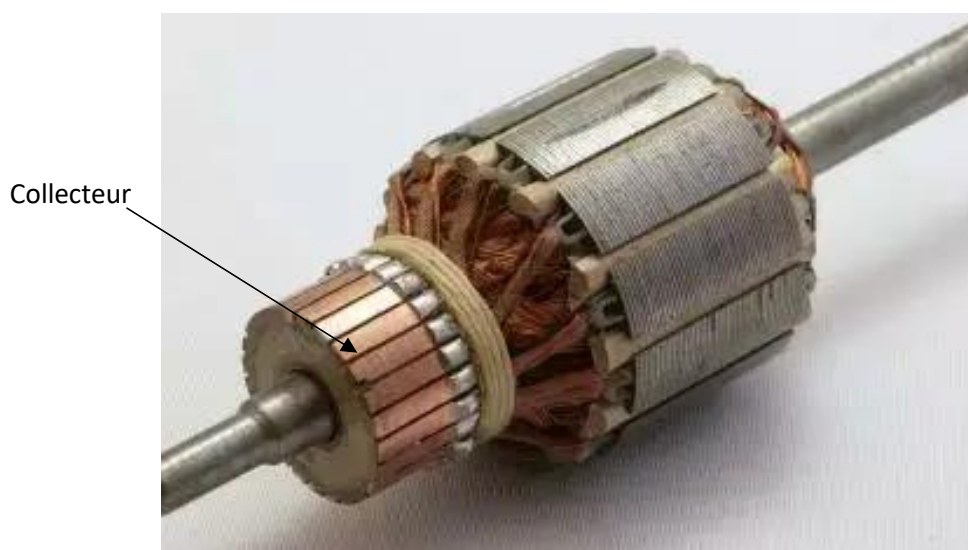


Figure IV-3. Rotor et collecteur d'une MCC

1-3-Collecteur - balais

Le collecteur est un anneau formé de lames de cuivre isolées l'une de l'autre, sur lesquelles frottent des balais. De ces balais partent les fils qui assurent la liaison électrique entre le rotor et l'extérieur de la machine. En réalité du fait de la rotation du rotor, les fem induites dans les conducteurs actifs sont alternatives. Le collecteur joue le rôle d'un redresseur mécanique pour ces f.e.m. Et grâce au collecteur, la f.é.m. entre les balais est unidirectionnelle.

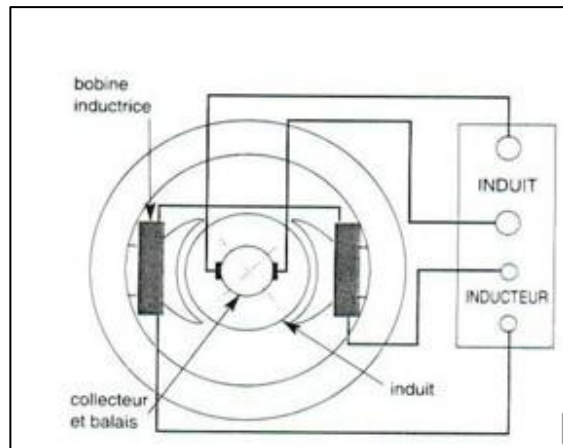
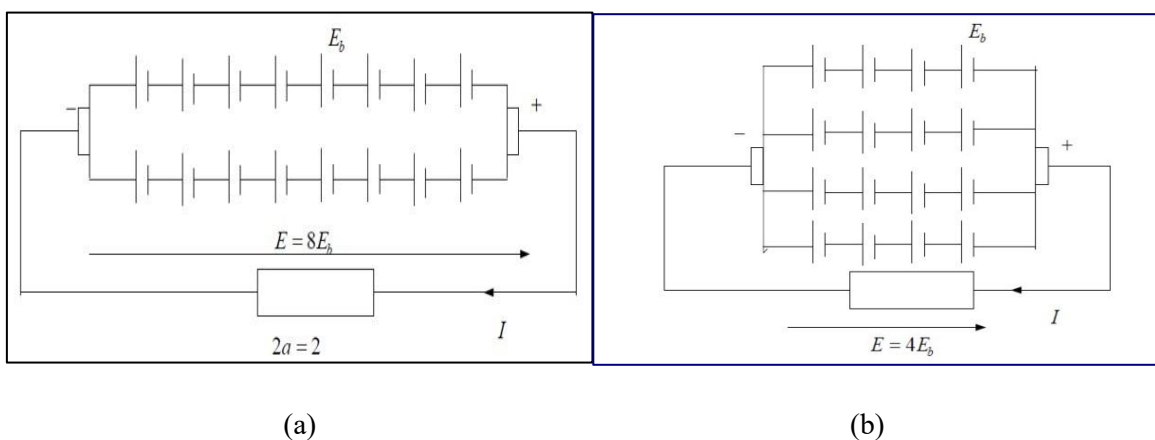


Figure IV-4. Collecteur d'une machine à courant continue

1-4- Les Voies d'enroulements

Les balais divisent l'induit en voies d'enroulement (2.a), chaque voie d'enroulement comporte $N/(2.a)$ conducteurs actifs (N : nombre total de conducteurs d'induit).

Les voies d'enroulement sont à considérer comme deux générateurs identiques montés en parallèle (même f.é.m. et même courant = $(1/2.a)$ courant dans la charge).



(a)

(b)

Figure IV-5. Voies d'enroulement:

(a): $2a=2$ voies d'enroulements. (b): $2a=4$ voies d'enroulements.

N : Nombre total de conducteurs d'induit.

E_f : F.é.m. par faisceau.

E_b : F.é.m. par brin actif de l'induit.

2a : Nombre de voies d'enroulement.

E : F.é.m. aux bornes d'induit.

$$E_b = N \cdot E_f \tag{IV-1}$$

$$E = \frac{N}{2 \cdot a} \cdot E_b \tag{IV-2}$$

Si $2 \cdot a = 2$: $E = \frac{N}{2} \cdot E_b$

Si par contre $2 \cdot a = 4$ alors: $E = \frac{N}{4} \cdot E_b$

Pour augmenter la f.é.m, on diminue le nombre de voies d'enroulements (on prend $2a = 2$ et on augmente le nombre de conducteurs actifs).

Une augmentation du nombre de voies engendre l'augmentation du courant débité si on est en mode génératrice.

2-LA GÉNÉRATRICE A COURANT CONTINU

2-1 Symbole

Dans les circuits électriques usuels la machine a courant continu est symbolisé comme suit :

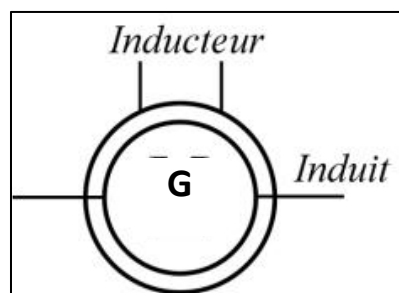


Figure IV-6. Symbole de la génératrice

2-2-Principe de fonctionnement

Pour faire fonctionner une génératrice, on alimente l'inducteur avec du courant continu pour créer un champs magnétique constant. L'induit étant entraîné par un moteur extérieur , ses conducteurs se voient soumis au champs variable qui va induire une fem selon la loi de Faraday.

2-3- FEM induite

Lorsque l'induit tourne, que ce soit en mode générateur ou moteur, il est le siège d'une f.é.m. induite E (pour le moteur elle est appelée force contre électromotrice E_c mais elle est de même nature).

$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot n \cdot \Phi \tag{IV-3}$$

Avec :

p : Nombre de paires de pôles

a : Nombre de paires de voie d'enroulement

N : Nombre de conducteur actif

Φ : Flux maximum à travers les spires en Webers (Wb)

n : Vitesse de rotation en tr/s

$$E = \frac{p}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot N \cdot \Omega \cdot \Phi \tag{IV-4}$$

avec $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ (en rad/s).

Finalement :

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \tag{IV-5}$$

Avec:

$$K = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}$$

C'est la constante interne de la machine.

2-4- Phénomène de commutation

La commutation est le changement du sens du courant dans une bobine au moment où cette bobine passe sous le balai. Elle se traduit pratiquement par des étincelles qui réduisent la durée de vie des balais. Ce phénomène s'explique par le fait que le courant dans une section (fortement inductive) doit s'inverser rapidement sinon une étincelle s'éclate entre la lame et le balai.

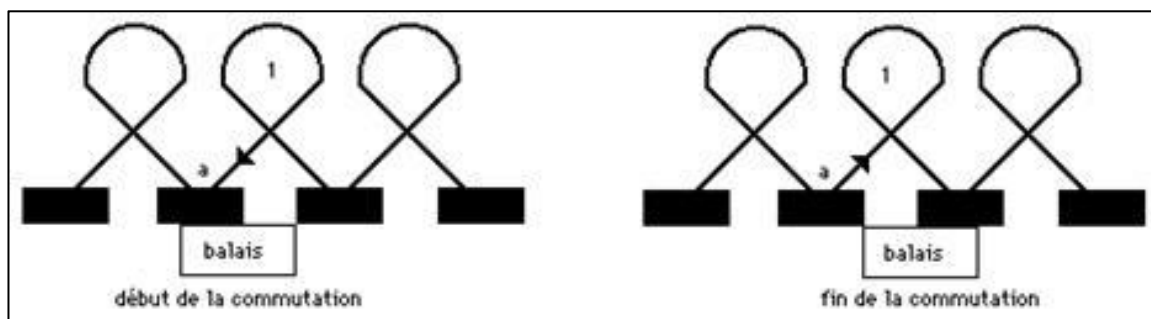


Figure IV-7. Déplacement du balais entre deux lames du collecteur

La bobine 1 doit changer le sens de son courant pendant qu'elle est en court-circuit sous le balai.

La bobine en commutation possède une résistance et une inductance. Si on pouvait commuter de façon linéaire ce serait l'idéal.

