

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



POLYCOPIE DE COURS

ÉLECTROTECHNIQUE FONDAMENTALE 2

(Cours & Exercices)

Préparé par: **Mostefa KOULALI**



Promotion : **Licence 2 Électrotechnique**
Semestre: **04**

Expertisé par:
Pr. BOUAZZA Abdelkader
Dr. BERKANI Abderrahmane

Année universitaire: 2024/2025



- 1- « L'Homme animé par l'esprit scientifique désire sans doute savoir, mais c'est aussitôt pour mieux interroger ». (Bachelard)
- 2- « Une théorie mathématiquement belle a plus de chance d'être correcte qu'une théorie inélégante, même si cette dernière décrit correctement les résultats expérimentaux ». (Paul Dirac)
- 3- « Le génie est fait d'un dixième d'inspiration... et de neuf dixième de transpiration ». (Edison)
- 4- « La théorie est absurde dans la pratique et la pratique est aveugle sans la théorie ». (Kant)
- 5- « En science, on trouve d'abord et on cherche ensuite. Il n'y a pas de fait en soi mais des faits observés ». (Imre Lakatos)
- 6- « Le savant n'est pas l'homme qui fournit les vraies réponses, c'est celui qui pose les vraies questions ». (C. Lévi-Strauss)
- 7- « Savoir s'étonner à propos est le premier mouvement de l'esprit vers la découverte ». (Louis Pasteur)
- 8- « Il ne faut pas dire que la science est utile parce qu'elle nous permet de construire des machines. Il faut dire : les machines sont utiles parce qu'elles nous permettent de faire de la science ». (Poincaré)
- 9- « Science sans conscience n'est que ruine de l'âme ». (Rabelais, 1494-1553)
- 10- « L'intelligence n'est pas une fonction isolable. Elle est, dans tout comportement, la plasticité qui permet d'échapper aux automatismes innés ou acquis ». (Zazzo, Le devenir de l'intelligence)
- 11- « Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs, n'a jamais tenté d'innover ». (Albert Einstein)
- 12- « Je crois en une vie après la mort, tout simplement parce que l'énergie ne peut pas mourir Elle circule, se transforme et ne s'arrête jamais », (Albert Einstein)

TABLE DES MATIERES



Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I: Transformateurs	
I. Intérêt et définitions	3
II. Transformateur Monophasé.....	4
II.1 Constitution.....	4
II.1.1 Le circuit magnétique.....	4
II.1.2 Les enroulements (bobines)	5
II-2 Symbole électrique	5
II-3 -Branchement	5
II-4 Principe de fonctionnement	6
II-5 Polarité d'un transformateur.....	7
II-6 Transformateur monophasé Parfait (Idéal).....	7
II.6.1 Rapport de transformation	8
II.6.2 Rendement d'un transformateur parfait.....	9
II.6.3 Passage d'impédance autour d'un transformateur parfait.....	9
II.6.4 Formule de BOUCHEROT	9
II.6.5 Transformateur idéal en charge.....	10
II.7 Transformateur monophasé réel.....	10
II.7.1 Définition	10
II.7.2 Rapport de transformation	10
II.7.3 Schéma équivalent complet d'un transformateur réel.....	11
II.7.4 Schéma équivalent d'un transformateur réel dans l'hypothèse de KAPP.....	11
II.7.5 Equations du transformateur réel	12
II.7.6 Détermination expérimentale des éléments équivalents	13
II.7.7 Bilan des puissances	15
II.7.8 Chute de tension ΔV_2	15
III. Transformateur Triphasé	16

III.1 Intérêt	17
III.2 Constitution et caractéristiques d'un transformateur triphasé.....	17
III-3 Symbole	18
III.4 Couplage des transformateurs	18
III.4.1 Définition	18
III.4.2 Choix du mode couplage	20
III.4.3 Utilités des différents couplages	20
III.5 Rapport de transformation	20
III.5.1 Rapport de transformation par colonne	20
III.5.2 Rapport de transformation par phase.....	20
III.5.3 Tableau résumant le rapport de transformation suivant le couplage	21
III-6 Indice horaire	21
III.6.1 Définition	21
III.6.2 Couplages des transformateurs et les indices horaires	22
III.7 Etude électriques des transformateurs triphasés	23
III.7.1 Schéma monophasé équivalent.....	23
III.7.2 Schéma équivalent ramené au secondaire	24
III.7.3 Chute de tension	24
III.7.4 Détermination des éléments du schéma électrique.....	24
IV. Exploitation en parallèle de transformateurs de puissance	24
V. Exercices	25

Chapitre II : Machines à courant continu

I. Introduction sur les machines électriques	29
I.1 Historique.....	29
I.2 Types des conversions de l'énergie électrique	30
I.3 Classification des machines électriques	30

I.4 Constitution de base	31
II. Machines à courant continu	32
II.1 Introduction générale	32
II.2 Symboles électriques	32
II.3 Constitution	33
II.4 Principe de fonctionnement de la machine à courant continu.....	35
II.5 Grandeurs de base et schéma électrique équivalent	36
II.5.1 Grandeurs de base	36
II.5.2 Schéma électrique équivalent.....	37
II.6 Machine a courant continue en mode moteur	37
II.6.1 Définition	37
II.6.2 Les différents modes d'excitation du moteur à courant continu.....	37
II.6.3 Comparaison entre les différents modes d'excitation.....	38
II.6. 4 Vitesse du moteur	42
II.7 Bilan des puissances et des pertes dans un moteur à courant continue.....	42
II.8 Démarrage du moteur à courant continu.....	44
II.9-Machine en courant continue en mode génératrice	45
II.9.1 Définition	45
II.9.2 Comparaison entre les différents modes d'excitation	45
II.9.3 Câblage d'une génératrice à courant continu.....	47
II.9.4 Bilan des puissances et des pertes	47
II.10 Freinage	48
II.10.1 Freinage rhéostatique	48
II.10.2 Freinage par récupération d'énergie	48
II.11 Avantages, Inconvénients et applications des machines à courant continu	49
II.11.1 Avantages, Inconvénients des machines à courant continu	49
II.11.2 Applications	49
III. Exercices	51

Chapitre III : Machines synchrones

I. Généralités	54
II. Introduction	54
III. Champ Tournant.....	55
IV. Relation entre vitesse de rotation et nombre de paires de pôles.....	57
V. Constitution et principe de fonctionnement.....	57
V.1 Présentation d'une machine synchrone.....	57
V.2 Constitution	58
V.3 Principe de fonctionnement	59
V.4 Symbole.....	60
VI- Etude de l'alternateur	60
VI.1 Définition	60
VI.2 principe de fonctionnement.....	62
VI.2.1 Induction électromagnétique	62
VI.2 .2 Principe de fonctionnement de l'alternateur	62
VI.3 Schémas électrique équivalent	63
VI.4 Détermination des grandeurs d'une phase	63
VI.5 Diagramme synchrone: (diagramme de BEHN-ESCHENBURG)	65
VI.6 Alternateur en charge	66
VI.7 Bilan des puissances et des pertes dans un alternateur synchrone	68
VI.8 Alternateur en production.....	69
VI.8.1 Production autonome.....	69
VI.8.2 Production sur un réseau	69
VII. Moteur synchrone	71
VII.1 Principe de fonctionnement	71
VII.2 Schéma électrique équivalent.....	72
VII.3 Diagramme synchrone: (diagramme de BEHN-ESCHENBURG).....	72
VII.4 Angle de décalage mécanique et décrochage	73

VII.5. Rendement	73
VII.6 Décrochage	73
VIII. Avantages et inconvénients des moteurs synchrones	73
IX- Réversibilité.....	74
X. Exercices.....	75

Chapitre IV : Machines asynchrones

I. Introduction.....	77
II. Le moteur asynchrone.....	77
II.1 Historique.....	77
II.2 Généralités	77
II.3 Constitution	77
II.4 Principe de fonctionnement	82
II.5 Glissement	83
II.6 Schéma électrique équivalent.....	84
II.7 Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé.....	85
II.8 Régime de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	90
II.9 Bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone triphasée.....	90
II.10 Essais de la machines asynchrone.....	93
II.11 Différents types de moteurs asynchrones.....	96
II.12 Démarrage Des Moteurs Asynchrones	97
II.12.1 Démarrage sous tension réduite	97
II.12.2 Démarrage « étoile / triangle »	98
II.12.3 Utilisation de résistances	98
II.12.4 Dispositifs particuliers : moteur à double cage ou à encoches profondes	99
II.13 Freinage du moteur Asynchrone.....	99
II.13.1 Freinage par injection de courant.....	99
III. Génératrice Asynchrone	101
III-1 Principe	101

III.2 Avantages et inconvénients	101
III.3 Caractéristique mécanique complète	102
IV. Exercices	103
Références	107

INTRODUCTION GÉNÉRALE



I. Introduction générale :

L'électrotechnique fondamentale est une discipline essentielle qui étudie la production, le transport, la transformation et l'utilisation de l'énergie électrique. Elle constitue le socle du génie électrique industriel et regroupe les connaissances nécessaires pour comprendre les phénomènes électriques et magnétiques ainsi que leur application technique dans divers équipements et systèmes électriques. Cette discipline est au cœur du développement économique, car l'énergie électrique est indispensable au fonctionnement des industries, des infrastructures et des technologies modernes.

Les objectifs de l'étude de l'électrotechnique fondamentale ne cessent de se développer grâce aux progrès de l'électronique de puissance, des microprocesseurs et des automates programmables. De plus, l'optimisation des systèmes électrotechniques et l'amélioration de leur rendement constitue un enjeu prometteur pour le secteur grâce à l'application des concepts de développement durable en réduisant leur poids et en utilisant des matériaux recyclables.

Tous ces développements technologiques majeurs enregistrés durant les dernières années ont fait accroître les besoins des entreprises industrielles en matière de compétences dans le domaine de l'électrotechnique. Investir dans la formation et préparer des cadres pour relever ces défis devient primordial. C'est dans cet objectif que cette formation est proposée

Au sein de l'électrotechnique, l'étude des machines électriques tournantes (générateurs et moteurs) et des transformateurs (machines statiques) occupe une place centrale. Ces dispositifs sont les piliers de la conversion et de l'adaptation de l'énergie électrique.

Les transformateurs sont des composants clés en électrotechnique. Leur fonctionnement repose sur le principe de l'induction électromagnétique, où un courant alternatif variable dans un enroulement génère un champ magnétique variable qui induit un courant dans un autre enroulement proche, permettant ainsi la transformation des niveaux de tension et de courant tout en conservant la fréquence. Les transformateurs sont largement utilisés pour adapter la tension dans les réseaux de distribution électrique, assurant une transmission efficace de l'énergie sur de longues distances.

Les machines électriques, quant à elles, sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Parmi elles, les machines à courant continu (CC) fonctionnent grâce à un champ magnétique stable créé par des enroulements inducteurs ou des aimants permanents dans le stator. Le courant circulant dans les bobines du rotor interagit avec ce champ, générant un couple moteur. Le sens du courant est périodiquement inversé par des collecteurs et des brosses pour maintenir une rotation continue. Ces machines sont souvent utilisées dans des applications nécessitant un contrôle précis de la vitesse et du couple.

Les machines synchrones se caractérisent par un rotor qui tourne à la même vitesse que le champ magnétique tournant du stator, assurant ainsi une vitesse constante quelle que soit la charge. Le rotor peut être constitué d'aimants permanents ou d'électroaimants alimentés en courant continu. Après le démarrage, le moteur synchrone fonctionne en parfaite synchronisation avec le champ tournant, ce qui en fait un choix privilégié pour des applications nécessitant une vitesse stable et une bonne régulation.

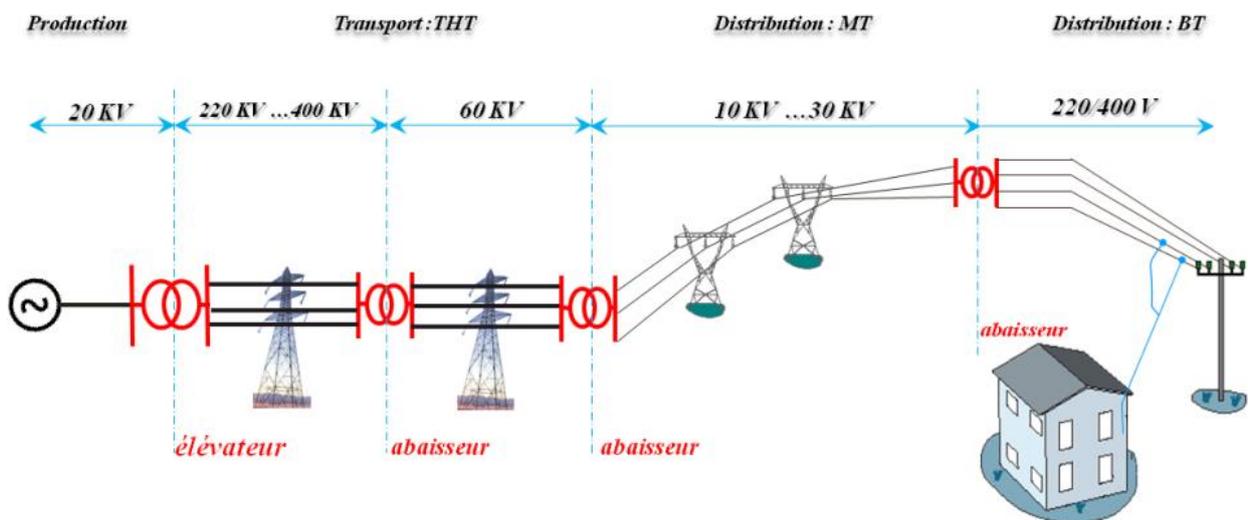
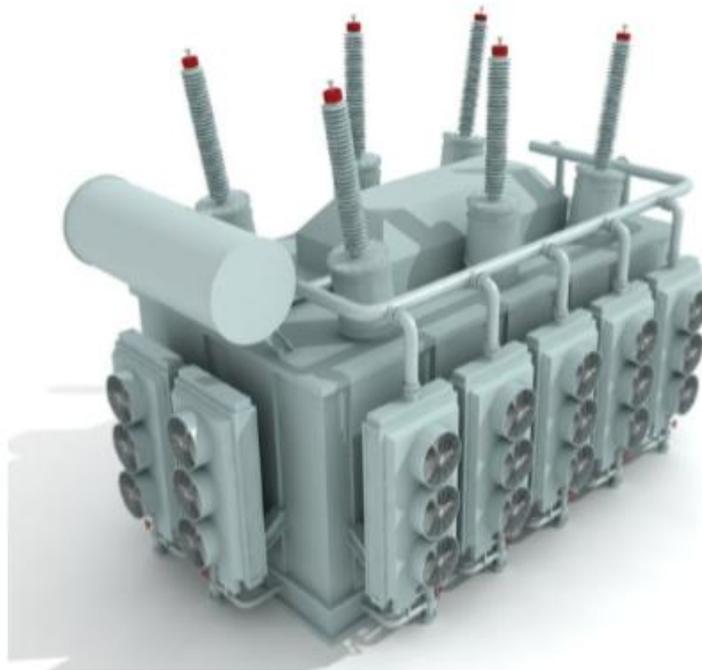
Enfin, les machines asynchrones, ou moteurs à induction, fonctionnent sur le principe de l'induction électromagnétique dans le rotor. Le champ magnétique tournant du stator induit un courant dans les conducteurs du rotor (souvent une cage d'écureuil), ce qui génère une force motrice. Le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant, phénomène appelé glissement, indispensable pour maintenir le couple moteur. Ces machines sont robustes, simples et largement utilisées dans l'industrie pour des applications variées.

L'étude approfondie de ces transformateurs et machines électriques est indispensable pour tout électrotechnicien. Elle permet non seulement de comprendre le fonctionnement des systèmes énergétiques actuels, mais aussi de concevoir, d'optimiser et de maintenir les équipements qui façonneront le paysage énergétique de demain, en intégrant les défis de l'efficacité, de la fiabilité et de la durabilité.

En résumé, l'électrotechnique fondamentale permet de comprendre les principes de base qui régissent les transformateurs et les différentes machines électriques, outils indispensables pour la conversion et la gestion de l'énergie électrique dans de nombreux secteurs industriels et technologiques.

CHAPITRE I

TRANSFORMATEURS



I. Intérêt et définitions :

Le fait que l'énergie électrique, soit produite, transportée et utilisée principalement sous forme de tensions et courants alternatifs sinusoïdaux a des conséquences majeures sur la physionomie des réseaux et des appareillages électrique. Une de ces conséquences liée à la nécessité de transporter l'énergie sous très haute tension (THT) est qu'il est nécessaire d'élever fortement les tensions produites par les alternateurs pour les transporter loin des centrales et de les abaisser ensuite au plus près des lieux de consommation.

Il apparaît ainsi un besoin immense : celui de savoir passer facilement d'une valeur de tension sinusoïdale à une autre, de façon fiable, facile à réaliser et à entretenir, présentant une grande durée de vie et un très bon rendement. L'outil qui permet tout cela est le **transformateur**.

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).

Le transformateur permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique



Lucien Gaulard, (1850 -1888) né à Paris, commence sa carrière comme chimiste avant de se tourner vers l'électricité. Avec John Dixon Gibbs, il dépose en 1883 un brevet fondamental sur la distribution électrique en courant alternatif et l'utilisation des transformateurs. Il réussit notamment à alimenter cinq stations de métro londoniennes et à démontrer l'efficacité du transport d'électricité à haute tension.

Définitions:

1- Le transformateur est un appareil électromagnétique qui sert à transformer le courant alternatif avec certaines valeurs de tension ou de courant vers un courant alternatif avec d'autres valeurs de tension ou de courant mais à une fréquence constante. On trouve des transformateurs : monophasés ; triphasés ; de puissance ; de mesure et spéciaux.

2- Un transformateur est un convertisseur « alternatif-alternatif » qui permet de modifier la valeur d'une tension alternative en maintenant sa fréquence et sa forme inchangées. Le transformateur est un appareil qui peut :

Transformer une tension alternative d'une grandeur à une autre grandeur.

- ✚ Transformer un courant alternatif d'une grandeur à une autre grandeur.
- ✚ Isoler un circuit électrique d'un courant continu circulant dans un autre circuit électrique.
- ✚ Faire paraître une impédance comme ayant une autre valeur.

Les transformateurs sont des machines électriques entièrement statiques, cette absence de mouvement est d'ailleurs à l'origine de leur excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport de l'énergie électrique où l'on préfère « transporter des volts plutôt que des ampères ». Ils assurent l'élévation de tension entre la source (alternateurs) et le réseau de transport, puis ils permettent l'abaissement de la tension du réseau vers l'utilisateur.

3- Les contraintes liées à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'énergie électrique sont différentes.

A partir de la production dans les centrales électriques, l'énergie est transportée :

- ✚ par un réseau en très haute tension sous des tensions **de 220 kV ou 400 kV** ;
- ✚ puis la distribution se fait sous **des tensions de 20 kV** ;
- ✚ pour une utilisation finale en basse tension sur **le réseau 220/380 V**.

Toutes ces modifications de tension nécessitent l'utilisation de transformateurs élévateurs ou abaisseurs de tension qui fonctionnent en alternatif.

4- Les transformateurs ont **pour fonction d'adapter une tension** (réseau de distribution) à une autre (tension d'utilisation). Un transformateur est constitué d'un circuit magnétique feuilleté sur lequel sont bobinés les enroulements du primaire et les enroulements du secondaire. Des organes mécaniques assurent les fonctions **de manutention, protection, support et refroidissement**.

Parmi les applications des transformateurs, on note :

Electronique :

- a) alimentation à basse tension
- b) adaptation d'impédance

Electrotechnique :

- a) transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité
- b) alimentation à basse tension (par exemple, lampes halogènes)

Mesure :

- a) transformateurs d'intensité de courant
- b) transformateurs de potentiel Il y a deux types principaux de transformateurs, le type cuirassé et le type à colonnes. Dans le type cuirassé, on utilise un circuit magnétique à trois branches, et les enroulements sont autour de la branche centrale. Dans le type à colonnes, un circuit magnétique à deux colonnes est utilisé.

II- Transformateur Monophasé :

II-1 Constitution :

Un transformateur monophasé est constitué de 2 bobines en fil de cuivre, l'une est dite "primaire", l'autre "secondaire". Ces bobines sont enroulées sur un noyau magnétique constitué d'un empilage de tôles minces en acier. Celui-ci permet de relier magnétiquement le primaire et le secondaire en canalisant les lignes de champ magnétiques produites par le primaire.



Figure -1-

II.1.1 Le circuit magnétique:

Un transformateur monophasé comporte un circuit magnétique fermé, constitué par un empilage de tôles (en forme de E et de I), en matériaux **ferromagnétique** (alliages de fer de nickel ou de cobalt.), isolées entre elles par un vernis (**circuit magnétique feuilleté**) pour éviter des pertes d'énergie par circulation de courants de Foucault et limitant les pertes par hystérésis.

Formes de circuits magnétiques:

Le circuit magnétique d'un transformateur permet de canaliser le flux magnétique Φ [Wb], Ce circuit peut avoir différentes formes:

- ✚ soit à 2 colonnes (figure -2-) formées par un empilage de tôles décalées (couche 1 puis couche 2 et ainsi de suite).
- ✚ soit de forme cuirassé, (figure -3-) c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux magnétique Φ [Wb] se referme par chacun des côtés qui forment la cuirasse.

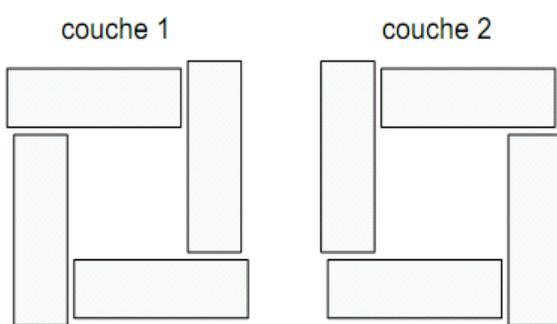


Figure -2-

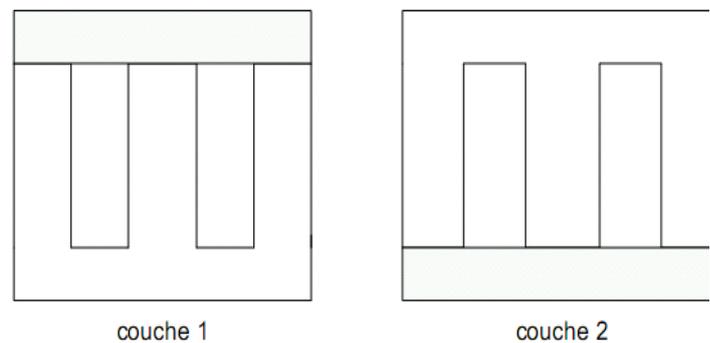


Figure -3-

La forme des tôles, selon les dimensions du circuit magnétique, peut être en E , U, L ,C ou en I.

