

Département de génie mécanique



Faculté des sciences appliquées

Université Ibn Khaldoun de Tiaret



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

SCIENTIFIQUE

جامعة ابن خلدون – تيارت

Université Ibn Khaldoun de Tiaret (U.I.K.T)

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

Polycopié Pédagogique En :

Electrotechnique Appliquée

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Préparé par : Dr. BEY Mohamed

Maitre de Conférence B

Année universitaire : 2022 / 2023

Table des matières

Préface

CHAPITRE I :

RAPPELS SUR LA MAGNETOSTATIQUE ET LES CIRCUITS MAGNETIQUES

| | |
|---|----|
| I.1. INTRODUCTION | 1 |
| I.2. DEFINITIONS DE BASE | 1 |
| 1.2.1. LE CIRCUIT MAGNETIQUE | 1 |
| 1.2.2. EXCITATION MAGNETIQUE | 2 |
| 1.2.3. INDUCTION MAGNETIQUE | 2 |
| 1.2.4. PERMEABILITE MAGNETIQUE RELATIVE | 3 |
| 1.2.5. FLUX MAGNETIQUE | 4 |
| I.3. Résumé des grandeurs | 5 |
| I.4. ANALYSE DES CIRCUITS MAGNETIQUES | 5 |
| I.4.1. LOI DE FARADAY | 5 |
| I.4.2. THEOREME D'AMPERE GENERALISE | 5 |
| I.4.3. LOI D'HOPKINSON | 6 |
| I.5. ANALOGIE AVEC LES CIRCUITS ELECTRIQUES | 7 |
| I.6. ASSOCIATION DES CIRCUITS HETEROGENES | 8 |
| I.7. CIRCUITS MAGNETIQUES EN REGIME ALTERNATIF SINUSOÏDAL | 10 |
| I.7.1. Relation $V=f(B)$ | 10 |
| I.7.2. L'INDUCTANCE | 11 |
| I.7.3. COURBE DE PREMIERE AIMANTATION – $B(H)$. | 11 |
| I.8. PERTE DANS LES CIRCUITS MAGNETIQUES | 12 |

CHAPITRE II:

TRANSFORMATEUR ELECTRIQUE

| | |
|--|----|
| II.1. INTRODUCTION | 14 |
| II.2. DEFINITION D'UN TRANSFORMATEUR | 14 |
| II.3. CONSTITUTION | 15 |
| II.3.1. CIRCUIT MAGNETIQUE | 15 |
| II.3.2. CIRCUIT ELECTRIQUE (BOBINES «ENROULEMENTS ») | 16 |
| II.3.2.1. TYPE DE BOBINAGE | 17 |
| II.4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT | 18 |
| II.5. SYMBOLE | 19 |
| II.6. Polarité d'un transformateur | 19 |
| II.7. TRANSFORMATEUR MONOPHASE PARFAIT | 20 |
| II.7.1. EXPRESSION DES F.E.M. DANS LE TRANSFORMATEUR | 20 |
| II.7.2. RAPPORT DE TRANSFORMATION | 20 |

| | |
|---|----|
| II.7.3. FORMULE DE BOUCHEROT | 21 |
| II.7.4. DEPHASAGES | 21 |
| II.7.5. LOI DE CONSERVATION | 21 |
| II.7.6. RENDEMENT D'UN TRANSFORMATEUR PARFAIT | 22 |
| II.7.7. ADAPTATION DES IMPEDANCES | 22 |
| II.8. TRANSFORMATEUR MONOPHASE REEL | 23 |
| II.9. DETERMINATION DES PERTES DANS UN TRANSFORMATEUR | 24 |
| II.9.1 PERTES PAR EFFET JOULE OU PERTE DE CUIVRE (ESSAI EN COURT-CIRCUIT) | 24 |
| II.9.2 PERTES FER OU PERTE MAGNETIQUE (ESSAI A VIDE) | 25 |
| II.10. DETERMINATION DES PARAMETRES DU TRANSFORMATEUR | 27 |
| II.11. RENDEMENT DE TRANSFORMATEUR MONOPHASE REEL | 28 |
| II.12. BILAN DE PUISSANCE | 28 |
| II.13. CHUTE DE TENSION SECONDAIRE | 29 |
| II.14. FACTEUR DE REGULATION D'UN TRANSFORMATEUR | 30 |
| II.15 CAPACITE EN PUISSANCE D'UN TRANSFORMATEUR | 30 |
| II.16 TRANSFORMATEUR TRIPHASE | 31 |
| II.17. CONSTITUTION DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE | 31 |
| II.18. CONCEPTION D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE | 33 |
| II.19. SYMBOLE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE | 33 |
| II.20. VUE ECLATE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE | 33 |
| II.20.1. LA PLAQUE SIGNALETIQUE | 34 |
| II.20.2. ENVELOPPE ET DIELECTRIQUE | 35 |
| II.20.3. TRAVERSEES ISOLANTES | 35 |
| II.20.4. REFROIDISSEMENT | 35 |
| II.20.5. DEFINITION DES PRINCIPAUX MODES DE REFROIDISSEMENT | 35 |
| II.21. INDICE HORAIRE | 36 |
| II.22. MODE DE COUPLAGE | 36 |
| II.23. CHOIX DU COUPLAGE | 37 |
| II.24. RAPPORT DE TRANSFORMATION | 38 |
| II.25. RENDEMENT | 38 |
| II.26. MISE EN PARALLELE DE TRANSFORMATEURS | 39 |

CHAPITRE III : *MACHINES A COURANT CONTINU*

| | |
|---|----|
| III.1. INTRODUCTION | 41 |
| III.2. DEFINITION D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU | 41 |
| III.3. CONSTITUTION D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU | 43 |
| III.3.1. STRUCTURE DE BASE | 43 |
| III.3.2. CONSTRUCTION | 46 |
| III.4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT | 47 |

| | |
|---|----|
| III.4.1. FORCE DE LAPLACE | 47 |
| III.4.2. FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE A COURANT CONTINU | 48 |
| III.5. SYMBOLE | 49 |
| III.6. SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT | 50 |
| III.7. TYPE D'EXCITATION | 51 |
| III.8. FORCE ELECTROMOTRICE INDUITE | 52 |
| III.10. PUISSANCE ABSORBE PAR UN MOTEUR A COURANT CONTINU | 52 |
| III.9. PUISSANCE ELECTROMAGNETIQUE | 52 |
| III.10. PERTES DANS LA MACHINE A COURANT CONTINU | 53 |
| III.10.1 PERTE PAR EFFET JOULE (PERTE DE CUIVRE) | 53 |
| III.10.2 PERTE COLLECTIVE (PERTE MAGNETIQUE) | 54 |
| III.12. PUISSANCE UTILE | 54 |
| III.13. RENDEMENT | 54 |
| III.14. BILAN DE PUISSANCE | 54 |
| III.14.1. GENERATRICE A COURANT CONTINU | 54 |
| III.14.2. MOTEUR A COURANT CONTINU | 55 |
| III.15 DEMARRAGE DES MOTEURS MCC | 55 |
| III.15.1 DEMARRAGE A VIDE DES MOTEURS MCC | 55 |
| III.15.2 PARTICULARITES D'UNE MCC A EXCITATION SEPARÉE | 56 |
| III.15.3 PARTICULARITES D'UNE MCC A EXCITATION SERIE | 56 |

CHAPITRE IV : MACHINES SYNCHRONES

| | |
|---|----|
| IV.1. INTRODUCTION | 59 |
| IV.2. CHAMP MAGNETIQUE TOURNANT | 59 |
| IV.2.1 SYSTEME TRIPHASE | 59 |
| IV.2.2 CHAMP MAGNETIQUE TOURNANT | 59 |
| IV.3. MACHINE SYNCHRONE | 62 |
| IV.3.1 GENERALITE | 62 |
| IV.3.2 CONSTITUTION DE LA MACHINE SYNCHRONE | 63 |
| IV.3.2.1 LE STATOR (INDUIT) | 64 |
| IV.3.2.2 LE ROTOR (INDUCTEUR) | 67 |
| IV.3.3 SYMBOLE DE LA MACHINE SYNCHRONE | 69 |
| IV.3.4 SYSTEME D'EXCITATION DE LA MACHINE SYNCHRONE | 69 |
| IV.3.5 MODELE ELECTRIQUE DE LA MACHINE SYNCHRONE | 70 |
| IV.3.5.1 MODE ALTERNATEUR | 70 |
| IV.3.5.1.1 LE COMPORTEMENT DE L'ALTERNATEUR | 71 |
| IV.3.5.1.2 CARACTERISTIQUE A VIDE DE L'ALTERNATEUR | 72 |
| IV.3.5.1.3 CARACTERISTIQUE EN CHARGE DE L'ALTERNATEUR | 73 |
| IV.3.5.1.4 BILAN DE PUISSANCE DE L'ALTERNATEUR | 73 |

| | |
|--|----|
| IV.3.5.1.5. ANGLE DE CHARGE DE L'ALTERNATEUR | 74 |
| IV.3.5.2 MODE MOTEUR | 74 |
| IV.3.6. REGULATION DE FREQUENCE | 75 |

CHAPITRE V :

MACHINES ASYNCHRONES

| | |
|--|----|
| V.1. INTRODUCTION | 78 |
| V.2. MOTEUR ASYNCHRONE (INDUCTION MOTOR) | 78 |
| V.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT | 79 |
| V.3. CONSTITUTION DE LA MAS | 80 |
| V.3.1 STATOR | 81 |
| V.3.2 ROTOR | 82 |
| V.3.3. AUTRES PARTIES | 84 |
| V.3.4. PLAQUE SIGNALETIQUE | 84 |
| V.4. SYMBOLE | 85 |
| V.5. FONCTIONNEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE | 85 |
| V.5.1. FONCTIONNEMENT A VIDE | 85 |
| V.5.2. FONCTIONNEMENT EN CHARGE | 86 |
| V.6. MODELISATION ET MISE EN EQUATION | 86 |
| V.6.1. SCHEMAS EQUIVALENTS DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE | 86 |
| V.6.2. BILAN DES PUISSANCES ET DES PERTES | 87 |
| V.6.2.1. PUISSANCES ET PERTES STATORIQUES | 87 |
| V.6.2.2. LES PERTES FER AU STATOR P_{Fs} | 87 |
| V.6.2.3. PUISSANCE ROTORIQUE | 88 |
| V.6.2.4. LES PERTES FER AU ROTOR P_{FR} | 88 |
| V.6.2.5. PERTES MECANQUES ROTATIONNELLES P_M | 88 |
| V.6.2.6. PUISSANCE UTILE | 89 |
| V.6.2.7. DETERMINATION DES PERTES CONSTANTES OU PERTES COLLECTIVES P_c | 89 |
| V.6.2.8. RENDEMENT | 89 |
| V.7. DEMARRAGE DIRECT DU MOTEUR ASYNCHRONE | 89 |
| V.7.1. CARACTERISTIQUE MECANIQUE : $C = f(\Omega)$ | 89 |
| V.7.2. VITESSE DE DECROCHAGE ΩD | 90 |
| V.7.3. CARACTERISTIQUE ELECTROMECHANIQUE : $I = f(\Omega)$ | 90 |
| V.7.4. DEMARRAGE ETOILE-TRIANGLE | 90 |
| V.8. LIAISON AVEC LE RESEAU ELECTRIQUE | 91 |
| V.9. LA VARIATION DE VITESSE | 92 |
| EXERCICES D'APPLICATION | |
| REFERENCES | |

Préface

L'électrotechnique appliquée est le domaine le plus intéressant dans le secteur d'énergie et des machines électrique, un domaine très présent dans la vie quotidienne pratiquement dans l'industrie.

Les transformateurs et les moteurs électriques sont considérés comme le cœur de toutes les machines industrielle tel que les fraiseuses, les malaxeurs, les chariots électrique, etc... et même fait une partie très importantes dans la robotique et les bras manipulateurs. Que ce soit statique comme les transformateurs ou tournants comme les moteurs asynchrones, sans la présence de ces dernières, il n'existe plus l'industrie. Cette importance, rends la maintenance et l'entretiens des différents machines électrique une partie indispensable dans n'importe quel usine ou application industrielle.

Ce manuscrit est destiné aux étudiants de la 3^{ème} Année Electromécanique option Maintenance Industrielle de nouveau système LMD. Son contenu, correspond au programme officiel de la matière « Electrotechnique appliquée » du cinquième semestre. Il a été rédigé dans le but de permettre d'avoir un outil de formation et de référence recouvrant les connaissances de base qui leur sont demandés.

Ce manuscrit couvre les connaissances en électrotechnique appliquée pour les étudiants qui souhaitent se qualifier dans l'industrie électrique en maintenance et réparation électromécaniques. Il fournit les connaissances de base aux personnes responsables de la remise à neuf de machines électriques. Cela comprend le démontage, le rebobinage, le montage et le test des machines électriques. Les personnes créditées de ce cours d'unité fondamentale sont capables de démontrer une connaissance de : - La f.e.m induite dans les machines électrique. -circuit de base qu'est le circuit magnétique - la machine statique c'est-à-dire les transformateurs électrique monos et triphasés. - Machines tournants qui comporte les machines à courant continu et le machine a courant alternatif.

RAPPELS SUR LA MAGNETOSTATIQUE ET LES CIRCUITS MAGNETIQUES

Objectifs :

- Justifier l'emploi de certains matériaux ferromagnétiques dans la construction des dispositifs électromagnétiques, actionneurs ou machines ;
- Analyser les circuits magnétiques ;
- Comprendre le côté fragile du magnétisme pour suggérer les précautions à prendre dans la manipulation.

Vocabulaire :

Aimantation J , Induction B , Perméabilité μ , Champ d'excitation H , Matériaux Magnétique, Hystérésis, flux magnétique.

A la fin de la séance, l'étudiant doit apprendre les notions suivantes :

- La conception d'un circuit magnétique ;
- La classification des différents matériaux du terme magnétisation ;
- Le cycle d'hystérésis ;
- Les calculs des circuits magnétiques.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre :05 |

I.1. INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est d'analyser le circuit magnétique qui représente le concept de base par lequel l'énergie est convertie (transformée) d'une forme à une autre dans les moteurs, les générateurs et les transformateurs. Le champ magnétique peut être produit par deux façons :

1. Naturellement par l'aimant permanent qui se trouve dans la nature ;
2. Artificiellement par la conception d'un tel circuit muni d'un ensemble de composant de différente nature.

Cette analyse nous a permis non seulement de découvrir le principe de base pour le fonctionnement d'une machine électrique mais aussi de simplifier l'étude de ce type des circuits par l'établissement des relations assez simples.

I.2. DEFINITIONS DE BASE

I.2.1. LE CIRCUIT MAGNETIQUE

D'une façon plus simple, un circuit magnétique est composé d'un groupe de corps reliés les uns aux autres et destinés à conduire un flux magnétique (figure I.1).

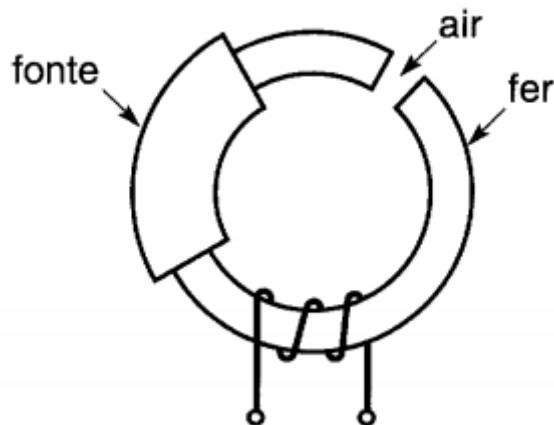


Figure. I.1 Exemple d'un circuit magnétique

Domaine d'Applications :

- L'imagerie magnétique IRM
- Accélérateur de particule
- Les machines électriques (moteurs et transformatrices)
- Les fours à inductions
- Etc...

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option: maintenance industrielle |
| | | | | Semestre: 05 |

I.2.2. EXCITATION MAGNETIQUE

Soit le circuit magnétique présenté dans la figure I.2, nous appellerons excitation magnétique, l'intensité du champ magnétique ou la force magnétisante définie par l'expression (1.1) qui exprime la force magnétomotrice **FMM** par unité de longueur, dont la valeur commune aux deux circuits ne dépend pas de la nature des noyaux.

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (1.1)$$

Avec :

H : l'excitation magnétique est exprimée en Ampère par mètre [A/m]

I : le courant est exprimé en Ampère [A]

l : la longueur du solénoïde est exprimée en mètre [m].

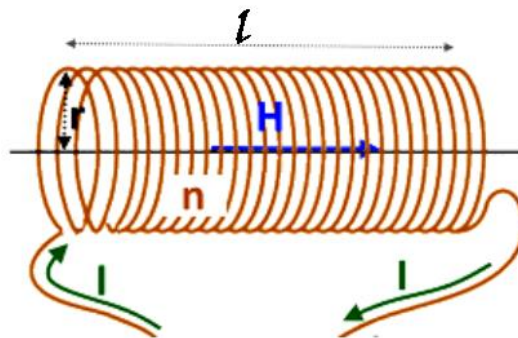


Figure. I.2 Champ d'excitation

Exemple d'application :

Pour un courant de 2A et une longueur de 10cm, calculer le nombre de spire requis pour obtenir une force magnétomotrice FMM de 20 A.

Solution :

$$FMM = H \cdot l = N \cdot I \text{ d'où : } N = \frac{FMM}{I} \quad A.N : N = \frac{20}{2} \quad N=10 \text{ spires}$$

$$\text{Par la suite : } H = \frac{N \cdot I}{l} \quad A.N : H = \frac{20}{0.1} \quad H=200 \text{ A/m}$$

I.2.3. INDUCTION MAGNETIQUE

Dans un milieu magnétique soumis à une excitation magnétique \vec{H} , on peut définir un vecteur **induction magnétique** \vec{B} (exprimé en tesla, T). L'excitation et l'induction magnétiques sont liées par la relation (1.2) :

$$B = \mu H \quad (1.2)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre :05 |

Avec : μ en H.m^{-1} est la perméabilité magnétique définie par :

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad (1.3)$$

Avec :

μ_0 : Perméabilité du vide.

μ_r : Perméabilité relative du matériau

Remarque :

Dans le vide on a $B = \mu_0 H$, avec $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ est la perméabilité magnétique du vide.

La mise en œuvre des machines électriques demande la création d'induction magnétique intense :

- Machine industrielle : $B = 1.5\text{T}$;
- Electroaimant avec entrefer 1 cm sur 20cm^2 : $B = 5\text{T}$;
- Supraconductivité : $B = 12\text{T}$;
- Régime impulsionnel : $B = 80\text{T}$.

Exemple d'Application :

Pour l'exemple ci-dessus, quelle est l'induction magnétique produite si aucun matériau ne se présente à l'intérieur des spires de la bobine.

Solution :

Si aucun matériau ne se présente à l'intérieur de la bobine, donc la perméabilité et celle du vide par la suite : $B = \mu_0 H$, A.N : $B = 4\pi \cdot 10^{-7} * 200$ $B = 25 \cdot 10^{-5} \text{ T}$

I.2.4. PERMEABILITE MAGNETIQUE RELATIVE

Un coefficient sans dimension, pour l'air $\mu_r = 1$, Par définition, la perméabilité relative est le quotient du champ magnétique qui y est produit par celui qui existerait dans le vide ou l'air.

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (1.4)$$

Sur la base de la perméabilité relative, on classifie les matériaux magnétiquement en trois types :

- **Les paramagnétiques :** μ_r très petite entre 10^{-3} et 10^{-7} , les vecteurs \vec{J} et \vec{H} dans le même sens.

Exemple : Tungstène ($6.8 \cdot 10^{-5}$), Césium ($5.1 \cdot 10^{-5}$), Aluminium ($2.2 \cdot 10^{-5}$), Lithium ($1.4 \cdot 10^{-5}$), Magnésium ($1.2 \cdot 10^{-5}$), Sodium ($0.72 \cdot 10^{-5}$)

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

- **Les diamagnétiques** : μ_r très petite entre 10^{-4} et 10^{-6} , les vecteurs \vec{J} et \vec{H} en sens opposé.

Exemple : Tous les cors composés de l'eau sont des matériaux diamagnétiques.

- **Les ferromagnétiques** : réagissent en renforçant très fortement l'induction \vec{B} : μ_r très grand entre 10^4 et 10^6 , \vec{J} et \vec{H} dans le même sens.

Exemple : Fe (200), Co (70), Ni (110) et alliages

Pour les ferromagnétiques, on distingue plusieurs matériaux utilisés différemment :

- **Fer silicié** : tôle de machine, fer doux, flux alternatif,
- **Fonte grise** : jantes rotoriques, moment d'inertie important, réalisation des stators avec rémanent.
- **Acier coulé** : tenus aux chocs, construction des rotors d'alternateur volant (300 tr/min).
- **Acier forgé** : construction des rotors de turbo-nateurs (3000 tr/min).

Exemple d'Application :

Pour le même exemple ci-dessus, nous introduisant trois types différents des matériaux à l'intérieur de la bobine engendrée par un courant électrique, calculé dans chaque cas suivant l'induction magnétique : cas de la glace, cas d'un matériau en magnésium, cas d'un matériau en fer.

Solution :

l'induction magnétique est égale : $B = \mu H = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

A.N : Cas de la glace : $B_g = 4\pi \cdot 10^{-7} * 10^{-5} * 200$ $B_g = 25 \cdot 10^{-12} \text{ T}$

Cas d'un matériau en magnésium $B_g = 4\pi \cdot 10^{-7} * 1.2 * 10^{-5} * 200$ $B_g = 30 \cdot 10^{-12} \text{ T}$

Cas d'un matériau en fer. $B_g = 4\pi \cdot 10^{-7} * 200 * 200$ $B_g = 0.05 \text{ T}$

I.2.5. FLUX MAGNETIQUE

Le flux magnétique φ est défini comme étant l'intégrale de la densité de flux B sur une certaine surface :

$$\varphi = \int B \cdot ds \quad (1.5)$$

Donc :

$$\varphi = B \cdot S \quad (1.6)$$

L'unité de flux est le Weber : Wb

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre :05 |

Exemple d'Application

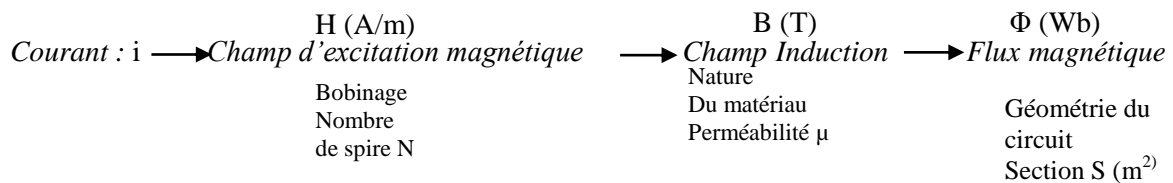
Calculer le flux magnétique pour le fer du circuit montré ci-dessus pour une section $S=2.4\text{cm}^2$

Solution :

$$\Phi = B.S \quad A.N : \Phi = 0.05.2.4 * 10^{-4} \quad \Phi = 1.2 * 10^{-5} \text{ Wb}$$

I.3. RESUME DES GRANDEURS

Un résumé des grandeurs mises en jeu dans les circuits magnétiques linéaires ainsi que des relations simplifiées qui les relient sont présentés ci-dessous :



Relation : Théorème d'ampère: $NI=H.l$ → Perméabilité magnétique : $B= \mu.H$ → Flux : $\Phi= B.S$

I.4. ANALYSE DES CIRCUITS MAGNETIQUES

I.4.1. LOI DE FARADAY

Tout changement du flux magnétique d'une bobine de fil par le temps entraînera une tension « f.e.m induite 'e' » dans la bobine exprimée par la loi de Faraday comme suit :

$$e = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.7)$$

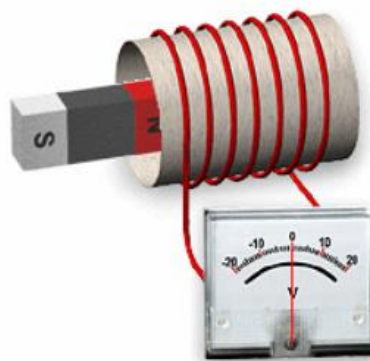


Figure. I.3 Force électromotrice

I.4.2. THEOREME D'AMPERE GENERALISE

La circulation du champ de l'excitation magnétique \vec{H} le long d'un contour fermé (C) de la figure I.4 est égale à la somme algébrique des intensités des courants enlacés montré par l'équation (1.8) ci-dessous :

$$\oint H . dl = \sum N . I \quad (1.8)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

En comptant ces intensités comme suit :

- Positivement lorsque le conducteur est orienté dans le sens de la normale ;
- Négativement dans le sens contraire.

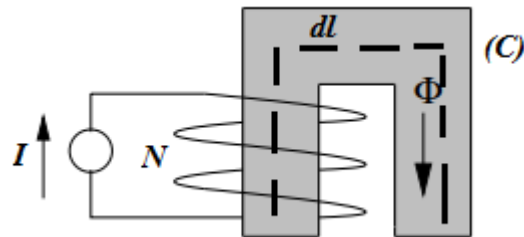


Figure. I.4 Théorème d'ampère

I.4.3. LOI D'HOPKINSON

Soit le circuit magnétique homogène et linéaire montré par la figure 1.5 avec S la section de ce circuit :

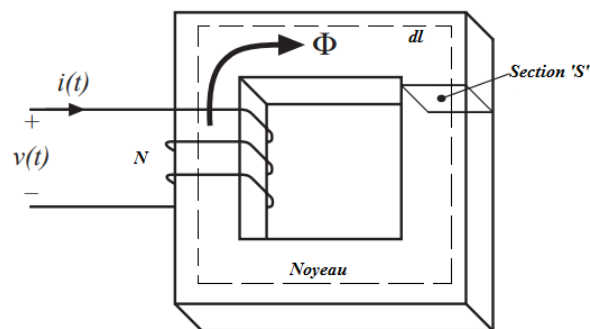


Figure. I.5 Circuit magnétique homogène

D'après le théorème d'ampère, nous avons :

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_C H \cdot dl = N \cdot I \quad (1.9)$$

Soit donc :

$$H \cdot l = N \cdot I \quad (1.10)$$

Avec : $B = \mu H$ D'ou : $H = \frac{B}{\mu}$ Et : $\Phi = B \cdot S$ D'où : $B = \frac{\Phi}{S}$

On écrit alors, pour les circuits linéaires :

$$B = \frac{\mu N I}{l} \quad (1.11)$$

Par la suite :

$$\Phi = \frac{\mu S N I}{l} \quad (1.12)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre :05 |

Pour retenir une relation pratique entre le flux et le courant qui le crée, on fait intervenir la grandeur appelée *Réductance* et notée \mathfrak{R} satisfaisant à la relation dite *d'Hopkinson* :

$$N.I = \mathfrak{R}\Phi \quad (1.13)$$

En résumé, pour caractériser toutes les grandeurs dans un circuit magnétique homogène linéaire, on retiendra la relation :

$$N.I = \mathfrak{R}\Phi \text{ avec } \mathfrak{R} = \frac{l}{\mu.S} \quad (1.14)$$

Exemple d'Application

Pour le circuit montré dans la figure 1.5 avec : $S = 16\text{cm}^2$, $l = 40\text{cm}$, $N = 350$ et $\mu_r = 50000$, pour obtenir une densité de flux magnétique (induction magnétique) = 1,5T, trouver :

- Le flux ;
- Le courant requis à travers la bobine.

Solution :

- Le flux : $\Phi = B.S$ A.N : $\Phi = 1.5 * 16 * 10^{-4}$ $\Phi = 2.4\text{mWb}$
- Le courant : $N.I = \mathfrak{R}.\Phi$ avec $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu.S}$ donc $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_0.\mu_r.S}$ par la suite $I = \frac{\mathfrak{R}.\Phi}{N}$

A.N :

$$\mathfrak{R} = \frac{40 * 10^{-2}}{4 * \pi * 10^{-7} * 50000 * 16 * 10^{-4}}$$

$$\mathfrak{R} = 3979 \text{ A. t/Wb}$$

Donc :

$$I = \frac{3979 * 2.4 * 10^{-3}}{350}$$

$$I = 27.3 \text{ mA}$$

I.5. ANALOGIE AVEC LES CIRCUITS ELECTRIQUES

L'utilisation de la notion de réductance permet de dresser une analogie entre les relations des circuits magnétiques et les relations des circuits électriques. On résume les caractéristiques de cette analogie sur le *tableau I.1*.

Cette analogie sera utilisée sans retenue dans les circuits linéaires et fait de l'étude des circuits magnétiques classiques un ensemble de techniques faciles à maîtriser pour l'électrotechnicien.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Tableau I.1 : Analogie magnétique / électrique

| Circuit magnétique | Circuit électrique |
|--|---|
| | |
| $N.I$: Force magnétomotrice | U : force électromotrice |
| Φ : Flux | I : courant |
| \mathfrak{R} : reluctance | R : résistance |
| Loi d'Hopkinton = $N.I = \mathfrak{R}_{eq}\Phi$ | Loi d'ohm : $U = R_{eq} \cdot I$ |
| Association des reluctances : | Association des résistances : |
| En série : $\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2$ | En série : $R_{eq} = R_1 + R_2$ |
| En parallèle : $\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_1 \cdot \mathfrak{R}_2 / (\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2)$ | En parallèle : $R_{eq} = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ |

I.6. ASSOCIATION DES CIRCUITS HETEROGENES

Un circuit est dit **hétérogène** (figure I.6) dès lors qu'il est constitué de matériaux différents ou de géométries à sections variables. La méthodologie va consister, comme dans un circuit électrique, à utiliser les associations connues de ré reluctances afin de calculer les différentes grandeurs.

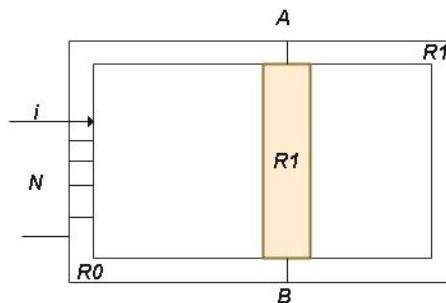


Figure.I.6. Circuit magnétique hétérogène

Dans ce cas, nous avons :

$$\mathfrak{R}_{eq} = \frac{(\mathfrak{R}_0 + \mathfrak{R}_2) \cdot \mathfrak{R}_1}{(\mathfrak{R}_0 + \mathfrak{R}_2) + \mathfrak{R}_1} \quad (1.15)$$

Par la suite :

$$N.I = \mathfrak{R}_{eq} \cdot \Phi \quad (1.16)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits 4 Coefficient : 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Exemple d'Application :

Pour le circuit suivant figure I.7, calculé les reluctances équivalentes et déduire l'excitation magnétique et les inductions B.

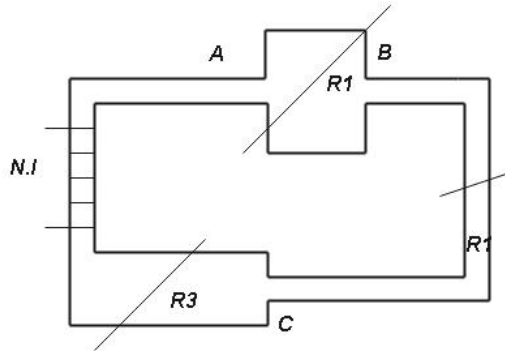


Figure. I.7 Circuit magnétique hétérogène

Solution

Par analogie avec le circuit électrique, le circuit magnétique peut être représenté comme suit :

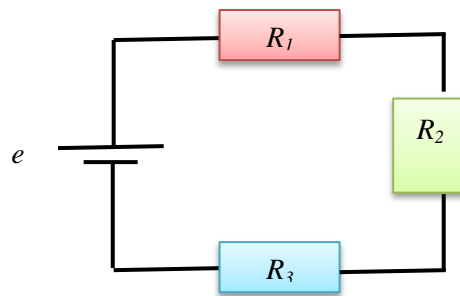


Figure. I.8 Circuit électrique équivalent

D'après le théorème d'ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \cdot I = \int_A^B H_1 \cdot dl + \int_B^C H_3 \cdot dl + \int_C^A H_2 \cdot dl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3$$

Et :

$$N \cdot I = \mathfrak{R}_1 \Phi_1 + \mathfrak{R}_2 \Phi_2 + \mathfrak{R}_3 \Phi_3 = (\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3) \Phi = \mathfrak{R}_{eq} \Phi$$

Alors :

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3$$

et

$$H \cdot l = \mathfrak{R}_{eq} \Phi$$

d'où l'excitation magnétique

$$H \cdot l = \mathfrak{R}_{eq} \Phi$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Et par la suite :

$$H = \frac{\Re_{eq} \Phi}{l}$$

L'induction magnétique : $\Phi = B \cdot S \rightarrow B = \frac{\Phi}{S}$

Comme la section de chaque tronçon est différentes, donc chaque tronçon a sa propre induction magnétique telle que :

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} \qquad B_2 = \frac{\Phi}{S_2} \qquad B_3 = \frac{\Phi}{S_3}$$

I.7. CIRCUITS MAGNETIQUES EN REGIME ALTERNATIF SINUSOÏDAL

I.7.1. Relation V=f(B)

En régime alternatif sinusoïdal, la relation entre la tension aux bornes du bobinage enroulé sur un circuit magnétique et le flux qui le parcourt est la loi de Lenz. Il apparaît alors une relation directe entre l'induction maximale (la valeur maximale de l'induction sinusoïdale) et la valeur efficace de la tension aux bornes du bobinage. On résume ces considérations, très importantes pour l'étude et la réalisation des circuits magnétiques, autour de la figure I.9

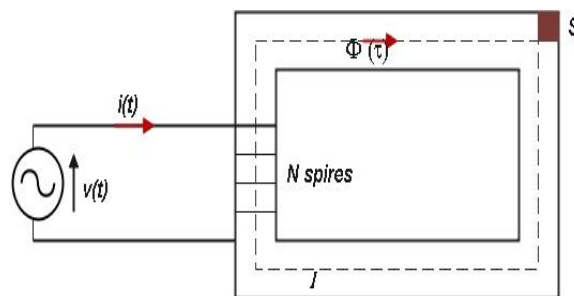


Figure. I.9. Circuit magnétique alimenté par un courant alternatif.