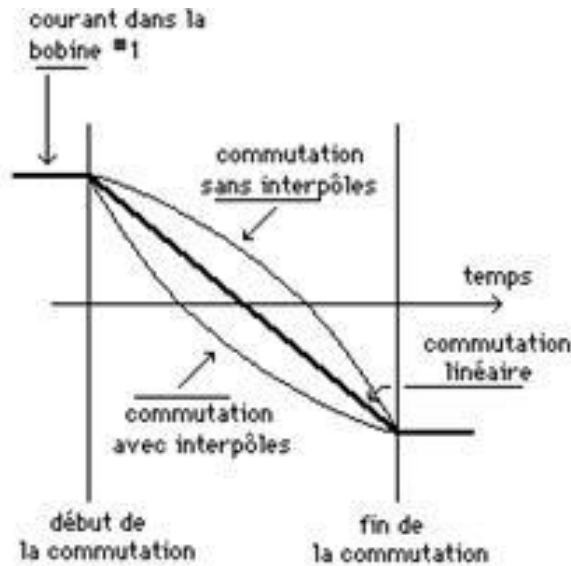


Figure IV-8. Inversion du sens du courant dans la bobine avec et sans pôle auxiliaire

Comme l'inductance est présente, le courant est retardé (courbe sans interpoles) et lorsque le balai quitte le commutateur il se produit un arc.

Pour aider la commutation, on introduit un pôle auxiliaire dont la FMM est proportionnelle au courant à commuter et produit un flux magnétique qui assiste le renversement du sens du courant.

Les pôles auxiliaires doivent être parcourus par le courant d'induit et participent également à la compensation de la RMI.

2-5-Modes d'excitation des génératrices

Il existe 4 modes d'excitation pour la génératrice à courant continu.

2-5-1-Génératrice à excitation séparée

Le circuit statorique inducteur est alimenté par une source extérieure indépendante. Le schéma électrique se présente comme suit:

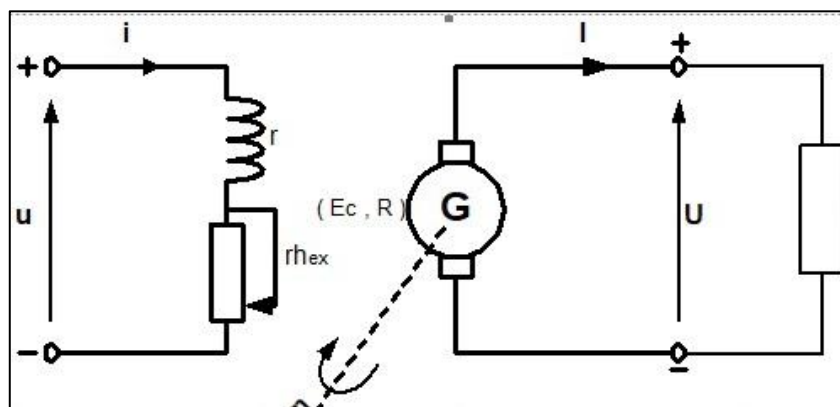


Figure IV-9. Excitation indépendante

La loi des mailles appliquée à l'inducteur donne

$$u = (r + rh_{ex}).i \tag{IV-6}$$

Pour l'induit

$$U = E_c - R.I \tag{IV-7}$$

Ce type d'excitation présente des propriétés tel que :

- Une faible chute de tension.
- Une tension proportionnelle à la vitesse donc réglable dans de larges limites dans les deux sens.
- Le courant d'excitation est indépendant de la charge et de la vitesse.
- Par contre il présente un inducteur moins résistant.

2-5-2-Génératrice à excitation shunt

Dans la génératrice shunt ou génératrice auto excitée, le circuit inducteur est alimenté par l'induit et branché en parallèle.

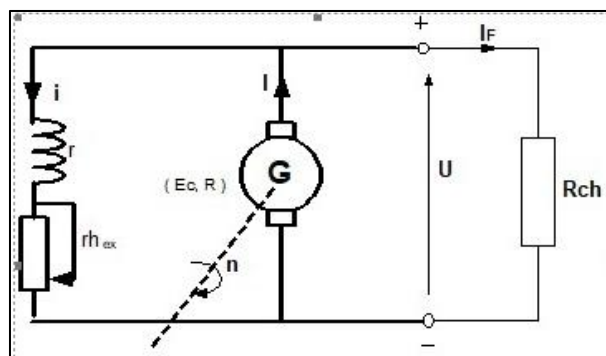


Figure IV-10. Excitation shunt

$$U = (r + rh_{ex}).i \tag{IV-8}$$

$$U = E - R.I \tag{IV-9}$$

Le courant de charge devient alors:

$$I_f = I - i \tag{IV-10}$$

Cette excitation se caractérise par une stabilité limitée (sensible à la variation de vitesse, risque de désamorçage), et une tension réglable par rhéostat de champ.

2-5-3-Génératrice à excitation série

L'enroulement inducteur est en série avec l'induit et comporte peu de spires. Sa résistance est très faible par rapport à celle de la génératrice shunt.

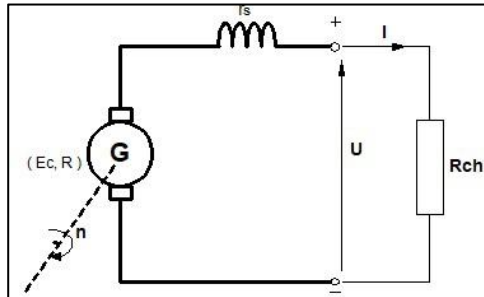


Figure IV-11. Excitation série

$$U = E_c - R \cdot I - r_s \cdot I \tag{IV-11}$$

$$U = R_{ch} \cdot I_{ch} \tag{IV-12}$$

$$I = I_f = i \tag{IV-13}$$

Cette excitation produit une caractéristique de tension très tombante, inutilisable à faible débit et faible vitesse et ne convient pas à l'alimentation de réseau à tension constante.

2-5-4- Génératrice à excitation composée

Appelé aussi excitation compound, elle se présente sous deux montages possibles, selon le branchement de l'enroulement shunt par rapport à l'enroulement série.

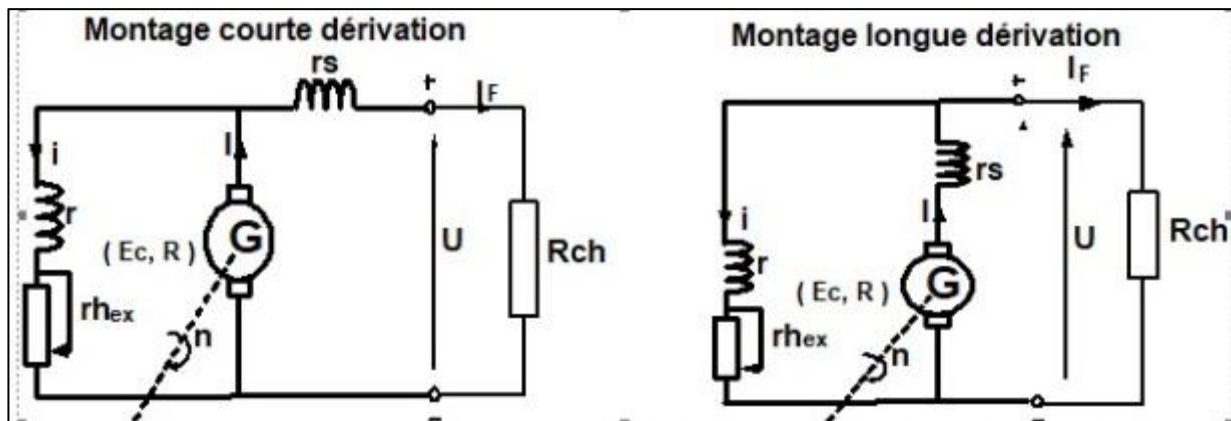


Figure VI-12. Excitation composée

Pour les deux cas
$$I = i + I_f \tag{IV-14}$$

Pour la courte dérivation l'équation des mailles s'écrit:

$$U = E_c - r_s \cdot I_f - R \cdot I = (r_{hex} + r) \cdot i \tag{IV-15}$$

Pour la longue dérivation:

$$U = E_c - (rs + R).I = (rhex + r).i \tag{IV-17}$$

pour le flux additif ou hyper-compound la caractéristique est croissante, et pour le flux soustractif le courant de court-circuit est supérieur au courant normal et la caractéristique est tombante

2-6- Amorçage des génératrices à courant continu

On parle d’amorçage lorsque la machine est auto excitée (excitation shunt, série ou composée)

Si les connexions entre inducteur et induit sont convenable ; le flux rémanent qui engendre aux bornes de l’induit une faible f.e.m provoque le passage dans l’inducteur, d’un courant qui renforce la valeur de ce flux. Si la génératrice ne s’amorce pas pour le sens de rotation désiré, il faut inverser les connexions entre les bornes de l’inducteur ou de l’induit.

La résistance totale du circuit inducteur ne dépasse pas une certaine valeur appelée : résistance critique d’amorçage. La droite des inducteurs doit avoir un point d’intersection avec la droite des fem sinon la génératrice ne s’amorce pas . La droite tangente a la partie linéaire représente celle de la résistance critique d’amorçage.

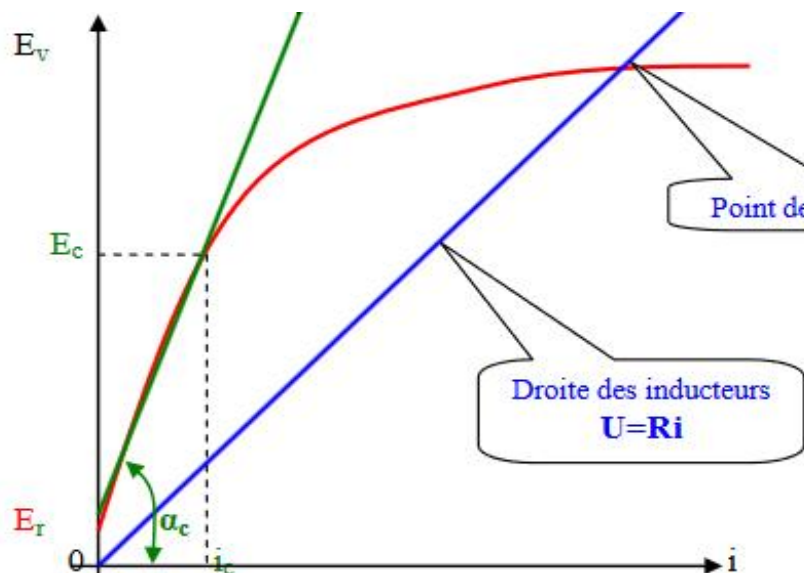


Figure IV-13. Résistance critique et amorçage de la génératrice

2-7- Essais de la génératrice à courant continu

2-7-1-Essai a vide

La caractéristique à vide est relevée lorsque la génératrice n'alimente aucune charge et à vitesse constante. Elle est effectuée généralement pour une génératrice à excitation indépendante.