II.1.2 Les enroulements (bobines) :

Chaque enroulement est constitué de spires isolées entre elles par un vernis. Les deux enroulements sont placés autour d'un noyau magnétique afin de diminuer les fuites magnétiques et d'augmenter le champ.

L'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement haute tension, il est constitué d'un fil plus fin que l'autre enroulement basse tension.

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

II-2 Symbole électrique :

Dans un schéma électrique, le transformateur peut être représenté par l'un des deux symboles suivants:

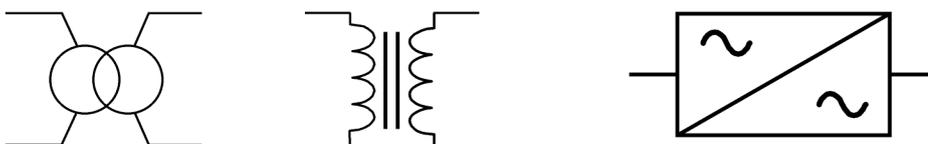


Figure -4-

II-3 -Branchement: (Figures 5 et 6)

- ✚ L'enroulement primaire est branché à une source de tension sinusoïdale alternative.
- ✚ L'enroulement secondaire alimente une charge électrique :

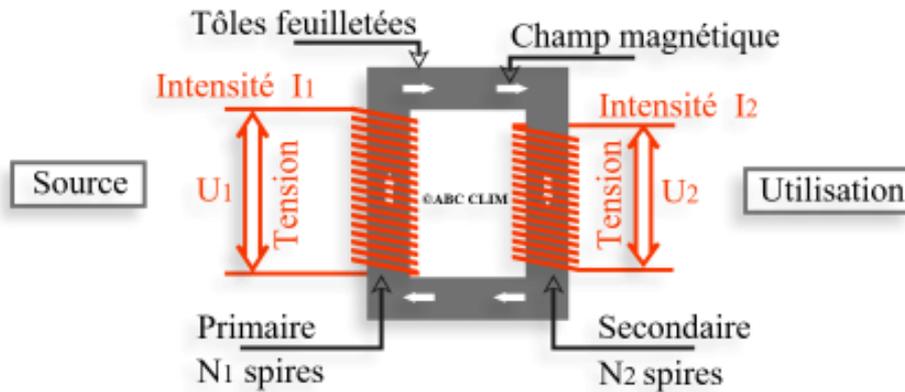


Figure 5

II-4 Principe de fonctionnement :

Loi de Faraday : une variation de flux à travers une spire créer une f.é.m. e. Inversement une f.é.m. e dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci. $e = -\frac{d\phi}{dt}$

Un transformateur est constitué de deux enroulements réalisés autour d'un circuit magnétique, comme le montre la figure 6

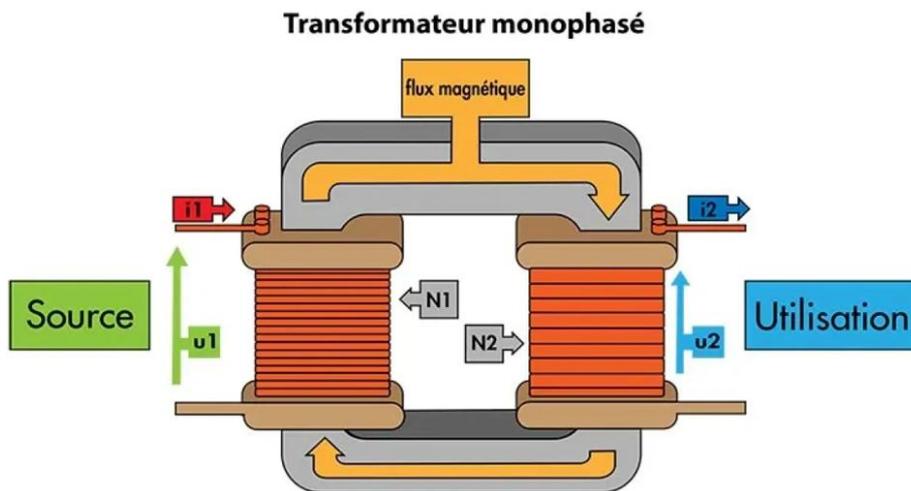


Figure 6

Le premier enroulement, constitué de **N₁ spires**, est appelé le **primaire du transformateur**. Si on l'alimente par une source de tension alternative U₁, il se crée un flux ϕ variable. Si la tension est sinusoïdale, comme c'est le cas généralement, le flux est également sinusoïdal.

Le second enroulement, constitué de **N₂ spires**, est appelé le **secondaire du transformateur**.

On sait que si un conducteur, une spire ou une bobine sont placés dans un champ magnétique variable, ils seront le siège de forces électromotrices (f.é.m.) induites. C'est le cas de l'enroulement

secondaire qui est traversé par le flux variable produit par le primaire et canalisé par le circuit magnétique. Le secondaire du transformateur sera donc le siège d'une f.é.m. induite U_2 sinusoïdale.

Remarque : C'est la **variation** du flux qui est à l'origine de la f.é.m. induite. Si la tension du primaire est sinusoïdale, le flux l'est également et ses variations sont telles que la f.é.m. est également sinusoïdale. Mais si la tension du primaire est continue, le flux est constant et n'engendre pas de f.é.m. induite. Si U_1 est une tension continue, alors $U_2 = 0$ V.

II-5 Polarité d'un transformateur:

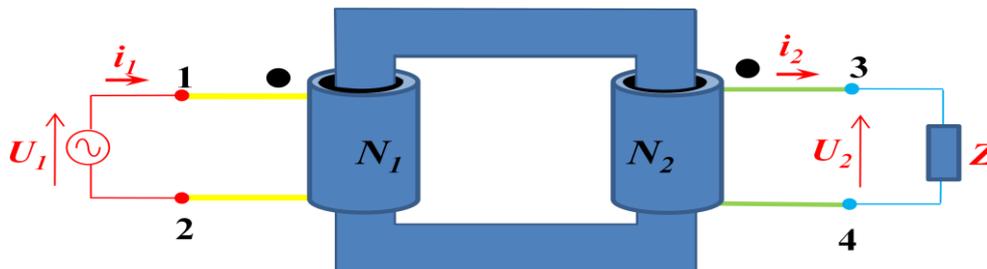


Figure -7-

Supposons qu'au moment où les tensions atteignent leur maximum (figure -7-), 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.

On peut réaliser un test de polarité d'un transformateur (figure-8-) de la manière suivante :

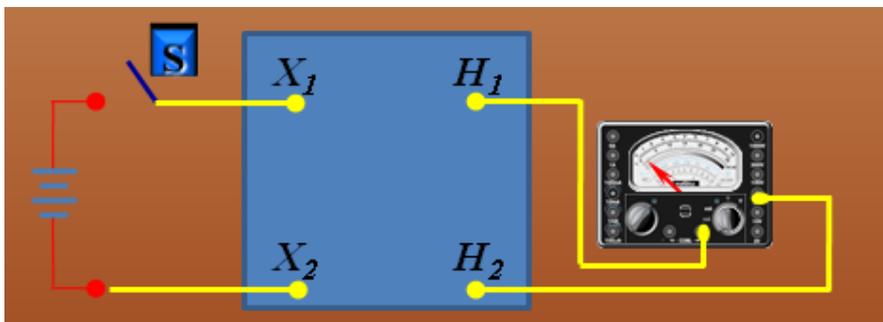


Figure -8-

On raccorde une pile de 1,5 [V] aux bornes basse tension du transformateur à travers un poussoir S. Lors de la 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 .

II-6 Transformateur monophasé Parfait (Idéal) :

C'est un transformateur virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels. (Ces derniers sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances). Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux sont négligées, le rapport du nombre de spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine totalement le rapport de transformation du transformateur.

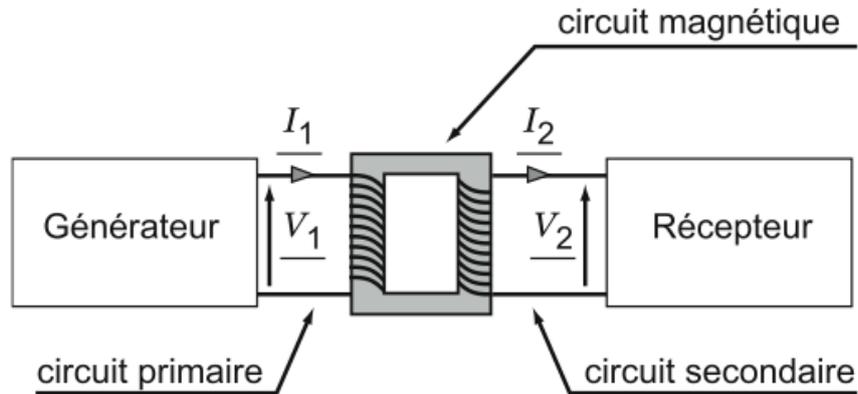


Figure -9-

En parlent d'un transformateur monophasé parfait dès lors que les bobinages et le circuit magnétique sont considérés comme idéaux, c'est-à-dire présentent les caractéristiques suivantes :

- ✚ **Les bobinages** : ni chute de tension, ni pertes (pertes par effet joule nul). La résistance dans les fils (au primaire et secondaire) est nulle.
- ✚ **Le circuit magnétique** : est de perméabilité infinie ($\mu = \infty$), c'est-à-dire de réluctance nulle ($\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu \cdot S} = 0$) (il n'y a pas de fuites magnétiques, Le noyau magnétique est parfait et les pertes fer sont nul).

II.6.1 Rapport de transformation :

La formulation de la loi de Lenz relative aux deux bobinages correctement conventionnés donne la relation :

$$v_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad \text{et} \quad v_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1}$$

Le rapport des nombres de spires est une grandeur sans dimension notée m et appelée rapport de transformation. Elle représente le facteur de proportionnalité qui existe entre la tension primaire et secondaire, la relation obtenue est également valable en régime sinusoïdale et donc en notion complexe.

$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Par ailleurs la formulation de la loi d'Ampère relative au circuit magnétique supposé parfait

$$\text{donne la relation : } N_1 \cdot i_1(t) - N_2 \cdot i_2(t) = \mathfrak{R} \cdot \phi(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{i_2(t)}{i_1(t)} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{m}$$

On retiendra ainsi la formule $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2}$

Et on peut en déduire les résultats suivants :

$N_2 > N_1 \Rightarrow m > 1 \Rightarrow$ le transformateur est éleveur.

$N_2 < N_1 \Rightarrow m < 1 \Rightarrow$ le transformateur est abaisseur.

$N_2 = N_1 \Rightarrow m = 1 \Rightarrow$ le transformateur est isolateur.

L'expression de la puissance apparente complexe au primaire du transformateur :

$$S_1 = V_1 \cdot I_1 = \frac{V_2}{m} \cdot m \cdot I_2 = V_2 \cdot I_2 = S_2$$

Par identification des parties réelles et imaginaires, ceci est équivalent à : $P_1=P_2$ et $Q_1=Q_2$. Le transformateur parfait est donc absolument passif et sans pertes. Quand il élève la tension, il abaisse le courant (ou inversement) et ne modifie pas les puissances qui transitent.

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.6.2 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 $P_2 = U_2 \cdot i_2$

Le rendement $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 100 \%$

II.6.3 Passage d'impédance autour d'un transformateur parfait :

En considérant une impédance Z placée en série avec le secondaire d'un transformateur parfait (figure 10) , il est possible d'écrire $V_2 = m \cdot V_1 - Z \cdot I_2$

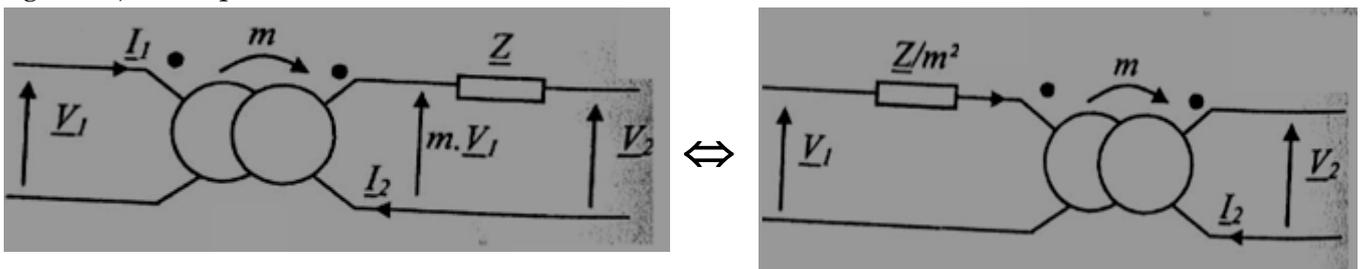


Figure -10-

Avec $I_2 = \frac{I_1}{m} \Rightarrow V_2 = m \cdot V_1 - \frac{Z}{m} \cdot I_1 \Rightarrow V_2 = m \cdot (V_1 - \frac{Z}{m^2} \cdot I_1)$

Cette écriture est équivalente à la présence de l'impédance Z/m^2 Placée en série avec le primaire du transformateur.

On montre plus généralement que toute impédance Z placée en série ou en parallèle au secondaire d'un transformateur parfait est équivalente à l'impédance Z/m^2 placée de façon analogue au primaire de ce transformateur et vice versa.

II.6.4 Formule de BOUCHEROT :

On suppose que l'expression de la tension sinusoïdale $v_1(t) = V_1 \sqrt{2} \cos (\omega t)$ et d'après la loi de Lenz $v_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\phi(t)}{dt}$. Ainsi en intégrant cette égalité, l'expression du flux dans le circuit magnétique s'écrit

$\phi(t) = \frac{V_1 \sqrt{2}}{N_1 \cdot \omega} \sin(\omega t)$ et comme $\phi(t) = B(t) \cdot S$ alors $B(t) = \frac{V_1 \sqrt{2}}{S \cdot N_1 \cdot \omega} \sin(\omega t)$, on relève la valeur

maximal $B_{max} = \frac{V_1 \sqrt{2}}{S \cdot N_1 \cdot 2\pi \cdot f} \Rightarrow V_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 \cdot B_{max} \cdot S \cdot f \Rightarrow$

Alors la formule de Boucherot est donnée par :

$$V_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f \quad \text{et} \quad V_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot B_{\max} \cdot S \cdot f$$

II.6.5 Transformateur idéal en charge:

Le calcul du courant au secondaire se réalise de la façon suivante : $i_2 = U_2 / Z$

Dans un transformateur idéal, le primaire et le secondaire sont couplés par le flux F_m [Wb] seulement.

Par conséquent, le rapport de transformation en charge est le même qu'à vide, soit : $m = N_1 / N_2 = U_2 / U_1$

II.7 Transformateur monophasé réel:

II.7.1 Définition :

Un transformateur réel est un appareil réalisé à partir de bobinages et d'un circuit magnétique tributaire de défauts. Il ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

- ✚ Noyau magnétique : Le noyau possède une caractéristique $B(H)$ non linéaire, avec hystérésis, et une perméabilité non-infinie ($\mu_r \neq \infty$).
- ✚ Bobinages : Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ($\rho \neq 0$).

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire six sources de pertes dans le transformateur :

1. Puisque la perméabilité du noyau est non -infinie, la réluctance du noyau ne sera pas nulle. Il y a par conséquent des fuites de flux :
 - (a) au primaire
 - (b) au secondaire
2. On a déjà vu qu'il existait des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.
3. La résistivité des fils de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

- ✚ Le rendement du transformateur est inférieur à 100%.
- ✚ Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours. La tension au secondaire variera aussi en fonction de la charge.

II.7.2 Rapport de transformation :

Le rapport de transformation se mesure à vide (pas de charge, $I_2=0$) $m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$

II.7.3 Schéma équivalent complet d'un transformateur réel :

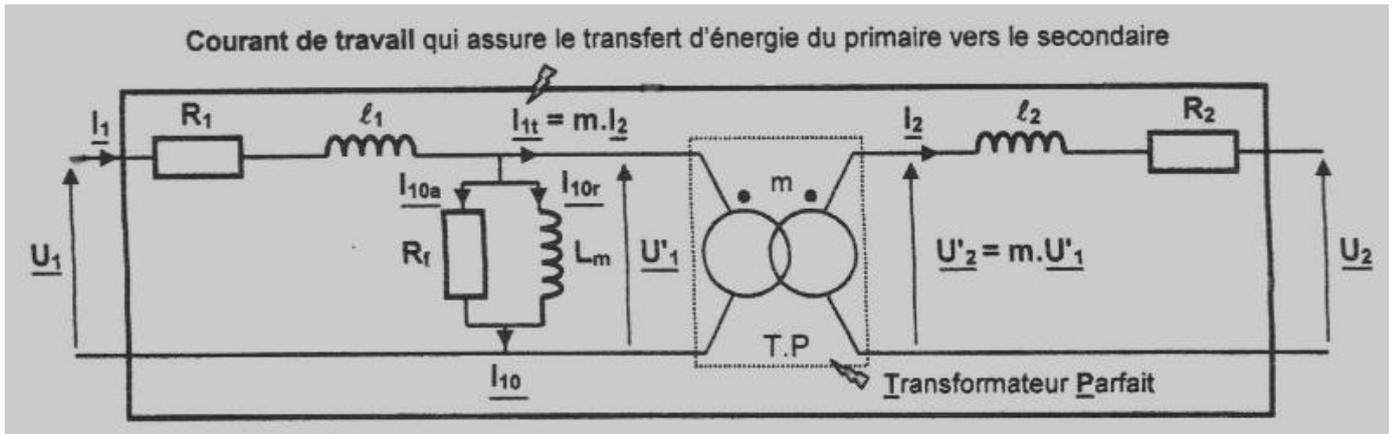


Figure -11-

Ce schéma décrit bien le fonctionnement d'un transformateur réel en charge, mais son usage est difficile et surtout ses paramètres sont de mesure délicate en particulier les inductances de fuites l_1 et l_2 . Avec :

- ✚ R_1, R_2 : Résistances des enroulements primaire et secondaire.
- ✚ l_1, l_2 : inductances de fuites partielles du primaire et du secondaire.
- ✚ L_m : inductance de magnétisation ($L_m = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}}$ avec N_1 : nombre de spires de l'enroulement primaire)
- ✚ R_f : Résistance simulant les pertes ferromagnétiques
- ✚ m : rapport de transformation à vide.

II.7.4 Schéma équivalent d'un transformateur réel dans l'hypothèse de KAPP:

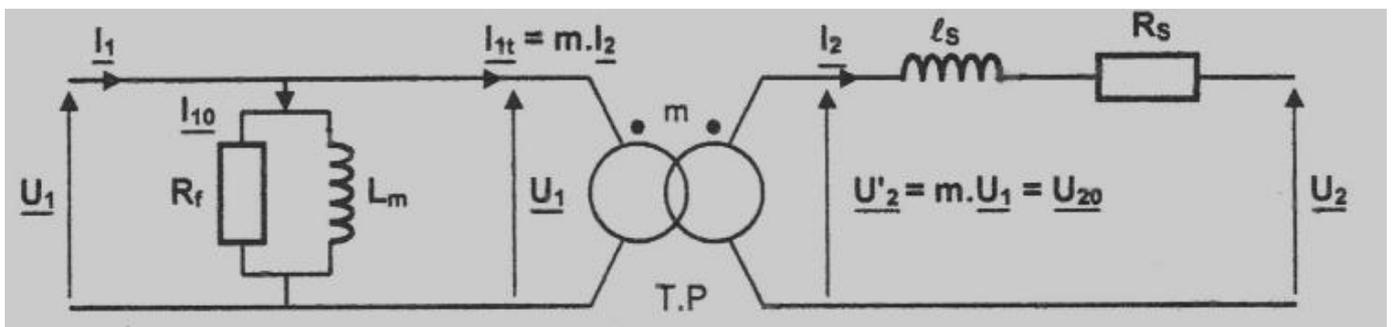


Figure -12-

Hypothèse : On admet que I_{10} est négligeable devant I_1 au voisinage de la charge nominale. On peut alors rapporter la branche de magnétisation ($R_f // L_m$) à l'entrée du schéma.