La loi de Lenz s'écrit, en convention générateur,

$$V(t) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi_T}{dt} \quad (1.17)$$

Relation tension/ induction :

$$V(t) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = V\sqrt{2} \cos(\omega t) \quad (1.18)$$

Si on intègre les deux côtés, on obtient alors :

$$\phi(t) = \frac{V\sqrt{2}}{N\omega} \sin(\omega t) \quad (1.19)$$

Avec :

$$\phi(t) = B \cdot S \quad (1.20)$$

d'où :

$$\frac{V\sqrt{2}}{N\omega} \sin(\omega t) = B \cdot S \quad (1.21)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre :05 |

Pour que B soit max, il faut que $\sin(\omega t) = 1$ et alors :

$$B_{max} = \frac{V \sqrt{2}}{S \cdot N \cdot \omega} = \frac{V \sqrt{2}}{S \cdot N \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (1.22)$$

Puisque $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Alors la tension est :

$$V = 4.44 \cdot N \cdot B_{max} \cdot S \cdot f \quad (1.23)$$

I.7.2. L'INDUCTANCE

L'inductance est, en régime linéaire, la grandeur de proportionnalité entre le courant dans le bobinage et le flux dit « total » intercepté par le bobinage, c'est-à-dire le flux $\Phi_T = N \cdot \phi$, On écrit alors :

$$\Phi_T = N \cdot \frac{NI}{R} = L \cdot I \quad (1.24)$$

La grandeur L est l'inductance du circuit magnétique bobiné, son unité est le *Henry (H)*. On retiendra :

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (1.25)$$

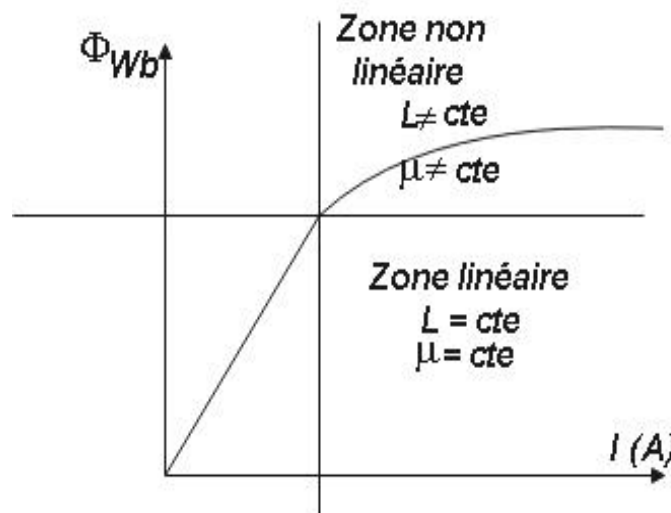


Figure.I.10. Exemple de non linéarité du courbe flux / courant

I.7.3. COURBE DE PREMIERE AIMANTATION – B(H).

Un matériau ferromagnétique n'ayant jamais été aimanté est tel que $B=0$ et $H=0$. Si on le soumet à une excitation magnétique croissante on obtient la courbe $B(H)$ de première aimantation portée sur la figure I.11 suivante :

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

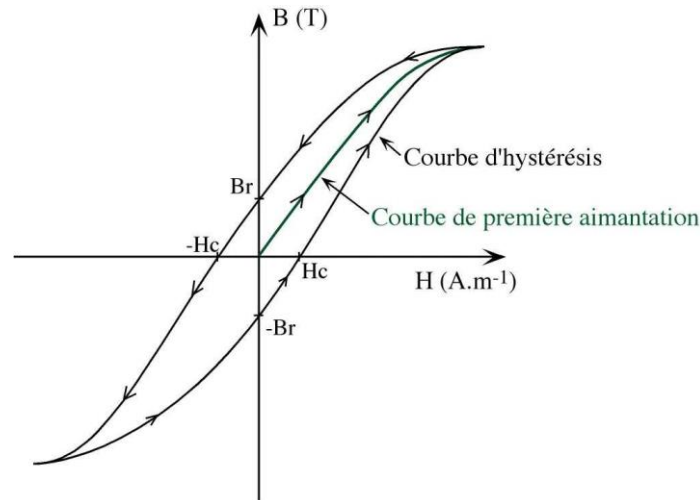


Figure.I.11 Courbe de première aimantation et d'hystérésis

Lorsque H devient très grand il apparaît un phénomène de saturation, B ne varie presque plus
Lorsque le ferromagnétique possède déjà une aimantation la courbe B(H) décrit un **cycle d'hystérésis** (cf. figure ci-dessus).

On peut élargir le cycle d'hystérésis par la **trempe**, obtenu par le refroidissement rapide du matériau ou par l'**écrouissage** obtenu par un travail à chaud du métal, comme on peut réduire la surface par un **recuit** obtenu par un chauffage suivi d'un refroidissement lent. Les chocs et les vibrations rétrécissent aussi le cycle d'hystérésis.

Ces phénomènes sont à l'origine du vieillissement de la tôle des machines.

I.8. PERTE DANS LES CIRCUITS MAGNETIQUES

Les matériaux ferromagnétiques décrivant un cycle d'hystérésis qui sont le siège des pertes énergétiques appelées **pertes fer**. Elles sont liées au parcours du cycle (**Perte hystérésis**) et à l'apparition de courants de Foucault (**perte de Foucault**) dans le corps ferromagnétique.

On démontre que la puissance des pertes fer peut s'écrire :

$$Pertes\ fer = P_{hystérésis} + P_{Foucault} = \frac{V \cdot A}{T}$$

Avec : V volume du corps ferromagnétique considéré, A air du cycle d'hystérésis et T la période de parcours du cycle.

TRANSFORMATEUR ELECTRIQUE

Objectifs :

- *Présenter le transformateur ;*
- *Analyser mathématiquement un transformateur ;*
- *Comprendre les différents enjeux énergétiques, couplages magnétique et bilan de puissance.*

Vocabulaire :

- *Transfo, impédance, perte joule, perte fer, schéma équivalent, bilan énergétique, indice horaire, rendement.*

A la fin de la séance, l'étudiant doit apprendre les notions suivantes :

- *La conception d'un transformateur monophasé et triphasé ;*
- *Son principe de fonctionnement, schéma équivalent et ces différents modèles ;*
- *Les pertes présentés dans le transformateur, technique de détermination et réduire ;*
- *Le bilan énergétique.*

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

II.1. INTRODUCTION

Le transformateur est un composant fondamental en électrotechnique, son étude constitue l'un des piliers de cette discipline. Rappelons que le transformateur industriel a été inventé par Lucien Gaulard et John-Dixon Gibbs en 1883, et qu'il a eu un rôle décisif dans le développement de l'énergie électrique et plus particulièrement en courant alternatif. Son essor fut immédiat, les puissances réalisées augmentèrent très rapidement (quelques 100 kVA en 1900 et quelques MVA en 1910).

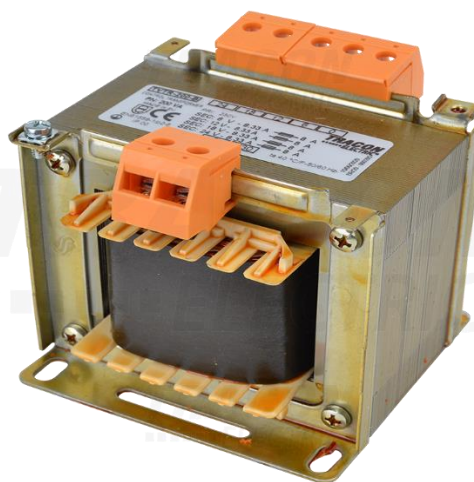
II.2. DEFINITION D'UN TRANSFORMATEUR

Un transformateur électrique (parfois abrégé en *transfo*) est une machine électrique statique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits. Dans une commutatrice.



(a) triphasé



(b) monophasé

Figure. II.1 Exemple d'un Transformateur

Domaine d'Applications : Le transformateur est utilisé dans tous les secteurs industriels ou domestiques par exemple à la sortie des centrales de production électriques, à l'entrée des usines et dans les différents équipements électriques comme TV, radio, etc...

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

II.3. CONSTITUTION

Comme nous pouvons le voir sur la figure II.2 ci-dessous, un transformateur est constitué d'au moins deux enroulements, ou bobines (circuit électrique), sans liaison conductrice entre eux (isolement galvanique) et d'un circuit magnétique fermé (pas d'entrefer).

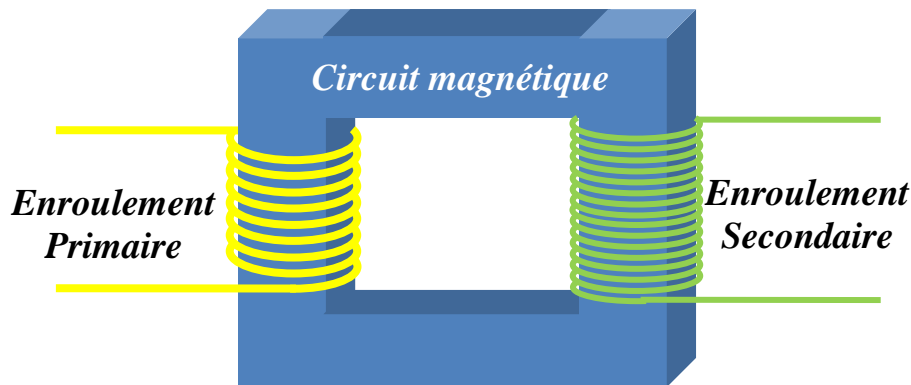


Figure. II.2. Constitution de base d'un transformateur

Le circuit électrique lié au générateur est appelé le circuit primaire (eg. indicé 1), celui qui est lié au récepteur est appelé le circuit secondaire (eg. indicé 2).

Règle 01 :

Appelons V_1 la valeur efficace de V_1 au primaire et V_2 la valeur efficace de V_2 au secondaire alors :

- Si $V_1 < V_2$, le transformateur est dit *élévateur de tension* ;
- Si $V_1 > V_2$, le transformateur est dit *abaisseur de tension* ;
- Si $V_1 = V_2$, le transformateur est un *transformateur d'isolement* ;

II.3.1. CIRCUIT MAGNETIQUE

Son rôle essentiel est de **canaliser le flux** et de présenter le minimum de pertes par hystérésis et courant de Foucault. Il est réalisé à partir d'un empilage de tôle en matériaux ferromagnétique en forme :

- Soit à 2 colonnes formées par un **emplissage de tôles** décalées : couche 1, couche 2 ou bien forme en deux colonnes et les enroulements sont placé sur chaque colonne.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

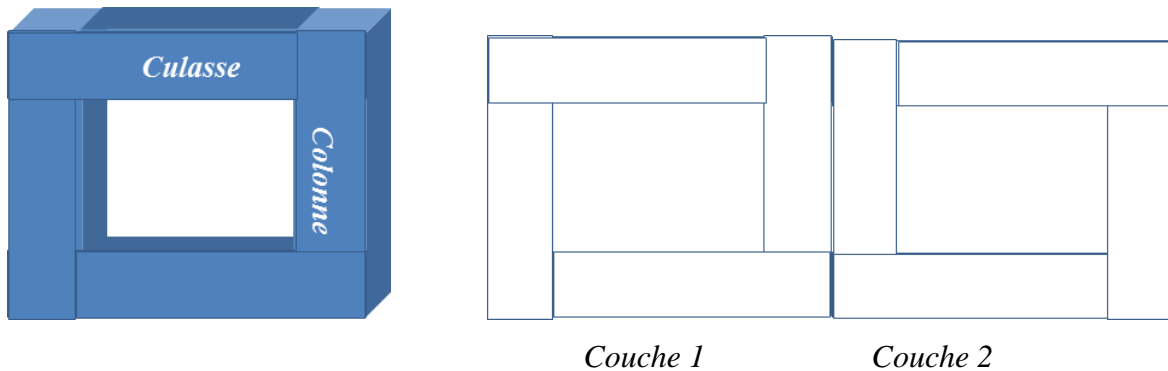


Figure. II.3. Circuit magnétique par empilage (en deux colonnes)

- Soit de **forme cuirassée** c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux se reforme par chacun des côtés qui forment cuirasse.

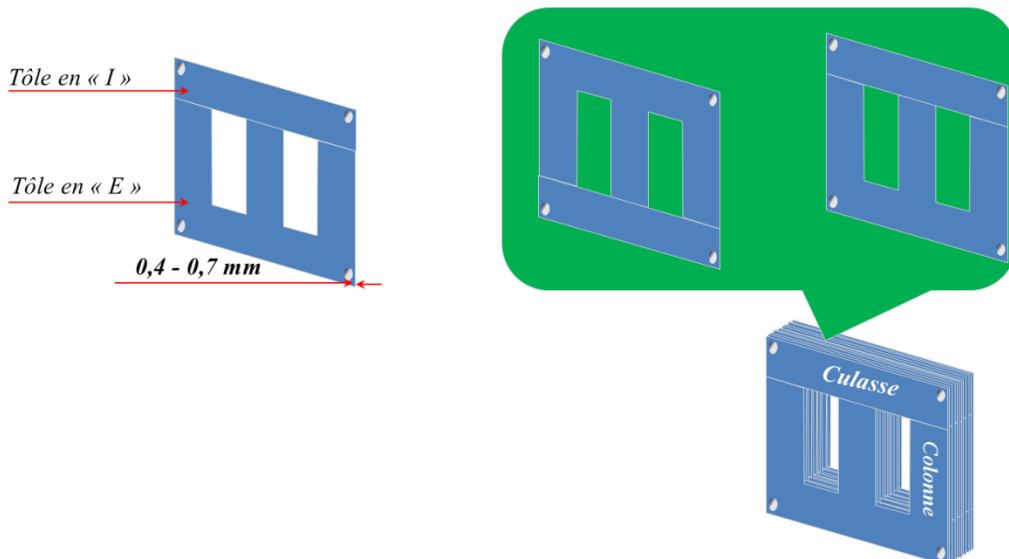


Figure. II.4. Circuit magnétique de forme cuirassée (en trois colonnes)

Les tôles ont une épaisseur entre 0,4 et 0,7 mm en fonction du soin qui est exigé par l'application. L'empilement de plan des tôles en « E » et en « I » avec alternance des joints entre le « E » et le « I » permet de fabriquer le circuit magnétique. L'ensemble forme un bloc cohérent quand cet ensemble est collé ou par serrage grâce aux systèmes vis écrous qui prennent place dans les trous. Les plans de tôle sont isolés entre eux par l'oxydation naturelle des tôles ou par un vernis. Ainsi les pertes par courant de Foucault sont limitées.

II.3.2. CIRCUIT ELECTRIQUE (BOBINES «ENROULEMENTS »)

Un enroulement est l'ensemble des spires formant un circuit associé à l'une des tensions pour lesquelles le transformateur a été établi ». Traditionnellement on appelle l'enroulement qui reçoit la puissance active de la source d'alimentation en service

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

« enroulement primaire » et celui qui délivre la puissance active à une charge, « enroulement secondaire ».

Dans la pratique les enroulements sont imbriqués l'un dans l'autre pour améliorer le rendement du transformateur.

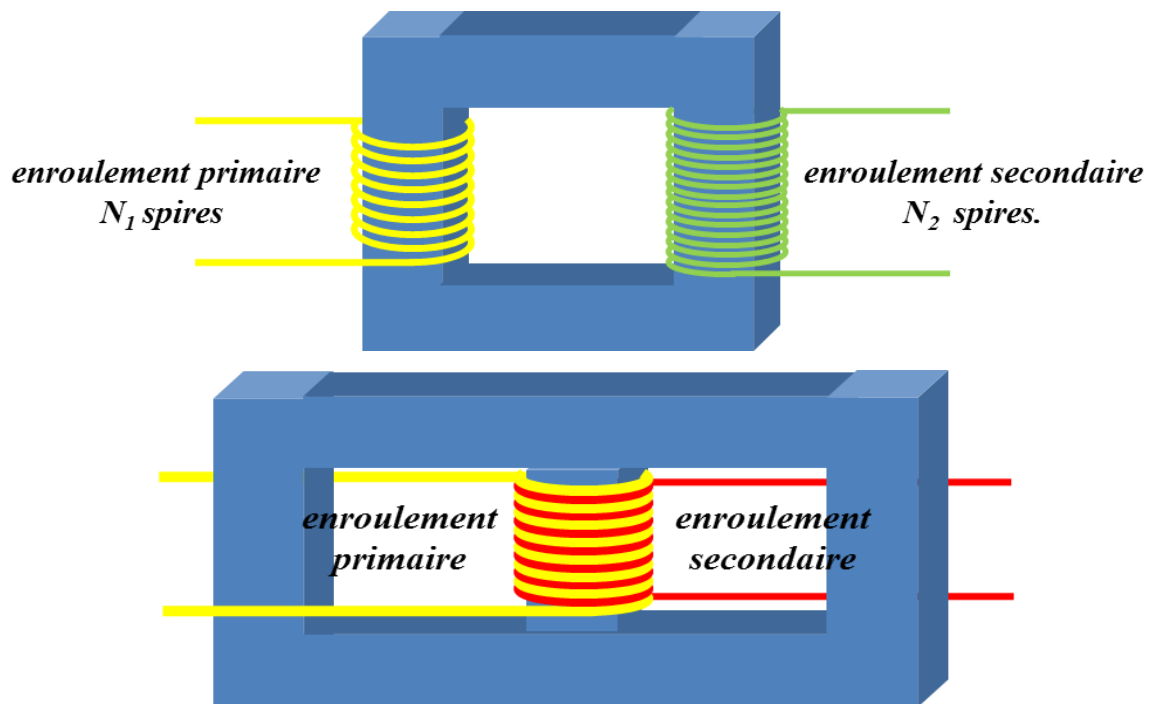


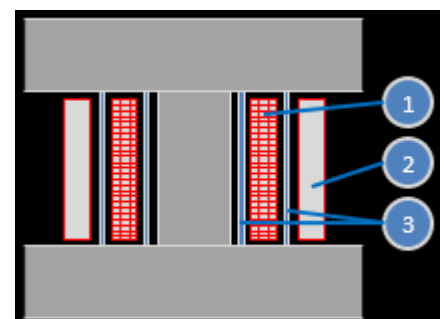
Figure. II.5. Circuit électrique

Chaque spire est isolée de sa voisine grâce au vernis isolant déposé sur le fil du bobinage. Une fois le bobinage constitué, la carcasse et ses enroulements sont déshydratés et imprégnés avec un vernis qui polymérise en étuve.

II.3.2.1. TYPE DE BOBINAGE

A)- BOBINAGE CONCENTRIQUE :

- (1) Enroulement BT près du fer disposé sur un cylindre isolant.
- (2) Enroulement HT à l'extérieur pour faciliter l'isolation.
- (3) Cylindres isolants servant d'isolant et de support aux bobinages.

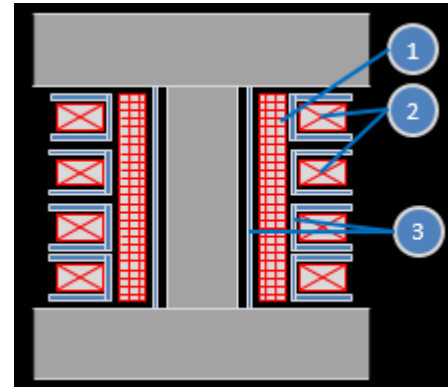


| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

B)- BOBINAGE MIXTE :

- (1) Enroulement BT en tonneau.
- (2) Enroulement HT en galette.
- (3) Séparations isolantes.

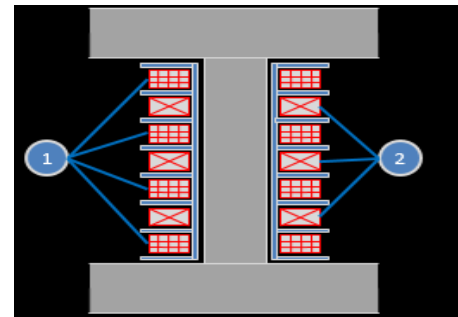
Pour éviter les très forts d.d.p entre les spires d'extrémité de deux couches successives, on réalise des bobines plates (galettes) qui sont montés en série les unes avec les autres. Utilisation en HT et THT.



C)- BOBINAGE ALTERNE EN GALETTE :

- (1) Galettes BT .
- (2) Galettes HT.

Les galettes HT et BT sont alternées, l'empilage et terminé par les galettes BT plus faciles à isoler du circuit magnétique.



Regle 2

Il est nécessaire de bien isoler les enroulements entre eux et par rapport à la masse.

II.4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale U_1 . Il est donc traversé par un courant sinusoïdal i_1 et donne naissance à travers le circuit magnétique à un flux sinusoïdal Φ . Ce flux variable engendre alors une force électromotrice induite e_1 dans l'enroulement primaire et e_2 dans l'enroulement secondaire. Au niveau des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdale U_2 dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire U_1 , mais dont l'amplitude est différente. Le comportement du transformateur peut alors être appréhendé par le schéma reporté sur la figure II.6.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

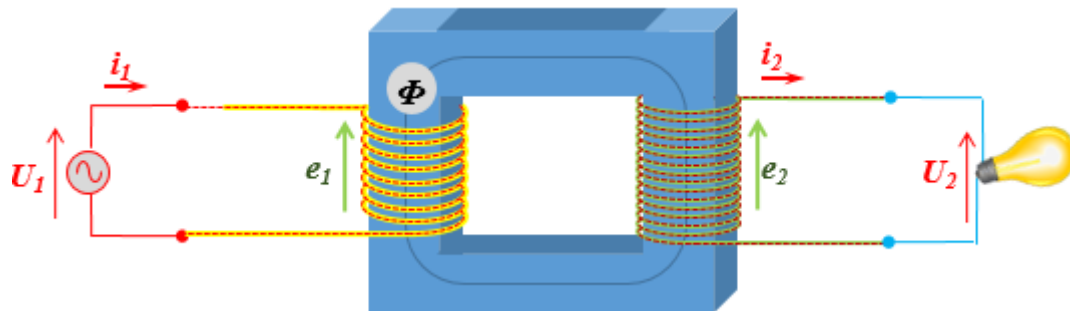


Figure. II.6. Principe de fonctionnement

Regle 3 :

On utilise la convention générateur pour le primaire, et récepteur pour le secondaire.

II.5. SYMBOLE

Dans un schéma électrique, le transformateur peut être représenté par l'un des deux symboles reportés ci-dessous :

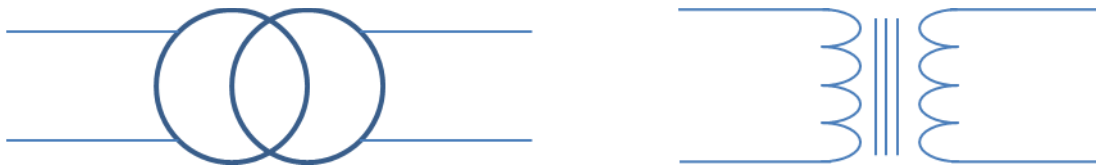


Figure II.7. Symbole

II.6. Polarité d'un transformateur

Supposons qu'au moment où les tensions atteignent leur maximum, la borne 1 soit positive par rapport à la borne 2, et que la borne 3 soit positive par rapport à la borne 4. On dit alors que les bornes 1 et 3 possèdent la même polarité. On l'indique en plaçant un point noir vis-à-vis la borne 1 et un autre près de la borne 3. Ces points sont appelés marques de polarité.

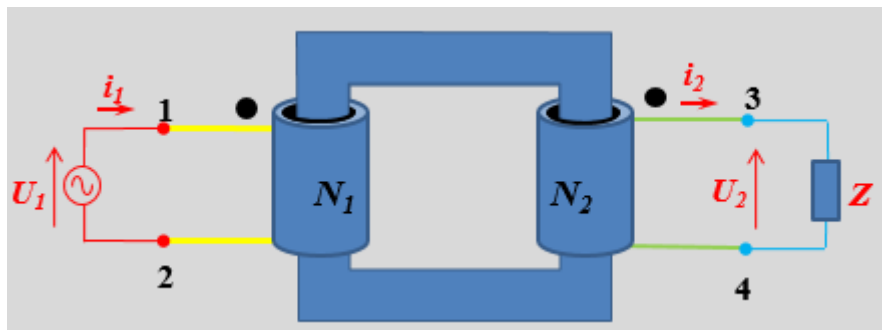


Figure. II.8. Polarité d'un transformateur

On peut réaliser un test de polarité d'un transformateur de la manière suivante : raccorder une pile de 1.5V aux bornes basse tension du transformateur à travers un poussoir S. Lors de la

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

fermeture (une seule impulsion) du poussoir, une tension est induite dans le secondaire. Si à cet instant l'aiguille du voltmètre dévie dans le bon sens, la borne du transformateur reliée à la borne positive du voltmètre est marquée H_1 et l'autre est marquée H_2 . Quant aux bornes à basse tension, celle qui est reliée au pôle positif de la pile se nomme X_1 et l'autre X_2 .

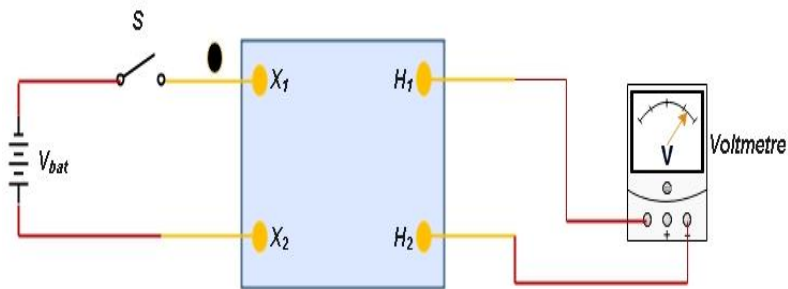


Figure.II.9. Test de polarité d'un transformateur

II.7. TRANSFORMATEUR MONOPHASE PARFAIT

Dans un transformateur monophasé parfait, il n'y a aucune perte, le primaire est constitué de N_1 spires et le secondaire est constitué de N_2 spires.

- On appelle U_1 et U_2 les tensions efficaces primaire et secondaire.
- On appelle i_1 et i_2 les intensités efficaces primaires et secondaires.

II.7.1. EXPRESSION DES F.E.M. DANS LE TRANSFORMATEUR

D'après la loi de Faraday, les forces électromotrices e_1 et e_2 dépendent de la variation du flux magnétique ϕ selon la relation :

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\ et \\ e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \end{cases} \quad (2.1)$$

II.7.2. RAPPORT DE TRANSFORMATION

Par définition, le rapport de transformation, noté m , correspond au quotient du nombre de spires du secondaire sur le nombre de spires du primaire.

$$m = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.2)$$

Dans le cas idéal, la tension au primaire vérifie la relation :

$$V_1 = -E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

et celle du secondaire vérifie :

$$V_2 = E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

En valeur efficace, les deux expressions conduits ainsi, à :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{i_1}{i_2} = m \quad (2.5)$$

II.7.3. FORMULE DE BOUCHEROT

Le générateur impose la tension primaire V_1 ainsi que la fréquence f . Le nombre de spires N_1 étant fixé par condition, le flux Φ a sa valeur imposée en module et phase par le générateur selon la relation suivante :

$$V_1 = 4.44 * N_1 * f * \Phi_{max} \quad (2.6)$$

Où : V_1 est la valeur efficace de la tension au primaire ;

N_1 le nombre de spires de l'enroulement primaire ;

f la fréquence du flux ;

Φ_{max} l'amplitude (valeur maximale) du flux magnétique.

II.7.4. DEPHASAGES

Les grandeurs (V_1, V_2) et (i_1, i_2) sont opposées en phases, Les déphasages φ_1 et φ_2 sont nécessairement les mêmes.

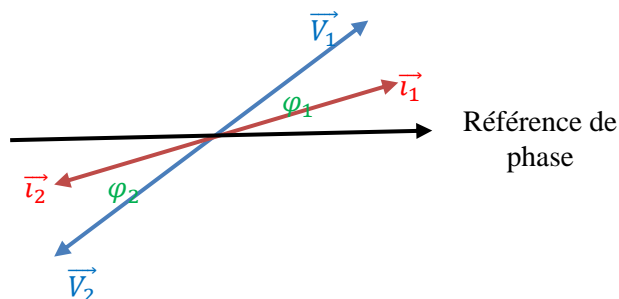


Figure. II.10. Déphasage tension /courant

II.7.5. LOI DE CONSERVATION

Le transformateur idéal conserve les grandeurs suivantes :

La puissance apparente :

$$S = V * I \quad \text{avec} \quad S_1 = S_2 \quad (2.7)$$

La puissance active :

$$P = V * I * \cos\varphi \quad \text{avec} \quad P_1 = P_2 \quad (2.8)$$

La puissance réactive :

$$Q = V * I * \sin\varphi \quad \text{avec} \quad Q_1 = Q_2 \quad (2.9)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

II.7.6. RENDEMENT D'UN TRANSFORMATEUR PARFAIT

La puissance instantanée demandée au réseau d'alimentation est : $P_1 = U_1 \cdot i_1$, la puissance fournie à la charge connectée sur le secondaire est $P_2 = U_2 \cdot i_2$,

On définit le rendement d'un transformateur par la relation suivant :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.10)$$

Si on remplace les puissances instantanées par leurs expression on obtient donc :

$$\eta = \frac{U_2 \cdot i_2}{U_1 \cdot i_1} \quad (2.11)$$

Avec :

$$m = \frac{U_2}{U_1} \text{ et } \frac{1}{m} = \frac{i_2}{i_1} \quad (2.12)$$

De (2.11) et (2.12) on peut exprimer le rendement par la relation (2.13) ci-dessous :

$$\eta = m \cdot \frac{1}{m} = 1 \quad (2.13)$$

Règle 4 :

Le transformateur parfait n'introduit pas de pertes dans la transmission énergétique du primaire vers le secondaire ; on dit qu'il y a conservation de puissance.

II.7.7. ADAPTATION DES IMPEDANCES

Supposons à présent le secondaire du transformateur soit chargé par une impédance Z . On se demande quelle va être la valeur de l'impédance vue depuis l'entrée du transformateur, c-à-d. depuis les bornes du primaire.

Appelons Z' cette impédance, alors :

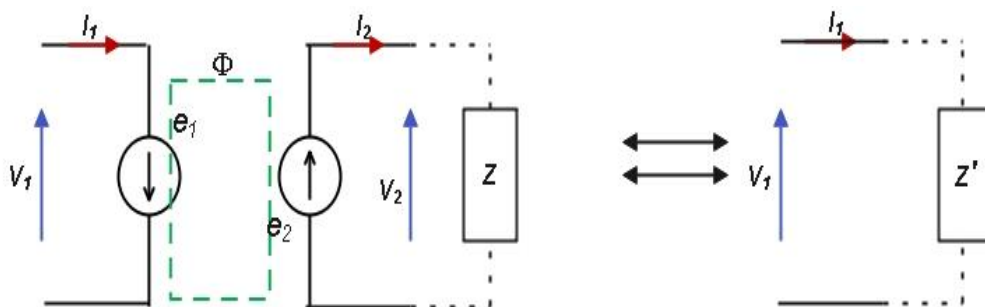


Figure. II.11. Ramene de l'impédance au primaire

La loi de maille pour la figure (b) nous a permis d'écrire :

$$Z' = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.14)$$

Avec :

$$mV_1 = V_2 \text{ et } I_1 = m I_2 \quad (2.15)$$

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Ainsi :

$$Z = \frac{V_2}{I_2} \quad (2.16)$$

Donc, l'impédance ramenée en primaire peut s'écrire comme :

$$Z' = \frac{V_2}{m \cdot I_2} = \frac{V_2}{m} \cdot \frac{1}{m \cdot I_2} = \frac{1}{m^2} \cdot \frac{V_2}{I_2} = \frac{Z}{m^2} \quad (2.17)$$

On pourra de la même manière ramener une impédance du **primaire vers le secondaire**.

Pour cela, il suffira de multiplier l'impédance au primaire par m^2 pour avoir sa valeur au secondaire.

$$Z' = Z \cdot m^2 \quad (2.18)$$

Règle 5 :

Ces règles de transformation restent valables dans le cas d'un transformateur réel.