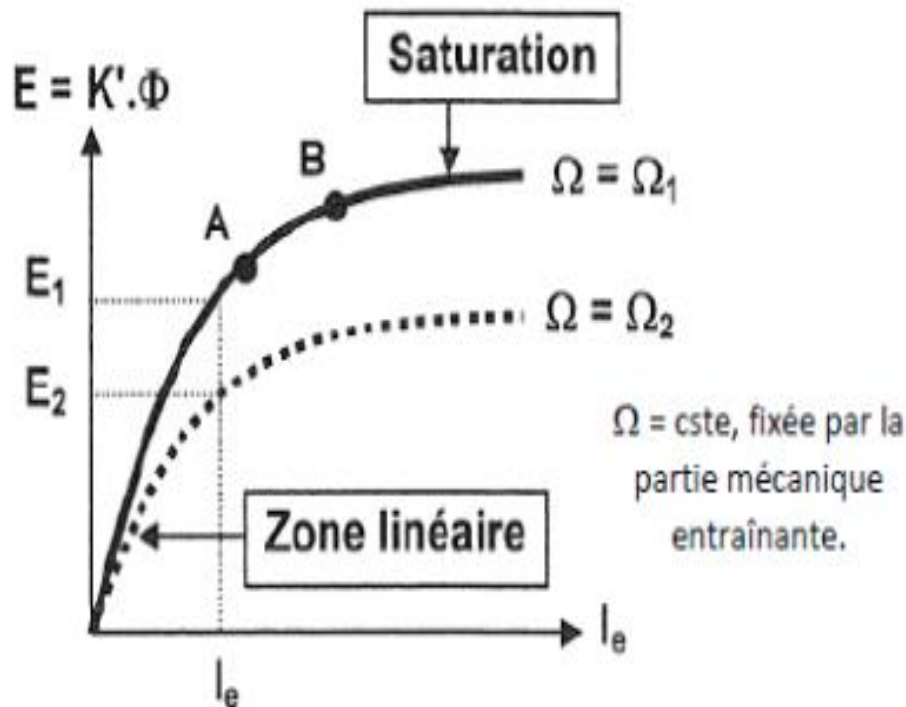


Figure IV-14. Caractéristique à vide ou interne

La caractéristique à vide est l'image de la caractéristique du circuit magnétique. Elle commence par une petite valeur appelée tension rémanente due au flux rémanent (flux emmagasiné lors de fonctionnements ultérieurs). Elle est divisée en trois parties; la partie linéaire ou non saturée, le coude, et la partie saturée. C'est pour ça qu'on l'appelle caractéristique interne. Pour deux vitesses différentes, on aura deux courbes différentes.

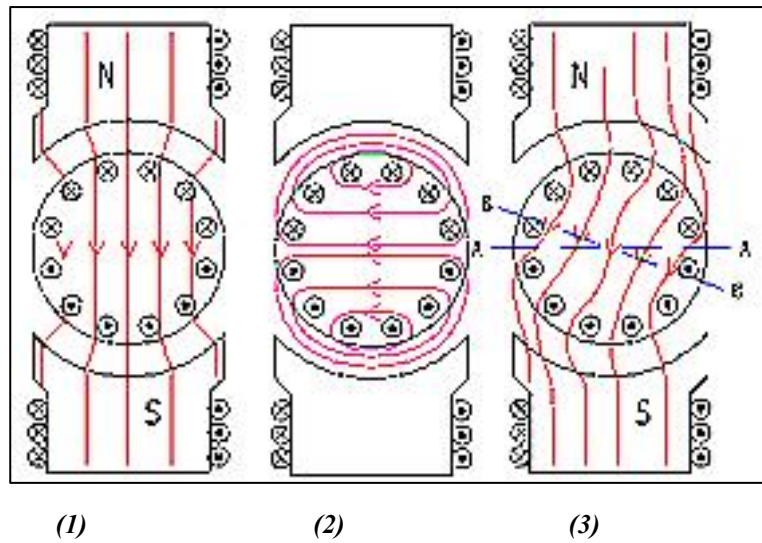


Figure IV-15. Déformation des lignes de champs en charge

(1): Champs principal dans l'inducteur

(2): Champs dû a l'induit

(3): Superposition des deux champs(réaction magnétique d'induit)

De plus on pourrait relever la caractéristique $E=f(n)$ pour un courant d'excitation donné. C'est une droite qui passe par zéro.

2-7-2-Essai en charge

Réaction magnétique d'induit

En fonctionnement génératrice reliée à une charge, les conducteurs de l'induit sont traversés par un courant, qui crée un champ magnétique d'induit. Ce dernier va se superposer au champ principal de l'inducteur. Le champs résultant sera alors déformé et sa valeur diminue.

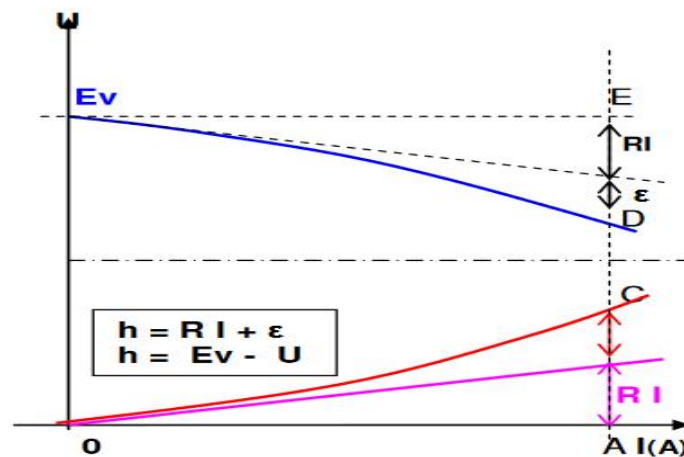


Figure IV-16. Réaction magnétique d'induit

Ce phénomène est appelée réaction magnétique transversale d'induit. Il engendre une diminution de la tension induite.

La caractéristique externe $U=f(I)$ est effectuée à vitesse et à excitation constante.

L'excitation composée présente l'avantage d'une tension stable quelque soit la charge.

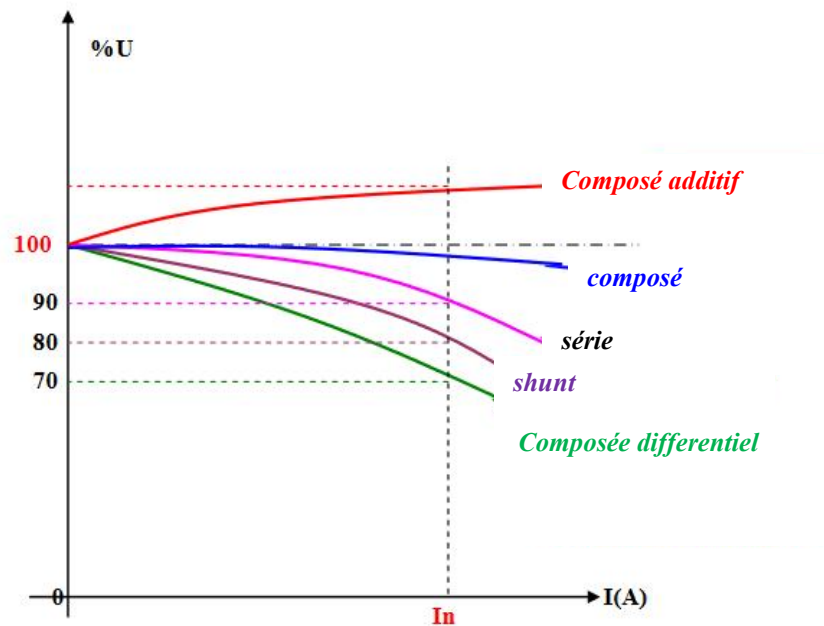


Figure IV-17. Caractéristique en charge ou externe

3-LE MOTEUR A COURANT CONTINU

3-1- Symbole

Le moteur à courant continu se présente dans les schémas électriques comme sur la figure IV-18.

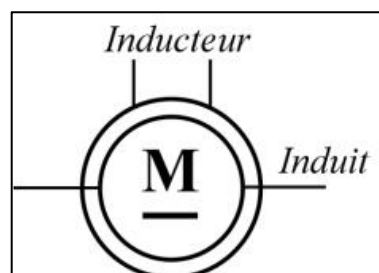


Figure IV-18. Symbole du moteur à courant continu

3-2- Principe de fonctionnement

Pour fonctionner en moteur la machine à courant continu doit être excitée. L'inducteur, alimenté en courant continu engendre un champ magnétique constant. On injecte un courant à travers les balais pour alimenter l'induit. Ce dernier va créer à son tour un champ magnétique d'induit.

L'interaction entre les deux champs va créer une force magnétique selon la loi de Laplace. Cette force va faire tourner le rotor. Le rotor est toujours le siège d'une FEM mais elle est opposée au courant, dans ce cas on l'appelle force contre électromotrice FCEM.

3-3-Types de moteurs

Comme pour la génératrice, le moteur est excité de plusieurs manières :

3-3-1 -Le moteur à excitation indépendante

Ce moteur n'est pas très utilisé du fait qu'on a besoin de deux sources de tension indépendantes.