R_s : résistance interne totale ramenée au secondaire : $R_s = R_2 + m^2.R_1$.

l_s : inductance de fuites totales ramenée au secondaire : $l_s = l_2 + m^2.l_1$.

$$m = \frac{U_{20}}{U_{1n}} = \frac{N_2}{N_1}$$

Le courant I_{10} étant négligeable devant I_1 au voisinage de la charge nominale, on peut alors remplacer la branche magnétisation par un circuit ouvert. On aboutit au schéma de la figure 13

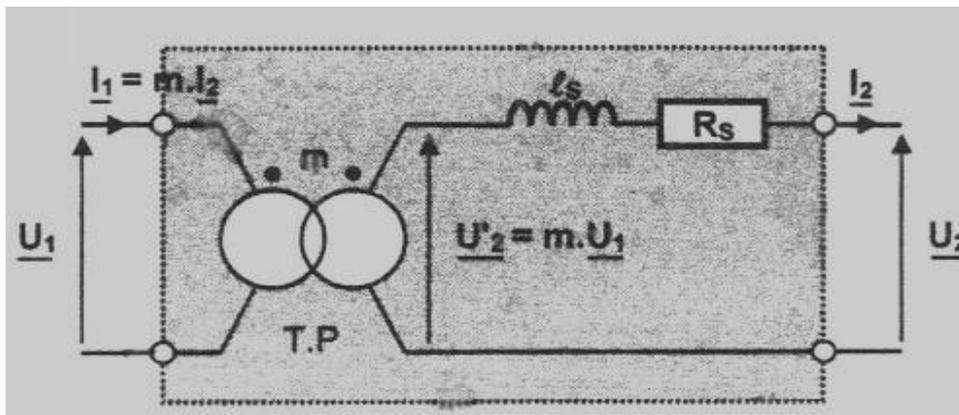


Figure -13-

II.7.5 Equations du transformateur réel :

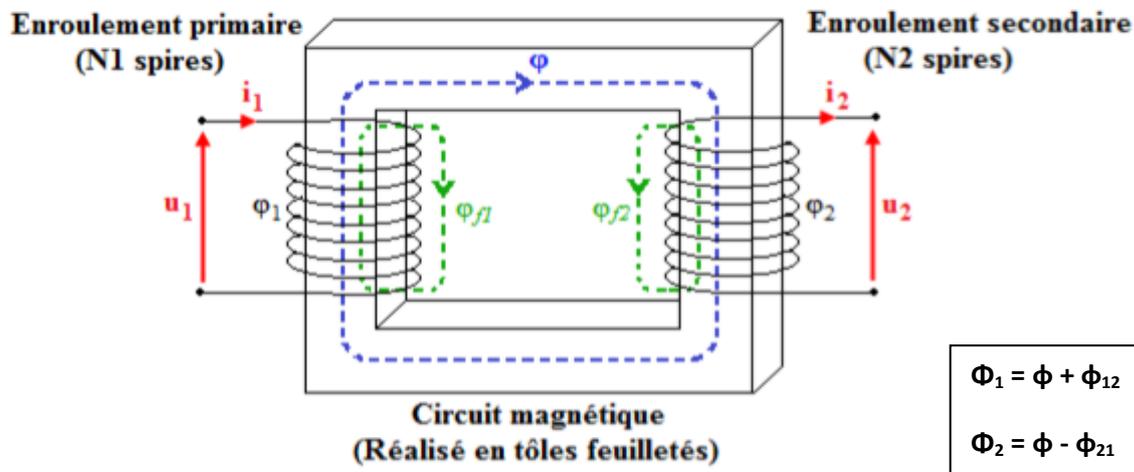


Figure -14-

$$\begin{cases} U_1 = R_1 \cdot I_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi_1}{dt} \\ U_2 = -R_2 \cdot I_2 + N_2 \cdot \frac{d\phi_2}{dt} \end{cases} \quad \text{et} \quad N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = \mathcal{R} \cdot \phi$$

par définition $L = \frac{N \cdot \phi}{I} \Rightarrow \begin{cases} N_1 \cdot \phi_{12} = L_1 \cdot I_1 \\ N_2 \cdot \phi_{21} = L_2 \cdot I_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L_1 = \frac{N_1 \cdot \phi_{12}}{I_1} \\ L_2 = \frac{N_2 \cdot \phi_{21}}{I_2} \end{cases}$

$$\begin{cases} U_1 = R_1 \cdot I_1 + N_1 \cdot \frac{d(\phi + \phi_{12})}{dt} \\ U_2 = -R_2 \cdot I_2 + N_2 \cdot \frac{d(\phi - \phi_{21})}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_1 = R_1 \cdot I_1 + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi_{12}}{dt} \\ U_2 = -R_2 \cdot I_2 + N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} - N_2 \cdot \frac{d\phi_{21}}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_{12} = \frac{L_1 \cdot I_1}{N_1} \\ \phi_{21} = \frac{L_2 \cdot I_2}{N_2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d\phi_{12}}{dt} = \frac{L_1}{N_1} \cdot \frac{dI_1}{dt} \\ \frac{d\phi_{21}}{dt} = \frac{L_2}{N_2} \cdot \frac{dI_2}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_1 = R_1 \cdot I_1 + L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \\ U_2 = -R_2 \cdot I_2 - L_1 \cdot \frac{dI_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \end{cases}$$

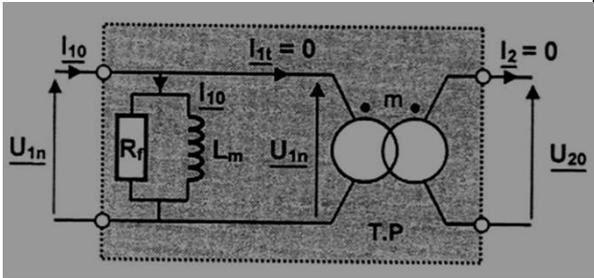
Remarque : pour un transformateur parfait les équations deviennent :

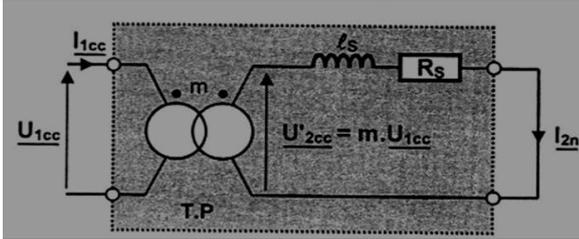
$$\begin{cases} U_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \\ U_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \end{cases} \quad \text{et} \quad N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = 0$$

II.7.6 Détermination expérimentale des éléments équivalents :

Il est possible de déterminer de façon pratique les éléments intervenant dans le schéma équivalent à partir des essais (essai à vide, essai en court circuit et essai en charge) . Ces manipulations sont mises en oeuvre pour les constructeurs de transformateurs afin de caractériser les défauts de leurs appareils.

Ces trois essais permettent de déterminer les différentes pertes du transformateur et sont rendement. Cette technique appelé la méthode des pertes séparées.

Types d'essai	Démonstration	Remarques
<p>Essai à vide</p>	<p>Le primaire est alimenté sous la tension nominale $U_{10} = U_{1n}$. On trouve parfois l'indice «v » ou lieu de l'indice « 0 ».</p> <p>Le secondaire est un circuit ouvert ($I_2 = 0$)</p> <p>Transformateur à vide \Leftrightarrow bobine à noyau de fer.</p> <p>Mesures : U_{1n} ou U_{10}, I_{10}, P_{20} et U_{20}</p>  <p>On détermine : R_f, L_m, m</p> $R_f = \frac{U_{1n}^2}{P_{10}}, \quad X_m = L_m \omega = \frac{U_{1n}^2}{Q_{10}}, \quad m = \frac{U_{20}}{U_{1n}}$ <p>avec : $Q_{10} = \sqrt{(U_{1n} \cdot I_{10})^2 - P_{10}^2}$</p>	<p>Bilan des puissances : (pertes fer)</p> <p>$P_{10} = P_{J10} + P_{fer}$.</p> <p>Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules au primaire.</p> <p><u>Remarque :</u> l'indice 0 (zéro) indique qu'il s'agit de valeurs à vide.</p> <p>A vide I_{10} est très faible. Par conséquent $P_{J10} \ll P_{10}$.</p> <p>Enfinement : essai à vide</p> <p>$P_{10} = P_{fer}$</p> <p>Complément : les pertes fer dépendent essentiellement du champ magnétique donc de la tension U_1 et de la fréquence f. Comme ces deux grandeurs restent les mêmes à vide ou en charge les pertes fer mesurées à vide sont les mêmes que celles en charge. Il faut donc naturellement faire cet essai à la tension nominale.</p>
	<p>Le primaire est alimenté sous la tension réduite U_{1cc} (induction dans le fer faible \Rightarrow on peut négliger la branche de magnétisation (R_f, L_m)).</p> <p>Le secondaire est on court-circuit et</p>	<p>Le circuit secondaire est en court-circuit : $U_2 = 0 \Rightarrow P_2 = 0$</p> <p>Bilan des puissances :</p>

<p>Essai en court circuit</p>	<p>parcouru par le courant nominale I_{2n} $S_n = U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{2n} \cdot I_{2n}$ Mesures : U_{1cc}, I_{1cc}, P_{1cc} et I_{2n}</p>  <p>On détermine : R_s, L_s $R_S = \frac{P_{1cc}}{I_{2n}^2}, X_S = l_s w = \frac{Q_{1cc}}{I_{2n}^2}, I_{1cc} = m \cdot I_{2n}$ avec: $Q_{1cc} = \sqrt{(U_{1cc} \cdot I_{1cc})^2 - P_{1cc}^2}$</p>	<p>(pertes joule ou pertes cuivres) $P_{1cc} = P_{J1cc} + P_{J2cc} + P_{fer}$.</p> <p>Toute l'énergie absorbée au primaire est utilisée pour compenser les pertes fer et les pertes joules.</p> <p><u>Remarque</u> : l'indice cc indique qu'il s'agit de valeurs mesurées en court-circuit.</p> <p>En court-circuit, pour obtenir I_n, il faut travailler à très faible tension U_{1cc}. Par conséquent P_{fer} est très faible.</p> <p>Finalement : essai en court-circuit $P_{1cc} = P_j = R_s \cdot I_{2n}^2$</p>
<p>Essai en charge</p>	<p>Cet essai nous permet de déterminer le rendement du transformateur</p> <p>Le rendement :</p> $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_{joules}}$ $\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \phi_2}{U_2 I_2 \cos \phi_2 + R_s I_2^2 + P_{fer}}$ <p>Essai à vide } $P_{fer} = P_{10}$ et $R_s I_2^2 = P_{1cc}$ { Essai en CC</p>	<p>On branche une charge au secondaire et il faut la choisir de tels sorts de travailler dans les conditions nominales de tension et de courant.</p> <p>On mesure P_1.</p>

II.7.7 Bilan des puissances :

D'après les trois essais on peut établir le bilan des puissances suivant :

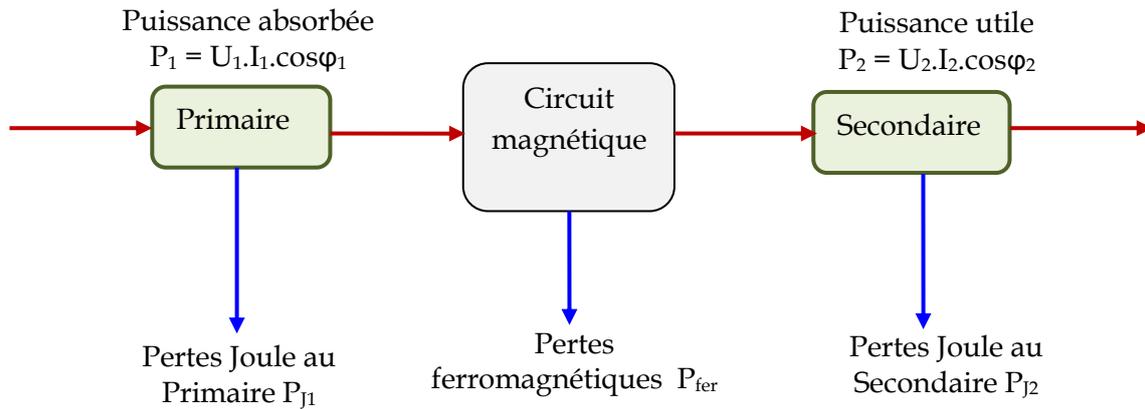


Figure -15-

II.7.8 Chute de tension ΔV2 :

Détermination de la tension V2 en charge :

Le schéma équivalent du transformateur en charge ramené au secondaire est le suivant :

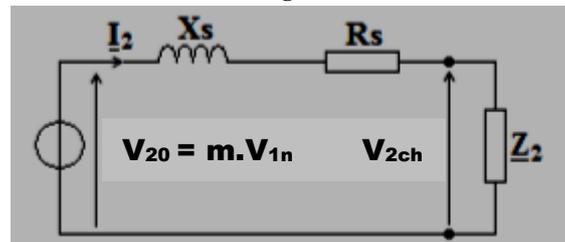


Figure -16-

On appliquant la loi des mails : $V_{20} = mV_{1n} = V_{2ch} + (R_s + jX_s)I_2$ Avec $X_s = L_s\omega$

Si on connaît V_{20} , I_2 , X_s , R_s et $\cos(\varphi_2)$ de la charge, on peut déterminer V_{2ch} par le diagramme de Kapp.

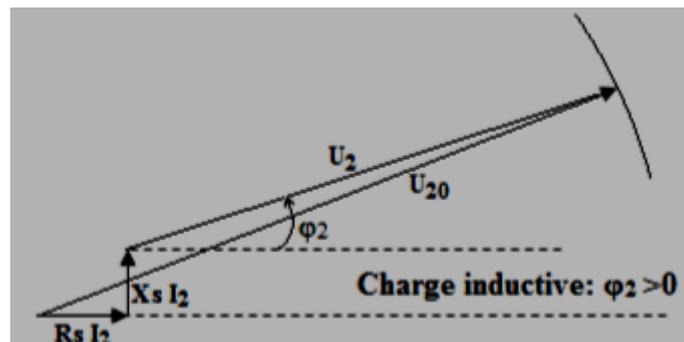


Figure -17-

Détermination de la chute de tension au secondaire ΔV2 :

La chute de tension en charge est définie par : $\Delta V_2 = V_{20} - V_{2ch}$ On donne le diagramme de Kapp :

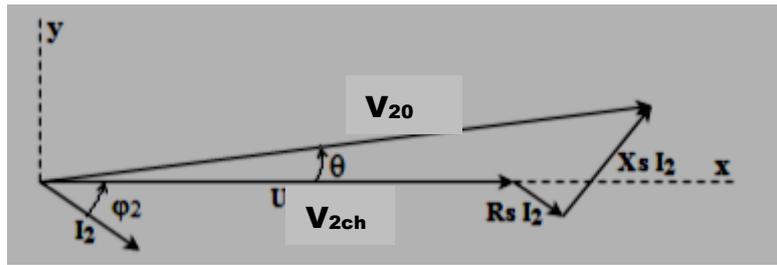


Figure -18-

Le triangle de Kapp représente les défauts de transformateur, ses dimensions sont faibles par rapport à V_{2ch} . Dans ces conditions l'angle θ est proche de 0.

Une projection sur l'axe x : $V_{20} \cos(\theta) = V_{2ch} + R_s I_2 \cos(\varphi_2) + X_s I_2 \sin(\varphi_2)$. Une 1^{ère} approximation (ordre 0) : $\cos(\theta) \approx 1$

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_{2ch} = R_s I_2 \cos(\varphi_2) + X_s I_2 \sin(\varphi_2)$$

Remarques :

- ✚ On constate que $V_{2ch} < V_{20}$. Plus I_2 augmente (charge augmente) plus V_{2ch} diminue, cette dernière observation vient de fait d'une chute de tension par la résistance du bobinage.
- ✚ La tension $m.V_{1n}$ représente la tension secondaire à vide V_{20} . Elle est colinéaire à la tension primaire V_1 .
- ✚ Le courant I_2 est le courant qui circule au secondaire, il est imposé par la charge. Ce courant est déphasé de l'angle φ par rapport à V_{2ch} , ce déphasage est également imposé par la nature de la charge

III- Transformateur Triphasé :

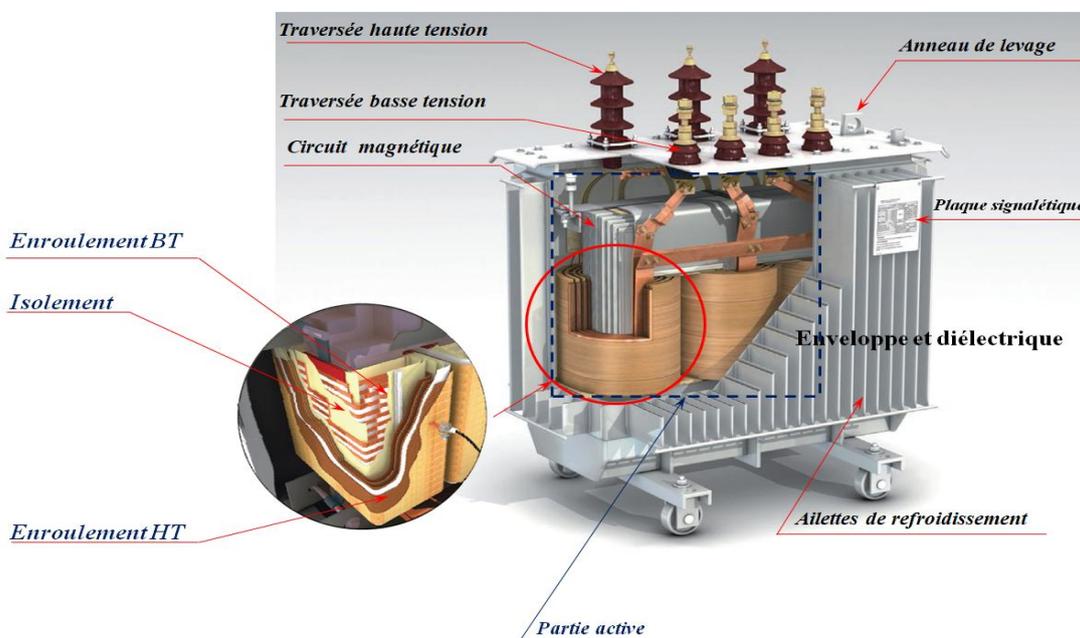


Figure -19-

III.1 Intérêt :

La production de l'énergie électrique et son transport se fait généralement en triphasé (Figure 21) 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 éleveurs 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 -20-

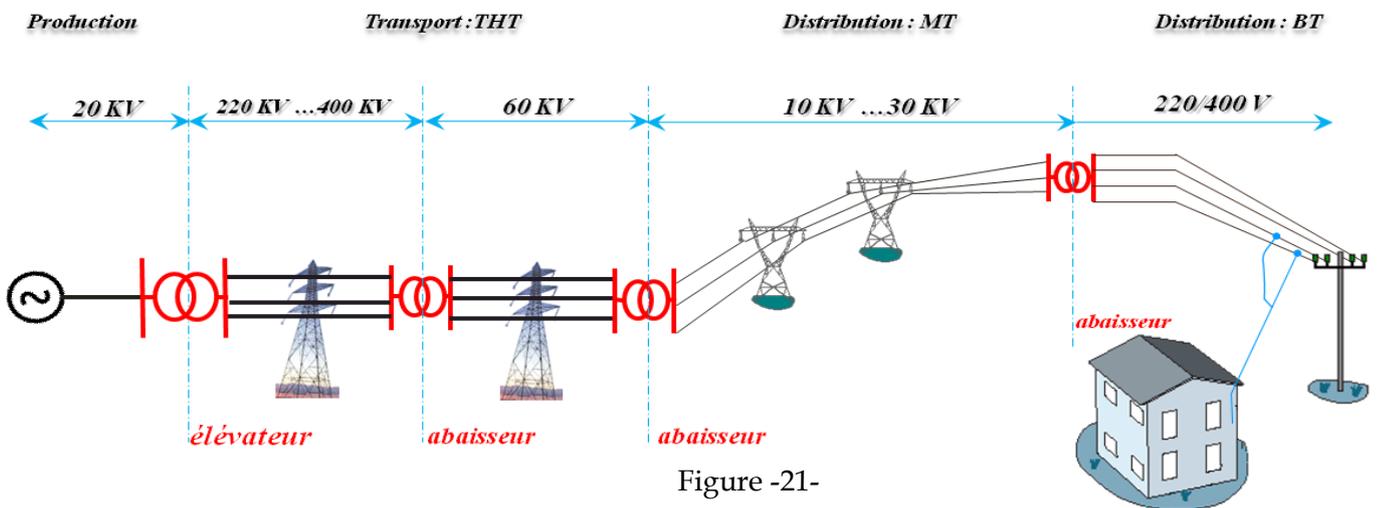


Figure -21-

III.2 Constitution et caractéristiques d'un transformateur triphasé:

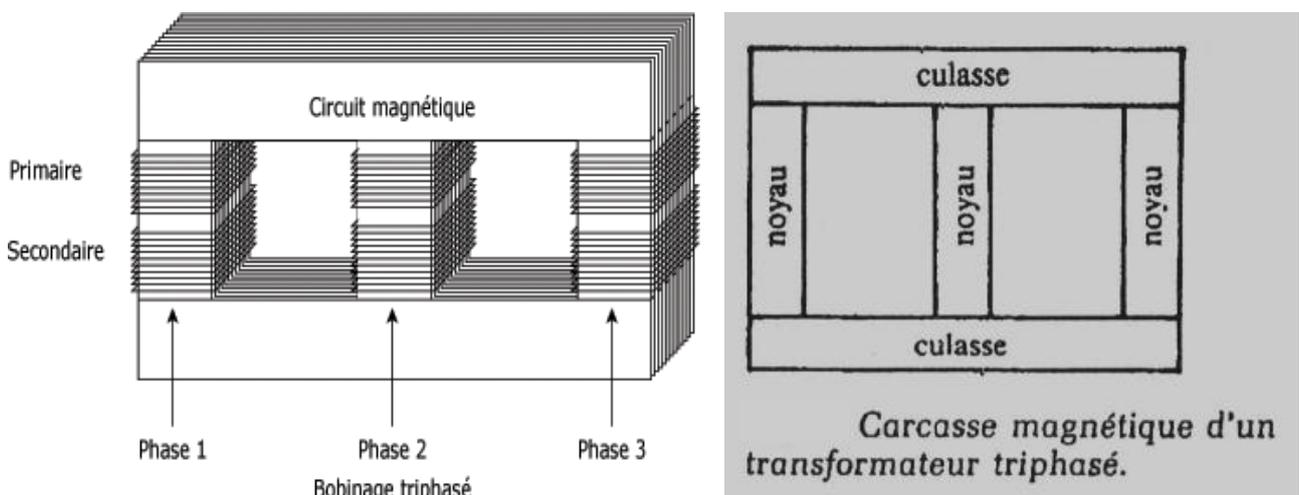


Figure -22-

Le circuit magnétique est constitué de trois colonnes (ou noyaux) en général alignées et de deux culasses qui assurent la fermeture du circuit. Il est réalisé par empilage **de tôles d'acier au silicium** (les colonnes et les culasses sont feuilletées pour diminuer les pertes d'énergie par courants de Foucault).

Chacune des colonnes **reçoit les bobinages primaires et secondaires** d'une phase comme pour les transformateurs monophasés (figure 22).

Les organes mécaniques ont un rôle plus important pour les transformateurs de forte puissance, tels que les anneaux de manutention ou le système de refroidissement.