II.8. TRANSFORMATEUR MONOPHASE REEL

Dans un transformateur réel, on ne néglige plus les pertes. Aussi doit-on prendre en compte :

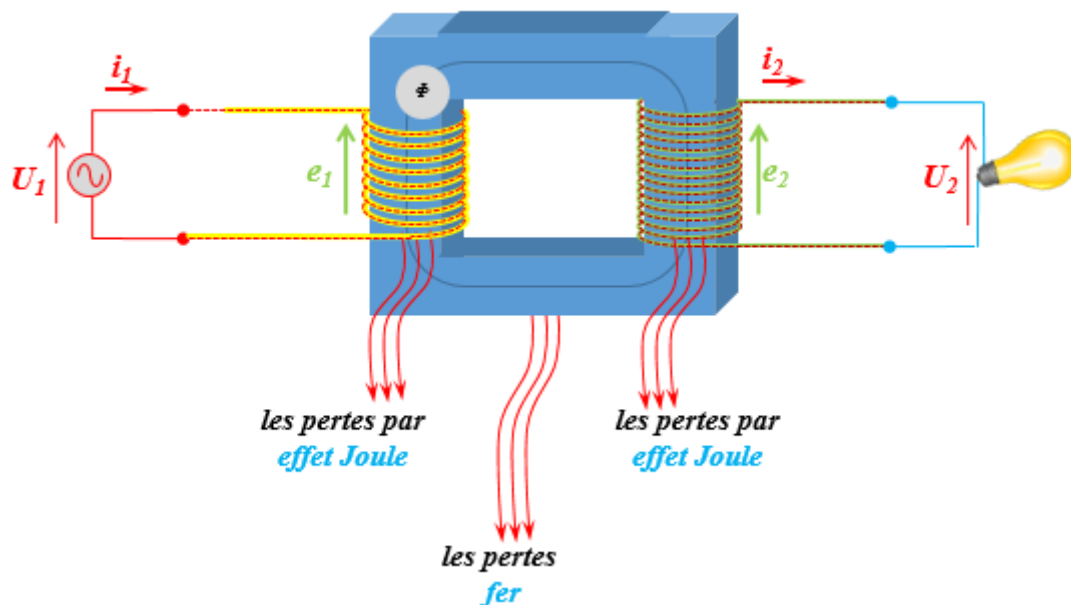


Figure. II.12. Transformateur monophasé réel

Les pertes Joule ou pertes cuivres

Dans les enroulements (bobines) et du fait que les résistances r_j des enroulements soient non-nulles, des **pertes par effet joule** se présentent au niveau du circuit électrique.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Les pertes fer ou pertes magnétiques :

La reluctance du circuit magnétique R n'est plus nulle qui représente une *Impédance* de fuite de flux magnétique.

Une partie seulement du flux Φ_1 créé au niveau du primaire sert à magnétiser le secondaire s'appelle : le **flux de magnétisation** Φ_C . Une autre partie du flux est perdue dans le vide s'appelle : le **flux de fuite** Φ_f . L'origine de ces pertes sont : les pertes par hystérésis et les pertes par courant de Foucault et peuvent être déterminées par l'expression ci-dessous :

$$P_{Fer} = P_{Fouc} + P_{Hyst} \quad (2.19)$$

L'étude d'un transformateur monophasé et la détermination de ses caractéristiques passe par la détermination de **modèles** plus ou moins réalistes en fonction des hypothèses faites.

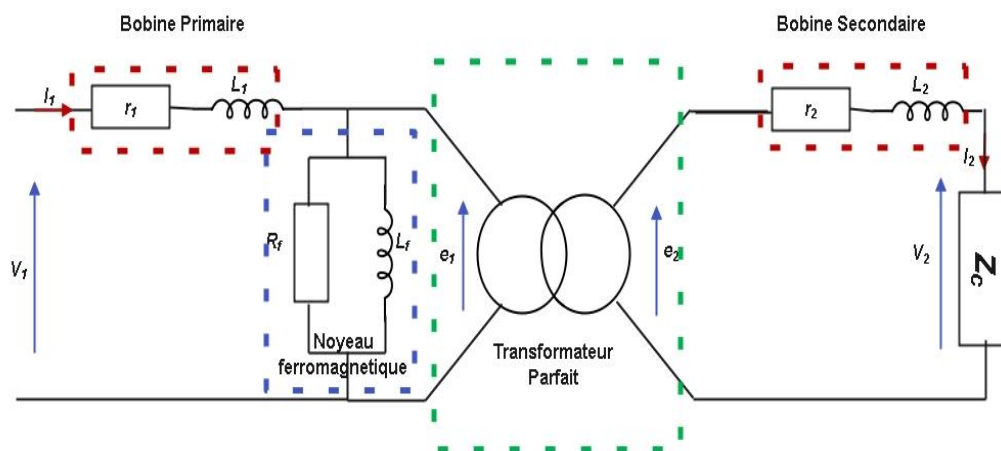


Figure. II.13. Schéma équivalent d'un transformateur monophasé réel

II.9. DETERMINATION DES PERTES DANS UN TRANSFORMATEUR

II.9.1 PERTES PAR EFFET JOULE OU PERTE DE CUIVRE (ESSAI EN COURT-CIRCUIT)

Le passage du courant dans les enroulements primaire et secondaire provoque une dissipation d'énergie sous forme de chaleur, elles dépendent de la *résistance* de ces enroulements et de l'*intensité* du courant qui les traverse : elles sont proportionnelles au carré de l'intensité.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Ces pertes peuvent être déterminés soit par :

- Calcule directement par la relation suivante :

$$P_j = r_1 \cdot i_1^2 + r_2 \cdot i_2^2 \quad (2.20)$$

- L'essai en court-circuit du secondaire à $i_{cc} = i_{2nom}$, permet d'effectuer un mesurage direct très précis des pertes joules dissipées dans les enroulements du transformateur.

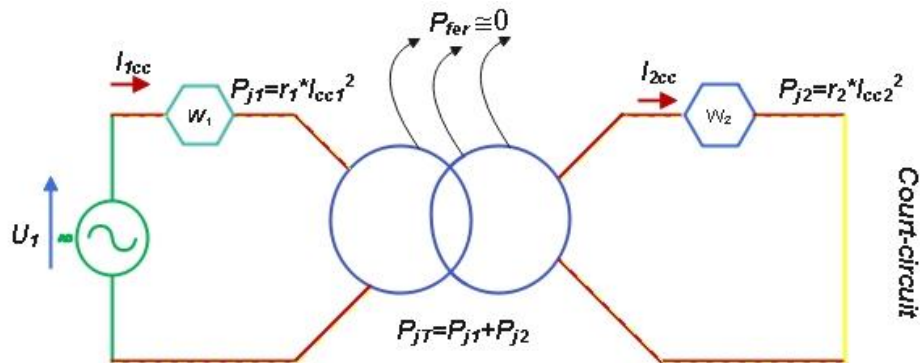


Figure. II.14. Essai en court-circuit

En court-circuit, pour obtenir I_n , il faut travailler à très faible tension U_{1cc} . Par conséquent P_{fer} est très faible :

$$P_{1cc} = P_j + P_{fer} \quad (2.21)$$

Avec : $P_{fer} = 0$

D'où :

$$P_{1cc} = P_j \quad (2.22)$$

II.9.2 PERTES FER OU PERTE MAGNETIQUE (ESSAI A VIDE)

La magnétisation des tôles du transformateur s'accompagne de pertes d'énergie sous forme de chaleur. Elles sont constantes quel que soit la charge du transformateur. Elles dépendent de la qualité des tôles utilisées pour la confection du circuit magnétique.

Ces pertes peuvent être déterminé par

- Pratiquement par un essai à vide : dans ce cas le primaire est alimenté par une tension et le secondaire ne se présente aucune charge.

Il permet de mesurer les pertes fer : $i_2 = 0 \rightarrow P_2 = 0$ et $P_{j2} = 0$, d'autre part, i_{10} est très faible. Par conséquent $P_{j10} \ll P_{10}$

$$P_{10} = P_{fer} \quad (2.23)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

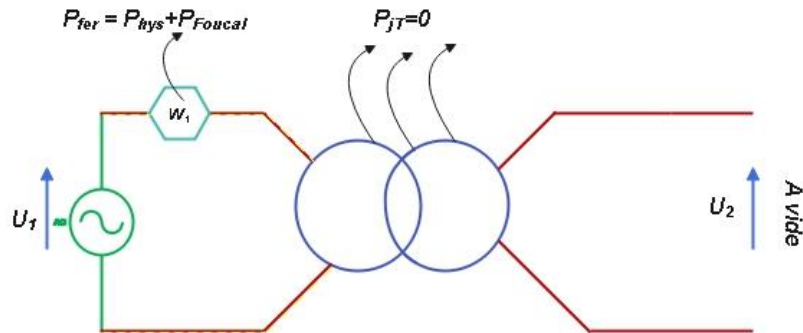


Figure. II.15. Essai a vide

- Théoriquement par un calcul direct exprimé par la relation (2.19) ci-dessus avec :

A) PERTES PAR COURANTS DE FOUCAULT

Toute variation de flux à travers un circuit fermé produit un courant induit I_{Fouc} , selon la loi de Lenz : Le courant induit I_{Fouc} a un sens tel qu'il crée un champ magnétique qui s'oppose à la variation de celui qui lui a donné naissance.

Effet : échauffement du métal et pertes supplémentaires dans le fer.

Solution : le feuilletage du métal limite le développement des courants de Foucault.

La puissance dissipée par courants de Foucault est égale à :

$$P_{Fouc} = C_{Fouc} \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot e^2 \cdot m \quad (2.24)$$

Avec : P_{Fouc} : perte par courant de Foucault en W ;

f : fréquence en Hz ;

B : Induction magnétique en T ;

e : épaisseur des tôles en m ;

m : masses de fer en kg

C_{Fouc} : coefficient de pertes par courants de Foucault en W/kg

B) PERTES HYSTERESIS

Une partie de l'énergie se dissipe sous forme de chaleur dans ce matériau : ce sont les pertes par hystérésis qui exprimé par la relation suivante :

$$P_{Hyst} = C_{Hyst} \cdot f \cdot B^2 \cdot m \quad (2.25)$$

Avec : P_{Hyst} : perte par hystérésis en W ;

f : fréquence en Hz ;

B : Induction magnétique en T ;

m : masses de fer en kg

C_{hyste} : coefficient de pertes par courants de Foucault en W/kg.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

II.10. DETERMINATION DES PARAMETRES DU TRANSFORMATEUR

Si on ramène l'impédance du primaire au secondaire, on obtient le schéma équivalent suivant :

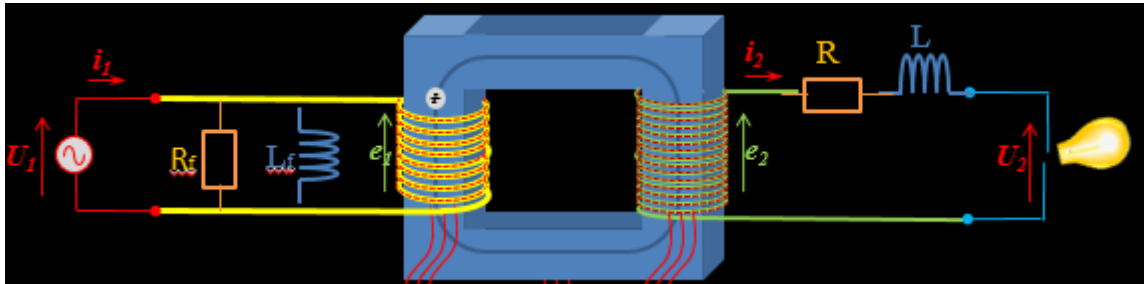


Figure. II.16. Circuit équivalent du transformateur vu du primaire

Avec :

$$R = r_2 + m^2 \cdot r_1 \quad (2.26)$$

Et :

$$L = l_2 + m^2 \cdot l_1 \quad (2.27)$$

On peut déterminer les paramètres physiques d'un transformateur à l'aide des tests expérimentaux :

A) ESSAI A VIDE

Aucune charge branchée au secondaire du transformateur, la seule puissance absorbée dans ce cas est due aux pertes fer.

On mesure :

$$P_{10} \text{ et } S_{10} = V_{1n} * I_{10} \quad (2.28)$$

On en déduit :

$$R_f = \frac{V_{1n}^2}{P_{10}} \quad (2.29)$$

et :

$$X_m = \omega L_m = \frac{V_{1n}^2}{Q_{10}} = \frac{V_{1n}^2}{\sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2}} \quad (2.30)$$

B) ESSAI EN COURT-CIRCUIT

Le secondaire du transformateur est en court-circuit, la seule puissance absorbée dans ce cas est due aux pertes joules :

$$P_{1cc} = R_{eq} * I_{cc}^2 \quad (2.31)$$

d'où :

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31.2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

$$R_{eq} = \frac{P_{1cc}}{I_{cc}^2} \quad (2.32)$$

Et :

$$Q_{1cc} = X_{eq} * I_{cc}^2 \quad (2.33)$$

d'où :

$$X_{eq} = \frac{Q_{1cc}}{I_{cc}^2} \quad (2.34)$$

II.11. RENDEMENT DE TRANSFORMATEUR MONOPHASE REEL

Le rendement d'un transformateur étant bon, P_1 et P_2 possèdent des valeurs voisines qui doivent être mesurées à l'aide du même wattmètre afin d'obtenir des mesurages qui introduisent les mêmes erreurs. D'autre part, il est difficile de charger un transformateur monophasé de forte puissance à sa puissance nominale, ces raisons font que cette méthode reste peu utilisée.

L'Essai en charge à I_{2nom} permet de déduire le rendement du transformateur qu'est exprimé par :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{fournie}} = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.35)$$

Avec :

P_{utile} : est la puissance consommée par la charge au secondaire

$P_{fournie}$: est la puissance absorbée par le transformateur :

$$P_{fournie} = P_{absorbée} = \sum P_{perte} + P_{utile} \quad (2.36)$$

II.12. BILAN DE PUISSANCE

D'après le théorème de Boucherot, le bilan de puissance considérant seulement les puissances actives et les pertes s'écrit comme :

$$P_1 = P_{J1} + P_{Fer} + P_{J2} + P_2 \quad (2.37)$$

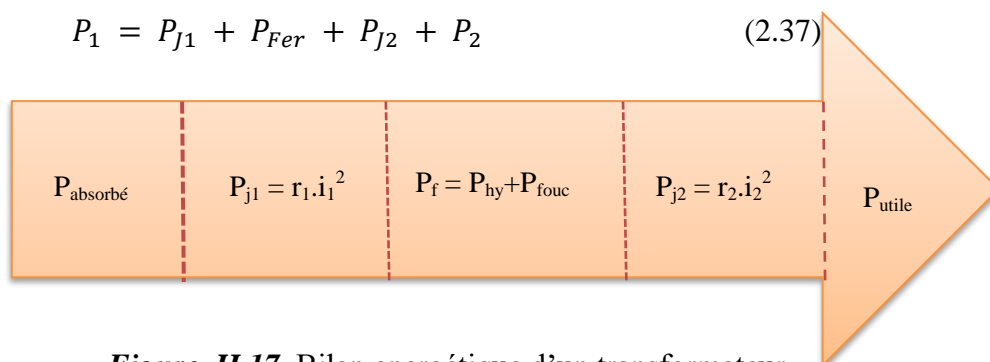


Figure. II.17. Bilan énergétique d'un transformateur

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Règle 6 :

Le rendement varie en fonction des conditions de fonctionnement. Le meilleur rendement est obtenu pour les valeurs nominales indiquées sur la plaque signalétique du transformateur.

II.13. CHUTE DE TENSION SECONDAIRE

Après avoir formé l'équation de maille de la figure II.16 qui relie les grandeurs électriques au secondaire du transformateur, on représente sur la figure II.18 le diagramme de Fresnel correspondant. On a considéré le cas général d'une charge linéaire de facteur de puissance ($\cos\varphi$) donné.

$$m \cdot V_1 = V_2 + R \cdot I_2 + jL\omega \cdot I_2 \quad (2.38)$$

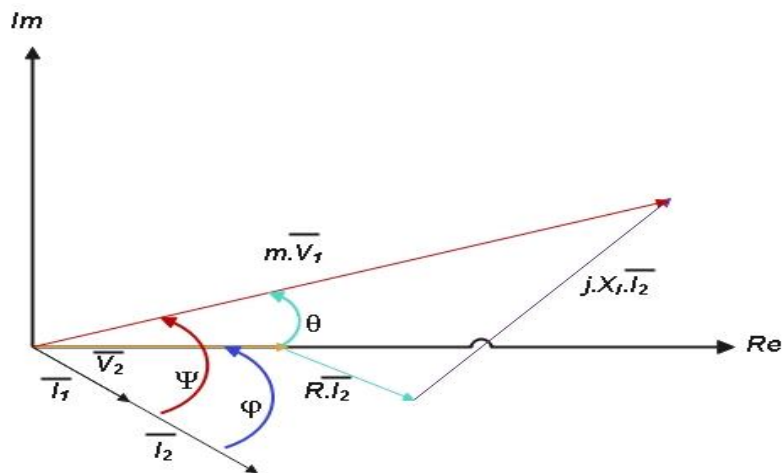


Figure. II.18 Représentation complexe des grandeurs électriques du schéma équivalent

Remarque :

➤ Il est à noter d'après ce schéma qu'il existe en général, et à cause des imperfections, un déphasage entre les tensions V_2 et V_1 , on le note θ .

➤ Plus important: IL existe une chute de tension entre V_2 et $m \cdot V_1$, la tension à vide.

On exprime cette « chute de tension secondaire » comme : $\Delta V_2 = m \cdot V_1 - V_2$

En faisant l'approximation très classique et généralement justifiée comme quoi θ est faible, on retiendra la formule donnant la chute de tension secondaire en fonction du courant et des éléments d'imperfection :

$$\Delta V_2 = m \cdot V_1 - V_2 = R \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi) + L\omega \cdot I_2 \cdot \sin(\varphi) \quad (2.39)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

II.14. FACTEUR DE REGULATION D'UN TRANSFORMATEUR ↴

Le facteur de régulation d'un transformateur indique la variation relative de la tension au secondaire en fonction de la charge :

$$reg = \frac{V_{20} - V_2}{V_2} \quad (2.40)$$

Avec : V_{20} est la tension à vide et V_2 est la tension en charge.

Dans certains cas, on fixe la tension au secondaire à sa valeur nominale, et alors la tension au primaire est plus élevée que la valeur nominale. Dans ce cas, le facteur de régulation est :

$$reg = \frac{V_1 - V_{10}}{V_{10}} \quad (2.41)$$

II.15 CAPACITE EN PUISSANCE D'UN TRANSFORMATEUR ↴

Les plaques signalétiques des transformateurs ressemblent typiquement à :

Transformateurs Cormier, Inc. 25 kVA, 600/120V 60 Hz, Z = 5%, 50°C

La capacité en puissance du transformateur (en VA, kVA ou MVA), est la *puissance apparente maximale* de sa charge.

Cette capacité est déterminée principalement par l'élévation de la température du transformateur, causée par les pertes Joules dans les bobinages et par les pertes Fer (hystérésis et courants induits) dans le noyau. Pour la température maximale d'opération, on indique parfois une température sur le transformateur, comme 50°C dans l'exemple ci-haut.

Ce 50°C représente l'augmentation de la température due aux pertes, une température d'opération de 40°C et une utilisation aux conditions nominales. On limite habituellement la température d'opération en dessous de 120°C.

Pour déterminer la capacité en puissance d'un transformateur, on doit déterminer la tension et le courant nominaux.

a) Capacité en tension

La capacité en tension V_{nom} est limitée par la densité de flux maximale B_{max} . Pour un transformateur, on utilise habituellement B_{max} entre 1.3T et 1.6T.

Alors :

$$V_1 = 4.44 * N_1 * f * \Phi_{max} \quad (2.42)$$

b) Capacité en courant

La capacité en courant I_{nom} est fixée par la densité de courant J_{nom} dans le fil des bobinages. Une valeur de J_{nom} entre 3A/mm² et 4A/mm² est habituellement utilisée.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Donc :

$$I_{nom} = J_{nom} * S \quad (2.43)$$

c) Capacité en puissance

La capacité en puissance est le produit des capacités en tension et en courant :

$$S_{nom} = V_{nom} * I_{nom} \quad (2.44)$$

II.16 TRANSFORMATEUR TRIPHASE

La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé. Par ailleurs, on démontre facilement que le transport de l'énergie en haute tension est plus économique, d'où la nécessité d'employer des transformateurs élévateurs à la sortie de centrale de production et abaisseurs tout proche des centres de consommation. En effet, pour modifier la tension d'un système triphasé, on peut choisir d'utiliser :

- Soit 3 transformateurs monophasés identiques
- Soit un seul transformateur triphasé (la solution la plus économique).

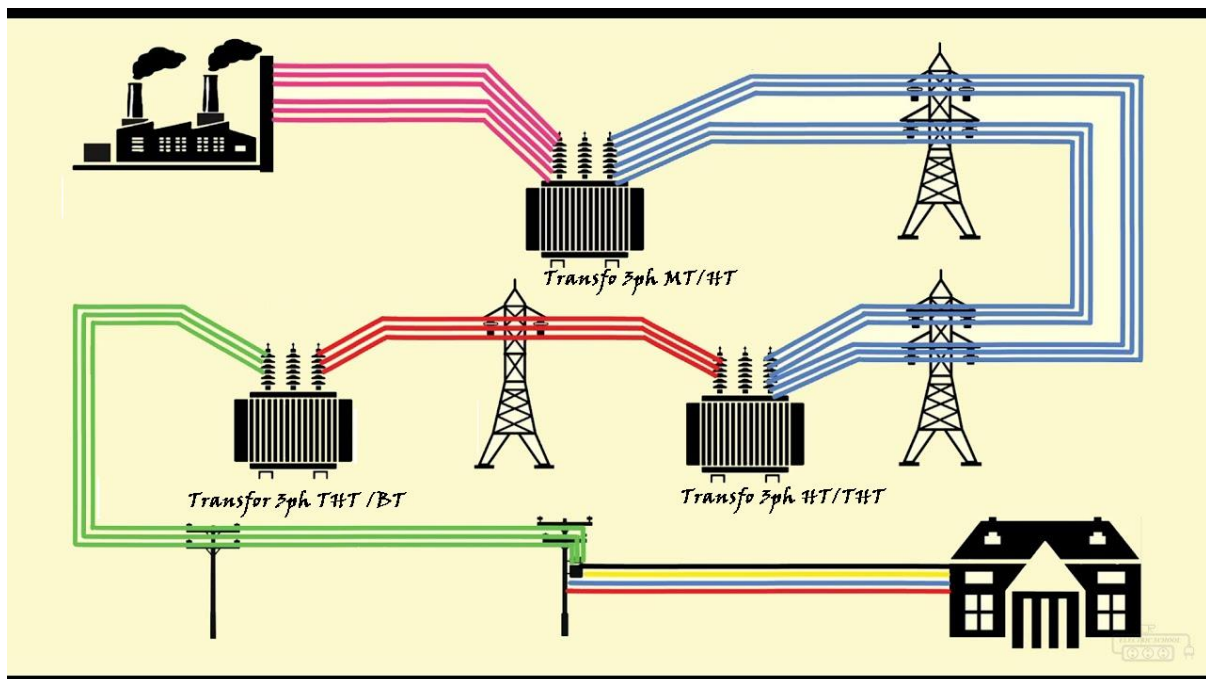


Figure. II.19 Transport de l'énergie électrique

II.17. CONSTITUTION DU TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Nous pourrions pour réaliser la transformation d'un réseau triphasé utiliser *trois transformateurs monophasés*. Dans ce cas, chacun de ces derniers serait alimenté par une phase. En fonction des enroulements primaires, les enroulements haute tension et basse

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

tension seront couplés en triangle ou en étoile. Cette méthode est toutefois coûteuse (la masse totale de fer et l'encombrement seraient trop grands) et complique l'installation.

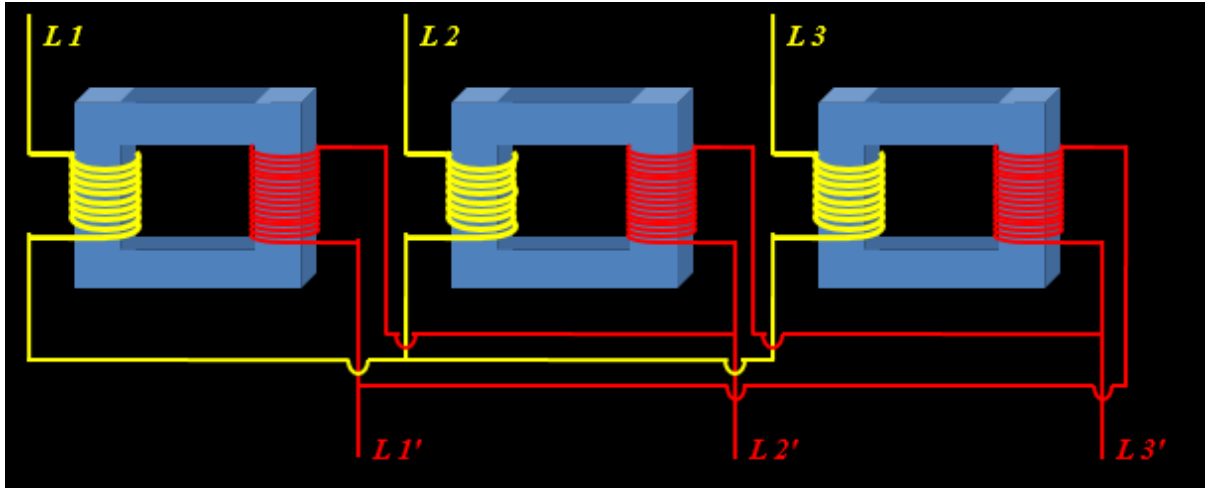


Figure. II.20 Transformateur triphasé constitué de trois transformateur monophasé

Ces trois transformateurs représentés par la figure II.20 peuvent être réunis de façon à créer une colonne centrale unique comme montré dans la figure II.21

Règle 7 :

Le transformateur triphasé est composé de trois bobinages primaires et trois bobinages secondaires enroulés sur un ou plusieurs circuits magnétiques.

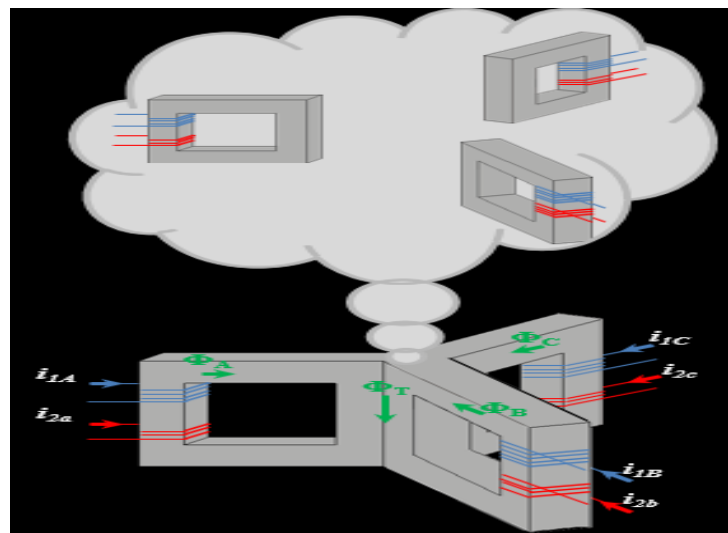


Figure. II.21 Transformateur triphasé

Dans ce cas, les tensions primaires et secondaires sont décalées par $2\pi/3$ avec :

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0 \quad (2.45)$$

$$i_{1a} + i_{1b} + i_{1c} = 0 \quad (2.46)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option: maintenance industrielle |
| | | | | Semestre: 05 |

II.18. CONCEPTION D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE

En réalité, pour des raisons de facilités de réalisation, le circuit magnétique du transformateur est réalisé à plat. Les réluctances des trois colonnes ne sont pas identiques. Chaque colonne ou noyau porte deux enroulements. Les bornes de hautes tensions sont repérées par des lettres majuscules (A, B, C) et les bornes de basses tensions sont repérées par (a, b, c). On définit les tensions homologues comme étant les tensions qui portent les mêmes noms : (U_A, U_a) , (U_B, U_b) et (U_C, U_c) .

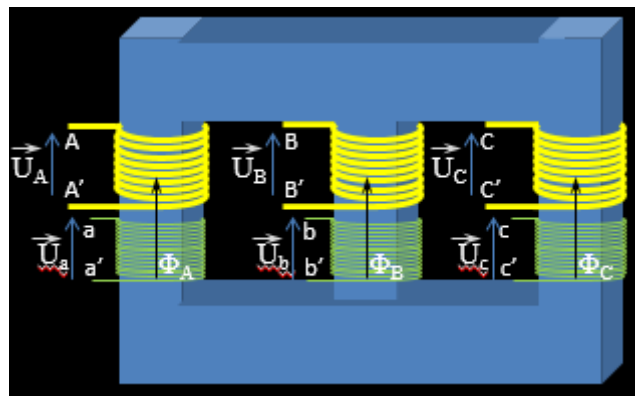


Figure. II.22 Transformateur triphasé conception

L'enroulement primaire (à N_1 spires) et l'enroulement secondaire (à N_2 spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux Φ les tensions et sont En phase A U_A et U_a .

II.19. SYMBOLE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Le transformateur triphasé est symbolisé comme montré dans la figure II.23 ci-dessous :

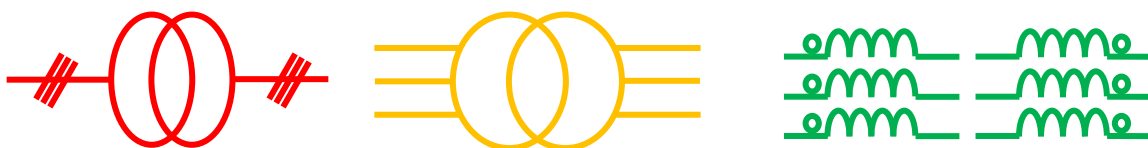


Figure. II.23 Symbole d'un transformateur triphasé

II.20. VUE ECLATE D'UN TRANSFORMATEUR TRIPHASE

Comme montré dans la figure II.24, de plus le circuit magnétique, le bobinage primaire et secondaire, un transformateur triphasé doté de d'autre composant essentiel tel que :

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

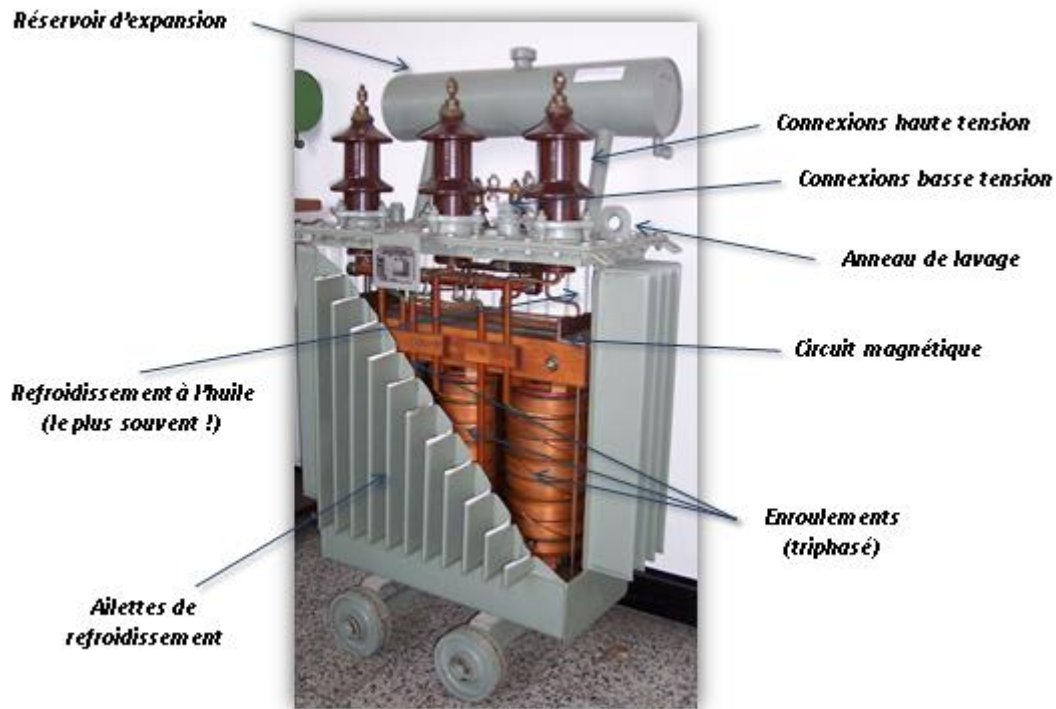


Figure. II.24 Exemple de construction d'un transformateur triphasé

II.20.1. LA PLAQUE SIGNALÉTIQUE

Sur la carcasse d'un transformateur triphasé (enveloppe diélectrique), se trouve indispensablement une fiche contient les informations de ce transformateur, cette fiche s'appelle « plaque signalétique », les principaux paramètres sont :

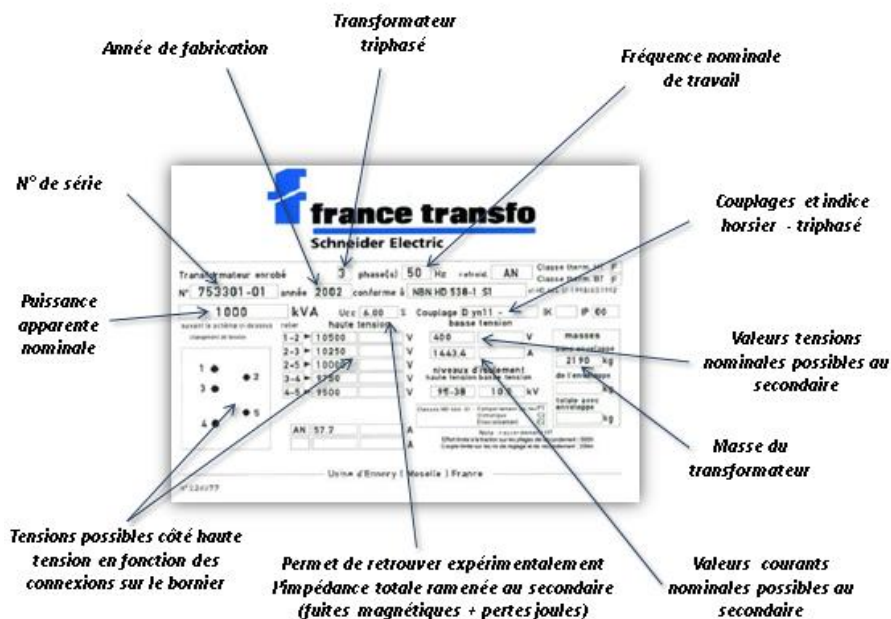


Figure. II.25 Plaque signalétique d'un transformateur triphasé

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Nveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

II.20.2. ENVELOPPE ET DIELECTRIQUE

L'enveloppe métallique du transformateur et le diélectrique liquide fournissent l'isolement et le refroidissement nécessaires au bon fonctionnement du transformateur.