3-3-2-Le moteur shunt

Le modèle équivalent se présente comme suit:

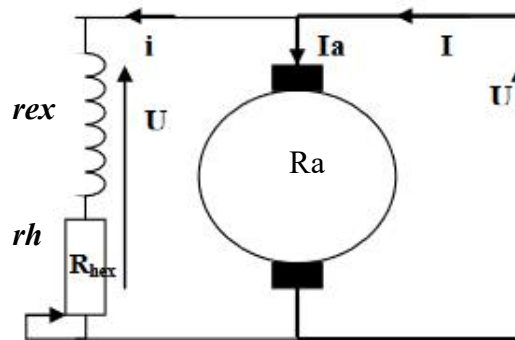


Figure IV-19. Moteur à courant continu à excitation shunt

L'équation des deux mailles du modèle de la génératrice est:

$$U = (r + r_{hex}).i = E_c + R_a.I \quad (IV-18)$$

E_c étant la force contre électromotrice engendrée au rotor.

Sa vitesse sensiblement constante et facile à régler et son degré de stabilité élevé.

3-3-3-Le moteur série

Le moteur à excitation sérié se présente comme sur la figure IV-20.

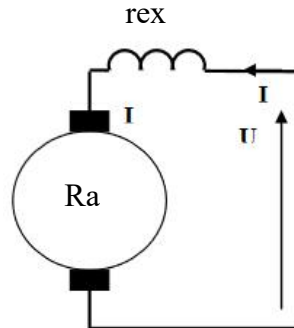


Figure IV-20. Moteur à Courant continu à excitation série

La loi des mailles donne:

$$U = E_c + (R_a + r_{ex}). I_a \tag{IV+-19}$$

A vide , I_a est nul on aura donc :

$$U = E_c \quad \text{et} \quad \Phi = 0$$

Or $\Omega = \frac{U}{K.\Phi}$ donc la vitesse va tendre à l'infini ce qui se traduit par un emballement du moteur.

Sa vitesse est très variable et il s'emballe à vide son couple de démarrage est élevé. Il peut atteindre de grande vitesse à faible charge et absorbe très bien les surcharges passagères, son couple est indépendant de la tension.

3-3-4-Le moteur à excitation composée

Le moteur est présenté sur la figure IV-21.

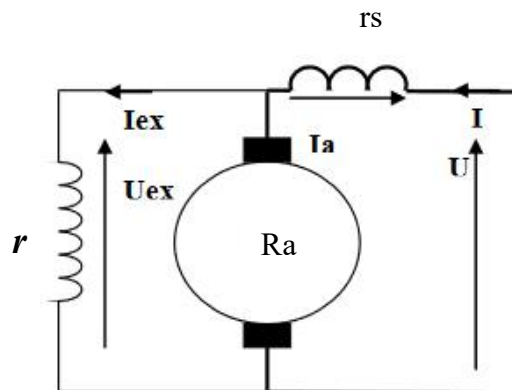


Figure IV-21. Moteur à courant continu à excitation composée (compound)

Selon que l'excitation soit à courte ou à longue dérivation, nous aurons les équations suivantes respectivement:

$$U = E_c + r_s.I + R_a.I = (r_{hex} + r).i \tag{IV-20}$$

$$U = E_c + (r_s + R_a).I = (r_{hex} + r).i \tag{IV-21}$$

Son couple de démarrage est plus élevé que celui du moteur shunt et croissant très rapidement avec le courant. Sa vitesse pratiquement constante aux charges normales et très rapidement décroissante lorsque le couple résistant augmente. Il ne s'emballe pas à vide ou aux faibles charges comme le moteur série.

3-4- Caractéristiques des Moteurs à Courant Continu

Pour pouvoir comparer toutes les caractéristiques des 4 types de moteurs, nous avons préféré les rassembler dans le même graphe.

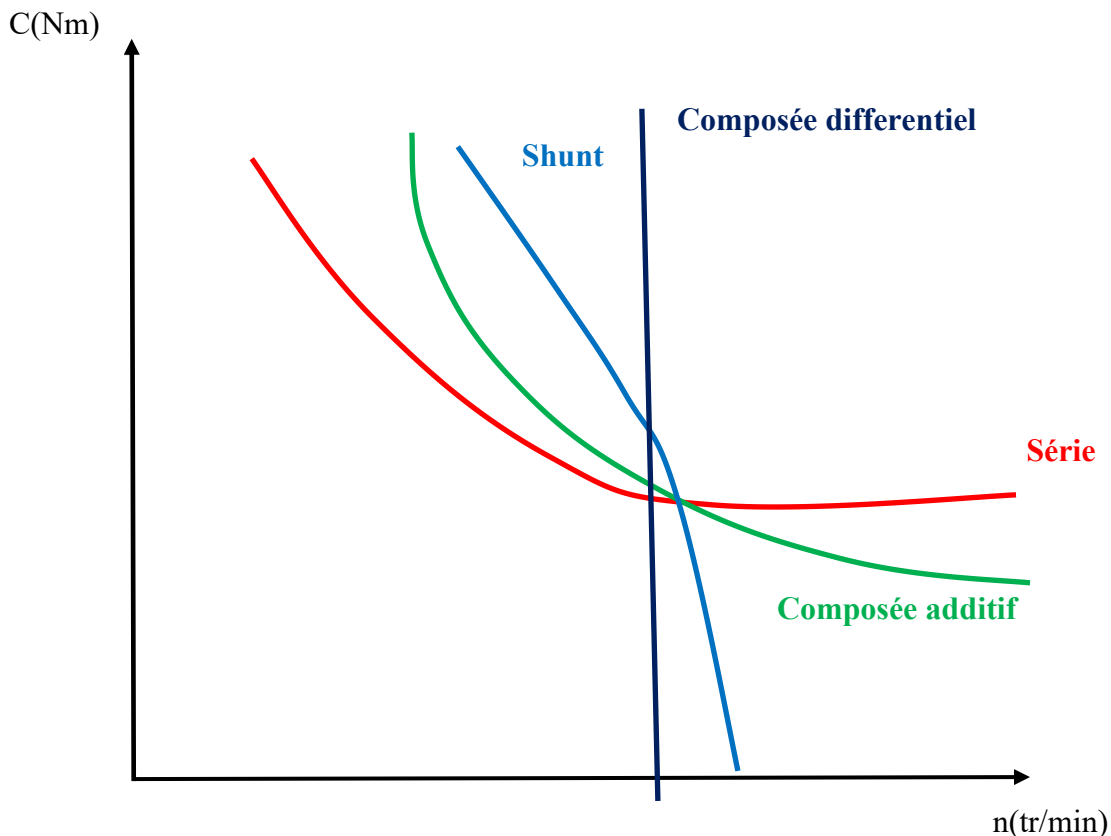


Figure IV-22. Caractéristiques mécaniques des moteurs à courant continu

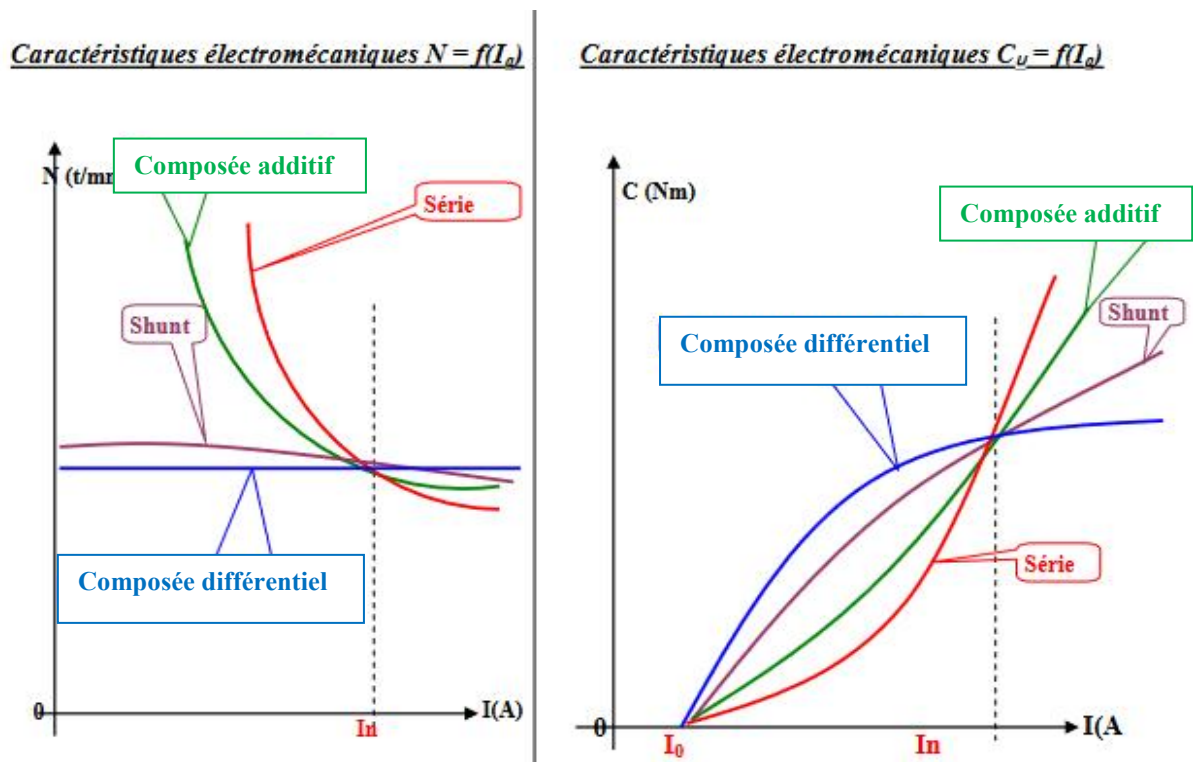


Figure IV-23. Caractéristiques électromécaniques des Moteurs à courant continu

3-5-Bilan des puissances du Moteur à courant continu

Les différentes pertes de la machine à courant continu que ce soit pour la génératrice ou bien le moteur restent les mêmes et ont la même origine.

Pertes dans le fer

Elles sont dues aux phénomènes d’hystérésis et de courants de Foucault dans la masse du circuit ferromagnétique. Elles dépendent du champ magnétique et de la vitesse de rotation. On les appelle aussi pertes magnétiques.