Remarque : On convient de repérer les bornes (figure 23) comme suit :

- ✚ Enroulements primaires par des lettres majuscules(A.B.C)
- ✚ Enroulements secondaires par des lettres minuscules (a.b.c)
- ✚ Les bornes désignées par le même lettre sont dites « Homologues » [(U_A, U_a), (U_B, U_b), (U_C, U_c)].
- ✚ L'enroulement primaire (N_1 spires) et l'enroulement secondaire (N_2 spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux \Rightarrow les tensions V_A et V_a sont en phase.
- ✚

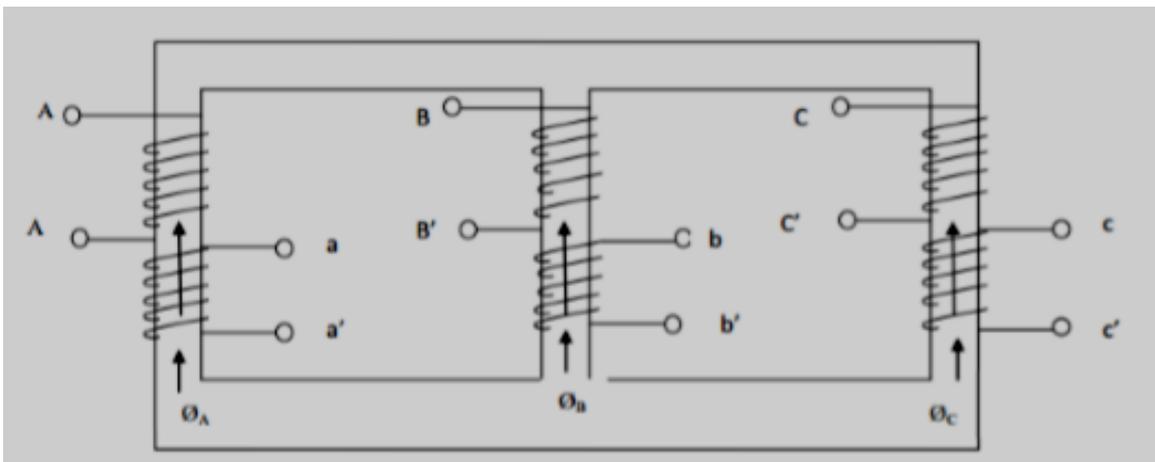


Figure -23-

III-3 Symbole :



Figure -24-

III.4 Couplage des transformateurs :

III.4.1 Définition :

Afin de caractériser d'une manière conventionnelle les couplages des transformateurs triphasés, on désigne la nature des couplages par des lettres désignant, en majuscule le primaire et en minuscule le secondaire.

Les enroulements primaires ou secondaires peuvent être couplés en étoile, en triangle ou en zig-zag,

✚ Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle(D).

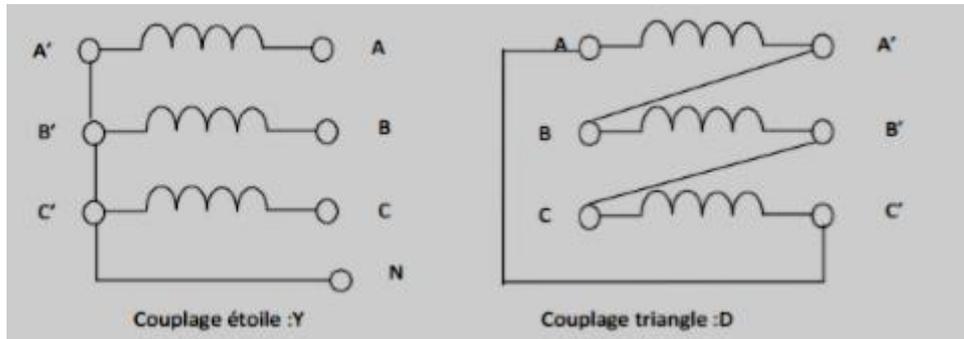


Figure -25-

✚ Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle(d) et zigzag(z).

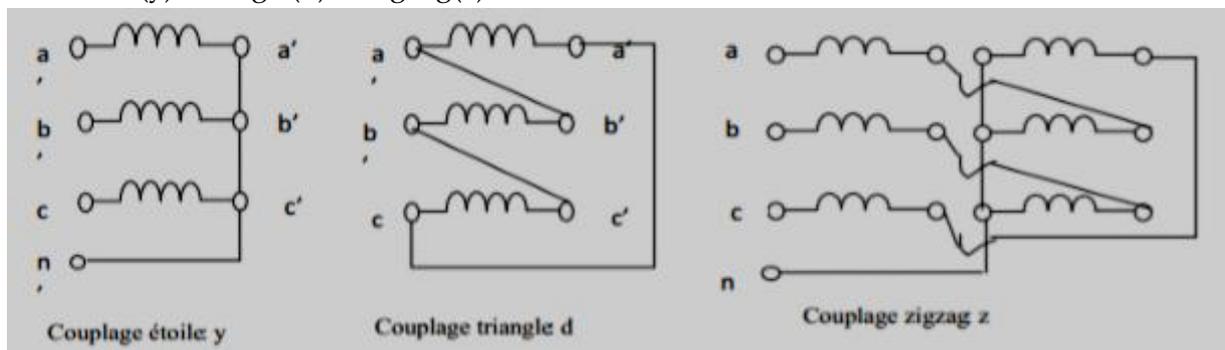


Figure -26-

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- ✚ Y-y : étoile –étoile
- ✚ Y-d : étoile-triangle
- ✚ Y-z : étoile-zigzag
- ✚ D-y : triangle- étoile
- ✚ D-d : triangle –triangle
- ✚ D-z: triangle-zigzag

Branchement	Etoile	Triangle	Zigzag
Schéma			
Symbole			
Lettre	Y ou y	D ou d	Z ou z
Remarque	Simple, robuste et adapté aux très hautes tensions	Plus adapté aux courants importants	Utilisé coté secondaire des transformateurs de distributions

III.4.2 Choix du mode couplage :

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- ✚ La charge nécessite la présence du neutre (par exemple réseau BT). Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag.
- ✚ Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre I_n est supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag.
- ✚ Côté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser).
(Chaque enroulement supporte une tension $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$)
- ✚ Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle (l'intensité par enroulement est $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$).

III.4.3 Utilités des différents couplages :

- ✚ 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 abaisseurs de tension qui assure entre réseau haute tension- moyenne tension.
- ✚ **Couplage triangle- étoile** : 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** : c'est un couplage utilisé dans les transformateurs de distribution pour compenser le déséquilibre.

III.5 Rapport de transformation :

Le rapport de transformation qui relie les grandeurs analogues du primaire et du secondaire, ne dépend plus uniquement des nombres de spires, mais aussi du mode couplage des enroulements. Dès lors qu'on parle d'un transformateur triphasé, on se doit donc d'en préciser les différents couplages.

III.5.1 Rapport de transformation par colonne m_c :

Il est défini comme étant le rapport de nombre de spires secondaire par le primaire $m_c = \frac{N_2}{N_1}$ et le

rapport des tensions simples par phase $m_c = \frac{V_a}{V_A}$

III.5.2 Rapport de transformation par phase m_{ph} :

C'est le rapport de la tension composée secondaire à vide par la tension primaire composée

$$m_{ph} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}}$$

Exemple :

$$\text{Couplage Yy} \Rightarrow m_{ph} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_a}{V_A} = \frac{N_2}{N_1} = m_c$$

$$\text{Couplage Dy} \Rightarrow m_{ph} = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_a}{\sqrt{3} \cdot V_A} = \frac{N_2}{\sqrt{3} \cdot N_1} = \frac{m_c}{\sqrt{3}}$$

III.5.3 Tableau résumant le rapport de transformation suivant le couplage:

Couplage	Yy	Dy	Yz	Yd	Dd
Rapport de transformation m_{ph}	$m_{ph} = \frac{N_2}{N_1}$	$m_{ph} = \frac{\sqrt{3} \cdot N_2}{3 \cdot N_1}$	$m_{ph} = \frac{\sqrt{3} \cdot N_2}{2 \cdot N_1}$	$m_{ph} = \sqrt{3} \cdot \frac{N_2}{N_1}$	$m_{ph} = \frac{N_2}{N_1}$

III-6 Indice horaire :

III.6.1 Définition :

L'indice horaire (Ih) est un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduisent le déphasage θ entre deux tensions primaire et secondaire homologues.

$$I_h = \frac{\theta}{\pi / 6}$$

avec $\theta = (\vec{V}_A, \vec{V}_a) = (\vec{V}_B, \vec{V}_b) = (\vec{V}_C, \vec{V}_c)$

Remarque :

On sait qu'un système de tensions primaires triphasé équilibré et direct donne naissance à un système secondaire triphasé équilibré et direct. Il est donc clair, que θ est aussi le déphasage entre les tensions composées homologues.

$$\theta = (\vec{U}_{AB}, \vec{U}_{ab}) = (\vec{U}_{BC}, \vec{U}_{bc}) = (\vec{U}_{CA}, \vec{U}_{ca})$$

On peut déterminer θ :

- ✚ Soit à partir du schéma des connexions
- ✚ Soit pratiquement par des essais

Exemple :

On varie de 0° à $330^\circ \Rightarrow$ donc n de 0 à 11

Par exemple si on pose :

V_{AN} : aiguille des minutes placée sur 12 et V_{an} : aiguille des heures placée de telle sorte qu'on a

$$\theta = (V_{AN}, V_{an}) = \pi$$



Figure 27

Remarque : Pour que l'on puisse coupler en parallèle à vide 2 transformateurs triphasés, il faut que leurs diagrammes vectoriels coïncident : même rapport de transformation, même ordre de succession des phases et même indice horaire.

III.6.2 Les couplages des transformateurs et les indices horaires

GROUPES	NOTATION UTE	NOTATION VDE	SYMBOLE IEC	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHEMA DES CONNEXIONS
G ₁ DEPHASAGE NUL (0°)	G 11	A ₁	Dd 0		
	G 12 NORMALISÉ	A ₂	Yy 0		
	G 13	A ₃	Dz 0		

G_2 DEPHASAGE 180°	G 21	B_1	$Dd\ 6$		
	G 22	B_2	$Yy\ 6$		
	G 23	B_3	$Dz\ 6$		
G_3 DEPHASAGE 330°	G 31 NORMALISE	D_1	Dy II		
	G 32	D_2	$Yd\ II$		
	G 33 NORMALISE	D_3	Yz II		

GROUPES	NOTATION UTE	NOTATION VDE	SYMBOLE IEC	DIAGRAMME VECTORIEL	SCHEMA DES CONNEXIONS
G ₄ DEPHASAGE 150°	G 41	C ₁	Dy 5		
	G 42	C ₂	Yd 5		
	G 43	C ₃	Yz 5		
DEPHASAGE 30°			Dy 1		
			Yd 1		
			Yz 1		

III.7 Etude électrique des transformateurs triphasés :

III.7.1 Schéma monophasé équivalent:

Le transformateur triphasé débitant sur une charge équilibrée est équivalent à trois transformateurs monophasés et sera donc tributaire d'un schéma équivalent monophasé conforme à celui d'un transformateur monophasé. Le schéma équivalent par phase est le suivant :

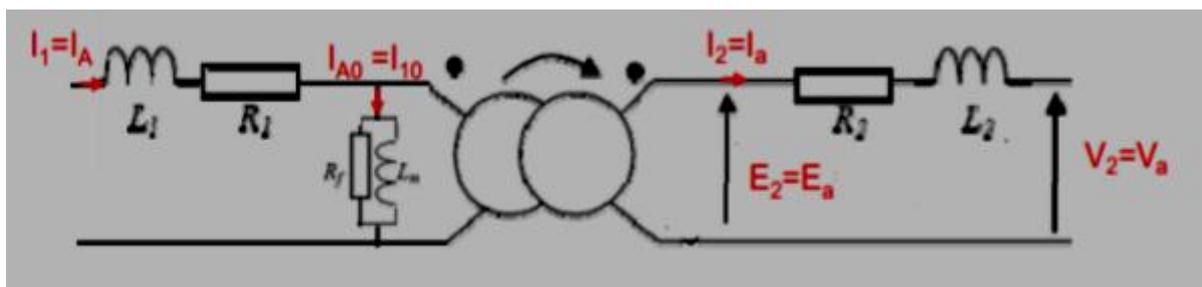


Figure -28-

Toutes analyses et hypothèses faites pour le transformateur monophasé restent valables pour le transformateur triphasé par phase.

III.7.2 Schéma équivalent ramené au secondaire:

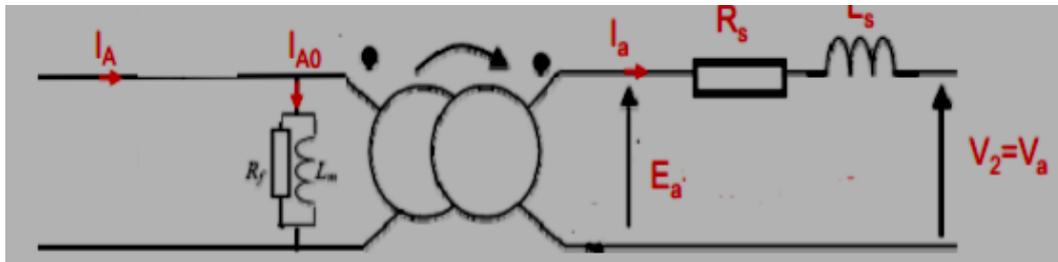


Figure -29-

III.7.3 Chute de tension:

$$\Delta V_a = R_s I_a \cos\varphi_2 + X_s I_a \sin\varphi_2 \Rightarrow \Delta U_a = \sqrt{3} \cdot \Delta V_a$$

III.7.4 Détermination des éléments du schéma électrique:

❖ Essai à vide :

$$P_{10} = P_{fcr} = \frac{3V_1^2}{R_f} \Rightarrow R_f = \frac{3V_1^2}{P_{10}} \text{ et } Q_{10} = \frac{3V_1^2}{L_m} \Rightarrow X_m = \frac{3V_1^2}{Q_{10}}$$

❖ Essai en court-circuit :

$$P_{1cc} = 3R_s I_{2cc}^2 \Rightarrow R_s = \frac{P_{1cc}}{3I_{2cc}^2} \text{ et } Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \text{ et } Z_s = m \frac{V_{1cc}}{I_{2cc}}$$

❖ Rendement :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_j} = \frac{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_{fer} + P_j} \text{ avec } P_j = 3R_s I_2^2$$

IV- Exploitation en parallèle de transformateurs de puissance :

Pour des raisons économiques, techniques et de redondance, il peut être parfois intéressant de brancher plusieurs transformateurs en parallèle plutôt qu'un seul de plus forte puissance. Dans ce cas plusieurs conditions doivent être remplies :

- ✚ La tension au primaire et au secondaire des transformateurs doivent être les mêmes; cela est évident à cause du branchement en parallèle, par conséquent les rapports de transformation des deux transformateurs doivent être les mêmes, avec une certaine tolérance.
- ✚ Pour des raisons similaires, le déphasage ou indice horaire entre les tensions primaires et secondaires des transformateurs doit être le même.

De plus les tensions de court-circuit relatives des transformateurs doivent être identiques, avec une certaine tolérance. En effet, cette valeur va déterminer la répartition de la charge entre les transformateurs. Si les valeurs diffèrent, le transformateur avec l'inductance la plus faible et la tension de court-circuit la plus faible, est traversé par un courant plus important. L'un peut ainsi être en surcharge et pas l'autre, on ne peut alors utiliser la totalité de la puissance des transformateurs.

V- Exercices :**Exercice N°1 :**

I) Soit un transformateur parfait 380/220V, 50 Hz de puissance apparente nominale $S_N=2$ kVA.

1. Calculer les courants nominaux I_{1N} , I_{2N} et le rapport de transformation m ?
2. La charge inductive est constituée d'une résistance $R=20 \Omega$ en série avec une inductance $L=50$ mH. Calculer l'impédance de la charge et son facteur de puissance et en déduire les courants du transformateur et la puissance active fournie ?

II) Un transformateur monophasé possède les caractéristiques suivantes: $S_n = 1$ KVA, $V_{1n} = 220$ V, $f = 50$ Hz :

- ❖ A vide sous tension primaire de 220 V il absorbe $P_0 = 45$ W et $V_{20} = 25,4$ V.
- ❖ En court circuit pour le courant nominal et sous la tension primaire $V_{1cc} = 10\%$ de V_{1n} on mesure $P_{1cc} = 94$ W.

- 1) la section utile du circuit magnétique est $S = 30$ cm² et l'amplitude du champ magnétique $B = 1,6$ T. Calculer le nombre de spires de chaque enroulement ?
- 2) Quelle est la valeur des courants nominaux du transformateur ainsi que le rapport de transformation ?
- 3) déterminer les éléments R_s , Z_s et X_s ?

Exercice N°2:

Un transformateur de commande et de signalisation monophasé a les caractéristiques suivantes :

$$230 \text{ V} / 24 \text{ V } 50 \text{ Hz } 630 \text{ VA } 11,2 \text{ kg}$$

- 1- Les pertes totales à charge nominale sont de 54,8 W.

Calculer le rendement nominal du transformateur pour : $\cos \varphi_2 = 1$ et $\cos \varphi_2 = 0,3$?

- 2- Calculer le courant nominal au secondaire I_{2n} ?
- 3- Les pertes à vide (pertes fer) sont de 32,4 W. 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 $\cos \varphi_2 = 0,6$ (inductif) est de 3,5 % de la tension nominale ($U_{2n} = 24$ V). En déduire X_S , la réactance de fuite ramenée au secondaire ?
- 5- Un court-circuit a lieu à 15 mètres du transformateur. Le câble de ligne en cuivre a une section de 1,5 mm².
 - 5-1- Calculer sa résistance totale R sachant que la résistivité du cuivre est : $\rho = 0,027 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.
 - 5-2- Calculer le courant de court-circuit I_{2cc} . Faire l'application numérique (on pourra prendre $R_S = 30 \text{ m}\Omega$ et $X_S = 15 \text{ m}\Omega$).

Exercice N°3: (ex1 de l'examen ETTF2 2022/2023)

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné :

- ❖ A vide : $U_1 = 220$ V, 50 Hz (tension nominale primaire) ; $U_{20} = 44$ V ; $P_{10} = 80$ W ; $I_{10} = 1$ A.
- ❖ En court-circuit : $U_{1cc} = 40$ V ; $P_{1cc} = 250$ W ; $I_{2cc} = 100$ A (courant nominal secondaire).
- ❖ En courant continu au primaire : $I_1 = 10$ A ; $U_1 = 5$ 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 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 . 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). 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. Représenter le schéma équivalent du transformateur avec l'hypothèse de Kapp. En déduire les valeurs de R_s , Z_s et X_s .
- 3) Le transformateur, alimenté au primaire sous sa tension nominale, débite 100 A au secondaire avec un facteur de puissance égales à 0,9 (charge inductive). Déterminer la tension secondaire du transformateur. En déduire la puissance délivrée au secondaire. Déterminer: La puissance absorbée au primaire (au préalable calculer les pertes globales). Le rendement et le facteur de puissance au primaire.

Exercice N°4: (ex1 de l'examen ETTF2 2023/2024)

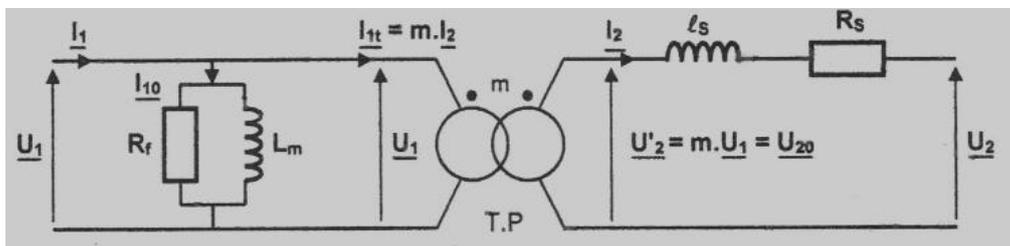


Figure 1

Pour un transformateur monophasé de 2,5 kVA à tension primaire nominale $U_{1n} = 220V$, $f = 60$ Hz, nous avons déterminé les éléments du modèle électrique équivalent simplifié (figure 1). A partir des essais standards : $N_1 = 520$ spires, $N_2 = 104$ spires, $R_f = 605\Omega$, $L_m = 751,8 \cdot 10^{-3}$ H, $R_s = 25 \cdot 10^{-3} \Omega$, $L_s = 241,9 \cdot 10^{-6}$ H.

- 1) Durant l'essai à vide à tension nominale. Déterminer : le rapport de transformation, la tension au secondaire U_{20} , les pertes fer, le courant à vide I_{10} , le facteur de puissance à vide $\cos\varphi_0$.
- 2) Déterminer les courants nominaux au primaire I_{1N} et au secondaire I_{2N} .
- 3) Durant l'essai à secondaire court-circuité et sachant que le courant au secondaire égale au courant nominale ($I_{2CC} = I_{2N}$). Déterminer : la tension au primaire U_{1CC} , les pertes Joule.
- 4) Le transformateur alimente à courant nominale une charge de facteur de puissance $\cos\varphi_2 = 0,6$ et constituée d'une résistance R_{ch} en série avec une inductance L_{ch} . Calculer : la chute de tension ΔU , la tension au borne de la charge U_2 , la puissance utile P_2 , la puissance absorbé P_1 , le rendement, les valeurs de R_{ch} et L_{ch} .

Exercice N°5:

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné les résultats suivants :

- ❖ Essai à vide sous tension primaire nominale : $U_{1n} = 2,20$ kV ; $f = 50$ Hz ; Valeur efficace de la tension mesuré au primaire: $U_{20} = 230$ V ; Puissance active mesurée au primaire : $P_{10} = 700$ W ; $I_{10} = 1,5$ A
 - ❖ Essai en court-circuit sous tension primaire réduite : $U_{1cc} = 130$ V ; $I_{2cc} = 200$ A et $P_{1cc} = 1,50$ kW.
- 1) Calculer le rapport de transformation m ?
 - 2) Calculer le facteur de puissance du transformateur lors de l'essai à vide ?
 - 3) On note I_{1m} la valeur efficace de la composante réactive de l'intensité I_{10} . Calculer I_{1m} (appelé parfois courant magnétisant) ?