II.20.3. TRAVERSEES ISOLANTES

Elles assurent la liaison électrique entre les enroulements et les circuits électriques extérieurs. C'est une borne isolante qui doit permettre :

- L'isolement de la liaison par rapport au couvercle.
- D'assurer l'étanchéité.
- De posséder une résistance suffisante.



II.20.4. REFROIDISSEMENT

Il est nécessaire de refroidir les transformateurs de grosses puissances afin d'éviter la détérioration des vernis isolants (courant de Foucault). Ce refroidissement peut se faire de différentes façons :

a) Refroidissement dans l'air :

Le transformateur est mis dans une enceinte grillagée, la ventilation peut être naturelle ou forcée (ventilateur).

b) Refroidissement naturel dans l'huile :

Une cuve renferme le transformateur. Cette cuve est munie d'ailettes. L'huile se refroidit au contact des parois (échange thermique).

c) Refroidissement par radiateur d'huile :

L'huile circule naturellement dans un radiateur séparé de la cuve. Ce radiateur peut être ventilé et la circulation d'huile forcée par une.

d) Refroidissement avec hydro-réfrigérant :

La circulation de l'huile s'effectue dans une cuve contenant des tubes à l'intérieur desquels circule de l'eau froide.

II.20.5. DEFINITION DES PRINCIPAUX MODES DE REFROIDISSEMENT

Exemple d'Application:

ONAN : Transformateur immergé dans l'huile, à circulation naturelle, refroidie par air à ventilation naturelle.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

| 1ère lettre | | 2ème lettre | | 3ème lettre | | 4ème lettre | |
|------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|
| Nature du diélectrique | | Mode de circulation du diélectrique | | Fluide de refroidissement | | Mode de circulation du fluide | |
| <i>O</i> | <i>Huile minérale</i> | <i>N</i> | <i>Naturel</i> | <i>O</i> | <i>Huile minérale</i> | <i>N</i> | <i>Naturel</i> |
| <i>L</i> | <i>Diélectrique chloré</i> | <i>F</i> | <i>Forcé</i> | <i>L</i> | <i>Diélectrique chloré</i> | <i>F</i> | <i>Forcé</i> |
| | | <i>D</i> | <i>Forcé et dirigé dans les enroulements</i> | | | | |
| <i>G</i> | <i>Gaz</i> | | | <i>G</i> | <i>Gaz</i> | | |
| <i>A</i> | <i>Air</i> | | | <i>A</i> | <i>Air</i> | | |
| <i>S</i> | <i>Isolant solide</i> | | | <i>S</i> | <i>Isolant solide</i> | | |

II.21. INDICE HORAIRE

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre des tensions homologues, c'est à dire apparaissant entre les bornes désignées par des mêmes lettres (V_A, V_a) ou (U_{AB}, U_{ab}).

En pratique, le déphasage θ obtenu est toujours un multiple entier de θ qu'est le retard d'une tension BT sur son homologue HT

L'indice horaire I est souvent exprimé en heures pour plus de commodité, ce qui correspond à $2\pi = 12h \rightarrow$ L'indice horaire 1 h correspond ainsi à $\pi/6$

L'indice horaire I est : $I = \theta / (\pi/6)$, θ varie de 0 à $330^\circ \rightarrow$ donc I varie de 0 à 11 ($0 \leq I \leq 11$)

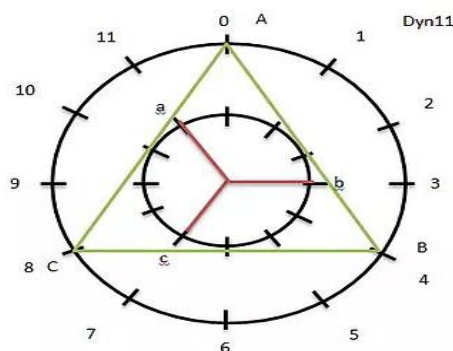


Figure. II.26 Indice horaire d'un transformateur triphasé.

II.22. MODE DE COUPLAGE

Les transformateurs sont réalisés à partir de trois types de couplage

- Le couplage étoile ;

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

- Le couplage triangle ;
- Le couplage Zigzag.

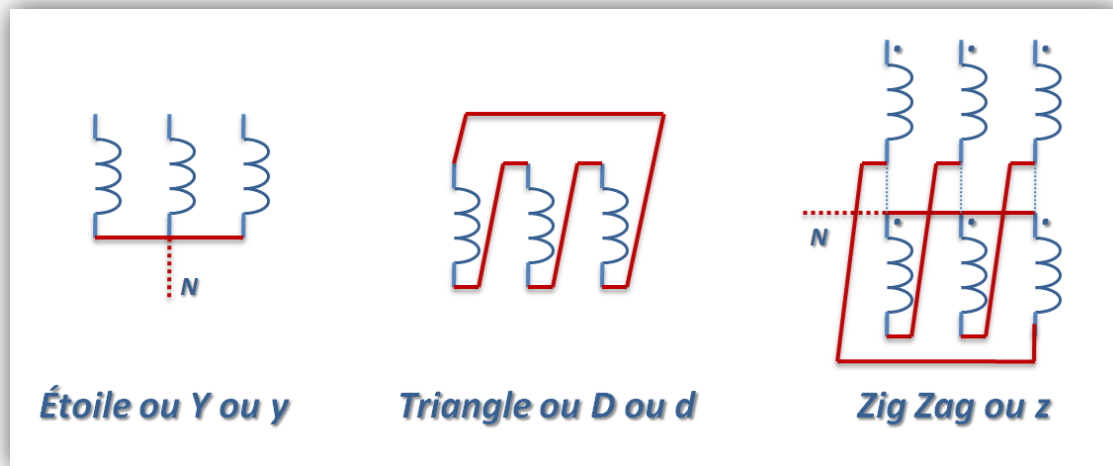


Figure. II.27 Mise en parallèle des transformateurs triphasés.

Les lettres majuscules concernent la haute tension et les lettres minuscules concernent la basse tension. Les lettres (A ; a), (B ; b), (C ; c) correspondent aux extrémités des enroulements. La lettre « N » et « n » représente le neutre qui n'est pas toujours relié.

II.23. CHOIX DU COUPLAGE

On a intérêt à choisir :

- **Un couplage étoile** : À la très haute tension (chaque enroulement supporte une tension $V=U/\sqrt{3}$).
- **Un couplage triangle** : Au fort courant (l'intensité par enroulement est $J = I / \sqrt{3}$)

Si on souhaite disposer de deux tensions : une tension basse pour l'éclairage et une tension élevée pour le chauffage d'un moteur, on adopte un couplage étoile au secondaire : cas du transformateur de distribution.

- **Couplage étoile-étoile Yy** : C'est un couplage utilisé dans les transformateurs abaisseur de tension qui assure la liaison entre réseau haute tension moyenne tension.
- **Couplage triangle-étoile Dy** : C'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution comme transformateur élévateur de tension à la sortie de centrale de production d'électricité.
- **Couplage étoile-zig-zag Yz** : C'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution pour compenser le déséquilibre.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

II.24. RAPPORT DE TRANSFORMATION

Il est égal au rapport de la tension U_1 , entre deux fils de phase de la ligne primaire à la tension U_{20} , entre deux fils de phase de la ligne secondaire à vide.

$$m = \frac{U_{20}}{U_1} \quad (2.47)$$

Les tensions U_{20} et U_1 , ne sont égales aux tensions aux bornes des enroulements que pour un couplage triangle. Le rapport de transformation est étroitement lié au type de couplage retenu pour le primaire et le secondaire. Le tableau donne les valeurs de m en fonction de m_V (rapport de transformation du transformateur monophasé à vide) pour les différents types de couplages.

| Couplage | U_{20} | U_1 | m |
|------------|-------------------------|----------------|----------------------|
| Y-y | $V_{20} \sqrt{3}$ | $V_1 \sqrt{3}$ | m_V |
| Y-d | V_{20} | $V_1 \sqrt{3}$ | $m_V / \sqrt{3}$ |
| Y-z | $(V_{20} / 2) \sqrt{3}$ | $V_1 \sqrt{3}$ | $m_V / 2$ |
| D-y | $V_{20} \sqrt{3}$ | V_1 | $m_V \sqrt{3}$ |
| D-d | V_{20} | V_1 | m_V |
| D-z | $(V_{20} / 2) \sqrt{3}$ | V_1 | $(m_V / 2) \sqrt{3}$ |

Remarque :

On peut observer que seuls les transformateurs présentant un couplage primaire analogue au couplage secondaire offrent un rapport de transformation triphasé identique à celui du transformateur à vide.

Exemple d'Application : Transformateur D-y

En notant par V_1 et V_{20} les tensions aux bornes des enroulements et par U_1 et U_{20} les tensions entre fils de phases : $U_1 = V_1$ et $U_{20} = V_{20} \sqrt{3}$

Le rapport de transformation en monophasé : $m = V_{20} / V_1$

Le rapport en triphasé : $m = U_{20} / U_1 = V_{20} \sqrt{3} / V_1$ soit $m_T = m_V \sqrt{3}$

II.25. RENDEMENT

Quel que soit le couplage retenu, le rendement du transformateur triphasé est :

$$\eta = \frac{P_2}{(P_2 + \text{pertes})} < 1 \quad (2.50)$$

Avec :

$$P_2 = \sqrt{3} * U_2 * I_2 * \cos(\varphi_2) \quad (2.51)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Pertes = Pertes fer + Pertes joules

(Pertes fer = **essai à vide** ; Pertes joules = **essai en court circuit**)

II.26. MISE EN PARALLELE DE TRANSFORMATEURS

La mise en marche en parallèle de transformateurs peut être nécessaire afin de répondre à l'augmentation de la demande de la puissance à fournir.

Pour que deux transformateurs triphasés puissent fonctionner en parallèle, il faut que ceux-ci aient :

- Un rapport de leur puissance < 2 ;
- Des caractéristiques de tension égales (rapport de transformation) ;
- Tension de Court circuit égale (ou à 10 % près) ;
- Des branchements étoile, triangle compatibles (des connexions de même longueur et de même caractéristique) ;
- Des indices horaires identiques ou appartenant au même groupe de couplage

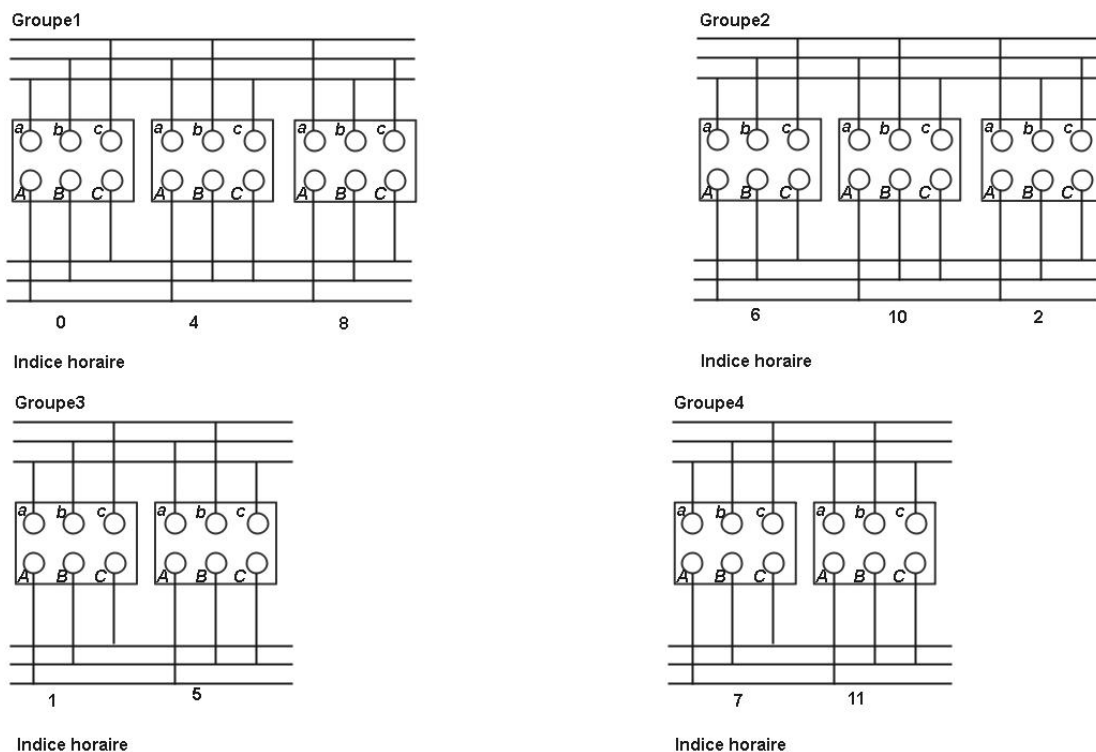


Figure. II.28 Mise en parallèle des transformateurs triphasés.

MACHINES A COURANT CONTINU

Objectifs :

- Assimilé la technologie et la création du f.e.m par spire ;
- Comprendre la génération des f.e.m par fil actif dans l'espace de fresnel ;
- Distinguer les f.e.m résultantes entre deux points de bobine ou entre deux balais ;
- Relier les fonctionnements moteurs et générateurs aux variables et à leurs signes relatifs ;
- Maitriser le rôle du collecteur et de la bobine pseudo stationnaire.

Vocabulaire :

- Bobines, collecteur, balais, Inducteur, Induit, excitation, moteur, générateur.

A la fin de la séance, l'étudiant doit apprendre les notions suivantes :

- La constitution d'une machine à cc ;
- Le principe de fonctionnement ;
- Les différents types d'excitation et les modes d'emplois ;
- Les problèmes de démarrages.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

III.1. INTRODUCTION

Le moteur à **courant alternatif** est invariablement appliqué dans l'industrie pour la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, mais aux endroits où la large plage de vitesses et une bonne régulation de la vitesse sont requises, comme dans le système de traction électrique, un moteur à **courant continu** est utilisé. Dans ce chapitre, nous allons comprendre en premier temps comment fonctionne et comment sont fabriqués les moteurs à courant continu.

En second lieu, l'étude analytique des moteurs à courant continu afin de réaliser les différents calculs tels que les paramètres de son schéma équivalent, la force électrique induit, la puissance électromécanique et le bilan de puissance sera présentée.

III.2. DEFINITION D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU

Une machine à courant continu 'MCC' est un dispositif de conversion **bidirectionnel** d'énergie électromécanique. Il existe deux types de machines à courant continu : l'un est un **générateur** à courant continu et un autre est connu sous le nom de **moteur** à courant continu.



Figure. III.1. Moteur à courant continu

Un **générateur** à courant continu convertit l'**énergie mécanique** (ωT) en **énergie électrique** à courant continu (**EI**) comme montré dans la figure III.2.a, tandis qu'un **moteur** à courant continu présenté par la figure III.2.b, convertit l'**énergie électrique** à courant continu en **énergie mécanique**.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

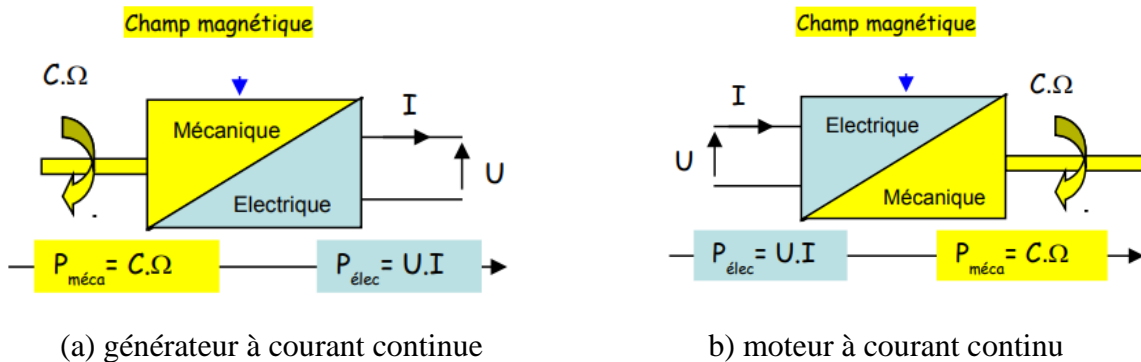


Figure. III.2. Fonctionnement d'une MCC

La construction du moteur à courant continu et du générateur est **presque la même**. Le générateur est utilisé de manière très sécurisée, il existe donc un type de construction ouverte. Mais le moteur est utilisé à l'endroit où il est exposé à la poussière et à l'humidité, et par conséquent, il nécessite des boîtiers, par exemple résistant à la saleté, au feu, etc. selon les besoins.



Figure. III.3. Machine à courant continu.

Bien que **la batterie** soit une source importante d'énergie électrique CC, elle ne peut fournir qu'une alimentation limitée à toutes les machines. Certaines applications nécessitent de grandes quantités de courant continu, telles que la galvanoplastie, l'électrolyse, etc. Par conséquent, à ces endroits, des générateurs de courant continu sont utilisés pour fournir de l'énergie.

Règle 1 :

Un **générateur** à courant continu peut être utilisé comme **moteur** à courant continu sans aucun changement de construction et l'inverse est également possible. Ainsi, un

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

générateur à courant continu ou un **moteur** à courant continu peut être nommé comme machine à courant continu.

III.3. CONSTITUTION D'UNE MACHINE A COURANT CONTINU

III.3.1. STRUCTURE DE BASE

La machine électrique tournante ou à courant continu comporte principalement **deux parties** : l'un est le **stator** et l'autre est le **rotor**. Le **stator** et le **rotor** sont séparés l'un de l'autre par un **entrefer**.

Le **stator** est le cadre **extérieur** de la machine et est **immobile**. Le **rotor** est **libre** de ses mouvements et constitue la partie **interne** de la machine.

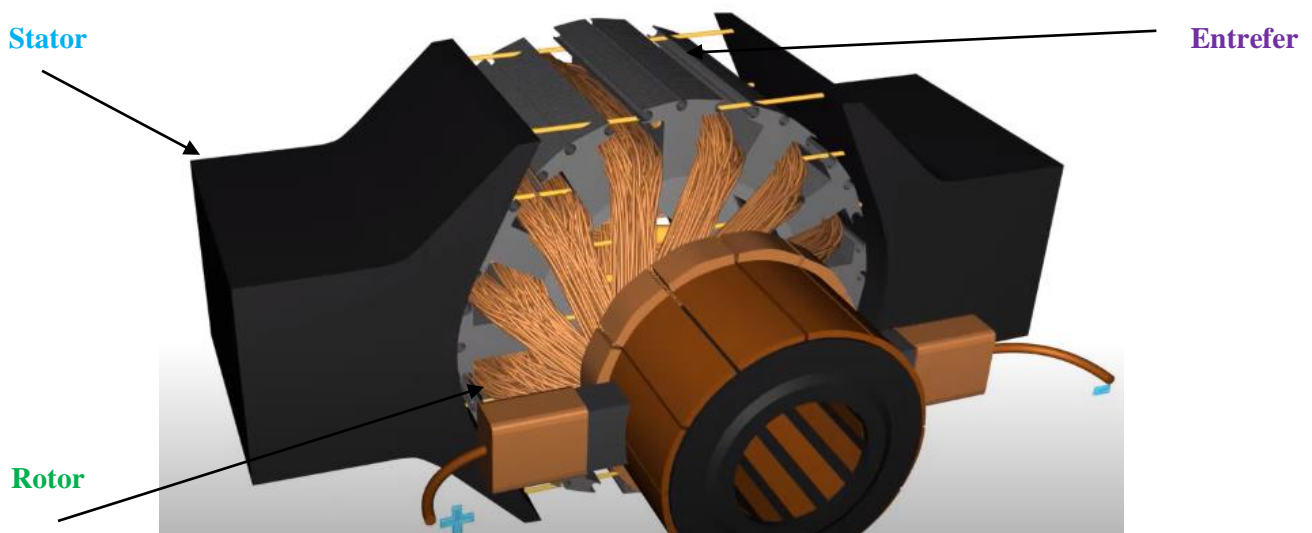


Figure. III.4. Structure de base d'une Machine à courant continu.

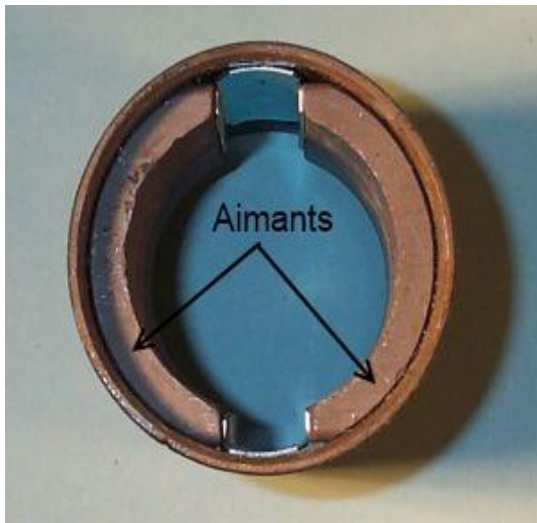
Le **stator** s'appelle aussi **l'inducteur** et le **rotor** connu sous le nom de **l'induit** sont tous deux constitués de matériaux **ferromagnétiques**. Des fentes sont découpées sur la périphérie interne du stator et la périphérie externe du rotor. Les conducteurs sont placés dans les fentes du **stator** ou du **rotor**. Ils sont interconnectés pour former des enroulements.

a) Le stator (l'inducteur)

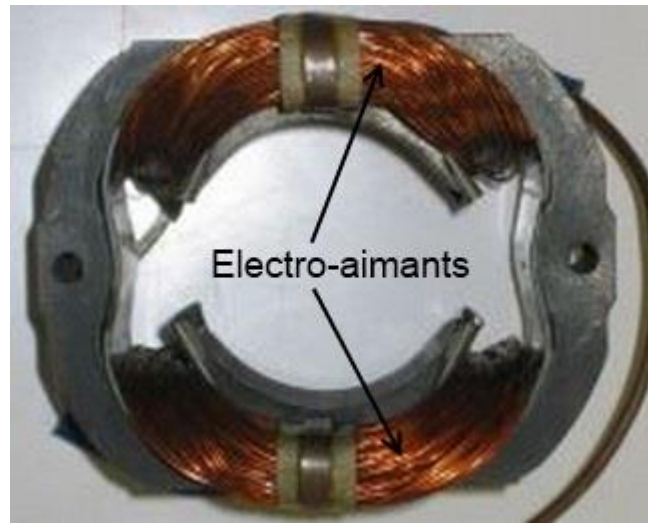
Le stator aussi appelé inducteur est constitué de plusieurs paires de pôles magnétiques. Ces pôles peuvent être obtenus par un aimant permanent ou des bobinages alimentés en courant continu.

Remarque: Pas besoin d'alimenter le stator lorsque celui-ci est constitué d'un aimant permanent.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |



a) Aimant permanent



b) Bobinage

Figure. III.5. Stator (inducteur) d'une MCC

b) le rotor (l'induit)

Le rotor aussi appelé l'induit est constitué d'un enroulement de spires conductrices réunis en fiscaux disposé de telle manière que lorsqu'un côté est soumis au pôle nord, l'autre est au pôle sud.



Figure. III.6. Rotor (inducteur) d'une MCC

La réalisation des enroulements est un problème complexe qui ne sera pas abordé dans le cadre de ce cours. Elle intéresse exclusivement les constructeurs de machines, sur la base du type de connexions d'enroulement, nous avons classé l'enroulement d'induit d'une machine à courant continu en deux types

b-1) Enroulement imbriqué ou bouclé :

Dans ce type d'enroulement, l'extrémité finale d'une bobine est connectée à un segment de collecteur et à l'extrémité de début de la bobine adjacente située sous le même

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

pôle et de la même manière, toutes les bobines sont connectées. Ce type d'enroulement est connu sous le nom de tour parce que les côtés des bobines successives se chevauchent. Les applications du bobinage à recouvrement comprennent principalement les machines à courant élevé et à basse tension.

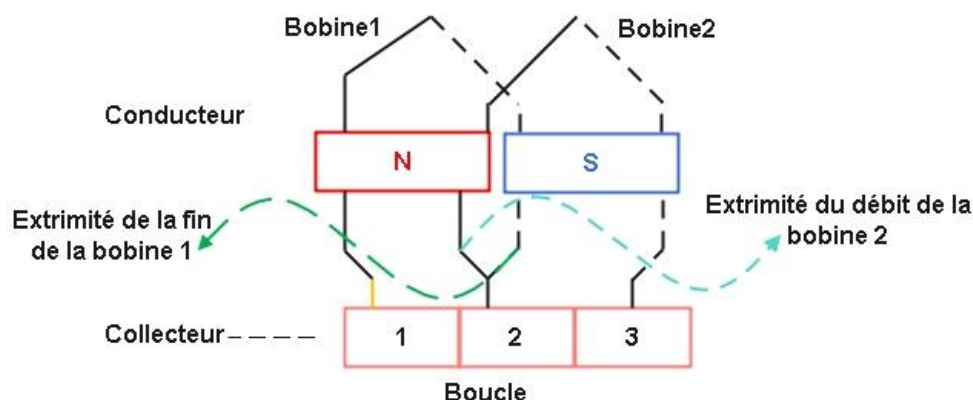


Figure. III.7. Enroulement imbriqué de rotor (inducteur) d'une MCC

b-2) l'enroulement ondulé ou en zig-zag :

Dans ce type d'enroulement ondulatoire, il n'y a que deux voies parallèles parmi les brosses positives et négatives. L'extrémité finale de la première bobine d'induit est liée à l'extrémité de début du segment du collecteur de bobine d'induit secondaire à une certaine distance.

Dans ce genre de bobinage, les conducteurs associés aux deux voies parallèles des pôles de la machine. Le chiffre des ports parallèles est équivalent au chiffre des balais. Ce type d'enroulement est applicable aux machines à faible courant et haute tension.

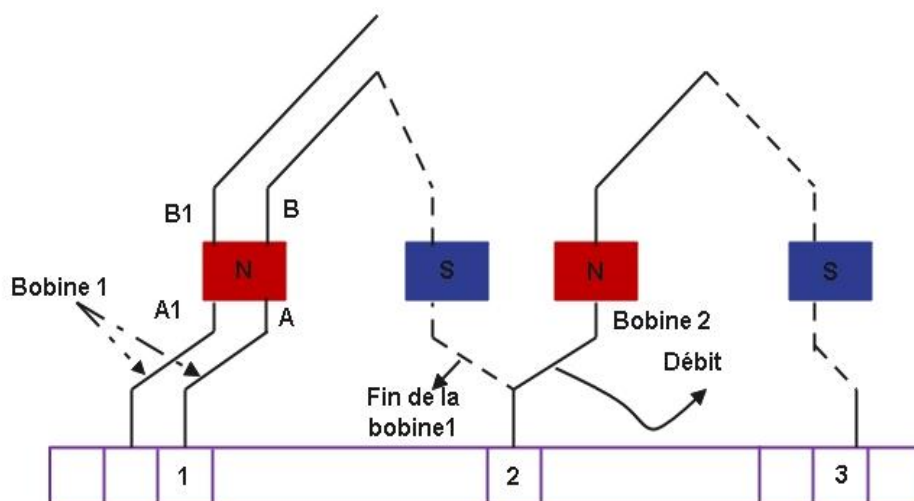


Figure. III.8. Enroulement ondulé de rotor (inducteur) d'une MCC

| | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

Remarque :

Il est clair également qu'il peut y avoir plusieurs conducteurs par encoche pour constituer des bobines (spires mises en parallèle) ou des enroulements à plusieurs couches (c'est-à-dire dans lesquels les conducteurs d'une encoche n'appartiennent pas à la même bobine. Enfin, les spires peuvent être diamétrales ou à pas raccourci lorsque la distance entre les deux conducteurs de la spire est inférieure à la distance interpolaire.

c) Principe du collecteur

Les extrémités d'une spire sont reliées électriquement à deux lames en cuivre : le collecteur. Pour prélever la f.e.m. 'e' sur la partie fixe, deux balais en graphite liés au stator frottent sur les lames.

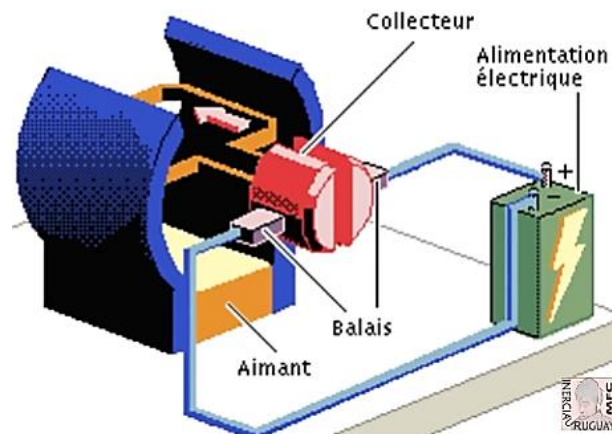


Figure. III.9. Système balais collecteur

III.3.2. CONSTRUCTION

La figure III.10 ci-dessus montre les détails de construction d'une simple machine à courant continu.

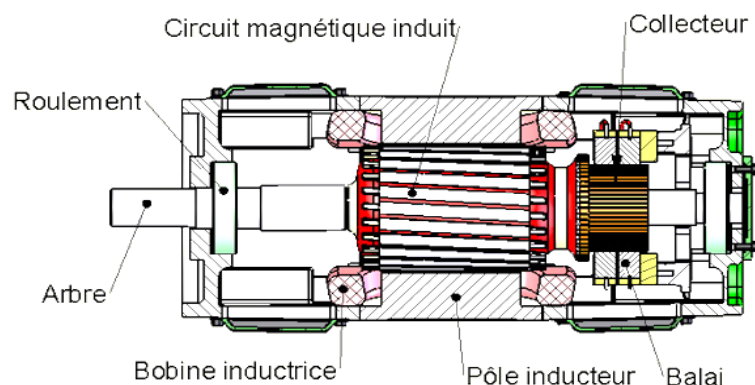


Figure. III.10. Détails de construction d'une machine à courant continu

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

a) Carcasse et flasques

Le cadre extérieur d'une machine à courant continu est appelé carcasse. Il est composé de fonte ou d'acier. Il fournit non seulement une résistance mécanique à l'ensemble des composants de la machine, mais transporte également le flux magnétique produit par l'enroulement de champ. et sur laquelle sont fixés :

- Les pôles inducteurs et auxiliaires ;
- Les flasques paliers ;
- la plaque à bornes ;
- Les pattes de fixation et le crochet de levage éventuel ;
- La plaque signalétique.

Avec les flasques, la carcasse assure en outre la protection mécanique et dirige l'air de refroidissement.

b) Arbre et paliers

L'arbre assure la transmission du couple. Guidé en rotation par deux paliers à roulement, il supporte :

- Le collecteur
- L'induit
- Eventuellement un ventilateur

Les bouts d'arbre sont normalisés et munis, en général, d'une rainure de clavette.

c) Ventilation

- **Machines auto-ventilées** : le ventilateur est calé sur l'arbre du côté opposé au collecteur. En général l'aspiration se fait côté collecteur et le refoulement côté ventilateur.
- **Machines à ventilation forcée** : un groupe moto-ventilateur extérieur aspire de l'air frais côté accouplement et l'air chaud sort côté collecteur.

III.4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

III.4.1. FORCE DE LAPLACE

On considère un conducteur rectiligne de longueur $l = PM$ parcouru par un courant électrique d'intensité I et placé dans un champ magnétique \vec{B} perpendiculaire à PM .