Pertes mécaniques

Elles sont produites par la ventilation et les divers frottements (frottements de l’arbre dans les paliers, frottements des balais sur le collecteur). Ces pertes sont à peu près indépendantes de la charge, donc de I ; par contre elles dépendent de la vitesse. Elles sont donc les mêmes à vide qu’en charge sauf pour le moteur série dont la vitesse varie beaucoup.

Pertes par effet joule dans l’induit

Elles sont dues à l’échauffement dans le bobinage du rotor , elle sont variables et dépendent de la charge.

Pertes par effet joule dans l'inducteur

Elles sont dues à l'échauffement dans le bobinage du stator, elles sont quasiment constantes sauf pour le moteur série.

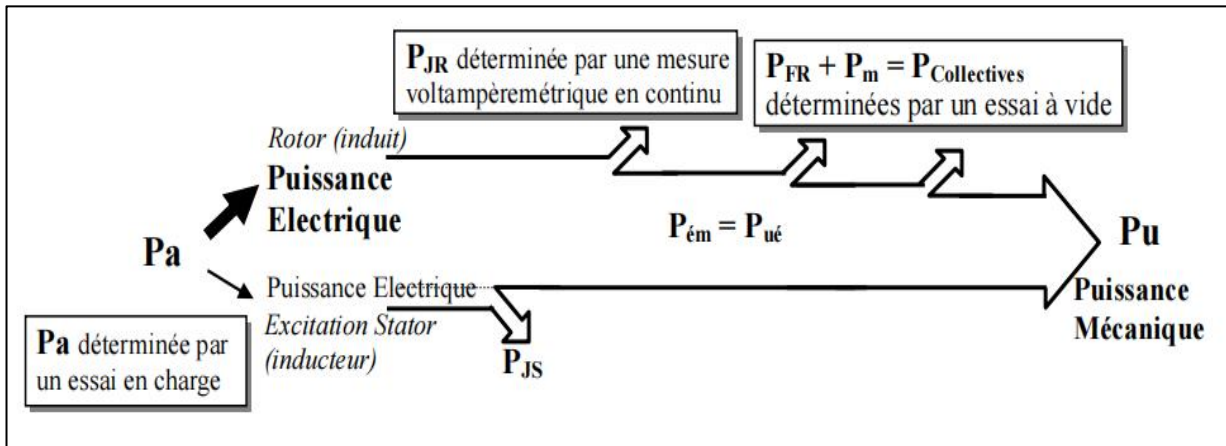


Figure IV-24. Bilan des pertes Moteur à Courant Continu

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \Sigma \Delta P} \tag{IV-21}$$

Pour le calcul du couple utile T_u :

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega} \tag{IV-22}$$

3-6-Problème du démarrage

L'intensité du courant de démarrage est très importante et peut atteindre 10 à 20 fois le courant nominal. Elle ne peut être acceptée ni par le réseau ni par la machine. Pour limiter cette intensité à une valeur acceptable, au moment du démarrage, on place en série avec l'induit, une résistance R_{hd} que l'on élimine au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse. La pointe du courant acceptée sera: $I_d = U / (r + R_{hd})$.

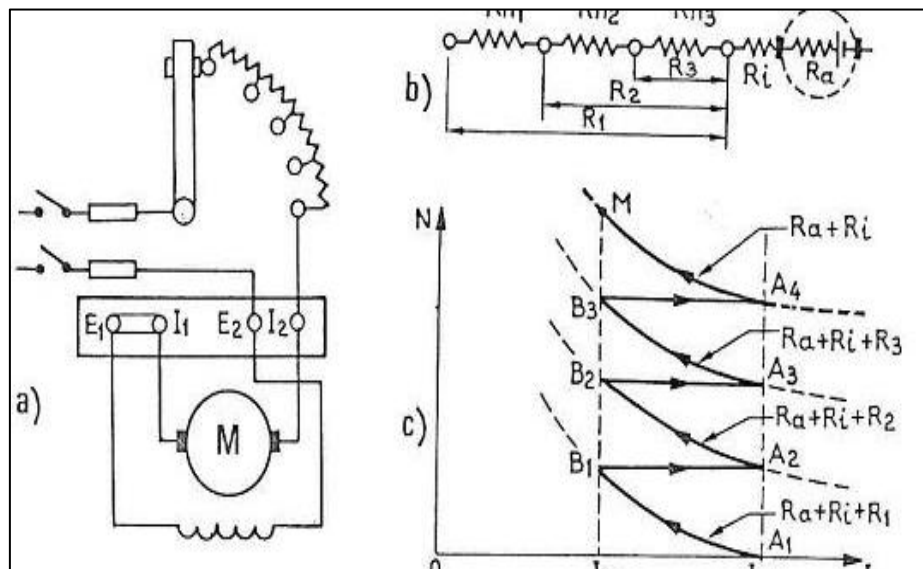


Figure IV-25. Démarrage du Moteur à courant continu

CONCLUSION

La machine à courant continu compte parmi les premières machines inventées par les ingénieurs électrotechniciens. Mais la tendance de l'industrie à utiliser le courant alternatif l'a mise à l'écart. Ses applications ce sont restreintes à l'utilisation comme moteur et spécialement le moteur shunt. Ce dernier présente le plus d'avantages parmi les autres types, notamment grâce à la facilité de réglage de sa vitesse et sa stabilité.

CONCLUSION

Les dispositifs électromagnétiques sont nombreux, et ceux qui permettent la conversion électromécanique sont très importants dans le domaine de l'électrotechnique. Parmi ces dispositifs, les machines électriques occupent une place de choix, et spécialement les machines tournantes. Qu'elles soient à courant continu ou à courant alternatif, elles ont pratiquement le même principe de fonctionnement. Elles sont basées sur la variation du champs magnétique et le principe de l'induction électromagnétique. En apparence, leur technologie et leur construction semble quasiment pareille, mais certaines différences sont nécessaires pour permettre un bon fonctionnement.

Les applications des machines électriques sont omniprésentes et essentielles dans la société moderne. Elles permettent de transformer l'énergie de manière efficace et versatile, répondant ainsi aux besoins croissants des industries, des transports, de l'habitat et des énergies renouvelables.

Les moteurs électriques, générateurs et autres dispositifs associés contribuent à l'amélioration de la productivité industrielle, à la mobilité durable, et à l'optimisation de la consommation énergétique. L'innovation continue dans le domaine des machines électriques, notamment en matière d'efficacité énergétique et de développement de nouvelles technologies (comme les véhicules électriques et les systèmes de production d'énergie verte), laisse entrevoir un avenir où ces machines joueront un rôle encore plus central dans la transition énergétique et le progrès technologique.

En résumé, les machines électriques sont des instruments indispensables pour un avenir plus efficient et durable.

RECUEIL D'EXERCICES CORRIGÉS

I- EXERCICES ALTERNATEUR SYNCHRONES

Exercice I-1

Un alternateur synchrone monophasé de 50 KVA, 230 V, 50 Hz a une résistance d'enroulement statorique de 0.012Ω et une réactance synchrone de 0.05Ω . (L'alternateur étant supposé non saturé)

Quelle est la F.E.M induite pour le courant nominal et a) $\cos\varphi=1$ b) $\cos\varphi=0.866$ AR et c) $\cos\varphi=0.866$ AV.

Exercice I-2

Un alternateur triphasé couplé en étoile possède les données suivantes :

- 50 kVA 440V 60HZ.

A vide pour une tension composée de 440 V le courant d'excitation est de 7A.

En court circuit l'alternateur délivre un courant nominal pour un courant d'excitation de 5.5A.

1-Donner le schéma équivalent par phase de cet alternateur en indiquant toutes les grandeurs.

2-Calculer la réactance synchrone par phase (la résistance d'enroulement supposée négligeable).

En charge cet alternateur alimente une charge de 40kW avec un facteur de puissance de 0.85 AR a 440V.

3-Quel est le courant d'excitation dans ce cas (la machine étant non saturée).

Exercice I-3

On considère un alternateur triphasé, branché en étoile de fréquence 50Hz et de vitesse de rotation 1500 tr/min. la machine a donné aux essais les valeurs suivantes :

- La caractéristique à vide à 1500 tr/min.

I_{exc} (A)	2	4	6	8	12	14
E(V)	952	1853	2477	2892	3516	3706

- La caractéristique en court-circuit qui passe par le point $I_{exc}=6$ A, $I_{cc}=225$ A
- La résistance de l'induit par phase $R=0.2 \Omega$
 - a- Déterminer l'impédance interne et la réactance synchrone par phase
 - b- Représenter le diagramme vectoriel pour les valeurs suivantes : $I_{exc}=14$ A $I_n=150$ A, $\cos\varphi=0.8$ AR
 - c- En déduire la chute de tension

Exercice I-4

La plaque signalétique d'un alternateur triphasé donne les indications suivantes :

50 kVA ; 220 V / 380 V ; 50 Hz ; 6 pôles

La caractéristique à vide à la vitesse de synchronisme (tensions simples) est :

I_e (A)	0	17	37	38	48
E (V)	0	139	260	265	310

1. Calculer la vitesse de synchronisme et la valeur efficace du courant nominal.
2. On obtient le courant nominal sous tension nominale dans une charge résistive lorsque le courant d'excitation I_e est de 37 A. On néglige les résistances statoriques. Calculer la réactance synchrone de chaque phase et le courant inducteur pour obtenir en court circuit le courant nominal.

3. L'alternateur alimente sous 380 V, cinq (5) moteurs asynchrones triphasés de puissance 5 kW, de rendement 0,85 et de facteur de puissance 0,8. et 180 lampes de 100 W – 220 V réparties régulièrement sur les trois phases.
Calculer le courant *de charge* correspondant et en déduire le courant d'excitation.

Exercice I-5

Soit un alternateur triphasé dont la résistance de l'enroulement est négligeable. La réactance X de l'induit est égale à 1,6 W pour une fréquence de 50 Hz. La caractéristique à vide en fonctionnement non saturé, pour une fréquence de rotation de 750 tr/min est donnée par :

$$E(V) = 120 i(A) \text{ avec } i \text{ le courant d'excitation.}$$

L'alternateur alimente une charge résistive traversée par un courant d'intensité efficace $I = 30 \text{ A}$. La tension U aux bornes de la résistance a pour valeur efficace $U = 110 \text{ V}$ et pour fréquence $f = 50 \text{ Hz}$.