- 4) On appelle R_s la résistance des enroulements ramenés au secondaire et X_s la réactance ramené au secondaire. ?
 - ❖ Pourquoi cet essai est-il réalisé sous tension primaire réduite ?
 - ❖ Que représente la puissance active P_{1cc} lors de cet essai ?
 - ❖ Calculer le module de l'impédance Z_s et on déduire X_s ?
- 5) Le secondaire alimente maintenant une charge inductive de facteur de puissance 0,8. $U_{1n} = 2,2$ kV. On relève $I_{2n} = 200$ A
 - ❖ Calculer une valeur approchée de U_2 ?
 - ❖ En déduire la puissance active fournie à la charge. ?
 - ❖ Quel est la valeur des pertes dans le fer P_f ? ... des pertes Joules P_j ? et calculer la puissance active P_1 . Calculer le rendement du transformateur ?

Exercice N°6:

Un transformateur triphasé a une puissance apparente nominale $S_n = 100$ KVA, une tension primaire nominale de 15KV (entre phases) et une fréquence de 50 Hz. Son circuit magnétique feuilleté dans la masse et de 320 kg est constitué de tôles de qualité 1,2 w/kg (pour une induction maximale $B_{max} = 1$ T) la section du noyau est de 380 cm² .Pour ce transformateur on a réalisé les essais suivants :

- ❖ Essai à vide : sous tension primaire nominale, la tension secondaire entre phases est égale à 231 V.
 - ❖ Essai en court circuit : sous tension primaire de 600V entre phases , la puissance consommée est égale à 1750W et le courant secondaire est égale à 250A.
- 1) Calculer le nombre de spires N_1 de chaque enroulement primaire pour que l'induction maximale dans chaque noyau soit $B_{max} = 1,3$ T lorsque le primaire est couplé en étoile et Calculer les pertes ferromagnétiques totales du transformateur pour cette induction ?
 - 2) Calculer le rapport de transformation ainsi que les éléments R_s , Z_s et X_s ramenée au secondaire l'ors de l'essai C.C?
 - 3) Le transformateur alimente une charge inductive de facteur de puissance 0,6 , telle que le transformateur travaille à sa puissance apparente nominale . Déterminer la tension secondaire entre phase et donner la valeur du rendement pour ce fonctionnement ?

Exercice N°7:

La plaque signalétique d'un transformateur triphasé donne les informations suivantes :

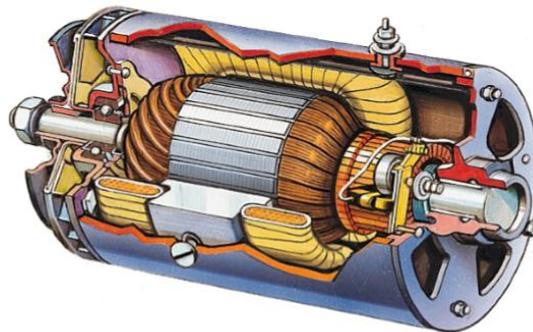
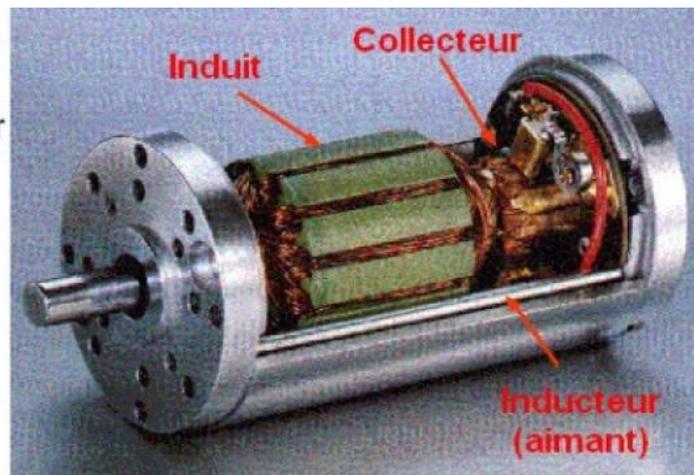
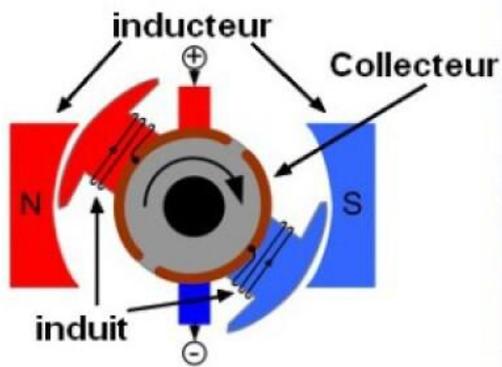
$$23 \text{ KV} / 380\text{V} , S_n = 50 \text{ KVA} , \text{couplage : Dy}$$

Les essais effectués par le constructeur on donné les résultats suivants :

- ❖ Essai à vide : sous tension primaire nominale $U_{1n} = 23$ kV , tension secondaire $V_{20} = 227$ V, puissances consommées: $P_0 = 195$ W , $Q_0 = 2$ kVAR
 - ❖ Essai en court circuit : $U_{1cc} = 872$ V , $P_{1cc} = 725$ W
- 1) Déterminer le rapport de transformation du transformateur ?
 - 2) Si le nombre de spires par enroulement au primaire est de 5066, quel est le nombre de spires par enroulement secondaire ?
 - 3) Calculer les éléments R_0 , L_0 , R_s et X_s du schéma équivalent par phase du transformateur ?
 - 4) Le transformateur alimente pour le courant secondaire nominal une charge de $\cos \varphi = 0,8$. Calculer la chute de tension en charge et le rendement du transformateur pour les conditions précédentes ?

CHAPITRE II

LES MACHINES A COURANT CONTINU



I. Introduction sur les machines électriques :

Une **machine électrique** est un dispositif électromécanique fondé sur l'électromagnétisme permettant la conversion d'énergie électrique par exemple en travail ou énergie mécanique. Ce processus est réversible et peut servir à produire de l'électricité :

- ✚ Les machines électriques produisant de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique sont communément appelées des génératrices, dynamos ou alternateurs suivant la technologie utilisée.
- ✚ Les machines électriques produisant une énergie mécanique à partir d'une énergie électrique sont communément appelées des moteurs.

Cependant, toutes ces machines électriques étant réversibles et susceptibles de se comporter soit en « moteur » soit en « générateur », la distinction moteur/générateur se fait « communément » par rapport à l'usage final de la machine.

Les moteurs rotatifs produisent une énergie correspondant au produit d'un couple par un déplacement angulaire (rotation) tandis que les moteurs linéaires produisent une énergie correspondant au produit d'une force par un déplacement linéaire.

Les transformateurs sont aussi classifiés comme des machines électriques. Ils permettent 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.

I.1 Historique

- ✚ En 1821 après la découverte du phénomène du lien entre électricité et magnétisme, l'électromagnétisme, par le chimiste danois Ørsted, le théorème d'Ampère et la loi de Biot et Savart, le physicien anglais Michael Faraday construit deux appareils pour produire ce qu'il appela une « rotation électromagnétique » : le mouvement circulaire continu d'une force magnétique autour d'un fil, en fait la démonstration du premier moteur électrique.
- ✚ En 1822, Peter Barlow construit ce qui peut être considéré comme le premier moteur électrique de l'histoire : la « roue de Barlow » qui est un simple disque métallique découpé en étoile et dont les extrémités plongent dans un godet contenant du mercure qui assure le passage du courant. Elle ne produit cependant qu'une force juste capable de la faire tourner, ne lui permettant pas d'application pratique.
- ✚ Le premier moteur à courant continu fabriqué avec l'intention d'être commercialisé a été inventé par Thomas Davenport en 1834 puis breveté en 1837. Ces moteurs n'ont pas connu de développement industriel à cause du coût des batteries à l'époque.
- ✚ On doit la vérification pratique de la réversibilité des machines électriques au physicien italien Antonio Pacinotti en 1864.
- ✚ En 1869, l'inventeur belge Zénobe Gramme rend possible la réalisation des génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Il améliore les premières versions archaïques d'alternateurs (1867) et devient célèbre en retrouvant le principe de l'induit en anneau de Pacinotti. En 1871, il présentera à l'Académie des sciences de Paris la première génératrice industrielle de courant continu, que l'on appela machine de Gramme.
- ✚ En 1873, Hippolyte Fontaine, partenaire de Zénobe Gramme, réalise la première application industrielle de la transmission électrique des forces. Tout en démontrant à l'occasion de l'exposition de Vienne, la réversibilité de la machine de Gramme, il présente une expérience associant dynamo et moteur à courant continu, séparés par 2 km de fils

électriques. Avant cette expérience décisive, l'énergie mécanique des cours d'eau devait être utilisée sur place, car intransportable sur de longues distances.

- ✚ Le physicien Nikola Tesla dépose un brevet de « machine électrique-dynamo » en 1886 (publié en 1887).
- ✚ La paternité de la machine asynchrone est controversée entre trois inventeurs : en 1887, le physicien Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone (publié en 1888), puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888
- ✚ En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

I.2 Types des conversions de l'énergie électrique :

Selon le schéma de la figure1 on peut distinguer plusieurs type de conversion d'énergie

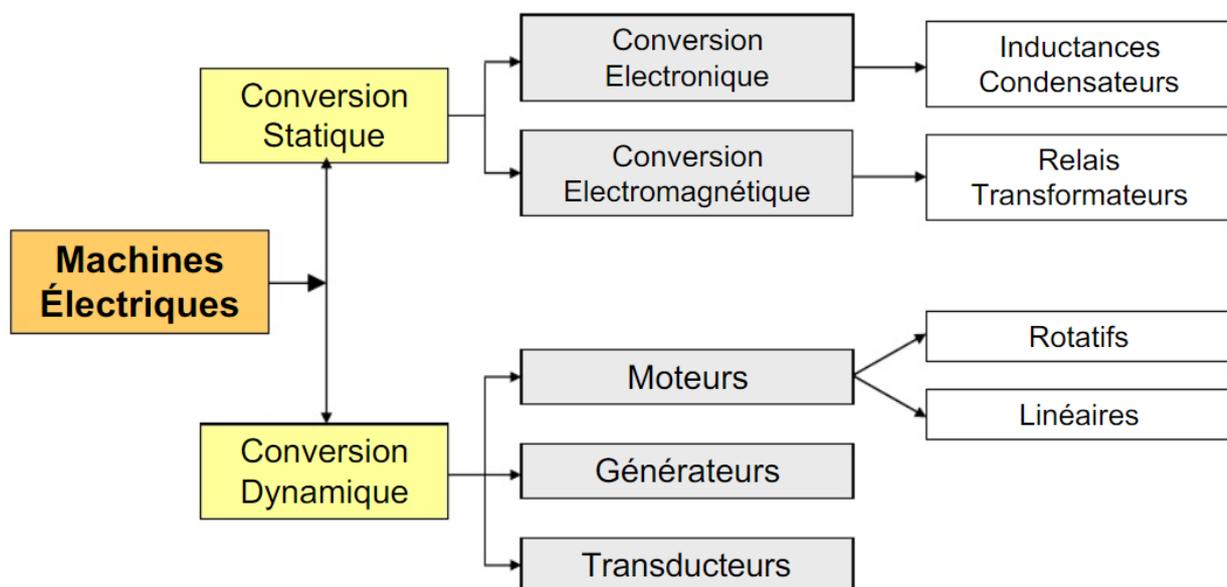


Figure 1

I.3 Classification des machines électriques :

Selon la figure 2 on peut les classées comme suit :

1) Machines à courant alternatif (CA) :

- ✚ **Machines Synchrones** : utilisées comme alternateurs (production de l'énergie électrique) ou comme compensateurs de l'énergie réactive.
- ✚ **Machines Asynchrones** : de construction simple. Ces moteurs sont les plus utilisés en industrie, mais leur réglage est complexe.

2) Machines à courant continu (CC) :

Elles offrent des performances remarquables avec des réglages simples. Cependant leur cout élevé et leur maintenance difficile limitent leur champ d'application.

3) Machines spéciales :

Ces machines sont de construction spéciale, sont essentiellement utilisées en robotique et dans les procédés d'automatisation et de régulation.

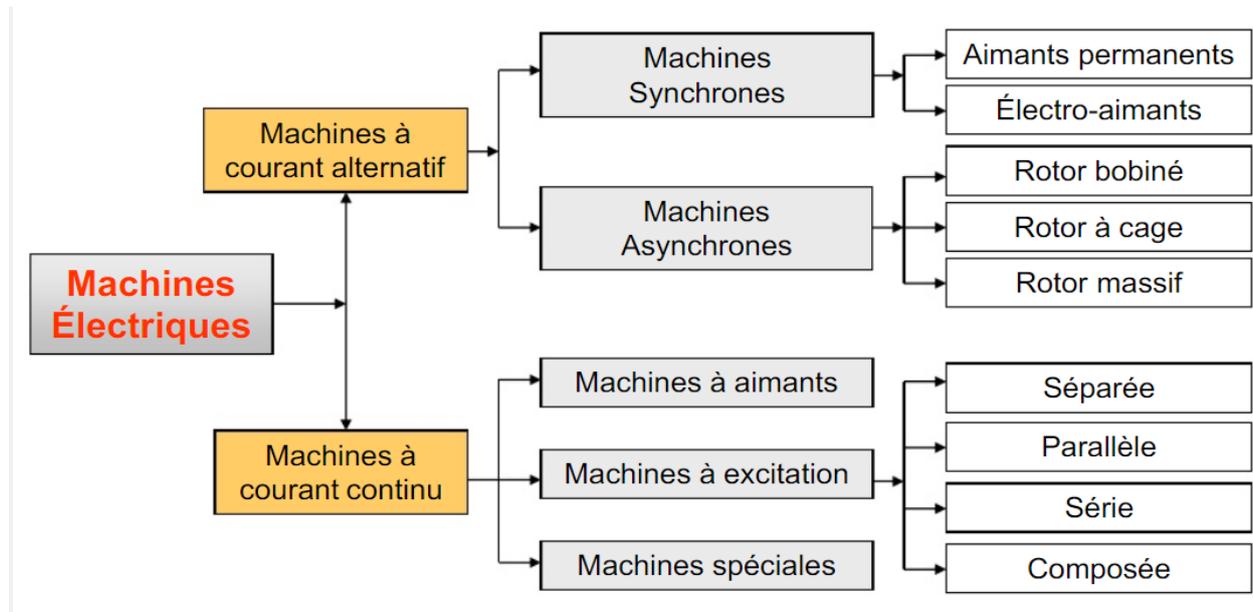


Figure 2

I.4 Constitution de base :

La construction se réalise sur deux armatures cylindriques et coaxiales, contenant des enroulements inducteur et induit :

- ✚ L'armature mobile est appelée **rotor** , elle transmet ou reçoit une puissance mécanique en présence d'un champ d'induction tournant.
- ✚ L'armature fixe est appelée **stator**, elle assure la fermeture des lignes d'induction canalisées par l'armature d'induit.

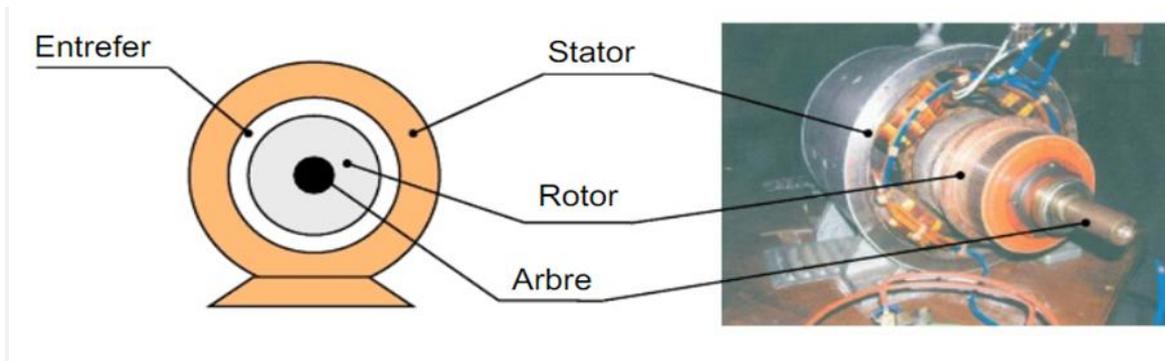


Figure 3

II. Machines à courant continu:

II.1 Introduction générale :

Les machines à courant continu ont été les premières machines électriques produites en grandes séries et utilisées de façon industrielle sur la gamme complète des puissances disponibles. Longtemps omniprésentes, dans le domaine de la traction électrique ferroviaire par exemple, elles ont été depuis les années 1990 sévèrement concurrencées par les machines à courant alternatif auxquels les alimentations électroniques confèrent des meilleures performances et une souplesse d'utilisation supérieure. Encore très utilisées aujourd'hui, elles restent très présentes sur une large gamme d'application et de puissances ne serait-ce qu'en tant que " moteur universel " en montage série, très abondant dans l'électroménager et le petit outillage.

Une machine à courant continu est une machine électrique tournante mettant en jeu des tensions et des courants continus. Elle permet une conversion électromécanique dans les deux sens, comme reporter sur la figure 4.

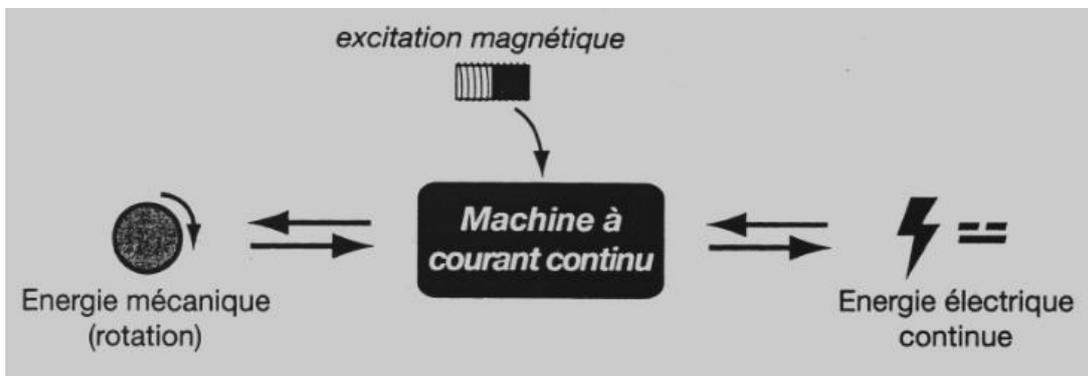


Figure 4 : Conversion électro- mécanique e la machine à courant continu

- ✚ Lorsqu'elle convertit de l'électricité continue en mouvement de rotation, la machine fonctionne en mode **moteur à courant continu**.
- ✚ Lorsqu'elle convertit un mouvement de rotation en électricité continu, la machine fonctionne en mode **génératrice de courant continu** ou dynamo.

II.2 Symboles électriques: (Figure5)



Figure 5 : symboles électrique d'une génératrice à courant continu (a) et d'un moteur à courant continu (b) , les lettres G et M signifient respectivement génératrice et moteur . Le trait horizontal sous la lettre décrit un courant continu.

II.3 Constitution:

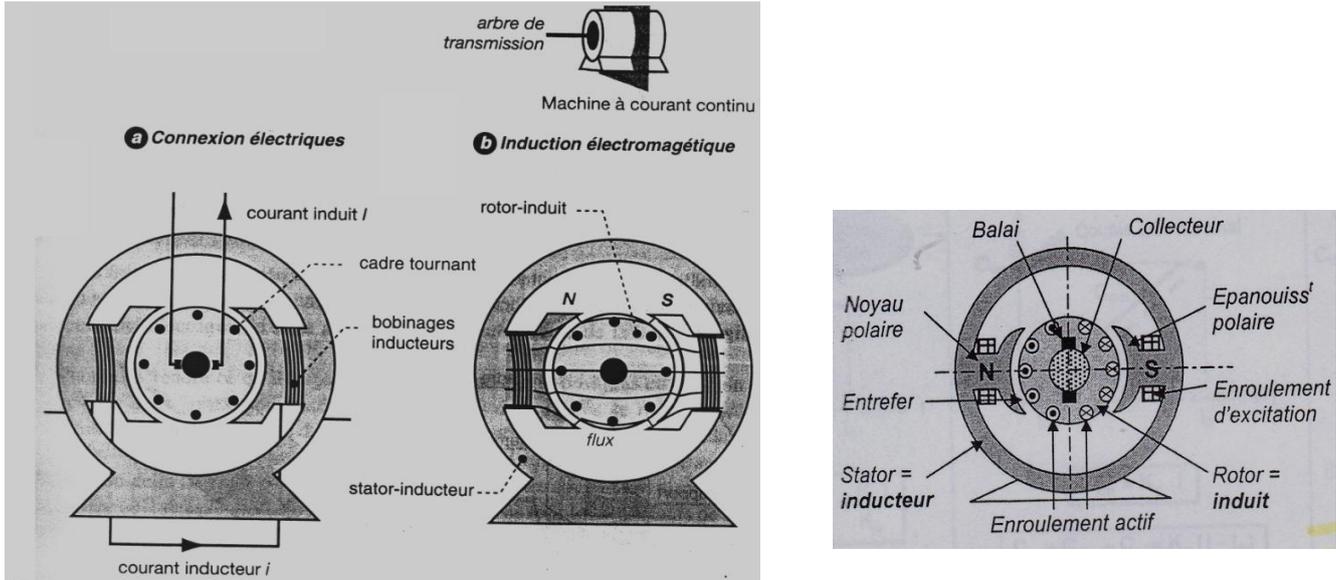


Figure 6 : Coupe d’une machine à courant continu à induction par électro-aimants.
 (a) Schéma des connexions électriques et (b) schéma du flux magnétique

Une machine à courant continu se compose de :

A) Stator (inducteur):

C'est la partie fixe de la machine, il joue le rôle de l'inducteur. C'est lui qui crée le champ magnétique continue dans lequel sont plongés les cadres tournants (Figure 7). Le stator peut être un bobinage traversé par un courant continu que l'on appelle le courant inducteur noté i .



Figure 7 : inducteur complet d’une machine à courant continu

B) Rotor (induit):

C'est la partie mobile de la machine, il joue le rôle d'induit, il constitué d'un ensemble de cadre conducteurs qui coupent le flux magnétique. Ces cadres sont réparties uniformément autour d'un support cylindrique pouvant entrer en mouvement de rotation et qui est relié à l'arbre de transmission. Le rotor - induit de la machine à courant continue tourne donc entre les pôles de l'inducteur et est traversé par le courant induit que l'on note I .