Lorsque le courant passe le conducteur mobile roule vers la gauche ou vers la droite selon le sens du courant et selon le sens du champ magnétique.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

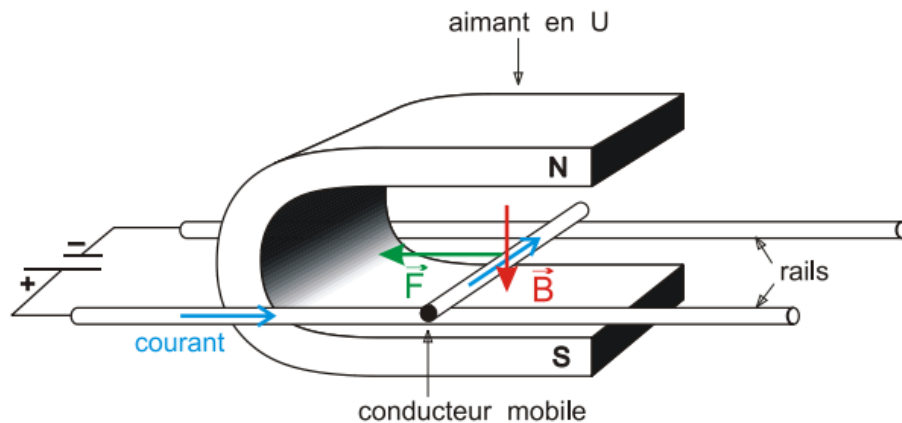


Figure. III.11. Force de Laplace

On dit que le conducteur est sollicité par une force appelée **force électromagnétique de Laplace**. Cette force est égale à la résultante de toutes les innombrables forces de Lorentz qui s'exercent sur les électrons qui constituent le courant électrique. Le sens de cette force est déterminé par la règle des trois doigts de la main droite :

Pouce : sens du courant ;

Index : sens de \vec{B} ;

Majeur : sens de \vec{F} ;

III.4.2. FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE A COURANT CONTINU

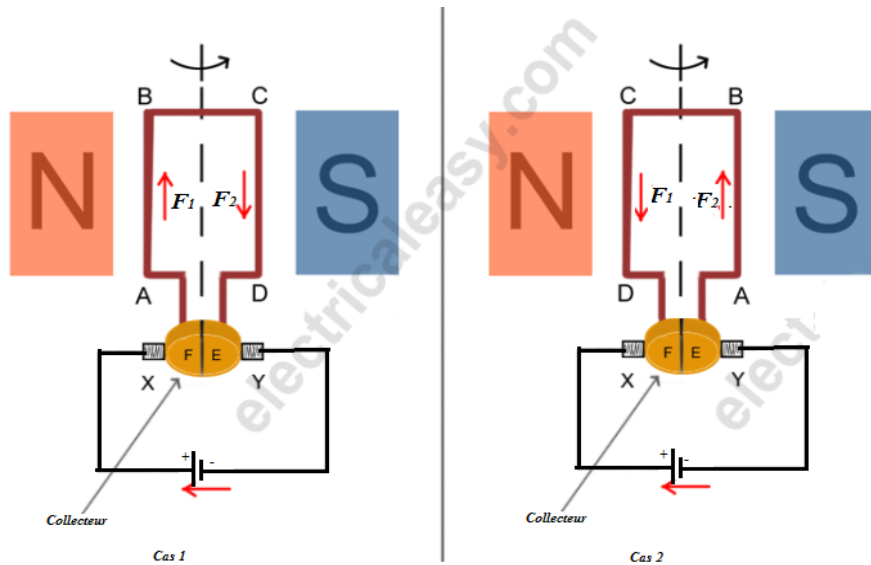
Le moteur à courant continu est la machine qui convertit le courant continu en travail mécanique (rotation). Il fonctionne sur le principe de la loi de Lorentz, qui stipule que "le conducteur porteur de courant placé dans un champ magnétique et électrique subit une force". Pour simplifier le processus, on peut décrire son fonctionnement continue comme suit :

- Couple électromagnétique : L'induit est alimenté sous une tension continue U ;
- Chaque conducteur de l'induit est alors parcouru par un courant continu I ;
- Les conducteurs placés sous les pôles de l'inducteur sont alors soumis à une force de Laplace (\vec{F}) ;
- Un couple moteur apparaît alors, entraînant l'induit en rotation.
- Le moment du couple résultant est fonction de l'intensité du courant I dans l'induit et de l'intensité du champ magnétique inducteur \vec{B} .

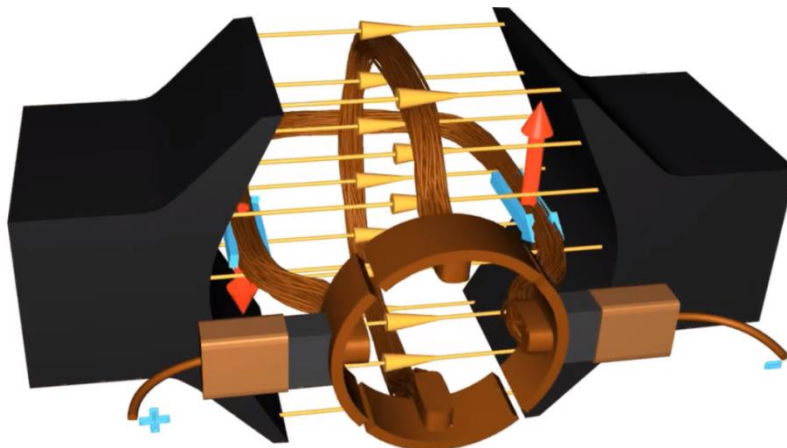
Exemple pour une spire :

Les deux brins d'une spire placés dans le champ magnétique \vec{B} , subissent des forces de Laplace (\vec{F}_1) et (\vec{F}_2) formant un couple de force.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |



(a)



(b)

Figure. III.12. Fonctionnement d'une MCC

Remarque :

Pour un induit constitué d'une seule bobine, il y a un mouvement irrégulier, pour surmonter à ce problème, on ajoute des boucles supplémentaires à l'induit et plus que le nombre des boucles nombreuses plus que le mouvement de l'induit et régulier.

III.5. SYMBOLE

Selon le type de l'inducteur utilisé dans la machine à courant continu, on lui associe deux symboles : la figure III.13(a) représente le symbole d'une machine à courant continu où l'inducteur est de type : bobinage, ou la figure III.13(b), montre le symbole d'une machine à courant continu à aimant permanent.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

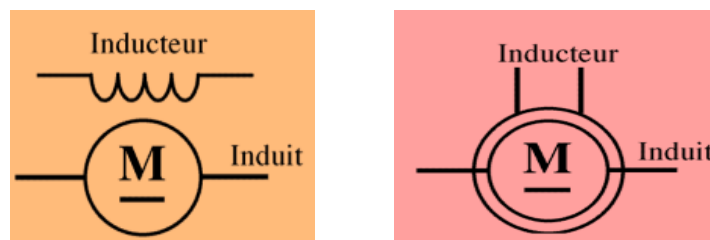


Figure. III.13. Symbole d'une MCC

III.6. SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT

On dit une machine à courant continu puisque elle est totalement réversible, c'est-à-dire elle peut fonctionner en tant que un moteur comme elle peut être une génératrice.

Dans le cas d'un inducteur à aimant permanent, le circuit électrique équivalent (schéma équivalent d'un MCC) en générale est représenté par une f.e.m et une résistance de l'induit.

- Si le courant et la tension f.e.m dans le même sens donc on parle d'un fonctionnement en mode génératrice.
- Si le courant et la tension f.e.m sont dans un sens opposés, donc on parle d'un fonctionnement en mode moteur.

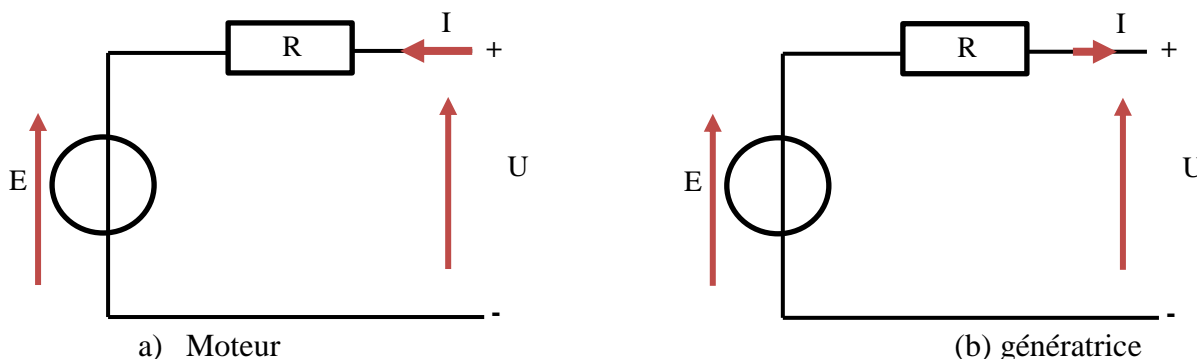


Figure. III.13. Schéma équivalent de l'induit d'une MCC

L'équation de l'induit d'un moteur à courant continu (figure III.13 (a)) s'écrit tout en appliquant la loi des mailles comme suit :

$$U = E + R * I \quad (3.1)$$

De la même manière pour le cas de l'induit d'une génératrice à courant continu, par l'application de la loi des mailles, l'équation s'écrit comme :

$$U = E - R * I \quad (3.2)$$

Dans le cas d'un inducteur en électro aimant, le schéma équivalent de ce dernier est représenté par la figure III.14 ci-dessous :

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

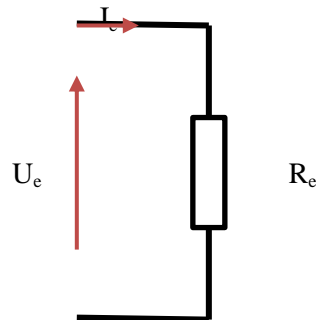


Figure. III.14. Schéma équivalent de l'inducteur d'une MCC

L'équation de l'inducteur est :

$$U_e = R_e \times I_e \quad (3.3)$$

III.7. TYPE D'EXCITATION

L'excitation veut dire l'alimentation de la machine, alors dépend de la nature de l'inducteur (aimant permanent ou bobinage), il existe les excitations suivants :

| Excitation Séparée | Excitation dérivation (Shunt ou parallèle) | Excitation série (moteur universel) | Excitation composée (moteur compound) |
|--|---|--|--|
| | | | |
| <p>Dans le cas d'un inducteur bobiné, nécessite deux alimentations.</p> <p>Petites puissances pour les moteurs à aimants permanents.</p> | <p>Vitesse relativement constante, quelle que soit la charge (autorégulateur de vitesse)</p> <p>Absence d'emballement à vide.</p> <p>Couple de démarrage moyen.</p> | <p>Fort couple à basse vitesse</p> <p>Autorégulateur de puissance : la vitesse décroît lorsque la charge augmente.</p> <p>Risque d'emballement à vide.</p> | <p>Couple de démarrage meilleur qu'en dérivation mais plus faible qu'en série.</p> <p>Vitesse relativement stable quelle que soit la charge.</p> <p>Absence d'emballement à vide</p> |

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

III.8. FORCE ELECTROMOTRICE INDUITE

La machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = \frac{p}{2\pi a} n\Phi\Omega \quad (3.4)$$

Avec : p : le nombre de paires de pôles

a : le nombre de paires de voies d'enroulement

n : le nombre de conducteurs

Φ : flux maximum à travers les spires

Ω : vitesse angulaire de rotation

On exprime la f.é.m. de la MCC de manière plus condensée :

$$E = K_{em} * \Phi * \Omega \quad (3.5)$$

Avec : $K_{em} = \frac{p}{2\pi a} n$ est le coefficient f.é.m de la MCC

Pour l'ensemble des n conducteurs du rotor, le moment résultant total est le couple :

$$C_{em} = \frac{p n\Phi}{a 2\pi} I \quad (3.6)$$

D'où :

$$C_{em} = K_{em} * \Phi * I \quad (3.7)$$

III.10. PUISSANCE ABSORBE PAR UN MOTEUR A COURANT CONTINU

La puissance absorbée par la machine à courant continu est la somme des deux puissances absorbées, celle absorbée par l'induit et l'autre absorbée par l'inducteur au cas où ce dernier est de type bobinage.

• Puissance absorbée par l'inducteur :

$$P_{ae} = u_e * i_e = r_e i_e^2 \quad (3.8)$$

• Puissance absorbée par l'induit :

$$P_{ai} = u_i * i_i \quad (3.9)$$

• Puissance électrique totale absorbée :

$$P_a = P_{ai} + P_{ae} = u_i * i_i + u_e * i_e \quad (3.10)$$

III.9. PUISSANCE ELECTROMAGNETIQUE

Si l'induit présente une f.é.m. e et s'il est parcouru par le courant total I , il reçoit une **puissance électromagnétique** :

$$P_{em} = E * I \quad (3.11)$$

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique :

$$P_{em} = C_{em} * \Omega = E * I \quad (3.12)$$

III.10. PERTES DANS LA MACHINE A COURANT CONTINU

Comme tous les circuits magnétiques, la machine à courant continu est le siège d'un ensemble de perte qui réduit le rendement de cette dernière, le tableau ci-dessous représente un inventaire des différentes pertes existes dans la machine à courant continu :

| Pertes | Perte magnétique P_{fer} ou perte ferromagnétique ou perte fer | Perte par effet joule P_j ou perte cuivre | Perte mécanique $P_{méc}$ |
|--------|---|---|--|
| Cause | Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de Ω . | Pertes dans l'induit et l'inducteur, dues aux résistances des bobinages | Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement |
| Parade | Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit | Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation | Utilisation de roulements et de lubrifiants |

III.10.1 PERTE PAR EFFET JOULE (PERTE DE CUIVRE)

Le passage de courant dans un conducteur provoque l'échauffement de ce dernier ce qui représente les pertes par effet joule et représenté par :

$$P_j = P_{jinduit} + P_{jinducteur} \quad (3.13)$$

Ou sous forme détaillé :

$$P_j = R \cdot I^2 + r_e \cdot I_e^2 \quad (3.14)$$

Avec : R : la résistance de l'induit ;

I : le courant de l'induit ;

r_e : résistance de l'inducteur ;

I_e : courant d'excitation de l'inducteur.

L'inducteur étant du point de vue électrique une simple résistance, toute l'énergie qu'il absorbe et dissipée par effet joule, par la suite :

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

$$P_{ae} = P_{je} \quad (3.15)$$

Si on remplace (3.15) dans (3.14), les pertes par effet joule peuvent être représenté par :

$$P_j = R \cdot I^2 + P_{ae} \quad (3.16)$$

III.10.2 PERTE COLLECTIVE (PERTE MAGNETIQUE)

Ces pertes sont dites « constantes » ou « collectives ». C'est-à-dire que si le moteur travaille à vitesse et flux constants, les pertes fer et mécaniques sont approximativement constantes. Elles ne varient pas avec la charge

$$P_c = P_{fer} + P_{méca} \quad (3.17)$$

A flux constant, P_c est proportionnel à Ω , donc le couple des pertes est :

$$C_p = \frac{P_c}{\Omega} \quad (3.18)$$

Règle : Le moment du couple de pertes est une caractéristique constante du moteur quelle que soit la vitesse.

III.12. PUISSANCE UTILE

Il s'agit d'une puissance mécanique de rotation :

$$P_u = C_u \times \Omega \quad (3.19)$$

Avec : T_u : couple utile (N.m)

Ω : Vitesse angulaire, $\Omega = 2\pi N$

Remarque : On note le couple par C ou par T

III.13. RENDEMENT

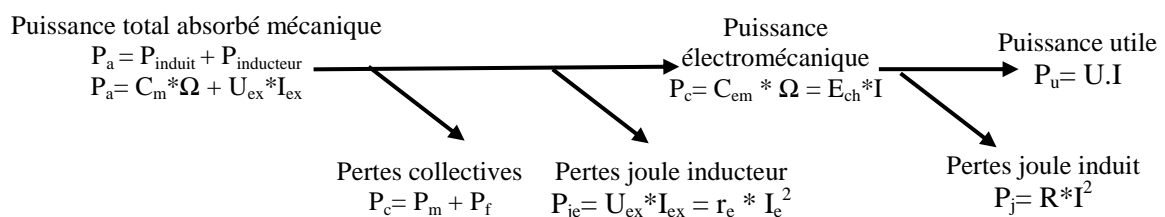
Comme dans toutes les machines électriques, le rendement de la machine à courant continu est le rapport entre la puissance de sortie ou la puissance utile par rapport à la puissance absorbée totale.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{C_u \Omega}{u_i I_i + u_e I_e} = \frac{C_u \Omega}{C_u \Omega + \sum \text{pertes}} \quad (3.20)$$

III.14. BILAN DE PUISSANCE

III.14.1. GENERATRICE A COURANT CONTINU

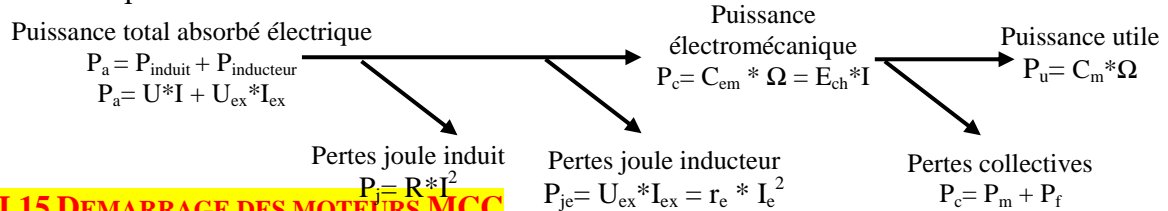
Le bilan de puissance d'une génératrice à courant continu est le suivant :



| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1.2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

III.14.2. MOTEUR A COURANT CONTINU

Le bilan de puissance d'un moteur à courant continu est le suivant :



III.15 DEMARRAGE DES MOTEURS MCC

Le courant absorbé par un moteur à courant continu est donnée par la loi d'Ohm :

$$U = E + R * I \quad (3.21)$$

Ce courant dépend de la f.c.e.m étant donné que U et R sont deux constantes. Entre la mise sous tension du moteur et son décollage, La vitesse est nulle donc la f.c.e.m aussi ; le courant n'est limité que par R.

$$I_d = \frac{U}{R} \quad (3.22)$$

Exemple d'application :

Moteur $U=240V$; $R=1\Omega$; $P=3.6KW$,

$$I_n = \frac{3600}{240} = 15A \text{ or, } I_d = \frac{240}{1} = 240A = 16I_n$$

Le courant de démarrage est 16 fois en plus au courant nominal qui certainement brule le moteur, **alors il faut limiter ce courant**

Solutions pour limiter le courant

Première solution

Pour limiter ce courant à une valeur comprise entre 1 et 2 fois l'intensité nominale (on général : $1,5 I_n$), on monte une résistance en série avec l'induit (rhéostat de démarrage). Le courant au moment de démarrage est alors de :

$$I_d = \frac{U}{R + R_h} \quad (3.23)$$

Deuxième solution : On démarre sous une tension d'alimentation réduite.

III.15.1 DEMARRAGE A VIDE DES MOTEURS MCC

A vide la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes. La puissance utile est nulle.

$I_0 \ll I_n$ d'où : $R I_0 \ll U$ par la suite :

$$\Omega_0 = \frac{U - R I_0}{k_{em} * \Phi} = \frac{U}{k_{em} * \Phi} \quad (3.24)$$

La vitesse à vide se règle en fonction de la tension d'alimentation ou du flux inducteur Φ .

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS 22h30 (Cours 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

III.15.2 PARTICULARITES D'UNE MCC A EXCITATION SEPARÉE

Le bobinage inducteur est alimenté par une source de tension indépendante de la source de tension d'induit. Les relations de E et T de la MCC à aimant permanent restent valables. Cependant, le flux étant proportionnel à I_e on peut le remplacer dans les expressions par :

$$K_{em} * \phi = K' * I_e \quad (3.25)$$

D'où :

$$T_{em} = K_{em} * \Phi * I = K' * I_e * I \quad (3.26)$$

Et :

$$E = K_{em} * \Phi * I = K' * I_e * I \quad (3.27)$$

Du fait d'une alimentation séparée pour l'excitation, La relation électrique de l'induit reste la même que pour la MCC à aimant permanent :

$$U = E + RI \quad (3.28)$$

$$U = E + RI = K' * I \quad (3.29)$$

$$K' * I_e * \Omega = U - RI \quad (3.30)$$

$$\Omega = \frac{U - R * I}{k' * I_e} \quad (3.31)$$

III.15.3 PARTICULARITES D'UNE MCC A EXCITATION SERIE

Le bobinage inducteur est placé en série avec le bobinage de l'induit. C'est donc le même courant d'induit I qui engendre à la fois le flux magnétique et le couple électromagnétique : $I = I_e$

Associées en série, les résistances d'induit et d'inducteur s'additionnent. La relation électrique de l'induit devient donc :

$$U = E' + (R + r) * I \quad (3.32)$$

Le flux étant proportionnel à I on peut le remplacer dans les expressions par :

$$K * \Phi = K' * I \quad (3.33)$$

Le couple électromagnétique peut donc s'écrire :

$$T_{em} = K * \Phi * I = K' * I^2 \quad (3.34)$$

Il y a risque d'emballement si le moteur est peu chargé : en effet $\Omega = \frac{E}{K' * I}$, donc si I tend vers 0, Ω tend vers l'infini. Cependant ce phénomène est rare pour les petits moteurs dont les pertes évitent l'absence de charge.

| | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

Règle :

À vide, il ne faut jamais **supprimer le courant d'excitation** I_e lorsque l'induit est sous tension, car le moteur peut s'emballer. En effet si $I_e \rightarrow 0$ alors $\Phi \rightarrow 0$ et $\Omega_0 \rightarrow \infty$.

En charge, si Φ tend vers 0, le couple électromagnétique aussi et il arrivera un moment où le couple sera inférieur au couple résistant et la machine s'arrêtera.

Alors :

Pour éviter que le moteur s'emballer, il est indispensable de respecter un ordre pour le câblage ainsi qu'un ordre inverse pour le dé câblage du moteur. L'inducteur doit être alimenté en premier lors du câblage, il sera débranché en dernier au dé câblage du moteur.

Conclusion :

L'alimentation de l'induit sous tension réglable présente deux avantages :

- *Mise en vitesse progressive avec suppression de la surintensité.*
- *Vitesse largement variable.*

C'est le mode de fonctionnement utilisé lorsque la vitesse doit varier.

- *La tension d'alimentation impose la vitesse de rotation : $\Omega \approx \frac{U}{K_{em}\Phi}$*
- *La charge impose la valeur du courant : $I \approx \frac{T}{K_{em}\Phi}$*

MACHINES SYNCHRONES

Objectifs :

- *Assimilé la technologie des machines synchrones ;*
- *Comprendre et la création d'un champ magnétique tournant ;*
- *Etudie les différents diagrammes de fonctionnement d'une machine synchrone.*

Vocabulaire :

- *Champ tournant, stator, rotor, alternateur, moteur.*

A la fin de la séance, l'étudiant doit apprendre les notions suivantes :

- *Le principe de fonctionnement ;*
- *La constitution d'une machine synchrone ;*
- *Les différents modes d'emplois (Alternateurs / moteurs) ;*
Les diagrammes de fonctionnement.

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

IV.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons vu comment les principes de l'induction électromagnétique permettent à une machine à courant continu de fonctionner, cependant dans l'industrie, le **courant alternatif** ou **CA** est généralement utilisé car c'est la façon dont l'électricité du secteur est distribuée et elle peut être utilisée directement sans avoir besoin de convertir courant continu, alors comment peut-on construire et faire fonctionner une machine par le courant alternatif ? Cette question sera répondue en détail dans ce chapitre par l'étude de la machine dite **synchrone** et le chapitre suivant par l'étude de la machine dite **asynchrone**.

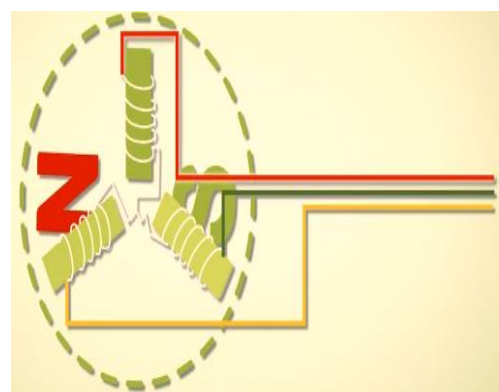
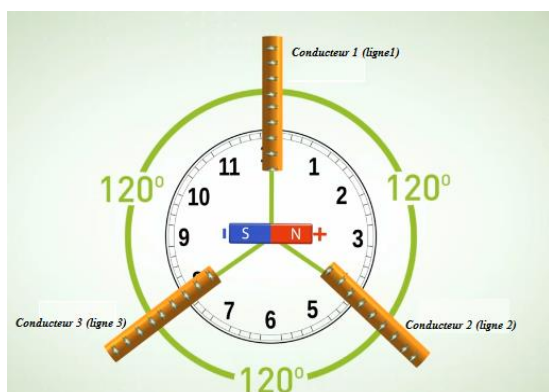
IV.2. CHAMP MAGNETIQUE TOURNANT

IV.2.1 SYSTEM TRIPHASE

Selon la loi de **faraday**, tout un **conducteur** se trouve dans un **champ magnétique variable** présente une **f.e.m.** tel que :

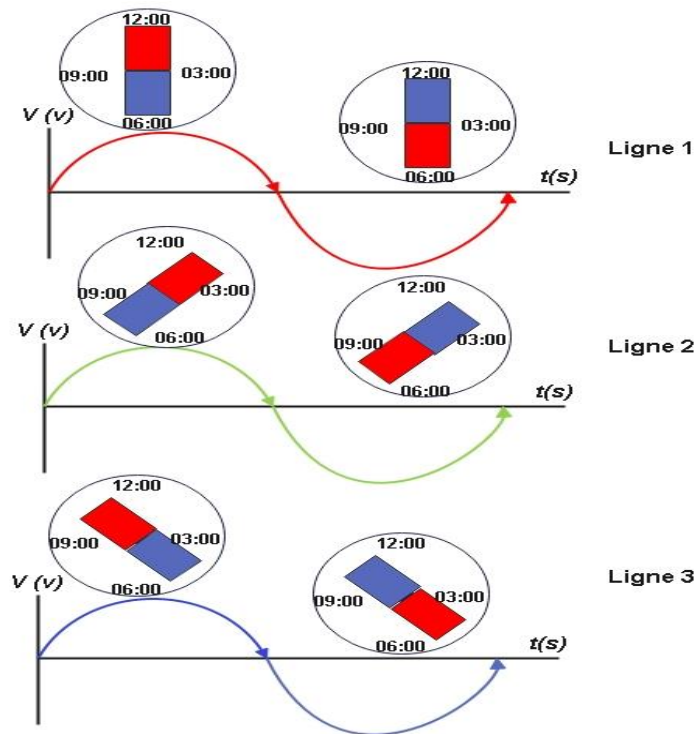
$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (4.1)$$

Alors, pour produire une f.e.m, il suffit de mettre un aimant en rotation proche d'un conducteur électrique, à cause des avantages rencontrés dans un système triphasé, on met trois conducteurs dans un champ magnétique variable (aimant en rotation), les trois conducteurs sont déphasés en 120° ($2\pi/3$), la figure IV.1 montre cette structure pour produire un système d'alimentation alternatif en triphasé.

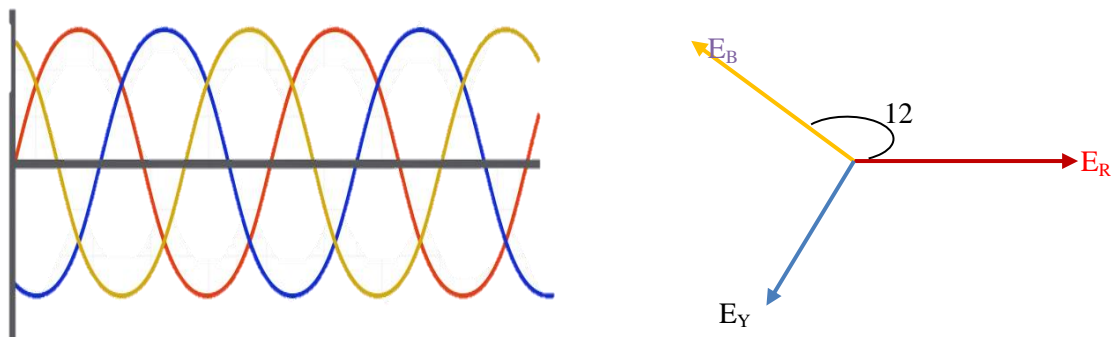


a) Positionnement des conducteurs

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |



(b) Production d'une tension alternatif dans chaque ligne (phase)



(c) le système de tension triphasé

Figure. IV.1. Structure pour produire un système d'alimentation alternatif en triphasé.

IV.2.2 CHAMP MAGNETIQUE TOURNANT

Maintenant, si on alimente **trois** bobines décalées en $(2\pi/3)$, c'est-à-dire 3 courants variable circule dans les bobines, selon la loi de **Lenz**, un courant circule dans un conducteur produit un **champ magnétique**, donc chaque bobine produit un flux magnétique $\Phi_1, \Phi_2, et \Phi_3$, le flux totale est donc :

$$\Phi_t = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 \quad (4.2)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

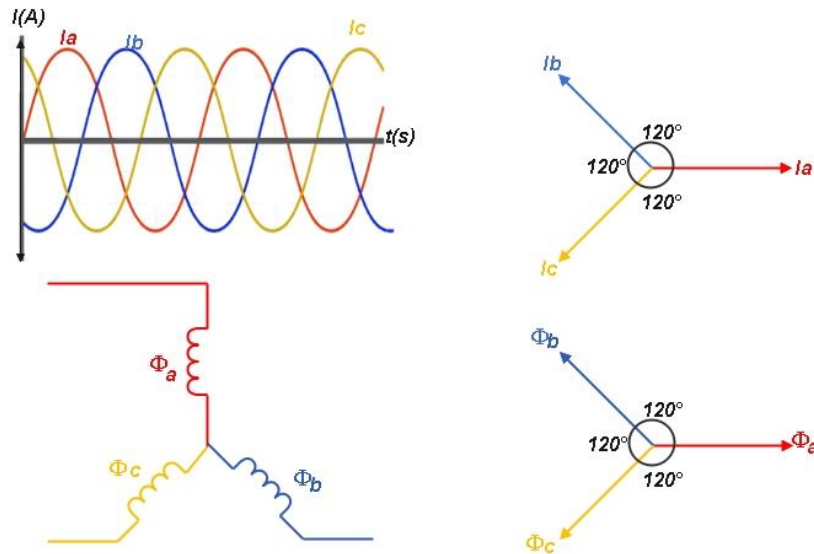


Figure. IV.2. Production de trois flux magnétique variable par le temps

D'après la figure IV.2, à chaque moment ou un courant s'annule (passe par le zéro), le flux magnétique lui associe s'annule aussi et par la suite dans le cas de $\Phi_1 = 1$, le flux total s'écrit :

$$\Phi_t = 0 + \Phi_2 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_3 \quad (4.3)$$

Si on trace la résultante vectorielle dans chaque instance un flux s'annule, on obtient 6 instances avec le flux total Φ_t change sa direction comme montré par la figure IV.3, la direction de ce flux total reste en mouvement de rotation jusqu'à la coupure de l'alimentation alternatif.

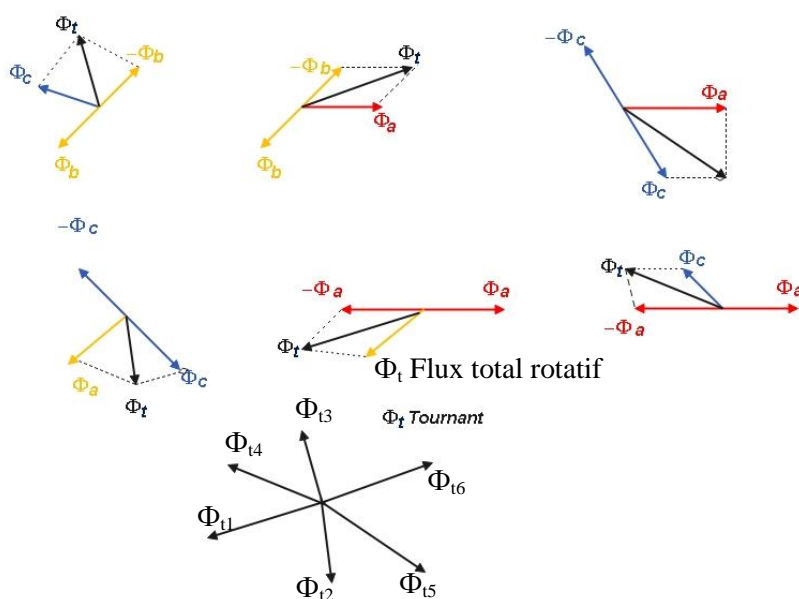


Figure. IV.3. Flux total rotatif

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Règle 1 :

Un tel champ tournant à la vitesse Ω_s est créé par un bobinage triphasé, on appelle la vitesse de rotation du champ « **la vitesse du synchronisme Ω_s** », elle s'exprime comme suit :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (4.4)$$

Avec : $\omega_s = 2\pi \cdot f$: la pulsation électrique ;

p : nombre de paires de pôles du bobinage.