- 1- Calculer le nombre de paires de pôles de l'alternateur sachant qu'il doit tourner à 750 tr/min.
- 2- donner la valeur efficace de la fem de l'alternateur E .
- 3- En déduire la valeur de l'intensité i du courant d'excitation.
- 4- Quelle est la résistance R de la charge ? En déduire la puissance utile fournie par l'alternateur à la charge résistive.
- 5- Dans les conditions de l'essai, les pertes de l'alternateur sont évaluées à 450 W. Calculer le rendement.

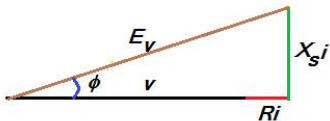
On modifie la vitesse de rotation : 500 tr/min.

Calculer f' , E' , X' , U' et I' les nouvelles valeurs de f , E , X , U et I .

CORRIGÉS

Exercice I-1

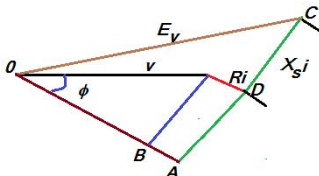
Pour $\cos\varphi = 1$



$$E_v^2 = (V \cos(\varphi) + RI)^2 + (X_s I)^2$$

$$E_v = 232.86V$$

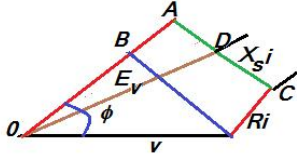
Pour $\cos\varphi = 0.866$ AR



$$E_v^2 = (V \cos(\varphi) + RI)^2 + (V \sin(\varphi) + X_s I)^2$$

$$E_v = 237.82V$$

Pour $\cos\varphi = 0.866$ AV



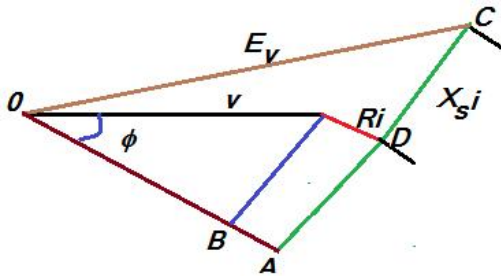
$$E_v^2 = (V \cos(\varphi) + RI)^2 + (V \sin(\varphi) - X_s I)^2$$

$$E_v = 225.84V$$

Exercice I-2

- 1) Schéma de Behn-Eschenburg déjà abordé dans le cours.
- 2) $Z_s = X_s = E_v / I_{cc}$ pour le même courant d'excitation (E_v par phase = $440/\sqrt{3} = 254$ V)
 On cherche le courant de court circuit pour $i_{ex} = 0.7$ A ($i_{cc} = f(i_{ex})$ étant une droite)
 Pour $i_{ex} = 5.5$ A $\rightarrow I_{cc1} = I_n = S/\sqrt{3} \cdot U = 50 \cdot 10^3 / \sqrt{3} \cdot 440 = 65.6$ A.
 (La règle de 3) Pour $i_{ex} = 7$ A $\rightarrow I_{cc2} = (7/5.5) I_n = (7/5.5) 65.5 = 83.5$ A.
 D'où $X_s = E_v / I_{cc} = 254 / 83.5 = 3.04 \Omega$

- 2) Pour calculer le courant d'excitation il faut calculer E.
 D'après le diagramme vectoriel



$$E = \sqrt{(V \sin \varphi + XI)^2 + (V \cos \varphi)^2}$$

Avec $I = P/\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi = 40 \cdot 10^3 / \sqrt{3} \cdot 440 \cdot 0.85 = 61.85$ A
 $E = 387$ V

Puisque le système est linéaire (non saturé), on peut appliquer la règle de trois):

Pour $440V/\sqrt{3} = 254$ V $\rightarrow 7$ A donc pour $387V \rightarrow i_{ex} = (387/254) \cdot 7 = 10.66$ A

$i_{ex} = 10.66$ A .

Exercice I-3

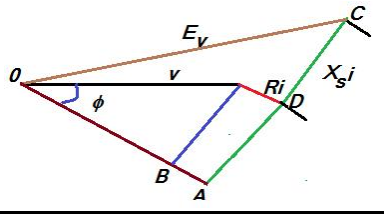
$$E_v = \frac{2477}{\sqrt{3}} = 1430.09$$

$$Z_s = \frac{E_{cc}}{I_{cc}} = \frac{1430.09}{225} = 6,356$$

$$Z_s = \sqrt{R^2 + X_s^2} \Rightarrow X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2}$$

$$X_s = \sqrt{(6.356)^2 - (0.2)^2} = 6.352 \Omega$$

$$i_{ex} = 14A \rightarrow U_v = 3706V \rightarrow E_v = \frac{U_v}{\sqrt{3}} = 2139,66V$$



$$E_v^2 = (V \cos(\varphi) + RI)^2 + (V \sin(\varphi) + X_s I)^2$$

$$E_v^2 = (V \cos(\varphi))^2 + (RI)^2 + 2RIV \cos(\varphi) + (V \sin(\varphi))^2 + (X_s I)^2 + 2X_s IV \sin(\varphi)$$

$$E_v^2 = V^2 + 2VI(R \cos(\varphi) + X_s \sin(\varphi)) + Z_s^2 I^2$$

$$V^2 + 2VI(R \cos(\varphi) + X_s \sin(\varphi)) + Z_s^2 I^2 - E_v^2 = 0$$

$V^2 + 1191.4V - 3669200 = 0$ résolution d'une équation du 2eme ordre \rightarrow 2 solutions dont une seule valable.

$$V = 1410.3V$$

L'autre solution est négative.

$$\Delta V = E_v - V = 2139,66 - 1410.3 = 729.36V \approx 730V$$

Exercice I-4

1/ Vitesse de synchronisme $n = 60 \cdot 50 / 3 \rightarrow n = 1000 \text{tr/min}$.

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \rightarrow I = S / (\sqrt{3} \cdot U) = 75.96A$$

2/-D'après le schéma équivalent d'un alternateur non saturé

$X_s = E_v / I_{cc}$ pour le même courant d'excitation.

$$X_s = 260 / 75.96 = 3.43 \Omega$$

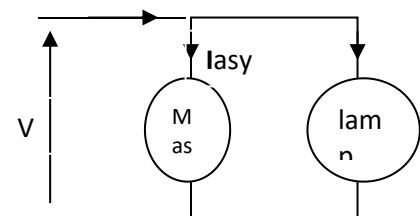
3/ Chaque moteur absorbe un courant $I = P_{abs} / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi) \rightarrow$ les 5 moteurs:

$$I_{asyn} = 5 \cdot (P_u / \eta) / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi) = 55.85A \text{ avec } \cos \varphi = 0.8$$

Par phase nous avons $180 / 3 = 60$ lampes.

Donc le courant absorbé $I_{lamp} = 60 \cdot P / V = 27.27A$ avec $\cos \varphi = 1$

Le schéma équivalent par phase est comme suit



Le courant total est la somme vectorielle des deux courants

Si on considère la machine non saturée on calcule E par la loi des maille pour le circuit équivalent et on en déduit Ie.

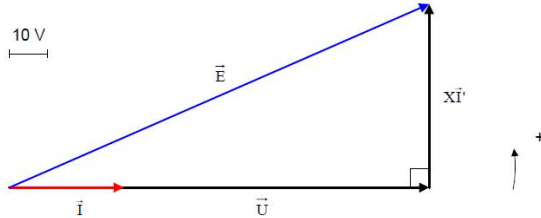
Exercice I-5

1- Le nombre de paires de pôles de l'alternateur:

$$p = 50 \cdot 60 / (750) = 4$$

2- La valeur efficace de la fem.

Construire le diagramme vectoriel de Behn-Eschenburg :



Théorème de Pythagore :

$$E = \sqrt{U^2 + (XI)^2} = 120 \text{ V}$$

3- En déduire la valeur de l'intensité i du courant d'excitation.

$$i = 120 / 120 = 1 \text{ A}$$

4- La résistance R de la charge et la puissance utile fournie

$$R = U / I = 110 / 30 = 3,67 \ \Omega ;$$

$$P_u = 3 \cdot RI^2 = 9,900 \text{ kW}$$

5- Calculer le rendement.

$$\eta = P_u / (P_u + \Delta P) = 9900 / (9900 + 450) = 95,6 \%$$

On modifie la vitesse de rotation : 500 tr/min. On note f' , E' , X' , U' et I' les nouvelles valeurs de f , E , X , U et I . Le courant d'excitation de l'alternateur est inchangé : $i' = i$.

6- Calculer f' . En déduire X' .

$$f' = p \cdot n s' / 60 = 4 \times (500 / 60) = 33,3 \text{ Hz}$$

$$X = L\omega \text{ et } X' = L\omega' \text{ donc : } X' = X f' / f = 1,07 \ \Omega$$

7- Calculer E' . En déduire I' le courant dans la charge et U' la tension aux bornes de l'alternateur.

L'excitation est constante donc la fem est proportionnelle à la vitesse de rotation.

$$E' = K\eta' \text{ et } E = K\eta$$

$$E' = E \times \eta' / \eta = 120 \cdot 500 / 750 = 80 \text{ V}$$

$$E' = \sqrt{U'^2 + (X'I')^2}$$

$$= \sqrt{(RI')^2 + (X'I')^2} = \sqrt{R^2 + X'^2} \cdot I'$$

$$I' = \frac{E'}{\sqrt{R^2 + X'^2}} = 20,95 \text{ A}$$

$$U' = RI' = 76,8 \text{ V}$$

8-Quel doit être le courant d'excitation pour avoir $U' = 110 \text{ V}$?
 $E=120 \cdot i$ pour $n=750 \text{ tr/mn}$, pour $n=500 \text{ tr/mn}$ la f.e.m est : $E'=80 \cdot i$

$$U' = R \frac{E'}{\sqrt{R^2 + X'^2}}$$

$$i = \frac{U' \sqrt{R^2 + X'^2}}{80 \cdot R} = 1,43 \text{ A}$$

II - EXERCICES MOTEUR SYNCHROME

Exercice II-1

Un moteur synchrone triphasé de 600 V, connecté en étoile fournit une puissance de 38 KW. A une résistance statorique par phase de 0.2Ω et une réactance synchrone par phase de 4Ω . Calculer :

- 1- La F.C.E.M induite par phase si le moteur travail en charge nominale avec un rendement de 92% et un $\cos\varphi = 0.8$ AV.