Figure 8 : induit complet d’une machine à courant continu

C) Le collecteur et les balais:

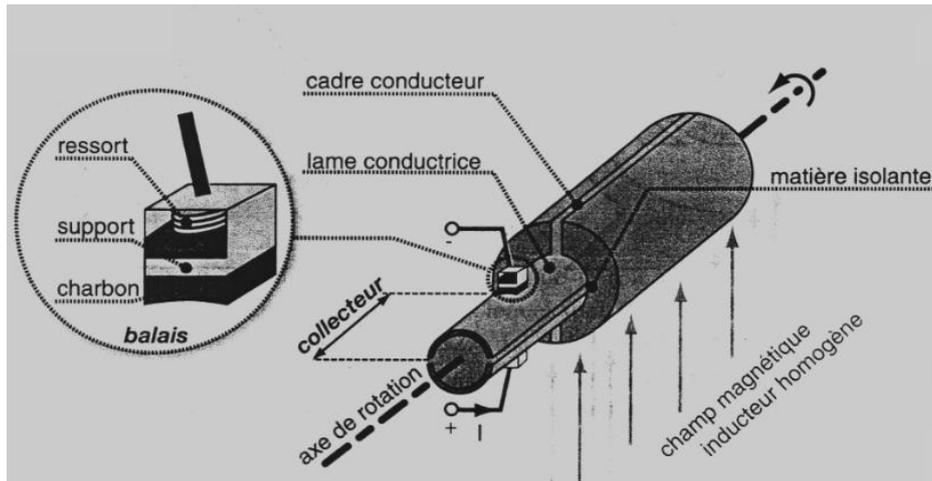


Figure 9 : Schéma de principe du collecteur et des balais d'une machine à courant continu

L'une des caractéristiques de la machine à courant continu est qu'il faut assurer un contact électrique avec le rotor afin d'y apporter ou de recueillir le courant induit. Or le rotor est en mouvement et le contact électrique ne peut donc pas être fait avec des câbles.

Afin d'assurer le contact électrique de l'induit et de permettre l'inversion de sens du courant, on utilise un collecteur sur lequel reposent des balais (figure 9)

C.1) Le collecteur: est un ensemble cylindrique de lames conductrices isolées les unes des autres deux par deux, les lames sont reliées à chaque cadre qui constitue le bobinage du rotor induit. Il suffit par conséquent d'entre en contact avec les lames du collecteur pour réaliser le contact électrique avec l'induit.

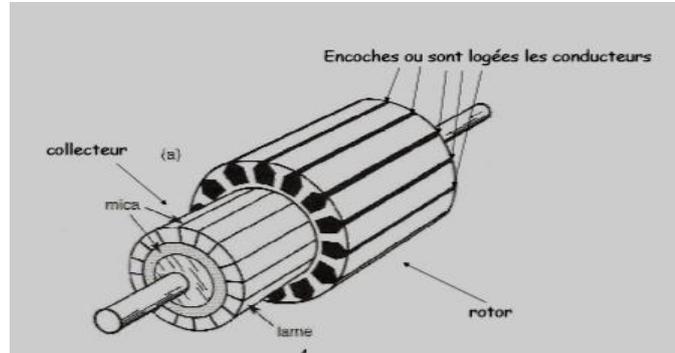


Figure 10 : collecteur d'une machine à courant continu

C.2) Les balais: ils assurent les contacts électriques au niveau du rotor en reposant sur les lames du collecteur, ils sont en carbone, parce que ce matériau a une bonne conductivité électrique tout en étant assez doux pour ne pas détériorer les lames. A cause du carbone qui le compose les balais sont aussi appelés les charbons.

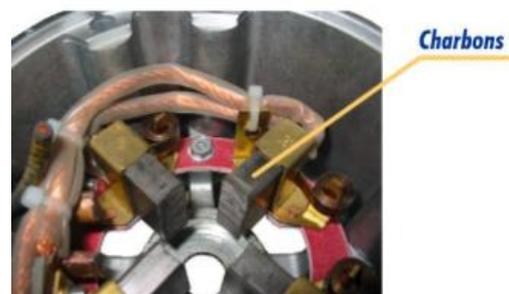


Figure 11 : les balais

Un système de ressorts permet de maintenir les charbons au plus près du collecteur et de ses lames conductrices. En effet lors de la rotation du rotor, les balais glissent sur le collecteur et les charbons passent ainsi d'une lame à l'autre.

II.4 Principe de fonctionnement de la machine à courant continu :

Tous les machines électriques sont basées sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La transformation de l'énergie s'opère à travers ce couplage magnétique ou interaction magnétique. De ce principe il découle que tout machine à courant continu est constituée de deux circuits électriques: l'inducteur aussi appelé circuit d'excitation et l'induit que l'on appelle aussi l'armature. Le bobinage inducteur c'est celui qui alimenté en courant continu, permet la création du flux dans la machine. On appelle courant inducteur le courant I_e qui le traverse. Toutes les grandeurs mécaniques ou électriques dans la machine seront liées au flux inducteur et donc au courant I_e . L'alimentation du circuit magnétique peut également être réalisée à base d'aliments permanents il n'y a dans ce cas la pas de bobinage inducteur et il faut considérer le flux dans la machine comme constant.

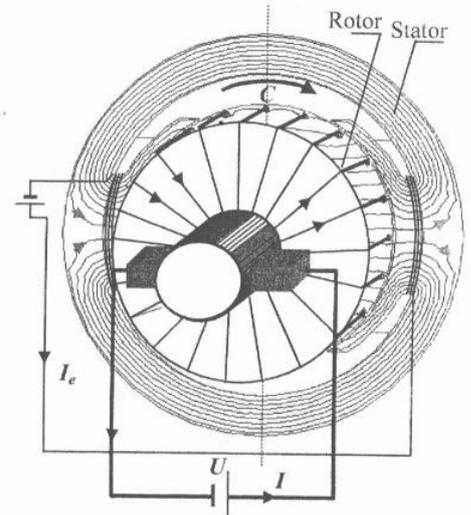


Figure 12 : schéma de principe de la M.C.C

Le bobinage induit c'est lui qui permet la circulation grâce au système (balais/ collecteur) d'un courant continu fixe et perpendiculaire au flux d'induction. Ce courant peut être imposé par une alimentation auquel cas la machine fonctionne en moteur en produisant un couple mécanique responsable de la rotation, soit être induit par la rotation forcée du rotor auquel cas la machine se comporte en génératrice.

L'induit est plongé dans le champ magnétique créé par l'inducteur.
 Par l'intermédiaire des charbons et du collecteur, un courant électrique circule dans les enroulements de l'induit.

Il se crée alors un champ magnétique dans chacune des spires de chaque enroulement et une force électromagnétique qui provoquent la rotation de l'induit autour de son axe.

Application de la règle des 3 doigts pour déterminer le sens de la force.

Courant électrique circulant dans une spire de l'enroulement induit

Champ magnétique statorique créé par les enroulements du stator ou par les aimants permanents

Force électromagnétique

II.5 Grandeurs de base et schéma électrique équivalent :

II.5.1 Grandeurs de base :

A) Force électromotrice :

Nous savons qu'une bobine en mouvement dans un champs magnétique voit apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday:

Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

avec:

$$E = \frac{P}{2\pi a} N\Phi\Omega$$

p : le nombre de paires de pôles

a : le nombre de paires de voies d'enroulement

N : le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)

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

Ω : vitesse de rotation (en rad.s⁻¹)

Finalement:

$$E = K\Phi\Omega$$

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

Si de plus la machine fonctionne à flux constants $E = K'\Omega$ avec $K' = K\Phi$

B) Couple électromagnétique :

Exemple pour une spire : les deux brins d'une spire placées dans le champ magnétique \vec{B} , subissent des forces de Laplace \vec{F}_1 et \vec{F}_2 formant un couple de force ($\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = I\vec{l} \wedge \vec{B}$).

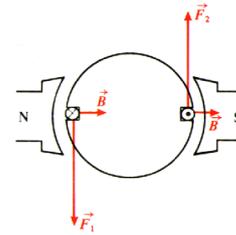


Figure 13

Pour une spire : $\Gamma = 2rF = 2rlBI = SBI = \Phi I$

Couple électromagnétique: $T_{em} = K\Phi I$ en Newtons. mètres (N.m)

K est la même constante que dans la formule de la f.é.m.: $E = K\Phi\Omega$

Si de plus la machine fonctionne à flux constant : $T_{em} = K' I$ avec $K' = K\Phi$

C) Puissance électromagnétique :

Si l'induit présente une f.é.m. E et s'il est parcouru par le courant I , il reçoit une puissance électromagnétique $P_{em} = E.I$

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

$$P_{em} = T_{em}\Omega = EI$$

P_{em} en watts

Remarque : on retrouve la relation $T_{em} = K\Phi I$

En effet $E = K\Phi\Omega$ donc $EI = K\Phi\Omega I = T_{em}\Omega$ d'où $T_{em} = K\Phi I$

D) Réversibilité :

A flux Φ constant, E ne dépend que de Ω et I ne dépend que de T_{em} .

La f.é.m. de la machine et l'intensité du courant dans l'induit sont deux grandeurs indépendantes.

On peut donc donner le signe souhaité au produit $E.I$.

La machine peut donc indifféremment fonctionner en moteur ($P_{em}>0$) ou en génératrice ($P_{em}<0$).

II.5.2 Schéma électrique équivalent :

Nous avons rapporté sur la figure 14 les schémas électriques équivalents de l'inducteur et de l'induit

- ✚ L'inducteur est un dipôle passif : c'est une résistance r que l'on appelle la résistance de l'inducteur.
- ✚ L'induit est un dipôle actif équivalent à une résistance R appelée résistance d'induit en série avec une force électromotrice E .

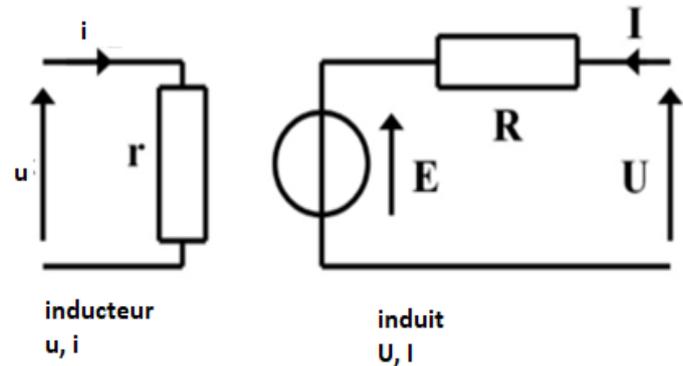


Figure 14 : schéma électrique équivalent d'une M.C.C

Le circuit induit est traversé par un courant I dont le sens dépend du mode de fonctionnement :

- 1) Lorsque I est dans le même sens que E , le dipôle E est un générateur que l'on appelle force électromotrice (f.é.m) et l'induit fournit une puissance électrique : la machine fonctionne alors en génératrice. $U = E - R.I$
- 2) Lorsque I est dans le sens opposé à E , le dipôle E est un récepteur. Comme la tension E est due à l'induction magnétique, on appelle cette grandeur force contre-électromotrice (f.c.é.m). Dans ces conditions l'induit consomme une puissance électrique : la machine fonctionne alors en moteur. $U = E + R.I$

II.6 Machine a courant continu en mode moteur :

II.6.1 Définition :

Une machine à courant continu fonctionne en mode moteur si et seulement si la tension aux borne de l'induit U est supérieur à la force contre-électromotrice induite E , de sorte que $E < U$.

II.6.2 Les différents modes d'excitation du moteur à courant continu:

Les caractéristiques mécaniques du moteur dépendent fortement du mode d'excitation

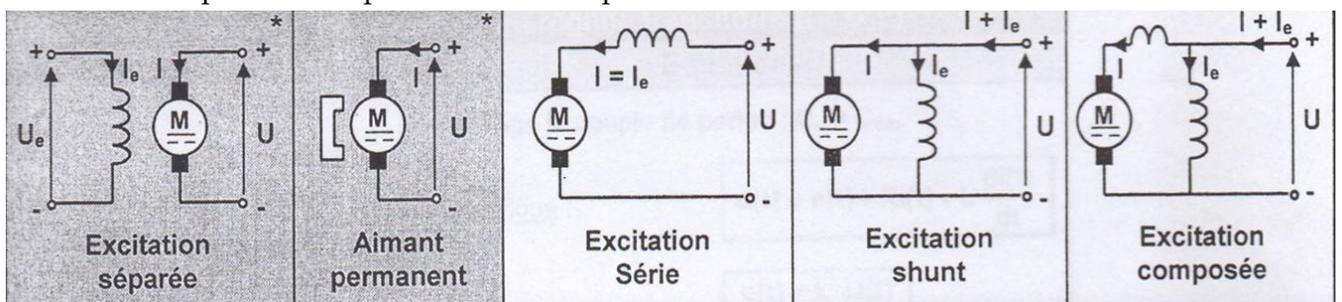
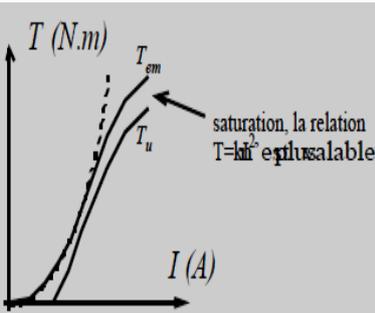
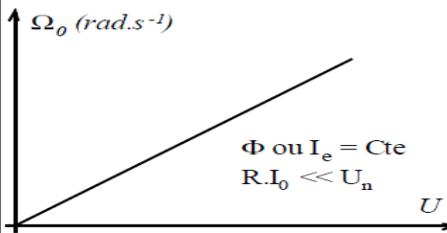


Figure 15

II.6.3 Comparaison entre les différents modes d'excitation

	Montage à excitation séparée	Montage à excitation série	Montage à excitation parallèle ou shunt				
Principe	Le terme d'excitation séparée désigne le fait que le bobinage inducteur est alimenté par une source de tension indépendante de la source de tension d'induit. Le courant inducteur i_e et le flux Φ sont ainsi indépendants des grandeurs électriques et mécaniques relative à l'induit.	Le montage série consiste à placer le bobinage inducteur en série avec le bobinage d'induit ainsi $I = i_e$. Outre le fait qu'une seule source de tension est nécessaire. Cette égalité à une grande influence sur le comportement de la machine. Le couple électromagnétique est proportionnel au carré du I. C'est cette particularité qui fait du montage série un moteur particulièrement utilisé dans la traction électrique et pour toutes les applications nécessitant un fort couple de démarrage	Le montage parallèle consiste à placer le bobinage inducteur en parallèle avec la tension d'alimentation, c'est-à-dire sous la tension U, il est possible d'insérer en série avec cet inducteur une résistance permettant de faire varier le courant i_e , mais cela n'empêche pas le fait que ce dernier reste proportionnel à U.				
Résistance d'inducteur	Elevée	Faible	Elevée				
Vitesse	Stable avec la charge et contrôler par la tension d'induit Le sens de rotation dépend : 1- du sens du flux, donc du sens du courant d'excitation i_e ; 2- du sens du courant d'induit I. Expression de la vitesse : $E = K\Phi\Omega = U - RI$ donc: $\Omega = (U - RI)/K\Phi$	Contrôler par la charge <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>$U = E + Rt I$</td> <td>$E = k\Omega I$</td> </tr> <tr> <td>$Tem = kI^2$</td> <td>$\Omega = (U - Rt I)/kI$</td> </tr> </table>	$U = E + Rt I$	$E = k\Omega I$	$Tem = kI^2$	$\Omega = (U - Rt I)/kI$	Stable avec la charge et contrôler par la tension d'induit Expression de la vitesse : $E = K\Phi\Omega = U - RI$ donc: $\Omega = (U - RI)/K\Phi$
$U = E + Rt I$	$E = k\Omega I$						
$Tem = kI^2$	$\Omega = (U - Rt I)/kI$						
Emballement	Si coupure de l'excitation	A vide	Si coupure de l'excitation				
Caractéristique	Vitesse constante	Puissance constante	Vitesse constante				
Couple	Tu est proportionnel à I	Tu est proportionnel au I ²	Tu est proportionnel à I				
Démarrage	Fort courant	Couple élevé	Fort courant				
Modification du sens de rotation	En inversant i_e ou I	Par recâblage / commande	En inversant i_e ou I				
Freinage possible	Oui	Par recâblage / commande	Oui				
Avantages	1- Ce montage permet d'atteindre par la maîtrise de U et i_e n'importe quel point de fonctionnement. 2- Les équations de la machine sont linéaires et représentent l'idéal de commande d'un actionneur électrique.	1- L'économie d'une source de tension et le fort couple de démarrage sont les avantages principaux de ce type de montage. 2- le flux inducteur et le courant d'induit peuvent changer de signe simultanément sans	1- L'économie d'une source de tension est l'avantage majeur de ce montage. 2-Il est possible d'utiliser ce montage en génératrice, celle-ci s'auto amorce à partir				

		changer le sens des forces de Laplace et le sens du couple.	du champ magnétique rémanent dans le matériau du circuit magnétique.
Inconvénients	1- Il nécessite deux sources de tensions indépendantes, ou tout système permettant de rendre le courant i_e indépendant de la tension U.	1- le bobinage inducteur doit supporter la valeur nominale du courant induit. l'enroulement correspondant est donc constitué de gros fil, assez volumineux et la source des pertes non négligeable. Ce bobinage doit donc présenter une faible résistance.	1- Les formules mises en évidence montrent que le moteur shunt a tendance à consommer un courant très fort sous faible tension. Il est donc important de prévoir un démarrage sous tension réduite. 2-Le bobinage inducteur doit pouvoir supporter la pleine tension d'induit et donc présenter une résistance assez grande.
Caractéristiques du moteur	<p>Fonctionnement à vide: A vide la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes. La puissance utile est nulle. $I_0 \ll I_n \Rightarrow RI_0 \ll U$ et finalement $\Omega_0 = (U - RI_0)/K\Phi \approx U/K\Phi$ La vitesse à vide se règle en fonction de la tension d'alimentation ou du flux inducteur Φ.</p> <p>Remarque : à vide, il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation ie lorsque l'induit est sous tension, car le moteur peut s'emballer. En effet si $i_e \rightarrow 0$ alors $\Phi \rightarrow 0$ et $\Omega \rightarrow \infty$. 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.</p> <p>Fonctionnement à flux constant $\Omega = (U - RI_0)/K\Phi \approx U/K\Phi = K'.U$ La caractéristique passe approximativement par zéro.</p>	<p>Fonctionnement à vide La charge impose le courant : Si T_{em} tend vers 0, I tend aussi vers 0 et Ω tend vers l'infini (si l'on ne tient pas compte des frottements).</p> $I = \sqrt{\frac{T_{em}}{k}}$ <p>Caractéristique T=f(I) $T_{em} = k.I^2$ $T_u = T_{em} - T_p$</p>  <p>Caractéristique mécanique T=f(Ω): a. Fonctionnement sous tension nominale: Si nous négligeons les différentes pertes : $E = U ; I = U/k.\Omega$ et $T_u = kI^2 = U^2/k\Omega^2$ Finalement : $T_u.\Omega^2 = Cte$</p>	



Fonctionnement en charge

Exprimons la vitesse de rotation en fonction de la tension d'alimentation :

$$\Omega = E/K\Phi \Rightarrow \Omega = (U - RI)/K\Phi = K'(U - RI) \text{ avec : } K' = 1/K\Phi = \text{cte}$$

La vitesse dépend de :

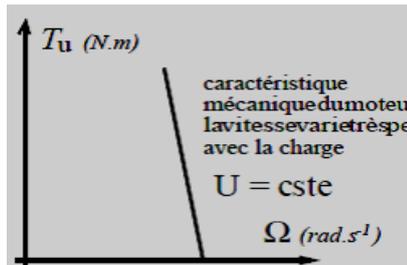
- la tension d'alimentation U ;
- l'intensité du courant I imposée par le moment du couple résistant.

U reste tout de même grand devant RI . En conséquence la vitesse de rotation est essentiellement fixée par la tension d'alimentation U et varie très peu en fonction du courant, c'est-à-dire de la charge.

Exprimons le courant en fonction du couple utile :

$$I = T_{em}/K\Phi = (T_u - T_p)/K\Phi$$

Le couple de perte T_p reste constant et faible devant le couple de charge T_r .



Mode de fonctionnement usuel:

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

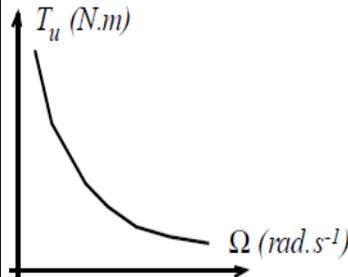
- 1- mise en vitesse progressive avec suppression de la surintensité ;
- 2- vitesse largement variable.

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

Point de fonctionnement

Une charge opposée au moteur un

Sous tension nominale, le moteur à excitation en série ne peut pas fonctionner à faible charge car la vitesse dépasserait largement la limite admise

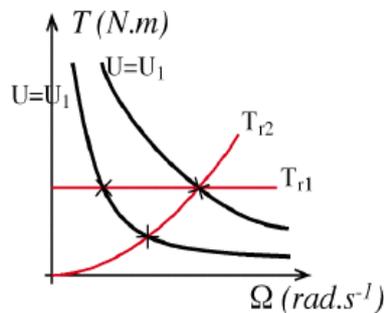


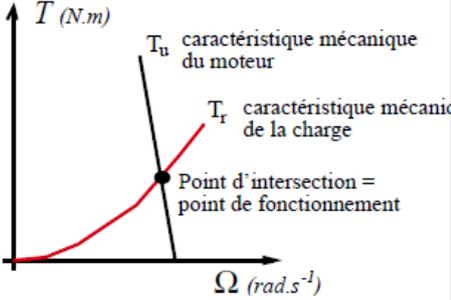
b-Fonctionnement sous tension variable:

La diminution de la tension d'alimentation permet d'obtenir un déplacement de la caractéristique mécanique.

T_3 et T_{r2} sont les caractéristiques de deux charges différentes.