IV.3. MACHINE SYNCHRONE

IV.3.1 GENERALITE

La machine synchrone c'est une machine **tournante** basée sur le principe de **champ magnétique tournant** et utilisée dans les applications qui demande plus de **précision**, le nom synchrone désigne que la vitesse de rotation du rotor est **synchronisé** à la fréquence du réseau d'alimentation, cette machine n'as pas besoin d'un ensemble de commutation comme la machine à courant continu (collecteur+ balais), mais il nécessite toujours une excitation pour le rotor afin de produire un champ magnétique.



Figure. IV.4. Machine synchrone

Comme la machine à courant continu, cette machine peut être utilisée en deux modes :

- Soit produisant un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation de la machine : **fonctionnement générateur** ;

Sous cette **forme d'alternateur**, les machines synchrones occupent une place importante dans la production de l'énergie électrique par des gammes allant de quelques watts jusqu'à quelque centaines mégawatts.

- Soit absorbant un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation de la machine : **fonctionnement moteur**.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Vue leurs caractéristiques intrinsèques d'avoir une vitesse directement liée à la fréquence, les machines synchrones peuvent être employées dans des domaines nécessitant une vitesse rigoureusement constante.

Ces moteurs synchrones peuvent aussi produire de l'énergie réactive, ce qui les rendrait en concurrence avec les batteries en terme de compensation d'énergie réactive et la correction de facteur de puissance.

Comme avantages des machines synchrones, on peut citer :

- Robustesse ;
- Le rendement élevé (99%) ;
- La durée de vie longue ;
- Fonctionne en vitesse variable ;
- Exploitable à différentes puissances
- Etc...

Par contre, cette machine représente aussi quelques inconvénients :

- Il n'est pas à démarrage automatique et nécessite un certain arrangement pour démarrer et synchroniser le moteur ;
- Il nécessite une excitation continue séparée ;
- Le coût initial est très élevé ;
- Il ne peut pas être utilisé pour des travaux à vitesse variable ;
- Si le moteur est en surcharge, il peut se désynchroniser et s'arrêter.

IV.3.2 CONSTITUTION DE LA MACHINE SYNCHRONE

Comme dans la machine à courant continu, la machine synchrone constitue de deux parties essentielles qui sont :

- **La partie fixe** : s'appelle **stator** ou **induit**, cette partie est responsable de la création d'un champ magnétique tournant.
- **La partie mobile** : s'appelle **rotor** ou **inducteur**, qu'est obligatoirement **un aimant permanent ou électroaimant** pour assurer la synchronisation de la vitesse de rotation du rotor.

D'autres éléments auxiliaires mais indispensables pour la constitution de la machine comme :

- **La carcasse** : boîtier extérieur de la machine pour fixer les différentes parties de la machine et protéger les éléments.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

- **La plaque signalétique** : toutes les machines électrique doit être obligatoirement portée une plaque signalétique sur la carcasse pour identifier les caractéristiques nominaux et définir le couplage dans le cas d'une machine alternatif (synchrone ou asynchrone).
- **L'arbre** : l'élément placé au rotor, c'est lui qui fait tournée les dispositifs extérieurs.
- **La ventilation et le couvercle** : lors de fonctionnement de la machine, cette dernière s'échauffé, un système de ventilation est placé sur la machine ou le ventilateur couplé directement au rotor alors dès que la machines démarre la ventilation démarre aussi.

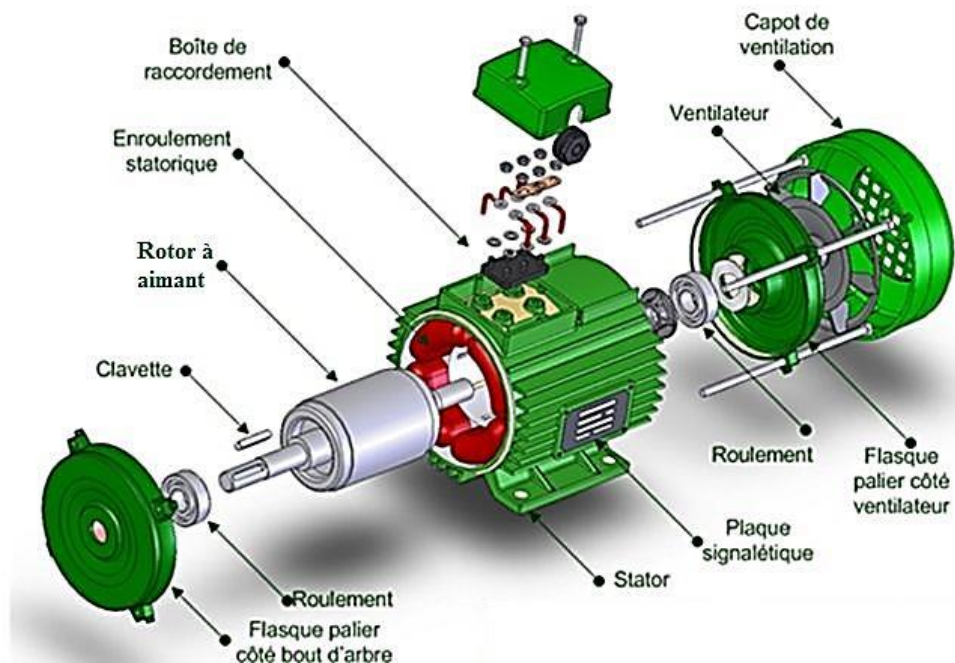


Figure. IV.5. Constitution de la machine synchrone

IV.3.2.1 LE STATOR (INDUIT)

Le stator de la machine synchrone (figure IV.6.a) a un circuit magnétique encoché (figure IV.6.b) avec un bobinage triphasé. Trois bobines décalées en 120° et alimentées en tension alternatif (figure IV.6.c) sont placées dans des encoches et connectées entre elles pour former l'induit qui sert à créer un champ magnétique tournant. Le bobinage consiste en des barres de cuivre isolé avec du mica et de la résine epoxy, les conducteurs sont maintenus donc par des cales d'acier. Dans les machines de grande dimension le stator est refroidi par du liquide.

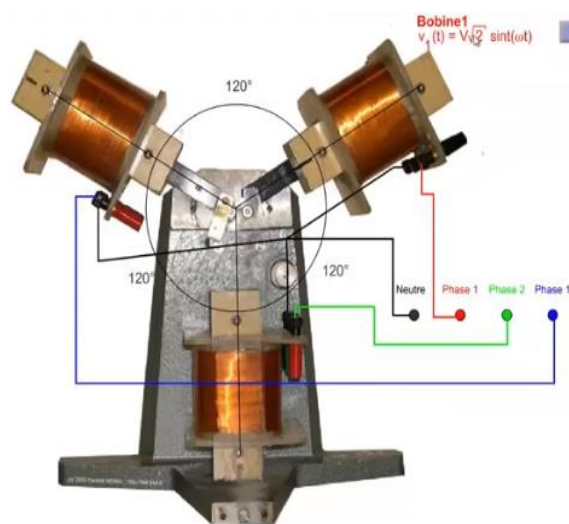
| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Nveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-3.1..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |



(a) Stator globalement



(b) encoches



c) Bobines du stator

Figure. IV.6. Constitution du stator

Un enroulement triphasé, sous une forme extrêmement simplifiée, est représenté sur la figure IV.7. Le début et la fin de toutes les bobines de la phase A sont désignés, respectivement, par **SA** et **FA**. La phase **A** est représentée par une ligne **continue** sur la figure, la phase **B** par une ligne **pointillée espacée** et la phase **C** par une ligne **pointillée**. Notez que chaque enroulement ne démarre pas et ne se termine pas sous le même pôle. De plus, notez que les **deux côtés** de la bobine d'une seule bobine donnée se trouvent dans des **conditions magnétiques identiques** de polarité **opposée**.

Cela implique que, vu des bornes de la bobine, les **f.e.m** produites dans les deux côtés de la bobine **s'additionnent**. Si nous supposons que les pôles du rotor se déplacent vers **la gauche** comme indiqué, alors le mouvement relatif des conducteurs d'induit est **vers la droite**. Cela implique que des conditions magnétiques identiques seront vues par les conducteurs de la

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

phase A, suivie de la phase C, suivie de la phase B. On peut dire que les FEM induites dans les phases A, C et B produisent une séquence de phases d'**ACB** à **CBA**. L'intervalle de temps entre deux phases pour obtenir des conditions magnétiques identiques **dépendraient** de la vitesse relative du mouvement et de la séparation spatiale des phases. Sur la figure IV.7, les phases sont disposées de telle sorte que chaque phase est séparée de l'autre de 120 degrés électriques (360° étant défini par la distance pour obtenir des conditions magnétiques identiques).

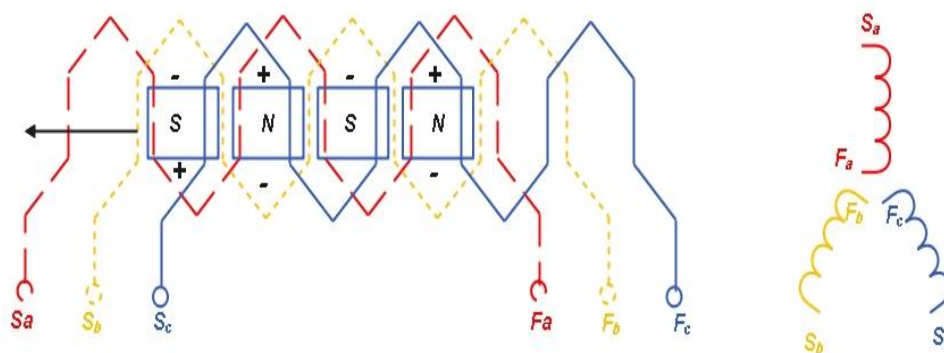


Figure.IV.7 Enroulement statorique

L'enroulement représenté sur la figure IV.7 est un enroulement :

- Ouvert puisque les deux extrémités des enroulements ont été sorties pour des connexions appropriées.
- D'onde puisqu'il progresse de pôle en pôle.
- Concentré car toutes les bobines d'une phase sont concentrées dans la même fente sous un pôle.
- S'agit d'un enroulement en demi-bobine car il n'y a qu'une demi-bobine (un côté de la bobine) dans chaque fente.
- S'agit d'un enroulement à pas complet car les côtés de la bobine d'une bobine sont distants de 180 degrés électriques, c'est-à-dire qu'ils se trouvent dans des conditions magnétiques identiques, mais de polarité opposée sous des pôles adjacents.

Pour les machines synchrones triphasées, deux couplages sont possibles :

- Etoile (Y) qui impose une tension simple à chaque enroulement,
- Triangle (D) qui impose une tension composée à chaque enroulement.

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

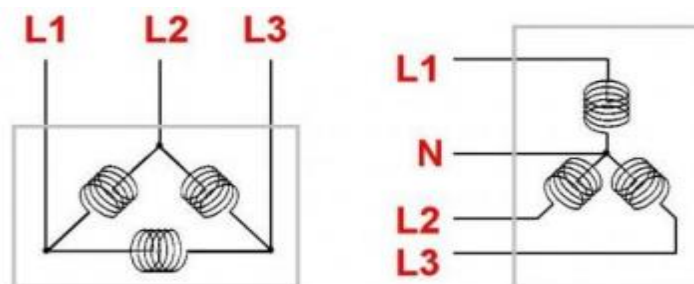


Figure.IV.8. Couplage du stator

Remarque 2 :

On ne peut jamais connaître le type de la machine à partir du stator puisque toutes les machines à courant alternatif ont des inducts identiques.

IV.3.2.2 LE ROTOR (INDUCTEUR)

Comme indiqué précédemment, les enroulements inducteurs sont prévus dans le rotor ou l'élément tournant de la machine synchrone. Deux types du rotor sont distingués dans la machine synchrone :

a) LE ROTOR A AIMANT PERMANENT

Dans ce cas-là, la machine synchrone s'appelle « machine synchrone à aimant permanent », l'**excitation** est assurée par l'aimant permanent au lieu de la source d'excitation externe. Le **rotor** est constitué d'un **aimant permanent** qui génère un champ d'excitation et remplace la source d'alimentation externe du générateur.

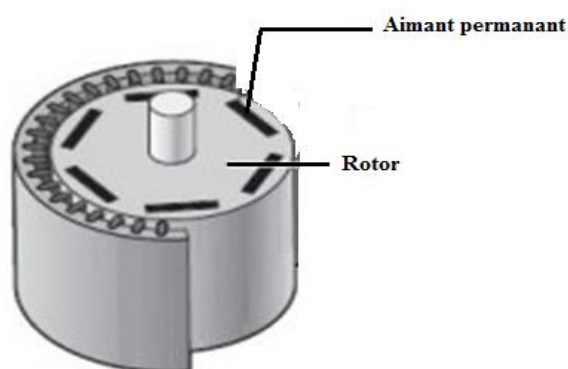


Figure. IV.9. Rotor à aimant permanent

Dans le cas d'un rotor à aimant permanent, il **n'y a pas besoin** de bagues collectrices et de balais de charbon, ce qui rend la machine **moins chère, plus légère** et la maintenance du générateur **diminue** également.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Avec la direction des lignes de flux, la machine synchrone à aimant permanent est divisée en trois catégories

- à flux radial,
- à flux axial,
- à flux transversal.

b) **LE ROTOR A ELECTROAIMANT**

Fondamentalement, il existe deux classifications du rotor à électro aimant :

- Le rotor cylindrique ou à pole lisse,
- Le rotor à pôles saillants - pour les grands générateurs synchrones triphasés.

La figure IV.10.a illustré des rotors cylindriques à deux pôles avec une vue développée de l'enroulement de champ pour une paire de pôles. La construction à rotor **cylindrique** est particulière aux générateurs synchrones entraînés par des turbines à vapeur et qui sont également connus sous le nom de turboalternateurs ou turbogénérateurs. Les turbines à vapeur fonctionnent à des vitesses relativement élevées, 1500 et 3000 tr/min étant courants pour 50 Hz, ce qui explique la construction à rotor cylindrique qui, en raison de sa compacité, résiste facilement aux forces centrifuges développées dans les grandes tailles à ces vitesses. En outre, la douceur du contour du rotor permet de réduire les pertes au vent et d'assurer un fonctionnement silencieux.



Figure. IV.10.a Rotor à pole lisse (cylindrique)

Les rotors à **pôles saillants** sont utilisés dans les générateurs synchrones à basse vitesse tels que ceux entraînés par des roues hydrauliques. Ils sont également utilisés dans les moteurs synchrones. En raison de leurs faibles vitesses, les générateurs à pôles saillants nécessitent un grand nombre de pôles comme, par exemple, 60 pôles pour un générateur 100 tr/min 50 Hz. Un pôle et sa bobine de champ associée d'un rotor à pôles saillants sont illustrés à la figure IV.10.b.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

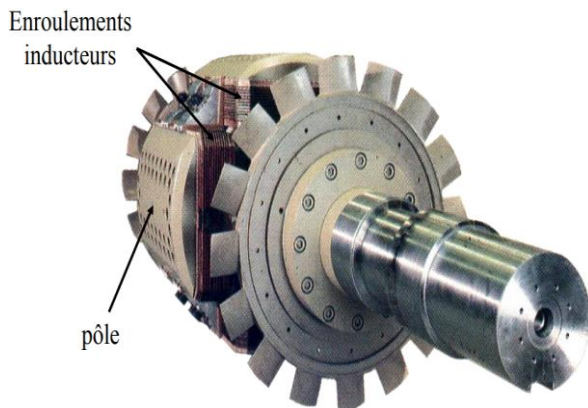
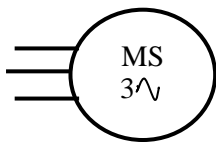


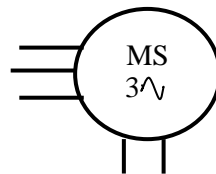
Figure. IV.10.b Rotor à pole saillant

IV.3.3 SYMBOLE DE LA MACHINE SYNCHROME

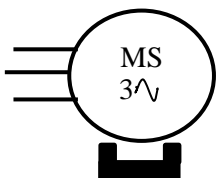
Voici les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone :



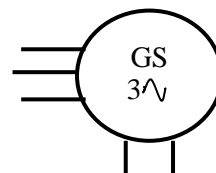
Symbole générale



Symbole MS triphasé à rotor bobiné



Symbole MS triphasé à aimant permanent



Alternateur MS triphasé à rotor bobiné

IV.3.4 SYSTEME D'EXCITATION DE LA MACHINE SYNCHROME

Un certain nombre de dispositions pour fournir du **courant continu** aux champs de machines synchrones ont été utilisées. Les ajustements du courant de champ peuvent être **automatiques** ou **manuels** en fonction de la complexité et des exigences du système d'alimentation auquel le générateur est connecté.

Les systèmes d'excitation sont généralement de **125V** jusqu'à des puissances nominales de **50kW** avec des tensions plus élevées pour les puissances nominales les plus élevées. La source d'alimentation habituelle est une excitatrice à connexion directe, un groupe électrogène, un redresseur ou une batterie (figure.IV.11). La sortie de l'excitatrice (c'est-à-dire le courant de champ de la synchrone machine) est variée en ajustant le rhéostat de champ d'excitation.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle |
| | | | | Semestre: 05 |

Cette disposition permet une plus grande rapidité de réponse, une caractéristique importante dans le cas des générateurs synchrones lorsqu'il y a des perturbations sur le système auquel le générateur est connecté.

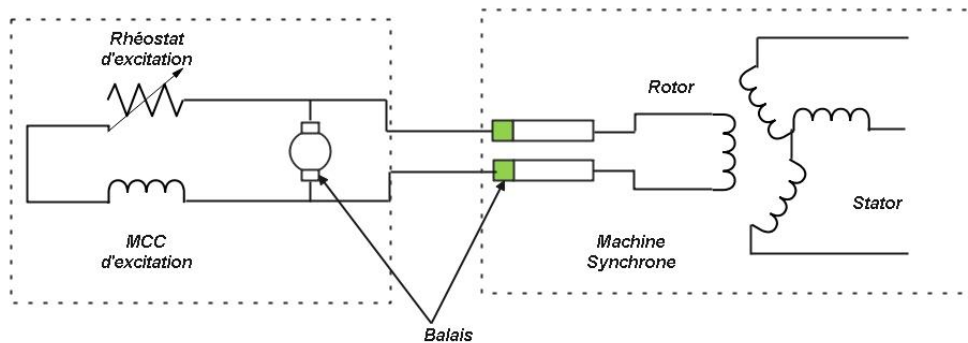


Figure. IV.11 Excitation de la MS

Dans certaines installations, une excitatrice séparée entraînée par un moteur fournit l'excitation. Un moteur à induction est utilisé à la place d'un moteur synchrone car en cas de perturbation grave du système, un moteur synchrone peut se désynchroniser avec le système. De plus, un grand volant d'inertie est utilisé pour transporter l'excitatrice pendant de courtes périodes de tension système fortement réduite.

IV.3.5 MODELE ELECTRIQUE DE LA MACHINE SYNCHRONE

IV.3.5.1 MODE ALTERNATEUR

En mode alternateur, la machine synchrone triphasée peut être représentée par le schéma électrique suivant :

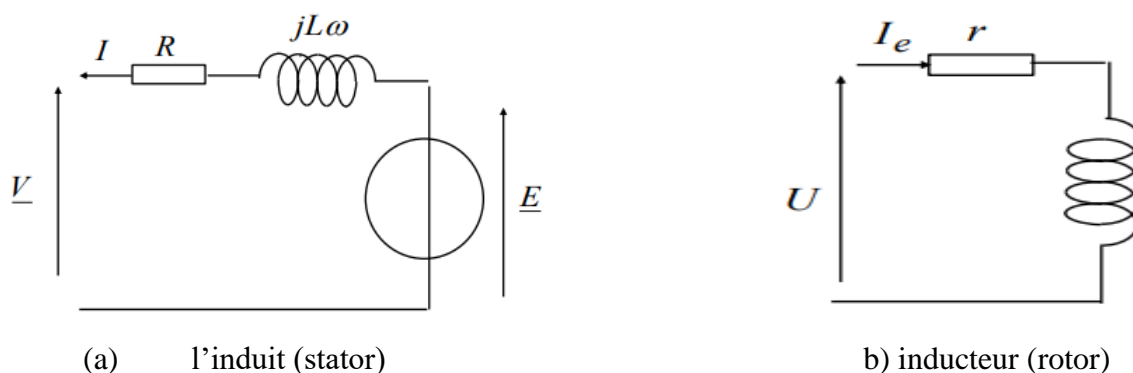


Figure.IV.12. Schéma équivalent de l'alternateur synchrone

Remarque :

- La convention signe dans le cas d'alternateur : E est dans le même sens avec I.

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

- Dans le cas où le rotor de la machine est un aimant permanent, le schéma équivalent ne comporte que le schéma de l'induit (stator).

La loi des mailles de l'induit donne :

$$E = V + (R + jL\omega) \times I \quad (4.1)$$

Le diagramme de la machine synchrone en négligeant R donne :

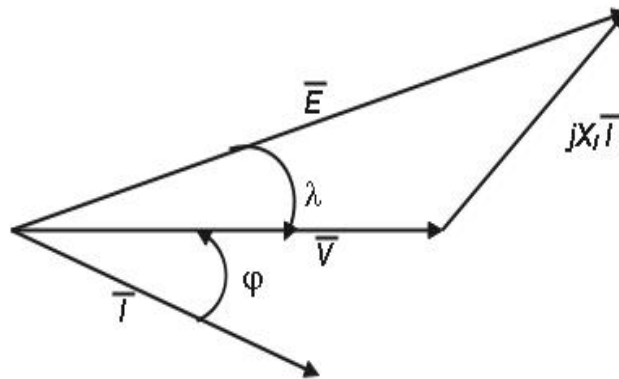


Figure.IV.13. diagramme de Fresnel de l'alternateur synchrone

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. E. Cette tension a pour valeur :

$$E = K \times N \times f \times \hat{\phi} \quad (4.2)$$

Avec : K, constante de Kapp dépendant de la machine

N : nombre de conducteurs dans un enroulement

f : fréquence d'alimentation

$\hat{\phi}$: flux max passant par une spire

Règle 3 :

Dans le cas de machine synchrone à rotor bobiné, en mode génératrice, en jouant sur le courant d'excitation, on peut faire varier E.

IV.3.5.1.1 LE COMPORTEMENT DE L'ALTERNATEUR

A partir du courant d'excitation de la machine, on peut modifier le comportement de l'alternateur, qui peut être réglé de manière à fournir de l'énergie réactive (on parle alors de compensateur synchrone), trois modes peuvent être distingué :

- Machine synchrone fonctionnant en alternateur surexcité fournissant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive au réseau (figure IV.14.a).

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option: maintenance industrielle |
| | | | | Semestre: 05 |

- Machine synchrone fonctionnant en alternateur sous-excité fournissant la puissance active au réseau et absorbant de la puissance réactive sur ce même réseau (figure IV.14.b).
- Machine synchrone à l'excitation « normale » fonctionnant en alternateur fournissant que de la puissance active au réseau (figure IV.14.c).

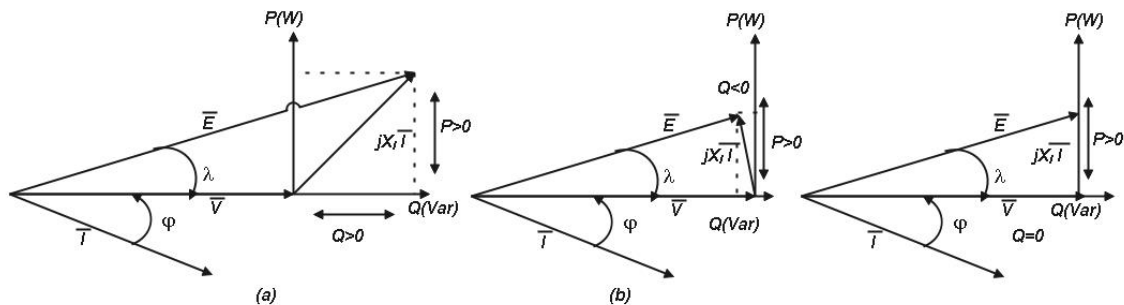


Figure.IV.14 Comportement de l'alternateur synchrone

IV.3.5.1.2 CARACTERISTIQUE A VIDE DE L'ALTERNATEUR

À vide, l'induit ne débite aucun courant et le rotor est entraîné à la vitesse nominale Ω_n constante par la suite, la f.e.m $E_0(t)$ est due uniquement au champ tournant rotorique, produit par le courant d'excitation J : $E_0 = f(J)$.

A partir de la caractéristique de l'alternateur à vide montré par la figure IV.15, on peut déduire :

- Tant que le courant d'excitation dans l'inducteur J ne dépasse pas une certaine limite J_n , la valeur efficace E_0 de la f.é.m. induite à vide est proportionnelle à ce courant
- La zone utile est au voisinage du coude de saturation
- Parfois un phénomène d'hystérésis dédouble la caractéristique

Alors, c'est le courant J qui détermine le flux c magnétique Φ dans l'entrefer de la MS.

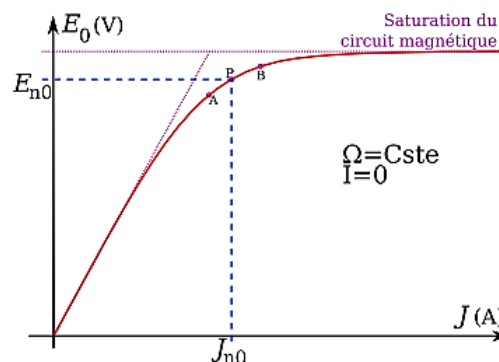


Figure.IV.15. Caractéristique à vide : $E_0 = f(J)$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

IV.3.5.1.3 CARACTERISTIQUE EN CHARGE DE L'ALTERNATEUR

Pour tracer cette caractéristique, on utilise une charge dont leur impédance et variable mais avec un déphasage $\cos\phi_s$ entre v_s et i_s constant.

En charge, l'enroulement statorique est parcouru par un système triphasé de courants induits ce qui crée un champ induit tournant, on a donc deux champs tournant, alors la F.E.M induit en charge n'est plus égale à la F.E.M à vide : $E_c = f(J; I_s) \neq E_0$

La figure IV.16 montre la caractéristique de l'alternateur en charge avec 3 charges différentes : capacitive (C_1), résistive (C_2) et inductive (C_3).

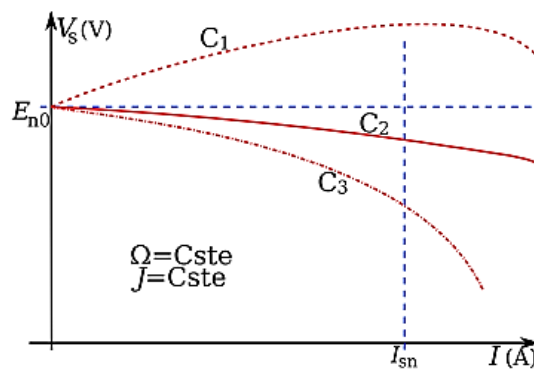


Figure.IV.15. Caractéristique en charge : $E_c = f(J)$

IV.3.5.1.4 BILAN DE PUISSANCE DE L'ALTERNATEUR

a) Puissance absorbée

Dans le cas alternateur, la puissance absorbée est en forme mécanique exprimé par :

$$P_a = C \cdot \Omega = 2\pi \cdot f \cdot N \cdot C \quad (4.3)$$

Remarque :

Si le rotor est un électro-aimant, la puissance absorbée est égale a :

$$P_a = C \cdot \Omega + U_e \cdot I_e \quad (4.4)$$

b) Puissance utile

La puissance électrique (utile) fournie par le stator-induit à ses bornes est une puissance électrique :

$$P_u = \sqrt{3}UI \cos \varphi = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4.5)$$

c) Pertes

Pertes par effet joule dans l'inducteur :

$$P_{jr} = U_r \cdot I_r = r_r \cdot I_r^2 \quad (4.6)$$

Pertes par effet joule dans l'induit :

$$P_{js} = \frac{3}{2} \cdot r \cdot I_s^2 \quad (4.7)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31.2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Pertes collectives :

$$P_c = P_{\text{fer}} + P_m \quad (4.8)$$

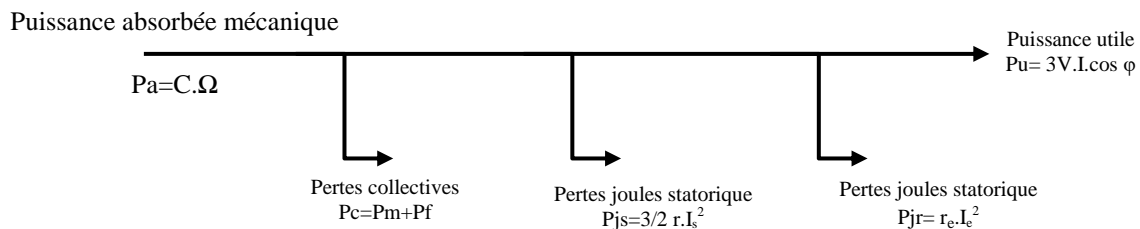
d) Rendement

Comme dans la machine a courant continu, le rendement est exprimé par la relation (4.9) ci-dessous :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI \cos \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi + P_{jr} + P_{js} + P_c} \quad (4.9)$$

e) Bilan de puissance de la génératrice synchrone

Comme c'est une génératrice, son objectif donc est de produire le courant électrique, dans ce cas-là, nous faisons tourner le rotor, par la suite la puissance absorbée est une puissance mécanique.



IV.3.5.1.5. ANGLE DE CHARGE DE L'ALTERNATEUR

Remarque :

Les alternateurs (à excitation bobinée) utilisés dans les centrales électriques peuvent avoir des puissances de l'ordre de 1000 MW. Même avec un rendement de 99%, il reste 10 MW de chaleur à évacuer !

IV.3.5.2 MODE MOTEUR

Lorsque l'on étudie la machine synchrone en mode moteur, on peut avoir une convention différente pour le courant I mais l'étude procède de la même démarche que le mode alternateur.

En mode moteur, les pertes dans la machine synchrone se répartissent suivant la manière suivante :

- On regroupe habituellement les pertes fer dans le stator (pertes par hystérésis et courants de Foucault) et les pertes mécaniques car sous la tension nominale, elles ne dépendent toutes deux que de la vitesse de rotation du moteur (ce qui devient faux lorsque l'onduleur commande le moteur en amplitude variable).

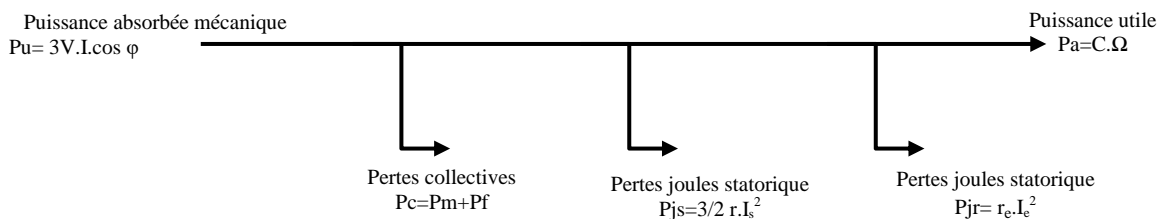
| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

- Les rendements des machines synchrones à aimants permanents sont généralement très bons (meilleurs que pour les autres moteurs d'environ 1%) de l'ordre de 96% pour 100kW, 91% pour 6kW et 78% pour 1kW.

L'expression littérale du rendement en fonctionnement moteur s'écrit :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{C.\Omega}{C.\Omega + P_{jr} + P_{js} + P_c} \quad (4.10)$$

Le bilan de puissance est donc :



IV.3.6. REGULATION DE FREQUENCE

Le pilotage de la vitesse des moteurs synchrones se fait électroniquement grâce à des variateurs de vitesse.

Vu la nécessité pour un moteur synchrone d'être démarré avec un système auxiliaire (le rotor ne peut pas "accrocher" un champ tournant statorique trop rapide de 3000 [tr/min]), le variateur de fréquence associé au moteur synchrone permet de le démarrer avec une fréquence statorique faible voire nulle.

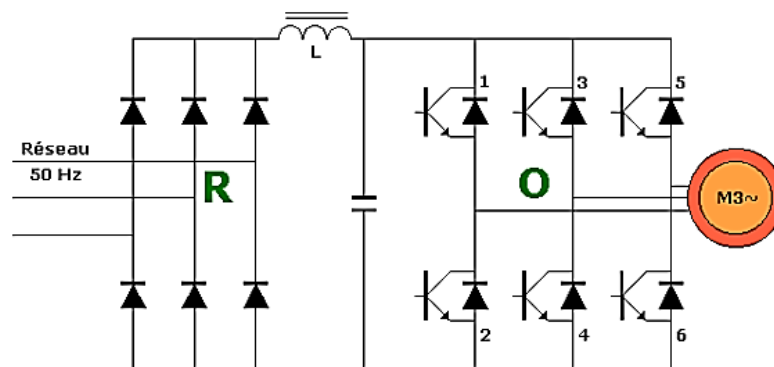


Figure.IV.16. Variateur de vitesse pour la machine MS

Sans perte de puissance, on peut piloter la vitesse de rotation du moteur en faisant varier la fréquence et la tension car la vitesse de rotation du champ tournant au niveau du stator change. A remarquer que le couple d'un moteur synchrone ne change pas en fonction de la vitesse puisqu'il n'y a pas de glissement.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Université Ibn Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence |
| | | | | Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-3.1..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Le pilotage du moteur synchrone par un variateur de fréquence montre des intérêts certains ;

à savoir principalement :

- La limitation du courant de démarrage (de l'ordre de 1,5 fois le courant nominal),
- Un couple constant quelle que soit la vitesse du moteur.