Exercice II-2

Un moteur synchrone triphasé connecté en étoile de 1000 KVA, 60 Hz, 2300 V et 1800 tr/mn, a une résistance statorique par phase négligeable et une réactance synchrone par phase de 1.65Ω . Calculer :

- La F.C.E.M induite par phase si le moteur absorbe un courant avec un facteur de puissance en retard et si l'angle de charge est de 5° (mécanique).
- La puissance absorbée du réseau.
- L'angle de charge quand le moteur développe une puissance électromagnétique de 500 KW et une F.C.E.M de 2000 V à la tension nominale.
- Tracer le diagramme vectoriel et déterminer si le moteur absorbe un courant en retard ou en avance.

Exercice II-3

Un moteur synchrone triphasé de 660 V, connecté en étoile absorbe une puissance de 50 KW avec un $\cos\varphi = 0.8$ AR. A une résistance statorique par phase négligeable et une réactance synchrone par phase de 3Ω . Calculer :

- 1- Le courant et le facteur de puissance quand la F.C.E.M induite par phase est augmentée de 50% pour la même charge entraînée.

Exercice II-4

Un moteur synchrone triphasé de 6 KV, connecté en étoile absorbe une puissance de 630 KW avec un $\cos\varphi = 0.8$ AR. A une résistance statorique par phase négligeable et une réactance synchrone par phase de 59.2Ω .

Dans quel rapport faut-il varier le courant d'excitation pour que la puissance absorbée reste la même avec un $\cos\varphi = 0.9$ AV et $U = C^{te}$?

CORRIGÉS

Exercice II-1

$$P_a = \frac{P_u}{\eta} = \frac{38 \cdot 10^3}{0.92} = 41304.34 \text{ kW}$$

$$I = \frac{P_a}{\sqrt{3} U \cos(\varphi)} = \frac{41304.34}{\sqrt{3} \cdot 600 \cdot 0.8} = 49.68$$

$$v = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{600}{\sqrt{3}} = 346.41 \text{ V}$$

$$X_s I = 4 \cdot 49.68 = 198.72 \text{ V}$$

$$R_s I = 0.2 \cdot 49.68 = 9.93 \text{ V}$$

Triangle OAB

$$E_v = \sqrt{(OA)^2 + (AB)^2}$$

Triangle OCD

$$OC = V \cos(\varphi) = 277.128$$

$$CD = V \sin(\varphi) = 207.846$$

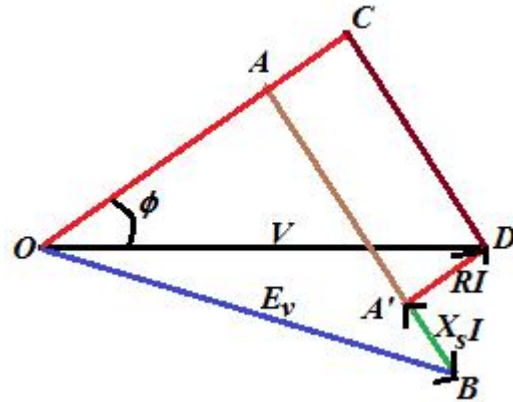
$$OA = OC - RI = 267.198$$

$$AA' = CD$$

$$A'B = X_s I$$

$$AB = AA' + A'B = 406.566$$

$$E_v = 486.50 V$$



Exercice II-2

$$n = \frac{60 f}{p} \Rightarrow p = \frac{60 f}{n} = \frac{60 \cdot 60}{1800} = 2$$

$$\theta_{el} = p \theta_{me} = 2 \times 5 = 10^\circ$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{100010^3}{\sqrt{3} 2300} = 251.02 A$$

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1327.91 V$$

$$X_s I = 1.65 \cdot 251.02 = 414.183 V$$

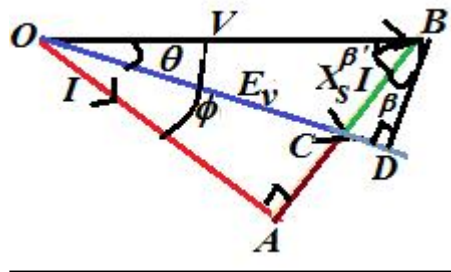
Triangle ODB

$$E_v = OC$$

$$BD = V \sin(\theta)$$

$$BD = X_s I \cos(\beta)$$

$$V \sin(\theta) = X_s I \cos(\beta) \Rightarrow \cos(\beta) = \frac{V \sin(\theta)}{X_s I}$$



$\cos(\beta) = \frac{1327.9 \cdot 0.1}{414.183} = 0.55$ $\sin(\beta) = 0.83$ $OD = V \cos(\theta) = 1307.72$ $CD = X_s I \sin(\beta)$ $E_v = OD - CD = 936.66 V$	$\theta + \beta + \beta' + 90 = 180 \Rightarrow \beta' = 90 - \theta - \beta$ $\varphi + \beta' + 90 = 180 \Rightarrow \varphi = 90 - \beta'$ $\varphi = \theta + \beta$ $\theta = 10^\circ, \beta = 56.633^\circ, \varphi = 66.633^\circ, \cos(\varphi) = 0.396$
--	---

$$P = \sqrt{3} U I \cos(\varphi) = \sqrt{3} \cdot 2300 \cdot 251.02 \cdot 0.396 = 395997.07 W$$

$$P_{em} = \frac{mVE_v}{X_s} \sin(\theta') \Rightarrow \sin(\theta') = \frac{P_{em} X_s}{mVE_v} = \frac{500 \cdot 10^3 \cdot 1.65}{3 \cdot 1327.9 \cdot 2000} = 0.1035$$

$$\theta' = 5.94^\circ$$

Exercice II-3

$$I = \frac{P_a}{\sqrt{3} U \cos(\varphi)} = \frac{5010^3}{\sqrt{3} \cdot 660 \cdot 0.8} = 54.6733 \text{ A}$$

$$V = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381.0512 \text{ V}$$

$$X_s I = 3 \cdot 54.6733 = 164.02 \text{ V}$$

Triangle OAC (figure I)

$$E_v = \sqrt{(OA)^2 + (AC)^2}$$

$$OA = V \cos(\varphi)$$

$$AB = V \sin(\varphi)$$

$$AC = AB - BC = V \sin(\varphi) - X_s I$$

$$E_v = \sqrt{(V \cos(\varphi))^2 + (V \sin(\varphi) - X_s I)^2} = 311.6128 \text{ V}$$

$$E'_v = 1.5 E_v = 467.4192 \text{ V}$$

Triangle OAB (figure I)

$$\delta + \varphi + 90 = 180 \Rightarrow \delta = 90 - \varphi$$

Triangle CEB (figure I)

$$\beta + \delta + 90 = 180 \Rightarrow \beta = 90 - \delta$$

$$\beta = 90 - (90 - \varphi) \Rightarrow \beta = \varphi$$

$$EC = X_s I \cos(\varphi)$$

Triangle OEC (figure I)

$$EC = E_v \sin(\theta)$$

$$E_v \sin(\theta) = X_s I \cos(\varphi) \Rightarrow \sin(\theta) = \frac{X_s I \cos(\varphi)}{E_v}$$

$$\frac{mVE'_v}{X_s} \sin(\theta') = \frac{mVE_v}{X_s} \sin(\theta) \Rightarrow E'_v \sin(\theta') = E_v \sin(\theta)$$

$$\sin(\theta') = \frac{E_v}{E'_v} \sin(\theta) = \frac{E_v}{E'_v} \frac{X_s I \cos(\varphi)}{E_v}$$

$$\sin(\theta') = \frac{X_s I \cos(\varphi)}{E'_v} = 0.2807$$

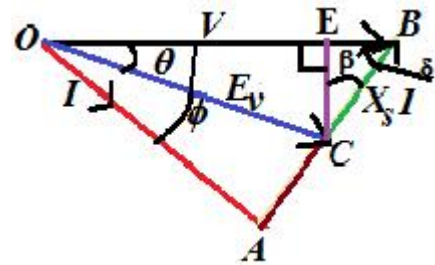


Figure I

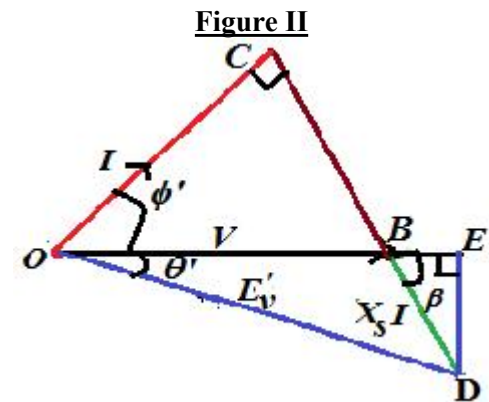


Figure II

Triangle OED (figure II)

$$OE = E'_v \cos(\theta')$$

$$ED = E'_v \sin(\theta')$$

$$BE = OE - V = E'_v \cos(\theta') - V$$

Triangle BED (figure II)

$$(X_s I')^2 = ED^2 + BE^2$$

$$X_s I' = \sqrt{(E'_v \cos(\theta') - V)^2 + (E'_v \sin(\theta'))^2}$$

$$I' = \frac{\sqrt{(E'_v \cos(\theta') - V)^2 + (E'_v \sin(\theta'))^2}}{X_s} = 49.1976A$$

$$I \cos(\varphi) = I' \cos(\varphi') \Rightarrow \cos(\varphi') = \frac{I \cos(\varphi)}{I'} = 0.889$$