Le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des deux caractéristiques T_u et T_r



<p>Caractéristiques du moteur</p>	<p>couple résistant T_r. Pour que le moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile T_u de telle sorte que $T_u \geq T_r$</p> <p>Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.</p> 		
<p>Démarrage</p>	<p>Surintensité de démarrage (exemple) Soient : T_{dc} le couple de démarrage imposé par la charge (N.m); T_d : le couple de démarrage du moteur (N.m); I_d : le courant de démarrage (A); $U_n = 240$ V la tension d'alimentation nominale de l'induit $I_n = 20$ A le courant nominal dans l'induit ; $R = 1 \Omega$ la résistance de l'induit. Au démarrage : $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0$ et donc $I_d = (U_n - E)/R = U_n/R = 240 A \gg I_n$ Dès que le moteur commence à tourner, E augmente et I_d diminue jusqu'à I_n. Au démarrage en charge : Il faut que $T_d > T_{dc}$ il faut donc un courant de décollage $I_d \approx T_d/K\Phi > T_{dc}/K\Phi$ On constate qu'étant donné la pointe de courant de démarrage, <i>le moteur à excitation indépendante peut démarrer en charge.</i> Conséquences La pointe de courant de 240 A va provoquer la détérioration de l'induit par échauffement excessif par effet joule. <i>Il faut limiter le courant de démarrage : en générale on accepte $I_d = 1,5 I_n$</i></p>	<p>Tension de démarrage: Comme pour le moteur à excitation indépendante, il est préférable de démarrer sous tension d'induit réduite. En effet au démarrage: au démarrage : $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0 \Rightarrow I = U/R_t$ Couple de démarrage: Le moteur série peut démarrer en charge. Supposons que l'on limite le courant de démarrage I_d à 1,5 fois le courant nominal I_n. Excitation indépendante: $T_d = K \cdot \Phi \cdot I_d = 1,5 \cdot K \cdot \Phi \cdot I_n = 1,5 \cdot T_n$ Excitation série: $T_d = k I_d^2 = k(1,5 I_n)^2 = 2,25 \cdot k \cdot I_n^2 = 2,25 \cdot T_n$ Pour les mêmes conditions, le moteur série possède un meilleur couple de démarrage que le moteur à excitation indépendante</p>	

Exemples d'application	Machines outils	Traction, levage, électroménager, (moteur universel)	Machines outils

II.6. 4 Vitesse du moteur:

Quel que soit le mode d'excitation lorsque la machine fonctionne en moteur, le courant induit est opposé à la force contre-électromotrice E de sorte que l'on peut écrire la relation électrique: $U = E + RI$

Comme $E = K\Phi\Omega$ alors: $\Omega = \frac{U - RI}{K\Phi}$

II.7 Bilan des puissances et des pertes dans un moteur à courant continu:

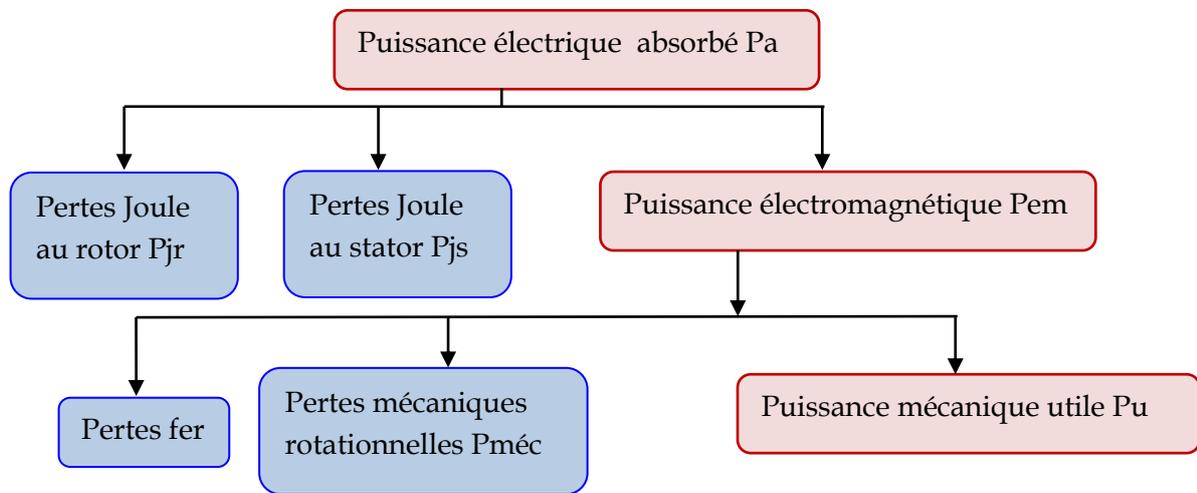


Figure 17: Bilan des puissances et des pertes dans un moteur à courant continu

1) La puissance absorbée Pa:

La puissance absorbée par un moteur à courant continu correspond à la puissance électrique consommée par l'inducteur et par l'induit. Comme l'énergie électrique est ici continue, la puissance Pa se calcule par la relation :

$$Pa = U.I + u.i_e$$

2) La puissance utile Pu:

Le moteur déploie sur l'arbre de transmission un couple appelé couple utile, que l'on note Tu. Ce couple peut être mesuré soit à l'aide d'une dynamo balance soit à l'aide d'un capteur de couple .

Le moteur tourne à la vitesse n , c'est-à-dire à une vitesse angulaire Ω . La puissance mécanique utile P_u que le moteur transmet à sa charge mécanique vérifie alors la relation :

$$P_u = T_u \cdot \Omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot T_u$$

3) La puissance électromagnétique P_{em} :

Elle est définie comme étant le produit de la force contre électromotrice E fois le courant d'induit I . **$P_{em} = E \cdot I$**

4) Les différentes pertes:

a) Les pertes Joule :

Ce sont les pertes par échauffement dans les circuits de l'induit et de l'inducteur. Elles sont dissipées par les résistances équivalentes des circuits, et sont de fait mesurables (grâce à **un essai court circuit**) par un multimètre électrique. En effet au stator inducteur :

$P_{js} = r_{ie}^2 = u \cdot i_e$ au rotor

induit **$P_{jr} = R \cdot I^2$** \Rightarrow les pertes joule **$P_j = R \cdot I^2 + u \cdot i_e$**

b) Les pertes collectives :

On classe avec les pertes collectives les pertes qui contrairement aux pertes Joule ne sont pas directement mesurables, on ne peut donc pas connaître leurs valeurs à chaque instant. Il s'agit:

- ✚ des pertes mécaniques rotationnelles P_{rot} qui sont due aux frottements et à la résistance de l'air et qui augmentent par conséquent avec la vitesse de rotation.
- ✚ des pertes fer par hystérésis et par courant de Foucault P_f qui sont des défauts d'aimantation de la machine et qui augmentent avec l'excitation.

L'expression des pertes collectives est par conséquent: **$P_c = P_{rot} + P_f$**

Il est possible, mais délicat de calculer les pertes collectives d'une machines tournante. Il est bien plus simple de les déterminer expérimentalement même s'il n'est pas possible d'avoir une mesure instantanée de leur valeur. On les évalue au travers du couple des

pertes collectives T_c définie par : **$T_c = \frac{P_c}{\Omega}$**

NB: Le couple des pertes collectives est considéré comme constant quel que soit le régime de fonctionnement de la machine.

Pertes	Pertes magnétiques P_{fer} ou pertes ferromagnétiques ou pertes fer	Pertes joules P_j	Pertes mécaniques $P_{méca}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et au courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de B et de Ω .	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues à la résistance des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.

Parades	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.
---------	--	--	--

La mesure des grandeurs électriques à l'induit à vide (essai **à vide**) permet de déterminer les pertes constantes du moteur à courant continu

5) Rendement du moteur à courant continu:

Le rendement η d'une machine quelconque est le rapport entre sa puissance utile et la puissance qu'elle consomme:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_{jr} + P_{js} + P_{rot} + P_f}$$

Couple utile d'un moteur à courant continu:

On remarque : $P_u = P_{em} - P_c$ et en divisant par la vitesse angulaire Ω , on établit que: $T_u = T_{em} - T_c$, le couple utile est donc égal à une constante près, au couple électromagnétique. En utilisant la relation $T_{em} = K \cdot \Phi \cdot I$, on établit alors que: $T_u = K \cdot \Phi \cdot (I - I_0)$

Le couple utile du moteur à courant continu est contrôlé par le courant induit.

II.8 Démarrage du moteur à courant continu:

Le moteur à courant continu peut démarrer en charge, il suffit d'injecter le courant induit nécessaire. Au démarrage, par définition le moteur ne tourne pas. Or la force contre-électromotrice E est proportionnelle à la vitesse de rotation, elle est donc nulle. Si l'on regarde la relation de U et E en posant $E = 0$, on remarque que toute la tension appliquée au démarrage est appliquée à des bobinages de faible résistance. Il résulte alors un fort appel de courant atteignant plusieurs fois le régime nominale qui peut mener à la détérioration des bobinages.

Donc un moteur à courant continu doit toujours démarrer par limitation du courant. Pour cela on utilise un rhéostat de démarrage, placé en série avec l'armature qui permet de diminuer la tension appliquée aux bornes de l'induit le temps du démarrage. Plus récemment les variateurs de tension ont offert la possibilité d'un démarrage à tension réduite.

II.9-Machine en courant continu en mode génératrice

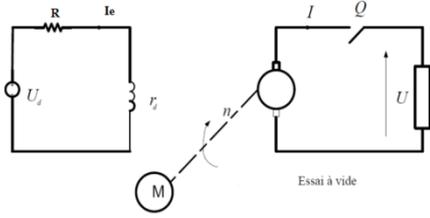
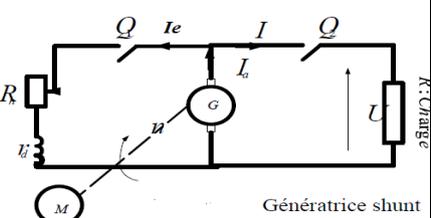
II.9.1 Définition:

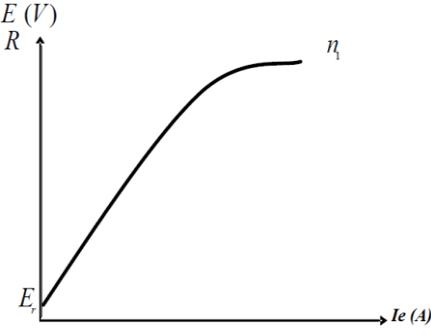
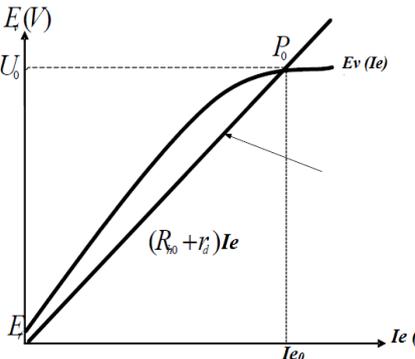
Une génératrice de courant continu est aussi appelée dynamo, diminutif de machine dynamo-électrique qui décrit une machine transformant le dynamique du mouvement en électricité.

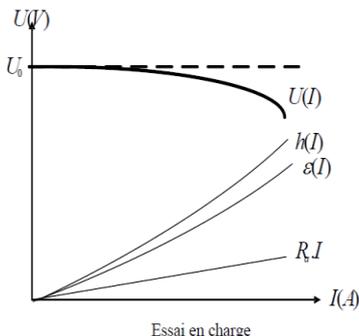
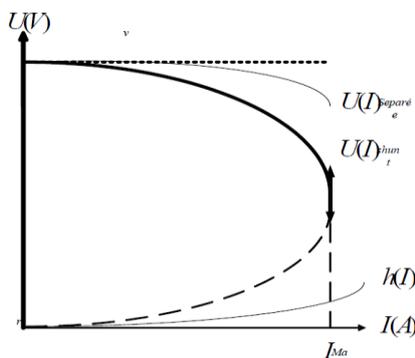
Une machine à courant continu fonctionne en mode génératrice si et seulement si la tension aux bornes de l'induit U est inférieure à la force électromotrice induite E de sorte que $U < E \Rightarrow U = E - R.I$

NB: Actuellement on obtient du courant continu à partir de source de courant alternatif associées à des redresseurs. Les machines à courant continu sont donc essentiellement utilisées en moteurs. Cependant lors des phases de freinage, il arrive qu'un moteur à courant continu fonctionne génératrice. C'est pourquoi il est indispensable d'étudier ce cas de fonctionnement.

II.9.2 Comparaison entre les différents modes d'excitation :

	Montage à excitation séparée	Montage à excitation shunt	Montage à excitation série
Principe	Dans le câblage à excitation séparée, le courant inducteur est fourni par une source extérieure et la production électrique s'amorce dès que le rotor entre en mouvement. ce câblage permet un contrôle total de l'excitation de la machine et par conséquent de la tension délivrée. Aussi en utilisera l'excitation séparée lorsque l'on voudra affranchir la production électrique des variation de la puissance mécanique afin de disposer d'une source stable. Ce montage est celui qui offre le plus de souplesse mai présente l'inconvénient de nécessiter une source externe.	Dans le montage shunt le courant d'excitation et puisé dans la production de la génératrice elle même, une partie du courant induit est injecté dans le bobinage inducteur. Dans ce montage une fois la production et amorcé, le courant d'excitation peut être réglé par le bais du rhéostat appelé rhéostat d'excitation. Mais une stabilisation est moins évidente à obtenir que dans le cas d'excitation séparée. En effet une variation de la vitesse occasionnant une variation de la tension, elle occasionne une variation de courant produit et donc une variation d'excitation.	La dynamo série est instable parce que le courant qui circule dans l'inducteur est celui qui produit par la machine. Difficile dans ces conditions de contrôler la production. De plus la tension qu'elle délivre à vide est proche de zéro, puisqu'aucun courant ne circule dans l'inducteur. Aussi la génératrice série n'est pas utilisé.
Schéma et équation de fonctionnement	 <p>U_d: source d'excitation ; R_h: Rhéostat d'excitation ; r_a: résistance de l'enroulement inducteur et M: moteur d'entraînement La loi des mailles appliquée :</p>	 <p>- Le circuit inducteur $R_h + r_a$ est branché en parallèle avec l'induit, d'où l'appellation shunt. -Le courant induit dans ce cas est, $I_a = I_e + I$ il est légèrement</p>	

	<p>- Au <i>circuit</i> inducteur nous donne :</p> $I_e = U_{ex} / (R_h + r_a)$ <p>- Au circuit induit nous donne :</p> $U = E_v - \varepsilon(I) - R_a I$ <p>Avec : R_a: résistance totale de l'induit et : $\varepsilon(I)$ chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit</p>	<p>supérieur à I dans la charge. La loi des mailles appliquée : Au circuit inducteur nous donne :</p> $I_e = U / (R_h + r_a)$ <p>Au circuit induit nous donne :</p> $U = E_v - \varepsilon(I) - R_a I$	
<p>Caractéristiques de la génératrice</p>	<p>Caractéristique à vide C'est la courbe $E = f(I_e)$ à $\Omega = Cste$ A vide (charge isolé), on maintient la vitesse constante et on fait varier le courant d'excitation I_e et on relève la tension aux bornes de l'induit. Pour $I_e = 0 \Rightarrow E_v = E_r$: <i>f.e.m</i> rémanente \lll (tension nominale lue sur la plaque signalétique). Pour les faibles valeurs de I_e le circuit magnétique n'est pas saturé $\Rightarrow \Phi_v$ est proportionnel à I_e donc $E_v(I_e)$ est une droite. Pour des valeurs d'excitations importantes, le circuit magnétique va se saturer et l'accroissement de la <i>f.e.m</i> sera moins vite que précédemment $\Rightarrow E_v(I_e)$ présente donc une coude de saturation. A la saturation, même si on augmente l'excitation la <i>f.e.m</i> à vide $E_v = Cste$.</p>  <p>Caractéristique en charge C'est la courbe $U = f(I)$ à Ω et I_e constantes On fait varier le courant I à l'aide de la charge R et on relève la tension U aux bornes de l'induit</p>	<p>Point de fonctionnement à vide Tout d'abord on précise que $E_v = f(I_e)$ ne dépend, ni du mode d'excitation, ni du mode de fonctionnement, car elle représente la courbe d'aimantation du circuit magnétique. Il est toujours recommandé de la relever en génératrice à excitation séparée). L'induit et l'inducteur sont en parallèle. A vide, la tension aux bornes de l'induit U_0 est : $U_0 = E_v - (R_h + r_a) I_e$ D'après ces deux égalités, on voit que P_0 le point de fonctionnement à vide est l'intersection de $E_v = f(I_e)$ et la droite des inducteurs $R_h + r_a$.</p>  <p>Caractéristique en charge: C'est la courbe $U = f(I_a)$ à $\Omega = Cste$ Le montage étant celui de la figure schéma électrique, après amorçage, à vide on règle l'excitation qui donne $U = U_0$ (on ne touche plus R_h) ; on ferme Q_2, puis on varie le courant à l'aide de la charge R et on relève la</p>	

	<p>tout en maintenant la vitesse Ω et l'excitation I_e constante. On obtient l'allure suivante</p> <p>Pour un régime de fonctionnement en charge (pour I donné), la chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit est donnée par : $\varepsilon(I) = E_v - E_{ch}$</p> <p>Lorsque I croit $\Rightarrow U$ diminue, donc $U(I)$ est décroissante et s'incurve de plus en plus à cause de $\varepsilon(I)$</p>  <p style="text-align: center;">Essai en charge</p>	<p>tension tout en gardant la vitesse constante.</p> <p>$U = f(I_{shunt})$ est plus tombante que $U = f(I_{séparé})$ car contrairement à l'excitation séparée, I_e n'est plus constante, elle décroît en même temps que U d'où une baisse plus accentuée de la tension.</p> <p>-Le courant débité présente un maximum, au-delà du quel, la génératrice refuse sa charge : si l'on diminue encore la résistance de charge, le courant décroît en même temps que la tension.</p> 
--	--	--

II.9.3 Câblage d'une génératrice à courant continu:

Tout comme le moteur à courant continu, la dynamo peut être câblée en excitation séparé, en shunt et en série.

II.9.4 Bilan des puissances et des pertes pour la Génératrice:

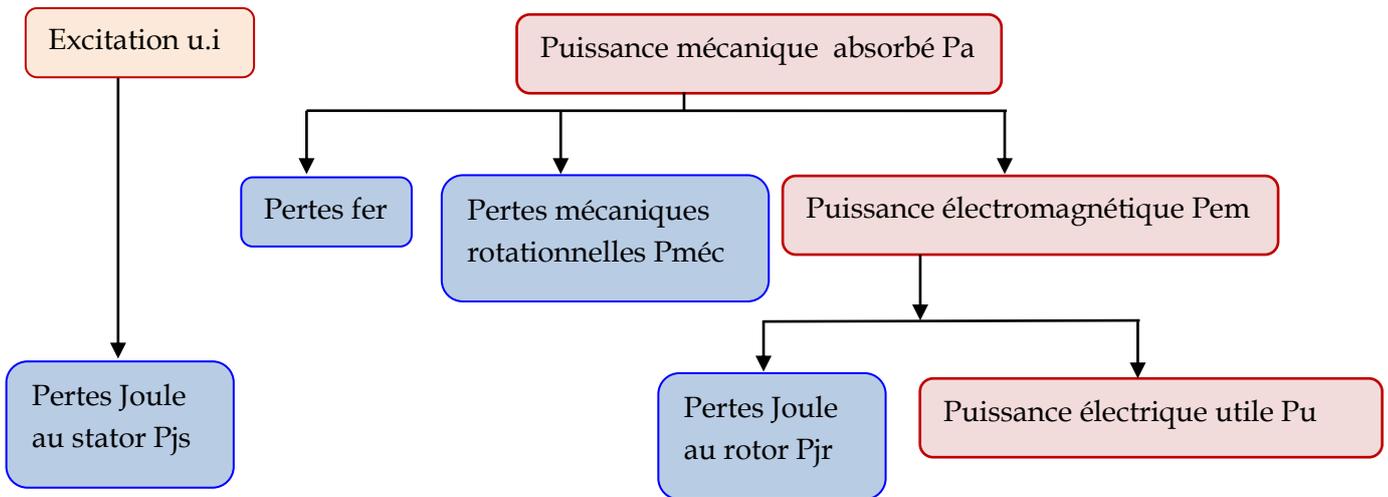


Figure 18 : bilan des puissances et des pertes dans une génératrice de courant continu
 L'excitation de la machine ne participe qu'indirectement à la conversion mécanique électrique

a) Couple appliqué et puissance absorbé:

Dns une génératrice si l'on on met dans un premier temps l'excitation, la puissance absorbée P_a est une puissance mécanique exprimé par: $P_a = T_a \cdot \Omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot T_a$

Ceci étant de même qu'en mode moteur, une puissance électrique $u.ie$ fournie à l'inducteur de la machine de façon à fournir l'excitation. Il convient de prendre en compte cette puissance dans le calcul de rendement.

b) La puissance utile P_u :

La puissance utile d'une génératrice est la puissance électrique fournie par l'induit à ses bornes:

$$P_u = U \cdot I_a$$

c) La puissance électromagnétique P_{em} :

Elle est définie comme étant le produit de la force électromotrice E fois le courant d'induit I .

$$P_{em} = E \cdot I$$

d) Les différentes pertes:

On retrouve dans la génératrice les mêmes pertes que dans le moteur à courant continu

RQ: La puissance nécessaire pour exciter la machine est une puissance électrique perdue en pertes joule au stator, nous l'avons donc représentée différemment de la machine de conversion mécanique-électrique à laquelle elle participe indirectement.

e) Rendement de la génératrice:

Le rendement η d'une génératrice est:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + u.ie} = \frac{P_a - P_{jr} - (P_f + P_{rot})}{P_a + u.ie}$$

II.10 Freinage:

L'une des solutions pour freiner une machine à courant continu est de la faire fonctionner en mode génératrice. C'est ce que l'on appelle le freinage dynamique. Ce mode freinage doit être fait en excitation séparée: Les connexions d'une génératrice série devons être modifiées par commande pour profiter de ce mode freinage.