Chapitre V:

MACHINES ASYNCHRONES

Objectifs :

- *Connaitre le principe de fonctionnement de la MAS ;*
- *La constitution de la MAS ;*
- *Modélisation et caractéristiques de la MAS ;*
- *Bilan énergétique.*

Vocabulaire :

- *Pulsation, Vitesse du synchronisme, glissement,*

A la fin de la séance, l'étudiant doit apprendre les notions suivantes :

- *Le principe de fonctionnement ;*
- *La constitution d'une machine Asynchrone ;*
- *Démarrage des moteurs asynchrones ;*
- *Réglage de vitesse des moteurs asynchrones.*

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

V.1. INTRODUCTION

Un autre moteur fonctionne en courant alternatif s'appel : **le moteur asynchrone**, sera présenté dans ce chapitre, basé sur le même principe des machines synchrone avec exactement le même stator (induit), le moteur asynchrone est privilégié pour son efficacité, sa faible dimension, sa simplicité de construction et sa fiabilité. due essentiellement a la constitution de la partie tournante qu'est le rotor.

Alors, comment ce moteur inventé par tesla fonctionne et quels sont ces différentes caractéristiques ?

V.2. MOTEUR ASYNCHRONE (INDUCTION MOTOR)

Les moteurs **asynchrone** est connu également sous le terme anglo-saxon de machine à **induction**. En effet, c'est une machine électrique tournante à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor, elles sont basées sur le principe de **champ tournant** (voir chapitre précédent).



Figure.V.1. Moteur asynchrone

Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation du rotor de ces machines **n'est pas** exactement déterminée par la fréquence des courants qui traversent leur stator, d'où la **vitesse** des MAS n'est pas **proportionnelle** à la fréquence des courants qui les traversent.

Remarque 1 :

Pour fonctionner en courant **monophasé**, les machines asynchrones nécessitent un **système de démarrage**.

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kW, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des **systèmes de courants triphasés**.

V.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Dans un moteur à induction, la circulation d'un courant alternatif à travers l'enroulement des fils de l'armature (le stator) produit un champ magnétique tournant, qui crée un **courant induit** dans le rotor. Ce courant réagit avec le champ tournant et crée un **couple** d'entraînement du rotor dans le sens de rotation du champ tournant.

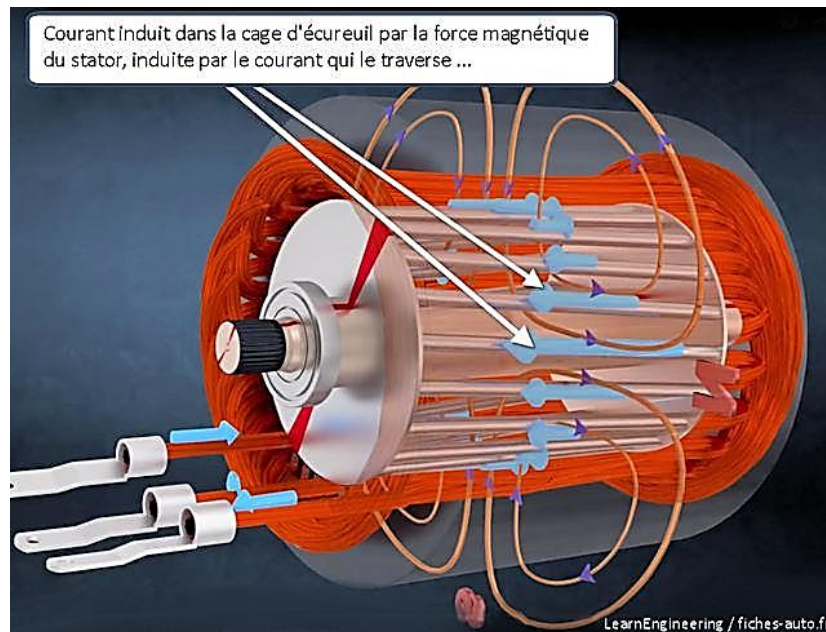


Figure.V.2. Principe de fonctionnement

Si on alimente les 3 enroulements statoriques par un système triphasé des tensions, le stator est parcouru par des courants triphasés I_s de pulsation ω_s . On obtient alors un champ magnétique tournant à une vitesse angulaire :

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (5.1)$$

Le champ tournant entraîne le rotor à une vitesse angulaire $\Omega < \Omega_s$.

Dans ce cas on dit que le rotor "*glisse*" par rapport au champ tournant et on définit le glissement comme suit :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \text{ (Exprimé en \%)} \quad (5.2)$$

Le rotor est balayé par le flux statoriques à la vitesse $\Omega - \Omega_s$. Il y a apparition de f.é.m. et de courant induit qui ont pour pulsation :

$$\omega_r = g * \omega_s \quad (5.3)$$

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Remarque 2 : La fréquence de synchronisme est un *sous-multiple entier* de la fréquence d'alimentation.

Exemple d'application :

Soit une MAS constituée d'une paire de pôle branché sur le secteur ($f_s = 50\text{Hz}$). Le champ tourne à la vitesse : $\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p}$. Avec $N_s = \Omega_s = 3000\text{tr/min}$ et pour $f_s=50\text{Hz}$, la vitesse du champ tournant est un sous-multiple de 3000tr/min, soit : 3000 ; 1500 ; 1000 ; etc...

Remarque 3 :

La vitesse de synchronisme en rad/s égale la vitesse en tr/min $\cdot (2\pi/60)$.

V.3. CONSTITUTION DE LA MAS

Comme tous les machines électriques tournante, la MAS constitue de deux principales parties principales : une partie **fixe** qu'est le **Stator** et une autre **mobile** qu'est le **Rotor**.

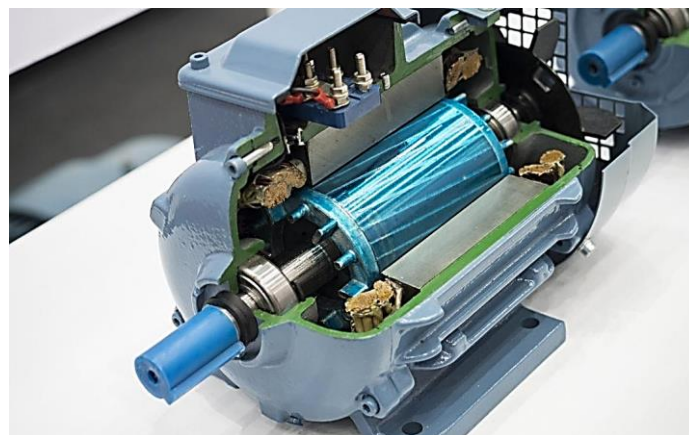


Figure. V.3. Vue latérale d'un moteur asynchrone

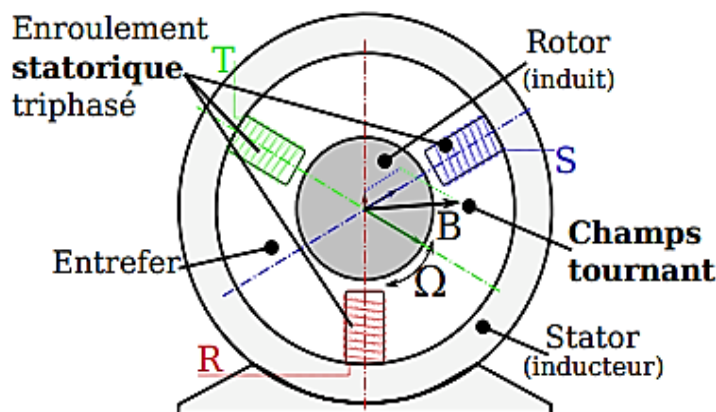


Figure. V.4. Eléments principale de constitution de la MAS

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

V.3.1 STATOR (VOIR CHAPITRE IV)

Exactement le même avec celle de la machine synchrone, il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'en coches permettant d'y loger les 3 bobines déphasées en $2\pi/3$ pour avoir créée le champ magnétique tournant.

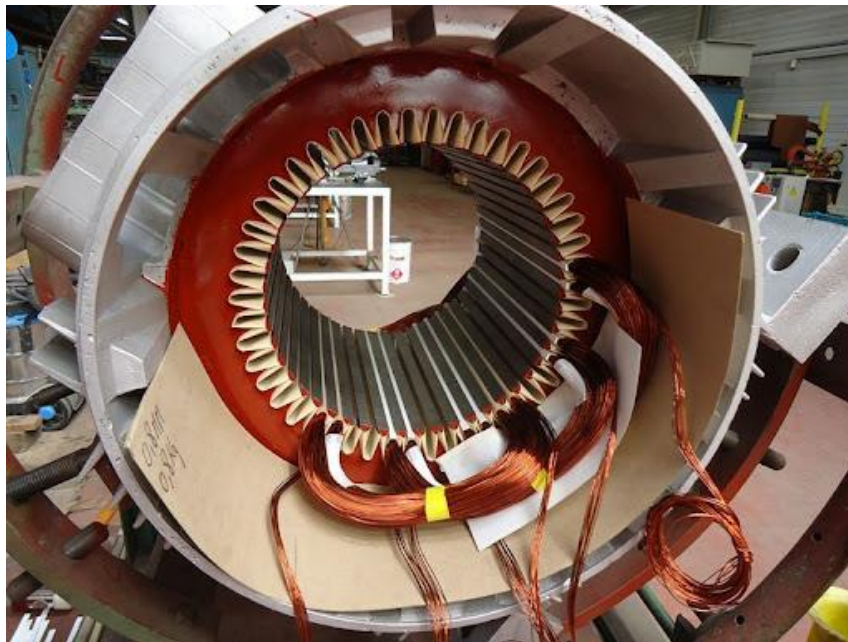


Figure. V.5. Stator de la MAS

Remarque 4

Il existe deux façons de couplage du stator de la machine a courant alternatif (synchrone ou asynchrone) dont :

a) Le couplage étoile (star) :

Utilisé pour la tension de fonctionnement le plus élevée indiquée sur la plaque signalétique. On utilise le montage étoile si un moteur de 230V par exemple doit être relié sur un réseau 400V ou pour démarrer un moteur à puissance réduite dans le cas d'une charge avec une forte inertie mécanique.

Dans un couplage étoile chacun des enroulements statoriques est branché entre une phase et le neutre ; La tension à ses bornes est donc la tension simple du réseau.

Chacun des enroulements est traversé par le **courant de ligne** présent dans le conducteur qui l'alimente.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

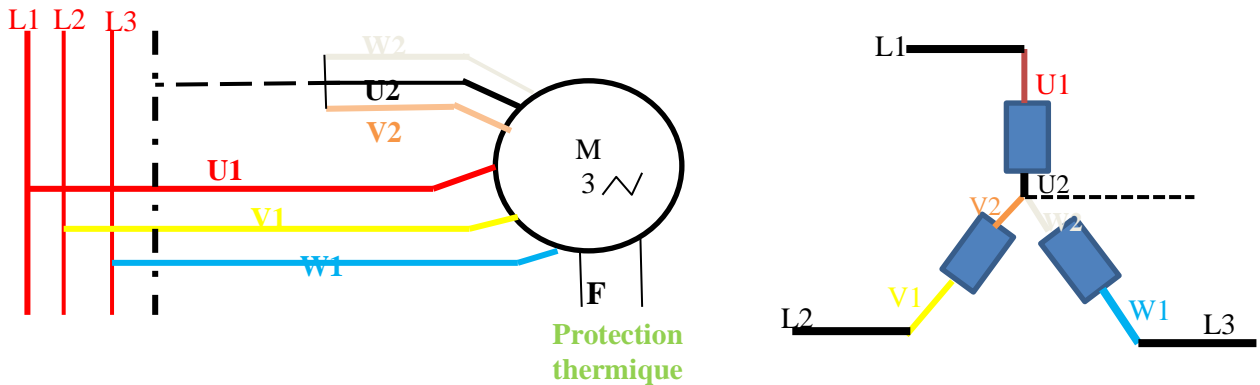


Figure. V.6. Couplage étoile des enroulements statorique

b) Le couplage Triangle (delta) :

Utilisé pour la tension de fonctionnement la plus élevée indiquée sur la plaque signalétique. Dans un couplage triangle chacun des enroulements est branché entre deux phases ; La tension à ses bornes est donc la **tension composée** du réseau. Chacun des enroulements est traversé par le courant de phase noté **J** qui n'est pas le courant de ligne présent dans le conducteur qui l'alimente.

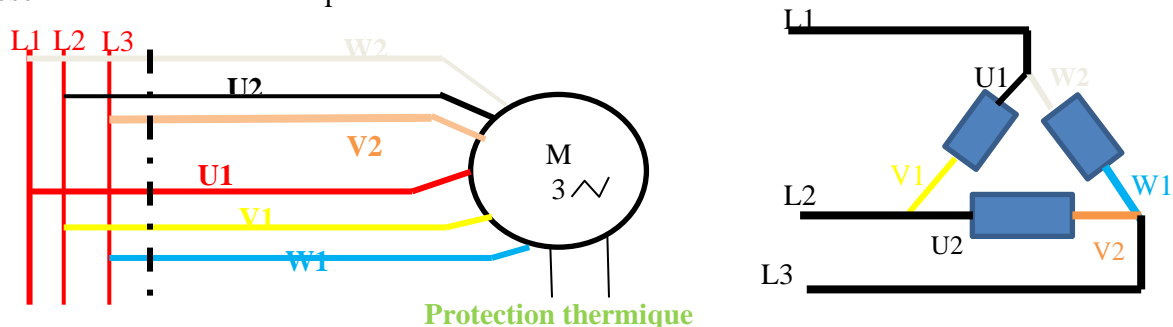


Figure.V.7. Couplage triangle du moteur asynchrone

Règle :

Pour déterminer le couplage des trois enroulements statoriques, il faut :

1. Connaitre la tension sous laquelle alimenté ;
2. Retrouvé sur la plaque signalétique cette tension ;
3. Lire le couplage qui lui est associe.

V.3.2 ROTOR

C'est la partie mobile de la machine et qui fait la différence entre la MS et la MAS, le concept de ce dernier rend la machine très simple et baisse leur cout par rapport à la machine synchrone, on distingue deux types de rotor dans la machine asynchrone :

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

a) Rotor a cage d'écureuil

Constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor et mises en court-circuit par 2 anneaux :

- Pas d'entretiens, et peu cher ;
- Pas relié au réseau (aucune alimentation électrique) donc pas de contrôle de l'induit.

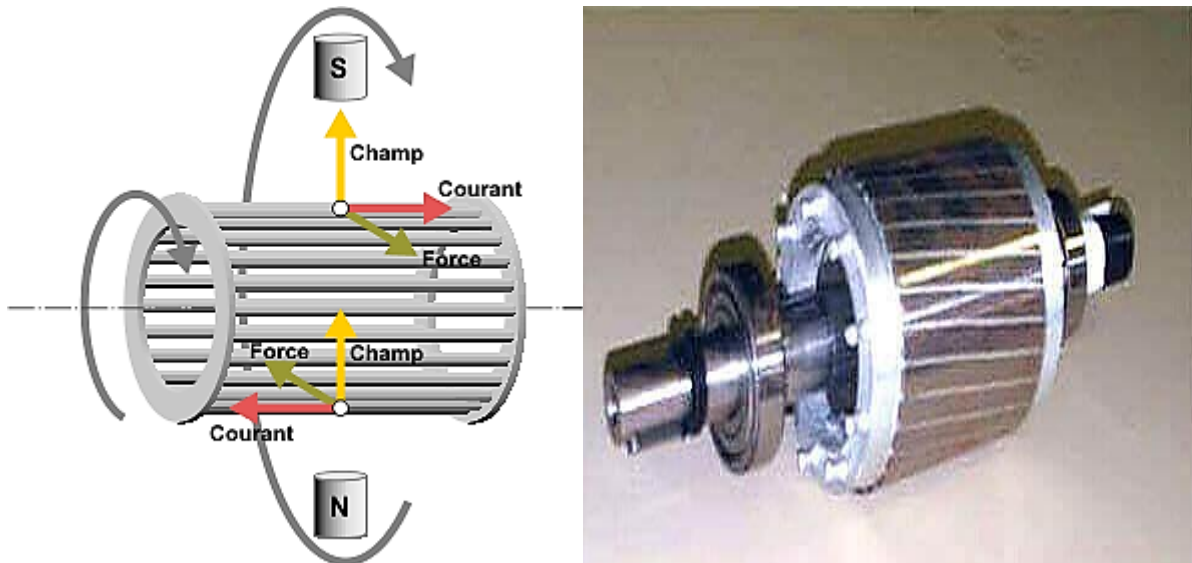


Figure.V.8 Rotor a cage d'écureuil

B) ROTOR BOBINÉ

Fait de 3 bobinages triphasés. Chaque bobine est reliée à une bague qui permet d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor

- Possibilité de modifier les propriétés électromécaniques de la MAS mais il nécessite l'ensemble collecteur + balais.



Figure.V.9 Rotor bobiné

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

V.3.3. AUTRES PARTIES

La figure V.10. Représente une vue éclaté d'un moteur asynchrone qui constitue de différentes parties tel que ; la carcasse, les flasques, la boîte à borne, etc...

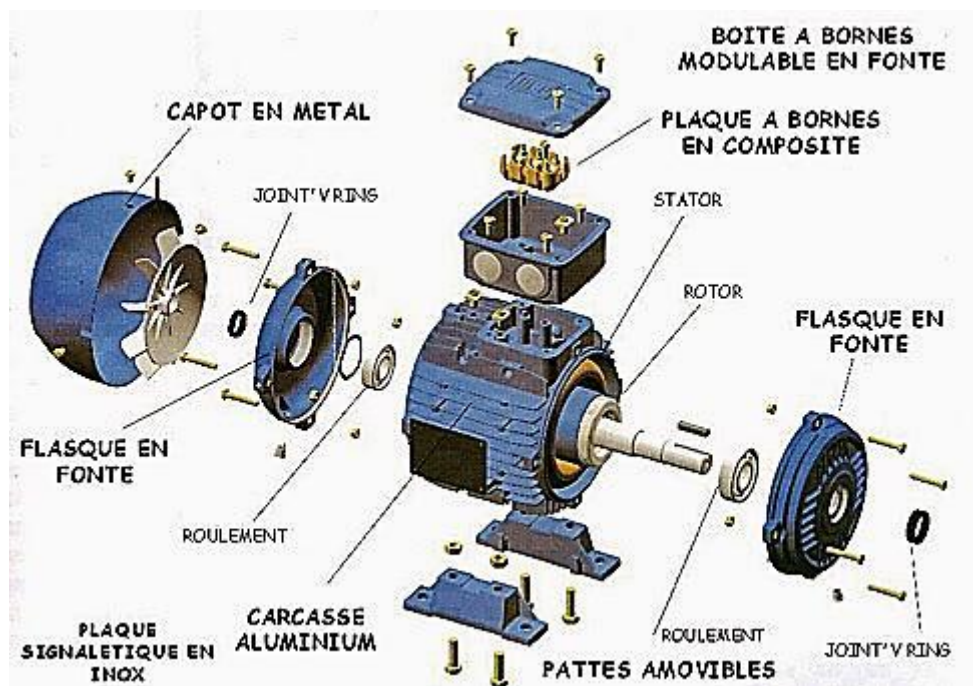


Figure.V.10. les différentes parties du moteur asynchrone (vue éclaté)

V.3.4. PLAQUE SIGNALÉTIQUE

La plaque signalétique est une carte d'identification du moteur asynchrone, pour cela, tous les moteurs asynchrones comportent une fiche détaillée collée sur la carcasse du moteur afin de définir les différents paramètres électriques, mécaniques et thermiques du moteur pour faire fonctionner le moteur dans les conditions nominales et par la suite garantir un meilleur rendement du moteur, les informations montrées dans la plaque signalétique sont :

- **Type :** (LS80Lt) référence propre au constructeur •
- **Puissance :** (0.75Kw) puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur.
- **Facteur de puissance ou cos phi :** (0,86) permet le calcul de la puissance réactive consommée
- **Tensions :** (230v/400v) la première indique la valeur nominale de la tension aux bornes d'un enroulement. Elle détermine le couplage (étoile ou triangle) à effectuer en fonction de la tension du réseau d'alimentation.
- **Intensités :** (3.3A/1.9A) Elles représentent l'intensité en ligne (dans chaque phase) pour chacun des couplages.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 3.1..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

- Le **glissement** est pratiquement nul et le rotor tourne *quasiment* à la vitesse de synchronisme
- Le facteur de puissance $\cos \varphi_{s0}$ à vide est très faible
- Le courant absorbé i_{s0} est élevé.

Donc à vide Le courant absorbé i_{s0} est un **courant de magnétisation**, Il sert à **créer le champ magnétique tournant**.

V.5.2. FONCTIONNEMENT EN CHARGE

Lorsque l'on charge la MAS le facteur de puissance augmente.

- Augmentation de la puissance active
- Le stator absorbe un **courant i_s actif**

V.6. MODELISATION ET MISE EN EQUATION

V.6.1. SCHEMAS EQUIVALENTS DU MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE

Le schéma électrique équivalent de la MAS réelle = Schéma électrique équivalent du **transformateur à champ tournant** alors, le stator constitue le primaire le rotor constitue le secondaire avec :

- r_s : résistance des enroulements statorique ;
- l_s : inductance de fuite des enroulements statorique ;
- r_F : résistance correspondant aux pertes fer dans le rotor de la MAS ;
- l_m : réactance magnétisante du circuit magnétique ;
- i_{s0} : courant à vide ;
- r : résistance du rotor ;
- X : réactance de fuite rotorique.

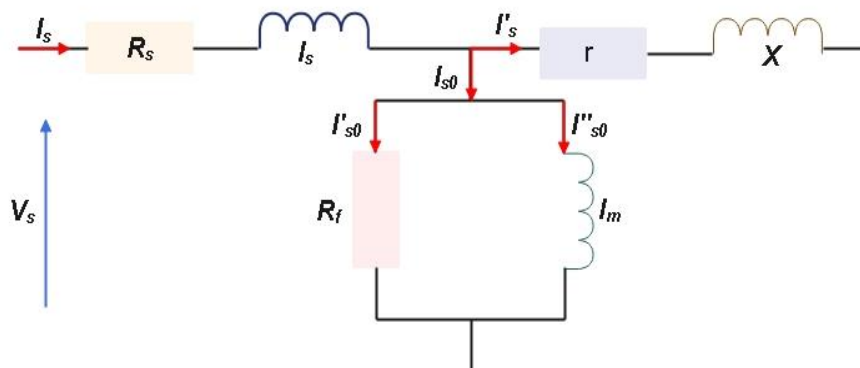


Figure.V.13. Schéma équivalent de MAS

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

V.6.2. BILAN DES PUISSANCES ET DES PERTES

Les pertes dans le moteur sont représentées par la différence entre la puissance absorbée et la puissance fournie :

$$\text{Pertes} = \text{Puissance absorbée (électrique)} - \text{Puissance fournie (mécanique)}$$

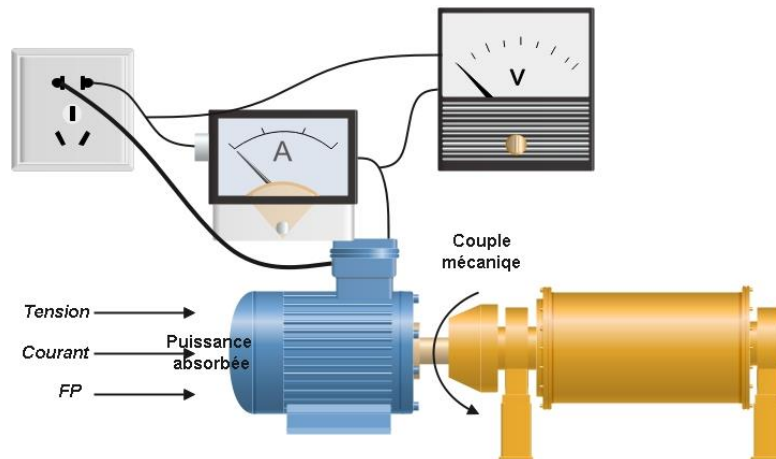


Figure.V.14. Puissance dans MAS

V.6.2.1. PUISSANCES ET PERTES STATORIQUES

La puissance reçue ou absorbée par le stator est tel que :

$$P_a = P_s = \sqrt{3}U_s I_s \cos \varphi_s = 3V_s I_s \cos \varphi_s \quad (5.4)$$

Les pertes par effet Joule au stator sont :

$$P_{Js} = \frac{3}{2} r_s I_s^2 \quad (5.5)$$

Remarque

r_s : résistance entre deux bornes et dépend du couplage du stator

- Couplage étoile : $r_s = 2R_s$
- Couplage triangle : $r_s = 2/3 R_s$

Avec : R_s : résistance des enroulements du stator

V.6.2.2. LES PERTES FER AU STATOR P_{FS}

- Fonctions du flux magnétique
- Elles ne dépendent donc que de la tension d'alimentation U_s et de la fréquence des courants statorique f_s

Modélisé par une résistance r_F

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31.2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

V.6.2.3. PUISSANCE ROTORIQUE

La puissance transmise dans l'entrefer P_{tr} est égale à la puissance transmise au rotor *magnétiquement*

- Théorème de Boucherot :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fs}) \quad (5.6)$$

- P_{tr} est transmise sous forme d'un couple électromagnétique C_{em} qui tourne à la vitesse des champs tournants Ω_s :

$$P_{tr} = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (5.7)$$

Puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor :

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g)P_{tr} \quad (5.8)$$

- Le rotor tourne à la vitesse Ω et développe sur l'arbre le couple électromagnétique C_{em} :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega \quad (5.9)$$

- Les pertes par effet Joule au rotor :

$$P_{jr} = R_r \cdot I_r^2 \quad (5.10)$$

• *Problème*

On ne connaît que rarement l'intensité I_r dans une phase rotorique et assez mal la valeur de la résistance R_r du rotor.

• *Solution :*

Comme :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega \quad (5.11)$$

D'où :

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (5.12)$$

V.6.2.4. LES PERTES FER AU ROTOR P_{FR}

- $P_{FR} = f(U_r; f_r)$,
- Les pertes fers du rotor sont **négligeables**.

V.6.2.5. PERTES MECANQUES ROTATIONNELLES P_m

Liés aux différents frottements qui créent les pertes mécaniques P_m fonction de la vitesse de rotation Ω . $\Omega \approx Cste \rightarrow$ les pertes rotationnelles seront considérées comme constantes :

$$P_m = P_u - P_{em} \approx Cste \quad (5.13)$$

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF 31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

V.6.2.6. PUISSANCE UTILE

C'est la puissance disponible ou fournie :

$$P_u = P_a - \sum \text{Pertes} \quad (5.14)$$

- Le rotor déploie un couple utile C_u à la vitesse Ω ,
- Il délivre la puissance utile :

$$P_u = C_u \cdot \Omega \quad (5.15)$$

- Les pertes mécaniques impliquent une diminution du couple utile :

$$C_u = C_{em} - \left(\frac{P_m}{\Omega}\right) \quad (5.16)$$

V.6.2.7. DETERMINATION DES PERTES CONSTANTES OU PERTES COLLECTIVES P_c

La somme des pertes fer stator P_{Fs} et des pertes mécaniques P_m reste pratiquement **constante** On définit les pertes constantes :

$$P_c = P_{Fs} + P_m \quad (5.17)$$

V.6.2.8. RENDEMENT

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a} \quad (5.18)$$

- Le rendement de la MAS est maximal lorsque l'on peut négliger toutes les pertes
- Les seules pertes non négligeables, sont les pertes joules rotor : $\eta = 1 - g$

V.7. DEMARRAGE DIRECT DU MOTEUR ASYNCHRONE

V.7.1. CARACTERISTIQUE MECANIQUE : $C = f(\Omega)$

Lors du démarrage du moteur asynchrone on peut voir deux points important :

- Le couple C_d est important au démarrage ;
- Le couple présente un maximum C_{max} ;

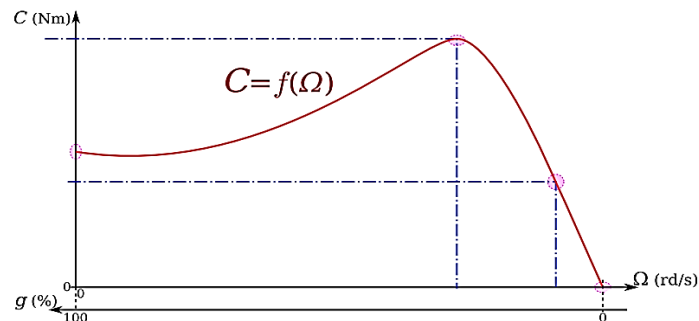


Figure.V.15. Caractéristique couple-vitesse démarrage normal

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle: Licence Niveau: 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits: 4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option: maintenance industrielle Semestre: 05 |

V.7.2. VITESSE DE DECROCHAGE Ω_d

Si la charge amène la vitesse de rotation de la MAS à descendre en dessous de Ω_d alors celle-ci *cale*, Il existe une **Zone quasi-linéaire** au voisinage de la vitesse de rotation nominale Ω_n :

$$C = a\Omega + b \quad (5.19)$$

• Le couple est proportionnel au glissement : $C = kg$. Cette zone correspond au **fonctionnement normal** de la MAS

V.7.3. CARACTERISTIQUE ELECTROMECHANIQUE : $I = F(\Omega)$

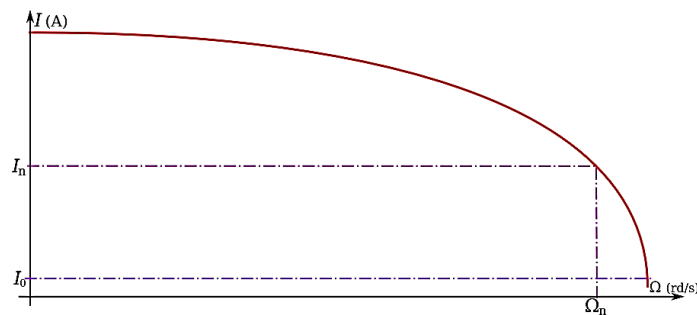


Figure.V.16. Caractéristique courant-vitesse démarrage normal

Pour réaliser cette caractéristique, on charge progressivement la MAS, cette caractéristique est tracée pour U_s et f_s constant, on remarque que :

- Plus on s'écarte de la vitesse de synchronisme, plus le courant appelé I_n est grand,
- À vide, le moteur appelle une intensité *non négligeable* par rapport à l'intensité nominale I_n ;
- Le fort courant de démarrage est un **inconvenient** important des MAS.

V.7.4. DEMARRAGE ETOILE-TRIANGLE

Ce démarrage consiste à coupler le stator en étoile pendant le démarrage, puis à rétablir le couplage en triangle.

Le procédé n'est possible que si le moteur a été conçu pour fonctionner en triangle sous la tension composée du réseau. Ce démarrage convient aux machines de moyenne puissance ($P < 50\text{kW}$) démarrant de préférence à vide ou à faible couple résistant : ventilateurs, machines-outils, etc...

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

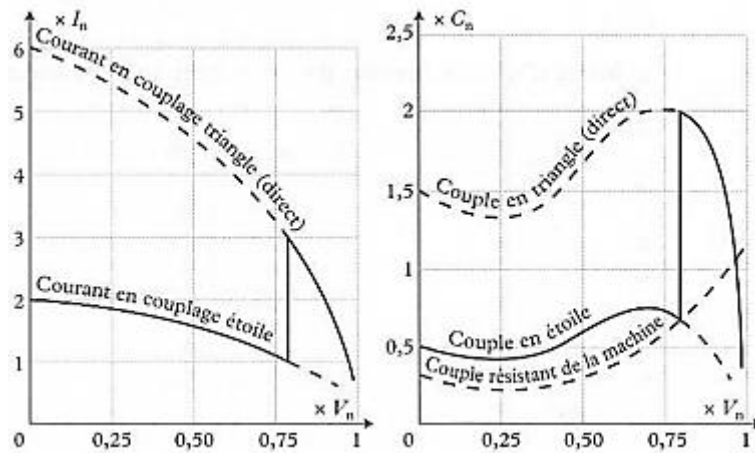


Figure.V.17. Caractéristique de la MAS avec un démarrage étoile

Ce démarrage est réalisé en deux étapes :

- Première étape : on démarre en étoile, chaque enroulement reçoit une tension 3 fois inférieure à sa tension nominale. **Conséquence** : l'intensité absorbée est divisée par 3, **Inconvénient** : le couple au démarrage est également divisé par 3.
- Deuxième étape : 2 à 3 secondes après, on bascule en triangle.