Exercice II-4

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos(\varphi)} = \frac{63010^3}{\sqrt{3} 6000 0.8} = 75.7772A$$

$$v = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464.1V$$

Triangle OAC

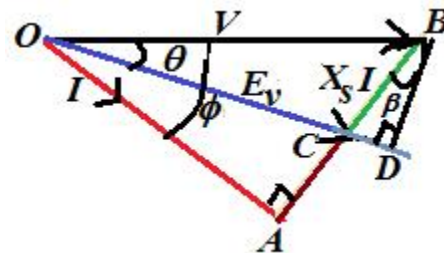
$$E_v = \sqrt{(OA)^2 + (AC)^2}$$

$$OA = V \cos(\varphi)$$

$$AB = V \sin(\varphi)$$

$$AC = AB - CB = V \sin(\varphi) - X_s I$$

$$E_v = \sqrt{(V \cos(\varphi))^2 + (V \sin(\varphi) - X_s I)^2} = 3671.01V$$



Triangle OCD

$$E'_v = \sqrt{(OC)^2 + (CD)^2}$$

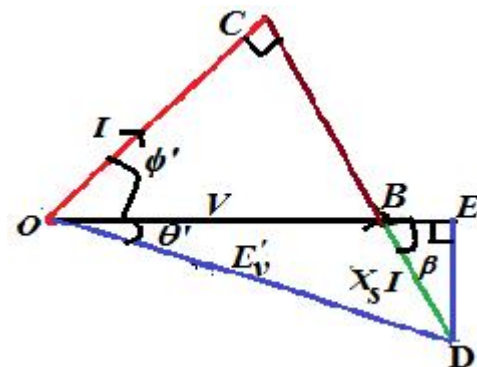
Triangle OCB

$$OC = V \cos(\varphi')$$

$$CB = V \sin(\varphi')$$

$$CD = CB + BD = V \sin(\varphi') + X_s I'$$

Puissance absorbée reste la même implique :



$$I \cos(\varphi) = I' \cos(\varphi') \Rightarrow I' = \frac{I \cos(\varphi)}{\cos(\varphi')} = 67.36 \text{ A}$$

$$E'_v = \sqrt{(V \cos(\varphi'))^2 + (V \sin(\varphi') + X_s I')^2} = 6320.04 \text{ V}$$

$$E_v = K i_{ex1}, E'_v = K i_{ex2}$$

$$\frac{E'_v}{E_v} = \frac{i_{ex2}}{i_{ex1}} = 1.72$$

III - EXERCICES MACHINES À COURANT CONTINU

Exercice III-1

Un moteur à excitation indépendante alimenté sous 220 V possède une résistance d'induit de $0,8 \Omega$.
A la charge nominale, l'induit consomme un courant de 15 A.

- 1- Calculer la f.c.e.m. E_c du moteur.
- 2- La machine est maintenant utilisée en génératrice (dynamo).
- 3- Elle débite un courant de 10 A sous 220 V. Calculer la Fem dans ce cas.

Exercice III-2

Une génératrice à excitation indépendante fournit une fem de 220 V pour un courant d'excitation de 3,5 A.
La résistance de l'induit est de $90 \text{ m}\Omega$.

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

Exercice III-3

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

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

- 1- Calculer la puissance mécanique consommée au fonctionnement nominal.
- 2- Calculer la puissance consommée par l'excitation.
- 3- Calculer la puissance utile.
- 4- En déduire le rendement nominal.

Exercice III-4

Une génératrice à excitation indépendante délivre une fem constante de 210 V pour un courant inducteur de 2 A.

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

Les pertes « constantes » sont de 400 W.

Pour un débit de 45 A, calculer :

1. • La tension d'induit U.
2. • La puissance utile P_u .
3. • Les pertes Joule induit et inducteur.
4. • La puissance absorbée P_a .
5. • Le rendement η .

Exercice III-5

Un moteur à courant continu à excitation indépendante a une résistance d'induit $R = 0,8 \Omega$. Il fonctionne sous une tension d'induit égale à $V = 130 \text{ V}$. A vide l'intensité dans l'induit est $I_0 = 1,2 \text{ A}$. En charge, l'intensité dans l'induit est $I = 25 \text{ A}$ et la fréquence de rotation $n = 1200 \text{ tr/min}$.

- 1- Calculer la fem en charge .
- 2- Calculer le couple électromagnétique .
- 3- Calculer la fréquence de rotation à vide .

Exercice III-6

Un moteur à excitation indépendante fonctionne sous une tension d'induit $V = 230 \text{ V}$. En fonctionnement nominal l'induit absorbe un courant de 40 A . On a mesuré les résistances : pour l'induit $R = 0,3 \Omega$, pour l'inducteur $r = 120 \Omega$.

Un essai à vide à la fréquence nominale a permis de mesurer sur l'induit $V_0 = 225 \text{ V}$ et $I_0 = 1,2 \text{ A}$. L'inducteur est alimenté sous une tension égale à 140 V .

1- Déterminer le rendement du moteur.

Exercice III-7

La force électromotrice d'une génératrice à excitation indépendante est $E = 240 \text{ V}$ lorsque le courant d'excitation est $I_e = 4 \text{ A}$.

Les résistances des enroulements sont : Pour l'induit $R = 0,1 \Omega$ et pour l'inducteur $r = 30 \Omega$

Les pertes collectives ou pertes constantes sont $P_c = 450 \text{ W}$

Lorsque la génératrice fournit un courant de 80 A , calculer :

- 1- La tension aux bornes de l'induit.
- 2- La puissance utile.
- 3- Les pertes par effet Joule dans l'induit.
- 4- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur.
- 5- La puissance absorbée.
- 6- Le rendement.

CORRIGÉS

Exercice III-1

1- La loi d'Ohm généralisée au moteur $V = E' + R.I$ donne $E' = V - R.I = 130 - 0,8 \times 25$
 $E' = 110 \text{ V}$

2- Le couple électromagnétique est donné par la relation $T_{em} = E'.I / \Omega$ avec $\Omega = 2\pi n = 2\pi \times 1200/60$
 $T_{em} = 110 \times 25 / 40\pi$ $T_{em} = 21,9 \text{ Nm}$

3- La fréquence de rotation est proportionnelle à la fém : $110 \text{ V} \quad 1200 \text{ tr/min}$
A vide $E' = V - R.I_0 = 130 - 0,8 \times 1,2 = 129 \text{ V}$; $129 \text{ V} \quad 129 \times 1200 / 110 \quad n = 1407 \text{ tr/min}$

Exercice III-2

Le rendement du moteur : $\eta = P_u / P_a$ avec $P_u = P_a - \text{pertes}$

P_a est la puissance absorbée par l'induit et par l'inducteur : $P_a = V.I + V_e.I_e$ (avec $I_e = V_e / r$)

$P_a = 230 \times 40 + 140 \times 140 / 120$ $P_a = 9363 \text{ W}$

$P_u = P_a - \text{pertes} = P_a - P_{js} - P_{jr} - P_{fr} - P_m$ avec $P_{fr} + P_m = P_c$ pertes collectives mesurées à vide

A vide $V_0 . I_0 = R.I_0^2 + P_c$ $P_c = V_0 . I_0 - R . I_0^2 = 225 \times 1,2 - 0,3 \times 1,2^2$ $P_c = 270 \text{ W}$

Et $P_{js} = V_e \times I_e = 140^2 / 120$ $P_{js} = 163 \text{ W}$

Et $P_{jr} = R . I^2 = 0,3 \times 40^2$ $P_{jr} = 480 \text{ W}$ $P_u = 9363 - 163 - 480 - 270$ $P_u = 8450 \text{ W}$

$\eta = P_u / P_a = 8450 / 9363$ $\eta = 90 \%$

Exercice III-3

1- La tension aux bornes de l'induit :

Elle est donnée par la loi d'Ohm généralisée : $V = E - R.I = 240 - 0,1 \times 80$ $V = 232 \text{ V}$

2- La puissance utile :

La puissance utile est une puissance électrique continue : $P_u = V.I = 232 \times 80$ $P_u = 18560$ W

3- Les pertes par effet Joule dans l'induit :

Elle sont donnée par la loi de Joule dans le rotor: $P_{jr} = R \cdot I^2 = 0,1 \times 80^2$ $P_{jr} = 640$ W

4- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :

Elle sont donnée par la loi de Joule dans le stator: $P_{js} = r \cdot I_e^2 = 30 \times 4^2$ $P_{js} = 480$ W

5- La puissance absorbée :

$P_a = P_u + \text{pertes} = P_u + P_{js} + P_{jr} + P_c = 18560 + 640 + 480 + 450$ $P_a = 20130$ W

6- Le rendement :

$\eta = P_u / P_a = 18560 / 20130$ $\eta = 92,2$ %

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L.Lasne, Exercices et problèmes d'électrotechnique, DUNOD Paris, Science sup. 2005.
- [2] M. Kostenko, L. Piotrovski. Machines Electriques Tome I. Machines a courant continu et transformateurs. Edition de Moscou. Techniques soviétiques. 1969.
- [3] M. Kostenko, L. Piotrovski, Machines Électriques Tome II, Machines a courant alternatif. Edition de Moscou, Techniques soviétiques, 1969.
- [4] C. Chevassu., Machines électriques, cours et problèmes, ENSM,2012.
- [5] R. Perret, A.Foggia, E.Rullière, P.Tixador. Entraînements électriques 2, machines électriques, 2007.
- [6] T.Wildi, G.sybille, électrotechnique 4eme edition, De boek. 1996.
- [7] J.P. Caron, J.P. Hautier, Modélisation et commande de la machine asynchrone, Technip, 1995.
- [8] G. Grellet, G. Clerc, Actionneurs électriques, Principes, Modèles, Commandes, Eyrolles, 1996.
- [9] J. Lesenne, F. Notelet,G. Séguier, Introduction à l'électrotechnique appro fondie, Technique et Documentation, 1981.
- [10] Paul C.Krause, Oleg Wasyzczuk, Scott S, Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, John Wiley, Second Edition, 2010.
- [11] PS Bimbhra, Generalized Theory of Electrical Machines, Khanna Publishers, 2008.
- [12] A.E, Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, and Stephan D, Umanx, Electric Machinery, Tata McGraw Hill, 5th Edition, 1992.