V.8. LIAISON AVEC LE RESEAU ELECTRIQUE

Le moteur est relié au réseau par un certain nombre de dispositifs de sécurité et de commande comme montré dans la figure V. ci-dessous :

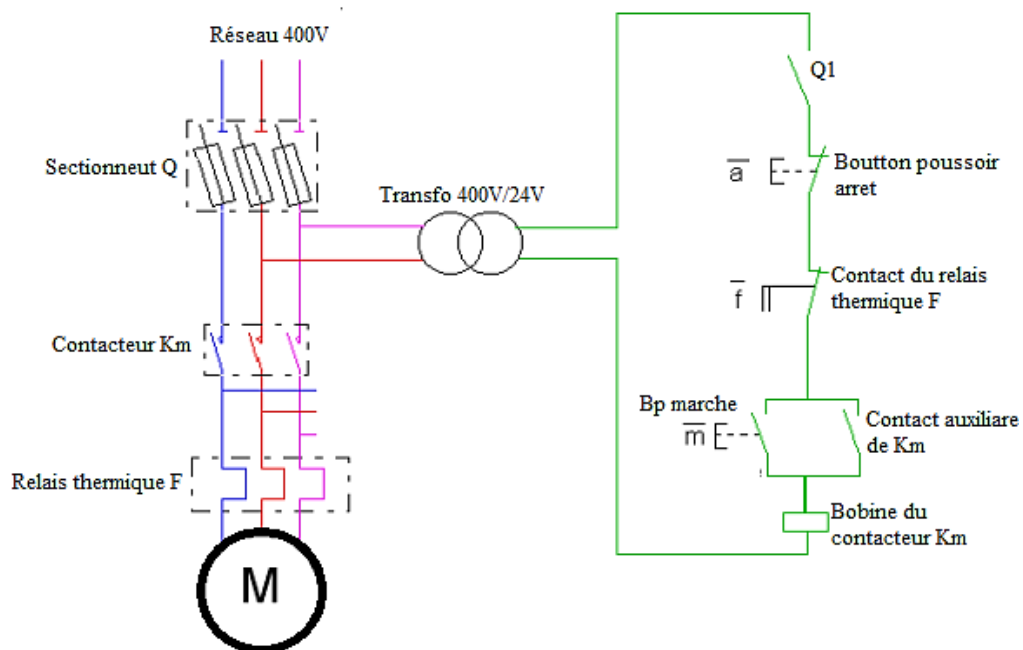


Figure.V.18. Schéma de liaison d'un MAS avec le réseau

| | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IbnKhaloun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

- Le sectionneur d'isolement avec fusibles permet de déconnecter le moteur du réseau pour des opérations de maintenance par exemple. Il protège également le dispositif en aval contre les risques de court-circuit grâce aux fusibles.
- Le contacteur permet l'alimenter le moteur avec une commande manuelle ou automatique avec un automate programmable.
- Le relais thermique protège le moteur contre les surcharges de courant, l'intensité maximale admissible est réglable. Son action différentielle permet de détecter une différence de courants entre les phases en cas de coupure d'une liaison par exemple.
- Le transformateur abaisse la tension secteur à une valeur de 24V pour garantir la sécurité des utilisateurs sur la partie commande.

Remarque :

Pour modifier le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé, il suffit de permuter deux des trois phases.

V.9. LA VARIATION DE VITESSE

Malgré sa conception ancienne, le moteur asynchrone reste toujours d'actualité car l'électronique permet maintenant de faire varier sa fréquence de rotation. Pour faire varier celle-ci, il faut modifier la fréquence de rotation du champ magnétique et donc la fréquence du courant d'alimentation. Les variateurs de vitesse sont des variateurs de fréquence.



Figure.V.19. Variateur de vitesse

Ils permettent :

- Une gamme de vitesses de 5% à 200% de la vitesse nominale ;
- Une conservation du couple sur toute la gamme de vitesses ;
- Des rampes d'accélération et de décélération ;
- Deux sens de rotation.

Exercices d'application

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

Exercice 01

Une bobine de 200 tours est enroulée uniformément sur un anneau en bois ayant une circonférence moyenne de 600mm et une section transversale uniforme de 500 mm². Si le courant traversant la bobine est de 4 A, calculez : l'intensité du champ magnétique, l'induction et le flux total.

Exercice 02

Si la densité de flux le long de la branche gauche du circuit magnétique illustré dans la figure 1 ci-dessous est $B_A = 0,5$ [T],

- Tracez le schéma équivalent du circuit.
- Trouvez le courant de la bobine (I).

La courbe B-H du matériau magnétique est la suivante (figure 1); et certaines des données lues à partir de la courbe ont également été résumées dans le tableau.

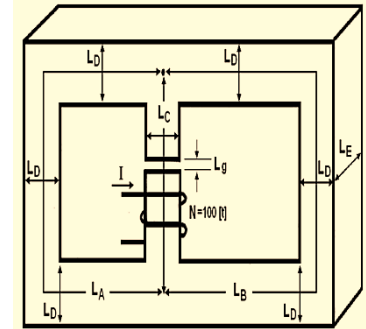


Figure1

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| B [T] | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 | 1.2 |
| H [At/m] | 20 | 37 | 50 | 62.5 | 75 | 90 | 112.5 | 135 | 170 | 220 | 275 | 370 |

Exercice 03

Pour obtenir une densité de flux magnétique variant dans le temps dans l'entrefer du circuit magnétique de la Figure 2a de la forme : $B_e = B_0 + B_1 \sin(\omega t)$, où : $B_0 = 0,5$ T et $B_1 = 0,25$ T.

Le champ continu B_0 doit être créé par un aimant permanent NdFeB, tandis que le champ variant dans le temps doit être créé par un courant variant dans le temps. Supposons la perméabilité du fer est infini.

(a) Pour les dimensions de l'entrefer données dans la Figure 2a, trouvez la longueur de l'aimant d si la surface de l'aimant $S_e = 500$ mm².

(b) La figure 2b donne la courbe de démagnétisation de l'aimant permanent NdFeB, trouvez le courant d'excitation requis pour atteindre la densité de flux d'entrefer variable dans le temps souhaitée.

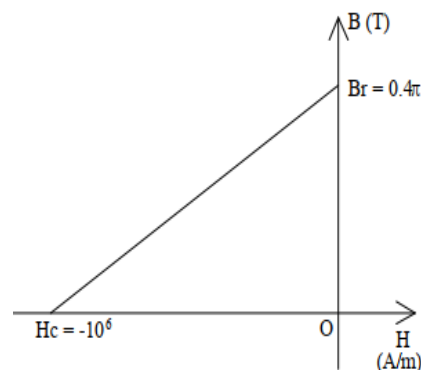
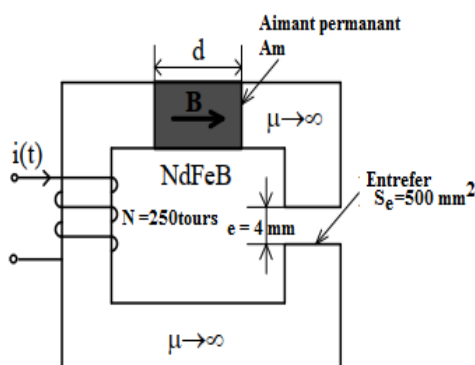


Figure 2

Exercice 04

Dans le circuit magnétique de la figure 3, un schéma simplifié du rotor et du stator d'une machine à courant continu est représenté. La longueur de trajet moyenne des noyaux du stator et du rotor est respectivement de 185cm et 10cm. La largeur de l'entrefer entre le stator et le rotor est de 0,5mm. Les sections transversales des noyaux du stator et du rotor sont respectivement de 428,36cm² et 424,12cm². La section transversale de l'entrefer est de 450 cm². La perméabilité

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

relative des matériaux du noyau du stator et du rotor est $\mu_r = 2500$ et est supposée constante. La bobine est composée de 300 tours de fil. On demande de :

1. Donner le schéma équivalent du circuit
2. Calculer les différentes reluctances.
3. trouver les densités de flux magnétique dans l'entrefer et dans le noyau du stator pour un courant de 2A dans la bobine.

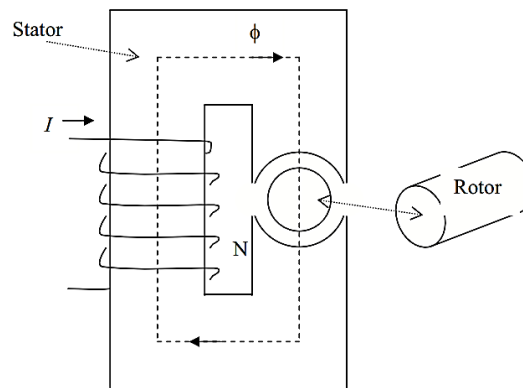


Figure 3

Exercice 05

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

- Tension primaire nominale : $U_{1N} = 5375V / 50Hz$
- Rapport du nombre de spires : $N_2/N_1 = 0,044$
- Résistance de l'enroulement primaire : $R_1 = 12\Omega$
- Résistance de l'enroulement secondaire : $R_2 = 25m\Omega$
- Inductance de fuite du primaire : $L_1 = 50mH$
- Inductance de fuite du secondaire : $L_2 = 100\mu H$

- 1- Calculer la tension à vide au secondaire.
- 2- Calculer la résistance des enroulements ramenée au secondaire R_s .
- 3- Calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire L_s . En déduire la réactance de fuite X_s .

Le transformateur débite dans une charge résistive $R = 1\Omega$.

- 4- Calculer la tension aux bornes du secondaire U_2 et le courant qui circule dans la charge I_2 .

Exercice 06

Un transformateur de commande et de signalisation monophasé a les caractéristiques suivantes : 230V/ 24V, 50Hz, 630VA, 11,2 kg.

Les pertes totales à charge nominale sont de 54,8W. Calculer le rendement nominal du transformateur pour $\cos\varphi = 1$ et $\cos\varphi = 0,3$.

- 2- Calculer le courant nominal au secondaire I_{2N} .
- 3- Les pertes à vide (pertes fer) sont de 32,4W. En déduire les pertes Joule à charge nominale. En déduire R_s , la résistance des enroulements **ramenée** au secondaire.
- 4- La chute de tension au secondaire pour $\cos\varphi = 0,6$ (inductif) est de 3,5% de la tension nominale ($U_{2N} = 24V$). En déduire X_s , la réactance de fuite ramenée au secondaire.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

5- Un court-circuit a lieu à 15 mètres du transformateur. Le câble de ligne en cuivre a une section de 1,5 mm². Calculer sa résistance totale R sachant que la résistivité du cuivre est : $\rho = 0,027 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

Exercice 07

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné :

- A vide : $U_1 = 220\text{V}$, 50Hz (tension nominale primaire) ; $U_{2v} = 44\text{V}$; $P_{1v} = 80\text{W}$; $I_{1v} = 1\text{A}$.
- En court-circuit : $U_{1cc} = 40\text{V}$; $P_{1cc} = 250\text{W}$; $I_{2cc} = 100\text{A}$ (courant nominal secondaire).
- En courant continu au primaire : $I_1 = 10\text{A}$; $U_1 = 5\text{V}$.

Le transformateur est considéré comme parfait pour les courants lorsque ceux-ci ont leurs valeurs nominales.

1- Déterminer le rapport de transformation à vide m_v et le nombre de spires au secondaire, si l'on en compte 500 au primaire.

2- Calculer la résistance de l'enroulement primaire R_1 .

3- Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide (pour cela, calculer les pertes Joule au primaire).

4- En admettant que les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension primaire, montré qu'elles sont négligeables dans l'essai en court-circuit. Faire l'application numérique.

5- Représenter le schéma équivalent du transformateur en court-circuit vu du secondaire. En déduire les valeurs R_s et X_s caractérisant l'impédance interne.

Quels que soient les résultats obtenus précédemment, pour la suite du problème, on prendra : $R_s = 0,025\Omega$ et $X_s = 0,075\Omega$.

Le transformateur, alimenté au primaire sous sa tension nominale, débite 100A au secondaire avec un facteur de puissance égal à 0,9 (charge inductive).

6- Déterminer la tension secondaire du transformateur. En déduire la puissance délivrée au secondaire.

7- Déterminer la puissance absorbée au primaire (au préalable calculer les pertes globales). En déduire le facteur de puissance au primaire et le rendement.

Exercice 08

Un transformateur triphasé dont le primaire couplé en triangle est alimenté par une tension triphasée 50Hz, de valeur efficace entre phase de 20kV. Le secondaire est couplé en étoile avec neutre sorti. Ce transformateur débite dans une installation fonctionnant sous une tension efficace 220-380V et comprenant :

Deux moteurs triphasés identiques de puissance utile 3kW, de rendement 0,8 et de facteur de puissance 0,82 et trois 90 lampes de 60W, 220V, régulièrement réparties sur les trois phases.

1-Pour réaliser l'essai à vide du transformateur, ne disposant pas d'une alimentation de 20kV, on l'alimente du côté du secondaire sous 380V entre phases : on relève une puissance de 400 W (pour l'ensemble du transformateur) et coté sortie une tension entre phases de 19570V.

Déduire de ces mesures :

- a) Le rapport de transformation m_c , dans le sens normal d'utilisation.
- b) Le nombre de spires d'un enroulement du primaire sachant qu'un enroulement du secondaire comporte 60 spires.
- c) Les pertes dans le fer du transformateur (le courant secondaire de l'essai à vide est faible).

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

2- Maintenant, le transformateur branché normalement, primaire sous 20kV entre phases, débite dans l'installation dont tous les appareils fonctionnent ; calculer l'intensité du courant dans un enroulement secondaire et son déphasage sur la tension.

3- Calculer la chute de tension en charge.

4) Déterminer le rendement du transformateur lorsqu'il débite un courant de 90A dans l'installation avec un facteur de puissance de 0,85, sachant que les résistances du primaire et du secondaire mesurées entre phases sont respectivement $R_1 = 44\Omega$ et $R_2 = 0,016\Omega$. (On supposera que le transformateur est parfait pour les courants.)

Exercice 09

Un moteur shunt est alimenté sous une tension constante de 200 V. Il absorbe un courant $I = 22A$. La résistance de l'inducteur est $R = 100\Omega$, celle de l'induit $R_a = 0.5\Omega$. Les pertes constantes sont de 200 W.

1-Calculer :

- Les courants d'excitation et d'induit
- La force contre électromotrice
- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur et dans l'induit d. la puissance absorbée, la puissance utile et le rendement global.
- On veut limiter à 30 A l'intensité dans l'induit au d'démarrage. Quelle doit être la valeur de la résistance du rhéostat de démarrage.
- On équipe le moteur d'un rhéostat de champ. Indiquer son rôle. Dans quelle position doit se trouver le rhéostat de champ au d'démarrage ? Justifier votre réponse.

Exercice 10

Une machine d'extraction est entraînée par un moteur à courant continu à excitation indépendante. L'inducteur est alimenté par une tension $u = 600 V$ et parcouru par un courant d'excitation d'intensité constante : $J = 30 A$. L'induit de résistance $R = 0.012\Omega$ est alimenté par une source fournissant une tension U réglable de 0 V à sa valeur nominale : $U_n = 600V$. L'intensité I du courant dans l'induit a une valeur nominale : $I_n = 1,50kA$. La vitesse de rotation nominale est $n_n = 30tr/min$.

1-Démarrage

- Ecrire la relation entre U , E et I , en d'déduire la tension U_d à appliquer au d'démarrage pour que $I_d = 1,2I_n$.

2-Fonctionnement nominal au cours d'une remontée en charge.

- Exprimer la puissance absorbée par l'induit du moteur et calculer sa valeur numérique.
- Exprimer la puissance totale absorbée par le moteur et calculer sa valeur numérique.
- Exprimer la puissance totale perdue par effet Joule et calculer sa valeur numérique.
- Sachant que les autres pertes valent 27 kW, exprimer et calculer la puissance utile et le rendement du moteur.
- Exprimer et calculer le moment du couple utile T_u et le moment du couple électromagnétique T_{em} .

3-Fonctionnement au cours d'une remontée à vide

- Montrer que le moment du couple électromagnétiques T_{em} de ce moteur est proportionnel à l'intensité I du courant dans l'induit : $T_{em} = KI$. On admet que dans le fonctionnement au cours d'une remontée à vide, le moment du couple électromagnétique à une valeur T_{em}' égale à 10 % de sa valeur nominale et garde cette valeur pendant toute la remontée.
- Calculer l'intensité I' du courant dans l'induit pendant la remontée.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

- c) La tension U restant égale à U_n , exprimer puis calculer la fem E' du moteur.
d) Exprimer, en fonction de E' , I' et T_{em}' , la nouvelle vitesse de rotation n' . Calculer sa valeur numérique

Exercice 11

Un générateur à courant continu de force électromotrice 220 V et de résistance interne $R_g = 0,2\Omega$ débite un courant de 50 A lorsqu'il alimente un réseau composé d'une résistance R connectée en parallèle avec un moteur. Ce dernier, de résistance interne $R_m = 0,2\Omega$, absorbe une puissance électrique de 8400 W. Calculer :

- La puissance électrique fournie par le générateur au circuit extérieur
- la tension commune entre les bornes du générateur, de la résistance R et du moteur
- L'intensité du courant dans le moteur
- La force contre-électromotrice du moteur
- L'intensité du courant dans la résistance R
- La valeur de la résistance R

Exercice 12

On se propose d'étudier un moteur de traction à courant continu à excitation séparée dont les caractéristiques nominales sont : $P_u = 165\text{KW}$; $U = 375\text{V}$; $n = 3000\text{tr/mn}$; résistance de l'induit $R_a = 0.05\Omega$; résistance de l'inducteur $R = 16\Omega$
1-Un essai en moteur alimenté sous sa tension nominale a permis de mesurer un courant induit $I = 440\text{A}$ et un courant inducteur $J = 25\text{A}$ pour une vitesse de rotation de $n = 2000\text{tr/mn}$.

- Calculer pour ce fonctionnement le couple électromagnétique C_{em} ainsi que la force contre électromotrice E
- Le couple utile, mesurée sur l'arbre du moteur a pour valeur $C_u = 710\text{N.m}$. Déduire la valeur du couple de pertes C_p ainsi que le rendement du moteur

2-La machine fonctionne maintenant en génératrice, l'inducteur est parcouru par le courant $J = 25\text{A}$ et l'induit délivre le courant $I = 300\text{A}$ sous la tension $U = 375\text{V}$. Calculer la vitesse de rotation et le couple électromagnétique

3-On néglige dans cette partie toutes les pertes du moteur. Entre deux stations, le mouvement du véhicule comporte :

- une phase d'accélération entre 0 et t_1 , pendant laquelle la vitesse croît linéairement
- une phase à vitesse constante entre t_1 et t_2
- une phase de décélération entre t_2 et t_3 , pendant laquelle la vitesse décroît linéairement on désigne par J le moment d'inertie de l'ensemble des pièces en mouvement ramené à l'arbre du moteur. On donne $J = 52\text{Kg.m}^2$; $t_1 = 13\text{s}$; $t_2 = 70\text{s}$; $t_3 = 83\text{s}$ et $\Omega_0 = 217\text{rd/s}$

- pour chaque phase de fonctionnement, calculer l'accélération $d\Omega/dt$ de l'arbre de rotation du moteur
- Le véhicule développe sur l'arbre de rotation et indépendamment du couple d'accélération un couple résistant $C_r = k * \Omega$, avec $k = 2.3$. Tracer les variations de ce couple en fonction du temps lors du déplacement entre deux stations
- Ecrire le principe fondamental de la dynamique, déduire l'expression du couple électromagnétique C_{em} , tracer la variation de C_{em} en fonction du temps

Exercice 13

- La vitesse synchrone d'un moteur asynchrone triphasé 4 pôles est de 60 tr/s. Déterminer la fréquence d'alimentation des enroulements du stator.
- La vitesse synchrone d'un moteur à induction triphasé est de 25 tr/s et la fréquence d'alimentation du stator est de 50 Hz. Calculer le nombre équivalent de paires de pôles du moteur.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF.31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

- Un moteur à induction triphasé à 6 pôles est connecté à une alimentation de 300 Hz. Déterminer la vitesse de rotation du champ magnétique produit par le stator.
- Un moteur à induction triphasé à 6 pôles tourne à 970 tr/min à une certaine charge. Si le stator est connecté à une alimentation de 50 Hz, recherchez le pourcentage de glissement à cette charge.
- Un moteur à induction triphasé 50 Hz a 8 pôles. Si le glissement à pleine charge est de 2,5 %, déterminez (a) la vitesse synchrone, (b) la vitesse du rotor et (c) la fréquence des forces électromagnétiques du rotor.
- Un moteur asynchrone triphasé est alimenté en 60 Hz et tourne à 1710 tr/min lorsque le glissement est de 5 %. Déterminez la vitesse synchrone.
- Un moteur à induction 4 pôles triphasé 50 Hz tourne à 1440 tr/min à pleine charge. Calculez (a) la vitesse synchrone, (b) le glissement et (c) la fréquence des forces électromagnétiques induites par le rotor.
- Un moteur à induction 12 pôles, triphasé, 50 Hz tourne à 475 tr/min. Calculez (a) la vitesse de glissement, (b) le pourcentage de glissement et (c) la fréquence des courants du rotor.
- La fréquence d'alimentation du stator d'un moteur à induction à 6 pôles est de 50 Hz et la fréquence du rotor est de 2 Hz. Déterminez (a) le glissement et (b) la vitesse du rotor en tr/min.

Exercice 14

La puissance fournie à un moteur à induction triphasé est de 50 kW et les pertes statoriques sont de 2 kW. Si le glissement est de 4 %, déterminez (a) la perte de cuivre du rotor, (b) la puissance mécanique développée par le rotor, (c) la puissance de sortie du moteur si les pertes par frottement et vent sont de 1 kW, et (d) le rendement du moteur, en négligeant les pertes de fer du rotor.

En utilisant la résistance du rotor externe, la vitesse du moteur à induction dans le problème 1 est réduite à 40 % de sa vitesse synchrone. Si les pertes de couple et de stator sont inchangées, calculez (a) la perte de cuivre du rotor et (b) le rendement du moteur.

Exercice 15

Un moteur asynchrone 400 V, triphasé, 50 Hz, 2 pôles, connecté en étoile tourne à 48,5 tr/s à pleine charge. La résistance et la réactance du rotor par phase sont respectivement de $0,4\Omega$ et 4Ω et le rapport de tours rotor-stator effectif est de 0,8:1. Calculer (a) la vitesse synchrone, (b) le glissement, (c) le couple à pleine charge est 22.43 N.m, (d) la puissance de sortie si les pertes mécaniques s'élèvent à 500 W, (e) le couple maximal, (f) la vitesse à laquelle le couple maximal se produit, et (g) le couple de démarrage.

Calculez à pleine charge (a) le courant du rotor, (b) la perte de cuivre du rotor et (c) le courant de démarrage.

Si les pertes statoriques du moteur à induction du problème 1 sont de 525 W, calculez à pleine charge (a) la puissance absorbée, (b) le rendement du moteur et (c) le courant prélevé sur l'alimentation si le moteur tourne à un facteur de puissance de 0,84

Déterminer la résistance de l'enroulement du rotor nécessaire pour couple de démarrage maximal

Exercice 16 Moteur asynchrone pour lave-linge

Un moteur asynchrone en étoile d'un nettoyeur haute pression a les caractéristiques nominales suivantes :

- Puissance $P_n = 5,5$ kW,
- Valeur efficace de tension composée $U_{sn} = 400$ V,
- Fréquence $f_n = 50$ Hz,

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-31..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

- Intensités efficaces de courant de ligne $I_{sn} = 11 \text{ A}$,
- Vitesse de rotation $n_n = 1460 \text{ tr/min}$.

Supposons que la réactance statorique X_s est égale à la résistance statorique R_s . Utiliser un modèle équivalent monophasé du moteur asynchrone en cas de besoin,

1. Calculer la vitesse de rotation synchrone n_s , le nombre de paires de pôles du moteur et le glissement nominal g_n ;
2. Déterminer la valeur de la résistance statorique R_s sachant qu'un courant de valeur RMS $I_0 = 10 \text{ A}$ circule lorsqu'une tension de valeur efficace $U_0 = 20,6 \text{ V}$ est appliquée ;
3. Au point de fonctionnement nominal, sans charge mécanique, le moteur prélève un courant de valeur efficace $I_{s0} = 3,07 \text{ A}$ pour une puissance active $P_{s0} = 245 \text{ W}$. Calculer les pertes globales et calculer la résistance modélisant les pertes ferromagnétiques R_F et la magnétisation inductance L_f , en supposant que les pertes mécaniques sont égales aux pertes ferromagnétiques ;

Considérez que la machine fonctionne à vitesse nominale et produit la puissance mécanique nominale P_n à la charge mécanique. La puissance mécanique nominale peut également être notée P_{mec} .

4. Au point de fonctionnement nominal, calculer la puissance transmise du stator au rotor et les pertes Joules dans le stator p_{js} et en déduire la puissance totale consommée P ;
5. Calculer la résistance rotorique $R_0 r$ et l'inductance de fuite L_{r0} vue du stator ;
6. Au point de fonctionnement nominal, calculer le couple mécanique C_n et le couple électromagnétique C_{emn} , le facteur de puissance $\cos \varphi_n$ et le rendement η_n ;
7. Calculer la valeur efficace I_s des courants de ligne, et le facteur de puissance $\cos \varphi$ à une vitesse de rotation de 0 tr/min

Exercice 17 Moteur asynchrone d'un ventilateur

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone d'un ventilateur utilisé dans une centrale de traitement d'air, on lit les caractéristiques suivantes : 4,4 kW; 230/400 V; 15,5/9 A; 50 Hz; 4 poles

En utilisant un modèle équivalent monophasé du moteur asynchrone :

1. Expliquez la signification de chaque élément de la plaque signalétique ;
2. Le moteur est utilisé sur un réseau 230 V, expliquer quel couplage d'enroulement doit être utilisé pour le stator ;
3. Calculer la vitesse de rotation synchrone n_s ;
4. Sachant que la valeur de résistance (DC) mesurée entre deux bornes du stator est $R_a = 0,654 \Omega$, calculer la valeur de la résistance statorique R_s du modèle monophasé équivalent ;
5. Un moteur calibré est utilisé pour faire tourner l'arbre du moteur considéré non alimenté, jusqu'à atteindre la vitesse synchrone, à laquelle le moteur calibré consomme 86 W. Calculer les pertes mécaniques du moteur et expliquer pourquoi supposer que ces pertes mécaniques restent constantes est une bonne approximation;
6. Au point de fonctionnement nominal, sans charge mécanique, le moteur prélève un courant de valeur efficace $I_{s0} = 3,82 \text{ A}$ pour une puissance active $P_{s0} = 300 \text{ W}$. Calculer la résistance modélisant les pertes ferromagnétiques R_F et l'inductance statorique L_f ;
7. L'arbre du rotor du moteur est calé tandis qu'une tension de valeur efficace $U_{sc} = 57,5 \text{ V}$ est appliquée pour une puissance active triphasée consommée $P_{sc,3\varphi} = 374 \text{ W}$ et une puissance réactive triphasée $Q_{sc,3\varphi} = 1,09 \text{ kvar}$. Calculez la résistance rotorique R'_r et l'inductance de fuite X'_r vue du stator. Une tension continue de valeur V_s et de fréquence f est appliquée sur chaque phase du moteur.

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Université IBN Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF3.1..2 | Option : maintenance industrielle Semestre : 05 |

8. A l'aide du modèle équivalent monophasé du moteur asynchrone, exprimer la valeur efficace du courant I_s en fonction de V_s , R_s , R'_r , g et X'_r ;
9. Calculez la puissance transmise du stator au rotor;
10. Calculer le couple électromagnétique C_{em} et donner le couple maximal atteignable C_{max} après avoir montré que C_{em} est maximal pour une valeur de glissement g_{max} ;
11. Tracer C par rapport à g pour une tension appliquée V_s égale à V_n , $V/\sqrt{2}$ et $V_n/2$;
12. Expliquer pourquoi un contrôle sur les tensions rotoriques n'est pas adapté à la variation de vitesse pour une charge à couple résistant constant ;
13. Pour limiter le courant de crête lors du démarrage du moteur, un démarreur étoile/triangle est fréquemment utilisé. En supposant que ce mode transitoire est beaucoup plus long par rapport à la période correspondant à la fréquence f des tensions appliquées, calculer les valeurs de courant efficaces des courants de ligne par rapport à ceux tirés en utilisant un démarreur étoile/triangle

Exercice 18 Alternateur synchrone « Etude de l'alimentation électrique d'un Airbus A320 »

En vol, la génération électrique est assurée par deux alternateurs principaux de 90 kVA qui délivrent un système triphasé de tensions 115V/200V, 400Hz. La fréquence est maintenue constante grâce à une régulation hydraulique de la vitesse de rotation des alternateurs. Nous nous intéressons à l'étude de l'alternateur non saturé.

Le système électrique de l'avion est alimenté en 400 Hz. Pour l'Airbus A320 le constructeur donne :

| | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Tension nominale V_N/U_N | 115 V / 200 V |
| Nombre de phases | 3 |
| Puissance apparente nominale | S_N 90 kVA |
| Fréquence nominale | f_N 400 Hz |
| Vitesse de rotation nominale | n_N 12,0 X 10 ³ tr/min |
| Facteur de puissance | $0,75 < \cos\varphi < 1$ |
| Résistance d'induit (par phase) | R_s 10 mΩ |

L'armature est couplée en étoile.

Deux essais ont été réalisés à vitesse nominale constante : n_N .

- Essai générateur à vide : caractéristique à vide $E_o(I_e)$ où E_o est la valeur de la force électromotrice induite à vide dans un enroulement et I_e l'intensité du courant inductif. La caractéristique est une droite telle que pour $I_e=0$ correspond $E_o = 0$ et pour $I_e=92$ A correspond à $E_o = 400$ V.

- Essai de court-circuit : dans la plage utile, la caractéristique de court-circuit est la droite d'équation $I_{cc} = 3,07 \times I_e$, où I_{cc} est la valeur efficace du courant de court-circuit dans un enroulement statorique.

1- On s'intéresse au fonctionnement nominal :

- a) Calculer la pulsation des tensions de sortie de l'alternateur.
- b) Déterminer le nombre de paires de pôles de la machine.
- c) Calculer la valeur efficace du courant nominal d'induit I_N .

2- On suppose l'alternateur non saturé

- a) Déposez son modèle équivalent par phase représentée.
- b) Calculer l'impédance synchrone de l'alternateur Z_s .

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Université Ibn Khaldoun de Tiaret | | Electrotechnique appliquée | VHS: 22h30 (Cours: 1h30) | Cycle : Licence |
| | | | | Niveau : 3 ^{ème} année |
| Faculté des sciences appliquées | Département de Génie Mécanique | Crédits:4 Coefficient: 2 | Unité d'enseignement: UEF-3.1..2 | Option : maintenance industrielle |
| | | | | Semestre : 05 |

c) Déduire la réactance synchrone $X_S = L_S \omega$

3- Dans la suite du problème, l'influence de la résistance statorique R_S est négligée.

a) Déterminer l'intensité du courant inductif I_{eo} pour un fonctionnement à vide à la tension assignée (nominale) $V=115\text{ V}$.

b) On considère une charge triphasée équilibrée. L'alternateur fonctionne dans les conditions nominales ; il délivre son courant nominal I_N , derrière (« en retard ») la tension.

Pour $\cos\varphi = 0,75$, représenter le diagramme vectoriel des tensions et en déduire :

- La valeur de la force électromotrice induite E_o .
- La nouvelle valeur du courant d'excitation I_e pour maintenir $V = 115\text{ V}$ à $\cos\varphi = 0,75$ lorsque l'alternateur délivre son courant nominal I_N

Références

1. Max Marty, Daniel Dixneuf et Delphine Garcia Gilabert, 'Principe d'électrotechnique : Cours et exercice corrigés', Dunod, Paris, 2005.
2. Luc Lasne, 'Notions de base et machines électriques : Rappels de cours', Dunod, Paris, 2005
3. David Folio, 'Support de cours d'électricité / électrotechnique', 3^{ème} Année Énergie, Risques et Environnement, Institut National des sciences appliquées, France, 2017-2018.
4. Amari Mansour, 'Cours d'électrotechniques', Licence génie électrique niveau 2, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, Janvier 2014.
5. Krishna Vasudevan, G. Sridhara Rao & P. Sasidhara Rao, 'Electrical Machines II', Indian Institute of Technology Madra
6. BOUCIF Adda, Présentation interne, document sonelgaze, Algerie, 2016.
7. Pierre Mayè . « Moteurs électriques industriels », édition Dunod, 2005.
8. R. Annequin et J. Boutigny. « Cours de sciences physiques : électricité », Tome 3, édition Vuibert ,Paris.
9. M. Kouznetsov. « Fondement de l'électrotechnique ».
10. H. Lumbroso. « Problèmes résolus sur les circuits électriques », édition Dunod.
11. Marcel Jufer. « Electromécanique, Presses polytechniques et universitaires romandes », Lausanne, 2004.
12. A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans. "Electric Machinery », McGraw-Hill Higher Education, 2003
13. Edminster, « Théorie et applications des circuits électriques », Mc.Graw.Hill.