Selon l'utilisation que l'on fait de l'énergie électrique, on distingue deux types de freinage dynamique: le freinage rhéostatique et le freinage par récupération d'énergie

II.10.1 Freinage rhéostatique:

Consiste à fermer l'induit de la dynamo sur une résistance. La puissance électrique issue de la conversion de l'énergie cinétique est alors dissipée par effet Joule, le freinage est d'autant plus efficace que l'effet Joule est important et donc que la résistance est petite.

L'avantage du freinage rhéostatique est qu'il permet un arrêt rapide et qu'il est réalisable en toute circonstance. L'inconvénient est la perte de l'énergie convertie.

II.10.2 Freinage par récupération d'énergie:

Consiste à renvoyer l'énergie électrique vers la source électrique. Cette opération peut se réaliser à condition que la force électromotrice soit supérieur à la tension d'induit(c'est-à-dire celle de la

source). La force électromotrice étant proportionnelle à l'excitation et à la vitesse de rotation, deux solutions sont envisageables:

- ✚ le freinage par survitesse.
- ✚ le freinage par variation de la f.e.m jouant sur l'excitation.

L'avantage majeur de ce freinage est la récupération d'énergie électrique qui lui est associée. En revanche pour qu'il soit mis en œuvre, la source électrique doit être réversible, l'énergie doit être stockée ou utilisée. De plus l'énergie électrique générée doit être rendue compatible avec le réseau.

II.11 Avantages, Inconvénients et applications des machines à courant continu :

II.11.1 Avantages, Inconvénients des machines à courant continu

Avantages	Inconvénients	Concurrence
<ul style="list-style-type: none"> ✚ Commande simple ✚ Facilement réversible ✚ Freinage dynamique ✚ Peut démarrer en charge ✚ Stabilisation de la vitesse (excitation shunt) ✚ Stabilisation de la puissance (moteur série) 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Présence d'un collecteur ✚ Cout de fabrication ✚ Cout d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Moteur asynchrone ✚ Alternateur triphasé

II.11.2 Applications : Les deux types les plus courants sont :

a) Les moteurs à balais

Ils représentent le type de moteur le plus classique et sont généralement utilisés pour des applications à faible budget, dans lesquelles le système de commande est relativement simple, telles que des applications grand public, et pour des équipements industriels basiques.

Ce type de moteur peut être décomposé comme ci dessous :

- ✚ **À excitation série :** Ces moteurs sont utilisés dans les applications exigeant un couple de démarrage élevé comme les automobiles, les palans, ascenseurs et grues.
- ✚ **À excitation shunt.** Son couple de démarrage est moyen avec une vitesse constante, il convient donc aux applications telles que les tours, aspirateurs, convoyeurs et meuleuses.
- ✚ **À excitation composée** Ce type de moteur combine la structure à excitation série et celle du bobinage "shunt". Ce type de moteur possède un couple de démarrage élevé et offre une large variation de vitesse. Il est utilisé pour piloter des compresseurs, pompes centrifuges à tête variable, presses rotatives, scies circulaires, machines de cisaillement, ascenseurs et carrousels à bagages
- ✚ **Moteur à aimant permanent** - Plutôt qu'un électroaimant, comme son nom l'indique, un aimant permanent est utilisé dans des applications où une commande précise et un couple faible sont nécessaires, telles que dans la robotique et les servo-systèmes.

b) Brushless

Les moteurs brushless réduisent certains problèmes liés aux moteurs à balais les plus courants (durée de vie limitée pour des applications à usage intensif) et leur conception mécanique est beaucoup plus simple (sans balais). Les avantages de cette technologie sont une longue durée de vie, peu d'entretien et un haut rendement (85-90 %), tandis que les inconvénients sont des coûts élevés et des contrôleurs plus compliqués. Ces types de moteurs sont généralement utilisés dans le contrôle de positionnement et de vitesse avec des applications telles que les ventilateurs, pompes et compresseurs, qui nécessitent fiabilité et robustesse.

Les **Moteurs pas à pas** font partie de la catégorie des moteurs brushless. Ils sont principalement utilisés dans le contrôle de position en boucle ouverte, avec des utilisations allant des imprimantes jusqu'à des applications industrielles telles que les équipements de placement à grande vitesse.

III. Exercices**Exercice N°1 :**

I) Un moteur de puissance utile 3 kW tourne à 1500 tr/min. Calculer le couple utile en Nm.

II) L'inducteur d'une machine à courant continue comporte 4 pôles, le flux utile est Φ , les conducteurs de l'induit sont répartis dans 44 encoches à raison de 6 conducteurs par encoche, l'enroulement est formé de 4voies.

- 1) Pour une fréquence de rotation $n = 1500$ tr/min quelle est la f.é.m de la machine ?
- 2) Quel est le nombre de spires dans chaque voie d'enroulement ?

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

- 1) Calculer la f.e.m. E du moteur.
- 2) La machine est maintenant utilisée en génératrice (dynamo). Elle débite un courant de 10 A sous 220 V. En déduire la f.e.m.

Exercice N°2 :

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 : $i = 30$ A. L'induit de résistance $R = 12$ m Ω est alimenté par une source fournissant une tension U réglable de 0 V à sa valeur nominale : $U_N = 600$ V. L'intensité I du courant dans l'induit a une valeur nominale : $I_N = 1,50$ kA. La fréquence de rotation nominale est $n_N = 30$ tr/min.

N.B. Les parties 1, 2, 3 sont indépendantes.

1) Démarrage :

- a) En notant Ω la vitesse angulaire du rotor, la fem du moteur a pour expression : $E = K\Omega$ avec Ω en rad/s.
- b) Quelle est la valeur de E à l'arrêt ($n = 0$) ?
- c) Dessiner le modèle équivalent de l'induit de ce moteur en indiquant sur le schéma les flèches associées à U et I.
- d) Ecrire la relation entre U, E et I aux bornes de l'induit, en déduire la tension U_d à appliquer au démarrage pour que $I_d = 1,2 I_N$.
- d) Citer un système de commande de la vitesse de ce moteur.

2) Fonctionnement nominal au cours d'une remontée en charge :

- a) Exprimer: la puissance absorbée par l'induit du moteur et calculer sa valeur numérique, la puissance totale absorbée par le moteur et calculer sa valeur numérique, la puissance totale perdue par effet Joule et calculer sa valeur numérique.
- b) Sachant que les autres pertes valent 27 kW, exprimer et calculer la puissance utile et le rendement du moteur.
- c) 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:

- a) Montrer que le moment du couple électromagnétique 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 a une valeur T_{em}' égale à 10 % de sa valeur nominale et garde cette valeur pendant toute la remontée.

b) Calculer l'intensité I' du courant dans l'induit pendant la remontée. 3-3-La tension U restant égale à U_N , exprimer puis calculer la fem E' du moteur.

c) Exprimer, en fonction de E' , I' et T_{em}' , la nouvelle fréquence de rotation n' . Calculer sa valeur numérique.

Exercice N°3:

I) Un moteur à courant continu est excité par des aimants permanents, le flux est constant. On donne pour le point nominal : $U_N = 48 \text{ V}$, $I_N = 80 \text{ A}$, $n = 800 \text{ tr/min}$, $R_a = 0,05 \Omega$

1) Montrer que le moment du couple électromagnétique est $T_{em} = K \cdot I$ et calculer K .

2) On réalise un essai à vide à vitesse nominale. La puissance consommée par l'induit est $P_{ao} = 320 \text{ W}$. En négligeant les pertes par effet joule dans l'induit calculer le couple des pertes T_p , le courant et la tension d'induit.

3) Pour le point nominal calculer le moment du couple utile et le rendement.

4) Montrer que l'équation de la caractéristique mécanique est : $T_{em} = 10,5 - 0,577 \cdot n$

5) Tracer les caractéristiques mécaniques $T_{em}(n)$ suivantes : C1 pour $U = U_N$; C2 pour $U = -U_N$; C3 pour $I = I_N$; C4 pour $I = -I_N$

II) Un moteur à excitation indépendante porte les indications suivantes : Résistance de l'inducteur $r = 150 \Omega$; tension d'alimentation $u = 120 \text{ V}$. Résistance de l'induit $R_a = 0,5 \Omega$. tension d'induit $U = 220 \text{ V}$.

🔧 Lors d'un essai à vide, on a mesuré : La puissance absorbée par l'induit $P_0 = 320 \text{ W}$, $I_0 = 1,2 \text{ A}$.

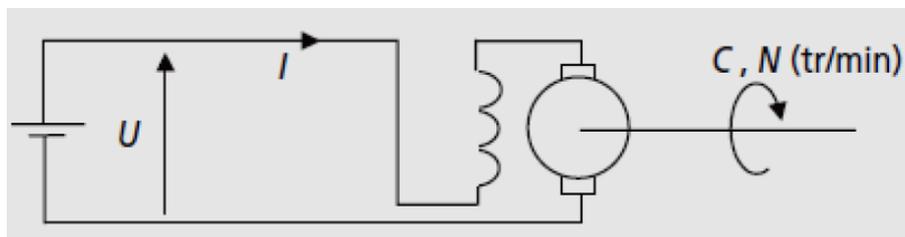
🔧 Pour essai en charge à la vitesse $n = 1450 \text{ tr/min}$, l'intensité $I = 18 \text{ A}$.

1) Pour l'essai en charge, calculer : La puissance électromagnétique, Les pertes par effet Joule au stator et au rotor, Les pertes collectives, La puissance utile P_u . Le rendement du moteur ?

2) Pour l'essai à vide, calculer La f.e.m. E_0 et la fréquence de rotation n_0 ?

Exercice N°4:

On s'intéresse à l'étude d'un moteur très utilisé en traction électrique : le moteur série. Il présente la particularité de posséder un bobinage inducteur placé en série avec l'induit comme le représente la figure suivante :



1) À quelle grandeur est proportionnel le flux dans la machine ?

2) Quelle relation relie alors le couple et le courant de la machine ? Quel est l'intérêt de cette relation ?

3) Quelle relation relie la force électromotrice interne E à la vitesse angulaire de la machine Ω et au courant I ?

4) Représenter le schéma électrique équivalent de la machine en rotation, on notera R la résistance d'induit et R_e la résistance d'inducteur.

- 5) Déterminer la relation existant entre Ω , I et les grandeurs constantes du système. Idem entre Ω et la couple C .
- 6) Représenter alors l'allure de l'évolution de la vitesse Ω en fonction du courant. Représenter également l'évolution de Ω en fonction du couple.

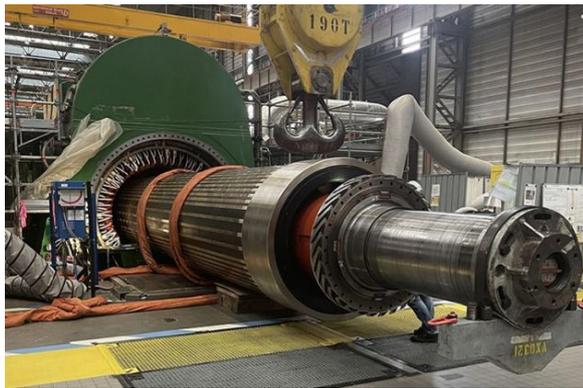
Exercice N°5 :

Une machine à courant continu à aimants permanents est utilisée en génératrice, entraînée par un ensemble mécanique à la vitesse $N_n = 3\,000$ tr/min. La tension nominale de la génératrice est $U_n = 220$ V, la puissance nominale $P_n = 20$ kW et le rendement nominal : $\eta = 0,8$

- 1) Représenter un schéma équivalent de la génératrice et de sa charge.
- 2) Calculer la valeur du courant nominal de la génératrice.
- 3) En déduire la valeur de la résistance d'induit si on néglige les pertes mécaniques de la machine.
- 4) Calculer alors la valeur de la tension à vide et de la tension à demi-charge, c'est-à-dire pour une puissance fournie $P = P_n/2$
- 5) Calculer le rendement de la machine à demi-charge.

CHAPITRE III

MACHINES SYNCHRONES



I. Généralités :

La machine synchrone est une machine réversible de conversion électromécanique. On la rencontre dans de nombreux dispositifs de conversion d'énergie aussi bien en:

- ✚ Production d'énergie électrique à partir d'énergie mécanique où elle porte le nom de **génératrice synchrone** lorsque la vitesse est variable (exemple éolien) ou d'**alternateur** lorsque sa vitesse est fixe (exemple centrale thermique),
- ✚ production d'énergie mécanique à partir d'énergie électrique où elle porte le nom de **moteur synchrone** (exemple chaîne de traction des TGV).

Avec le développement de l'électronique de puissance, le moteur synchrone vient à remplacer de plus en plus fréquemment le moteur à courant continu. Ne possédant pas de dispositif balais-collecteur, dont la fonction est déplacée dans l'électronique de puissance, on élimine une problématique de maintenance et de vitesse limite.



Invention : La machine synchrone est inventée par **Nikola Tesla**. Son concept figure dans un dépôt de sept brevets du 1^{er} mai 1888 où il en décrit plusieurs variantes ainsi que le principe du courant alternatif biphasé et triphasé et leur distribution. Tesla aurait développé cette idée de machine électrique quand il était étudiant à l'École polytechnique de Graz (1875-1876).

	<p>Nikola Tesla (1856 -1943) est un inventeur et ingénieur américain d'origine serbe. Il est notoirement connu pour son rôle prépondérant dans le développement et l'adoption du courant alternatif pour le transport et la distribution de l'électricité. Ses travaux les plus connus portent sur l'énergie électrique. Il a mis au point les premiers alternateurs permettant la naissance des réseaux électriques de distribution en courant alternatif, dont il est l'un des pionniers. Il est connu pour avoir su mettre en pratique la découverte du caractère ondulatoire de l'électromagnétisme, en utilisant les fréquences propres des composants des circuits électriques afin de maximiser leur rendement.</p>
--	---

II. Introduction :

Les machines électriques permettent la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique ou de l'énergie électrique en énergie mécanique: cette une conversion réversible. Les grands types de machines les plus couramment utilisées sont la machine à courant continu et la machine à courant alternatif (la machine synchrone et la machine asynchrone).

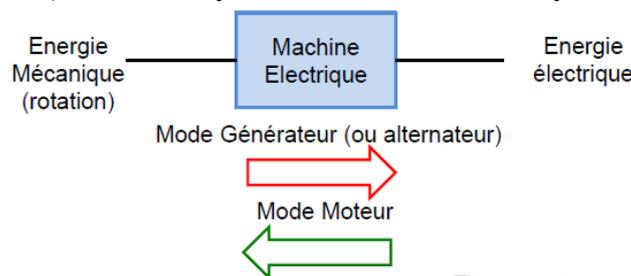


Figure -1-

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. C'est ce type de machine qui fournit l'énergie électrique appelée par le réseau de distribution dans les centrales électriques (on parle d'alternateur). Elle a également été utilisée en traction ferroviaire (rôle moteur) dans le TGV atlantique...Néanmoins, on la rencontre peu dans les applications domestiques, car elle est plus coûteuse à fabriquer et moins robuste que la machine asynchrone que nous verrons par la suite et elle ne peut pas démarrer simplement de façon autonome...

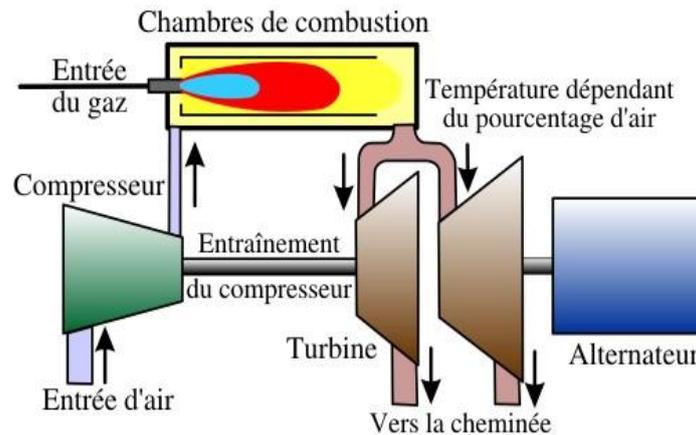


Figure 2 : Application de la machine synchrone dans la production d'électricité (Alternateur)

III. Champ Tournant:

Les machines tournantes sont formées habituellement de deux armatures magnétiques coaxiales séparées par un entrefer: – le stator, fixe, qui présente une surface interne cylindrique et pour lequel les enroulements sont placés dans des encoches – le rotor, mobile, qui peut être soit à pôles lisses, avec une structure analogue à celle du stator, soit à pôles saillants, les conducteurs étant alors enroulés autour des "cornes polaires".

En régime de fonctionnement, les courants circulant dans les différents enroulements créent dans l'entrefer un champ magnétique variable dans le temps et dans l'espace. On dit de ce champ qu'il est tournant s'il présente les mêmes caractéristiques que celui créé par un bobinage alimenté en courant continu (ou par un aimant permanent) animé d'un mouvement circulaire autour d'un axe perpendiculaire à la direction d'une paire de pôles.

Les machines électriques à courant alternatif (alternateurs, moteurs synchrones et asynchrones, etc.) reposent en grande majorité sur le principe du **champ tournant**, il est donc impératif de bien comprendre cette notion et ses caractéristiques avant d'aborder les différents modèles.

L'étude des machines tournantes montre que la conversion électromagnétique d'énergie n'est possible que s'il y a interaction entre deux champs tournants, l'un créé par le stator, l'autre par le rotor. Si on peut toujours générer le deuxième en faisant tourner une armature alimentée en courant continu, ceci n'est évidemment pas possible pour le stator, fixe par définition. Il faudra donc utiliser d'autres moyens pour créer ce champ. Dans ce qui va suivre, nous allons décrire quelques-unes des possibilités existantes.

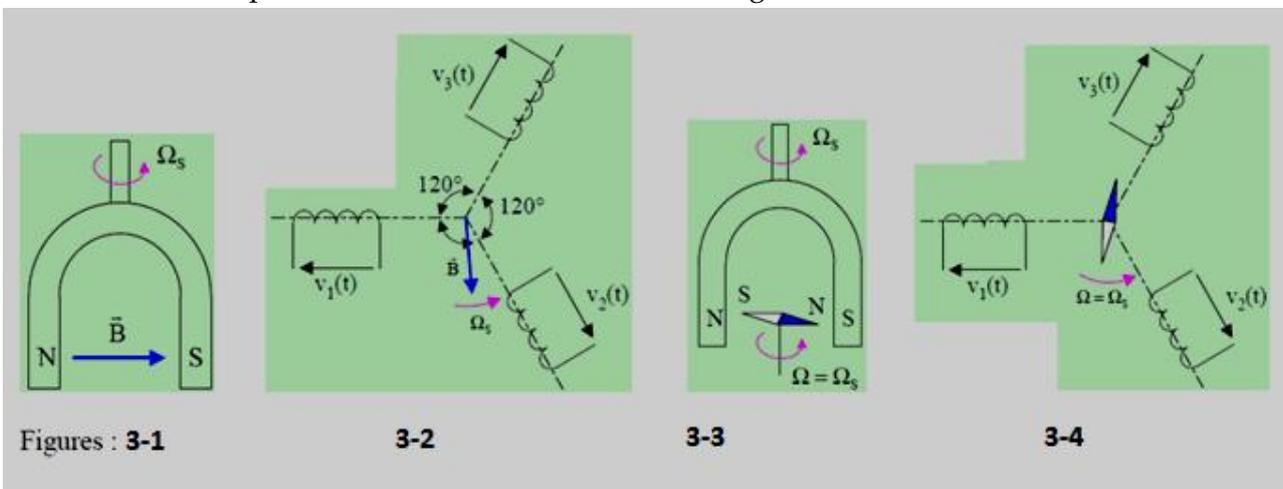
Une aiguille aimantée est une source de champ magnétique.

Plaçons au-dessus de cette aiguille un aimant en U pouvant tourner autour d'un axe vertical. La rotation de l'aimant en U crée un champ magnétique tournant. Ce champ entraîne l'aiguille qui tourne à la même vitesse. On dit que la rotation est synchrone. La vitesse de rotation du champ magnétique tournant est appelée **vitesse de synchronisme**, notée Ω_s (en rad/s) ou n_s (en tr/s).

Si on remplace l'aiguille par un disque conducteur, celui-ci se met à tourner mais avec une vitesse inférieure à la vitesse du champ. On dit que la rotation est **asynchrone**.

On peut créer un champ magnétique tournant soit par :

- ✚ **Rotation d'un aimant:** (figure 3-1) la vitesse de rotation de l'aimant correspond à la vitesse de rotation du champ.
- ✚ **Enroulement triphasé :** (figure 3-2) On fait passer un courant alternatif triphasé dans trois bobines identiques dont les axes font entre-eux un angle de 120° .



Lorsqu'un aimant tourne, le champ magnétique qu'il produit tourne aussi. Si un enroulement subit les variations de flux dues à ce champ tournant, il pourra être le siège de courants induits alternatifs : c'est le principe de l'alternateur, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Remarques:

- 1) Le champ magnétique tournant produit par un aimant (figure 3-1) est caractérisé par sa vitesse de rotation Ω_s
- 2) Le champ magnétique produit au centre de trois bobines alimentées par un système de tensions triphasées (figure 3-2) est tournant avec une vitesse de rotation $\Omega_s = \omega = 2\pi.f$ avec ω = pulsation des tensions triphasés .A.N. $f = 50\text{Hz}$, le champ magnétique tourne à 314 rd/s ou bien à 50tr/s
- 3) Lorsqu'on fait tourner un aimant au-dessus d'une aiguille aimantée (figure 3-3), l'aiguille tourne avec la même vitesse que l'aimant, on dit que les mouvements de l'aimant et de l'aiguille aimantée sont synchrones : $\Omega = \Omega_s$
- 4) Ω_s est appelée vitesse de synchronisme
- 5) la permutation de deux phases provoque l'inversion du sens de rotation du champ tournant.

- 6) Principe de la machine synchrone : L'aiguille (le rotor, figure 3-4) tourne à la vitesse de synchronisme $\Omega = \Omega_s = \omega = 2\pi.f$. C'est le principe de fonctionnement du moteur synchrone
- 7) Une spire ou un ensemble de spire où circule un courant peut être équivalent à un aimant (électroaimant).
- 8) Un aimant possède deux pôles, un pôle nord et un pôle sud. Ces deux pôles sont appelés paire de pôles.
- 9) Avec plusieurs enroulements, il est possible, en les disposant correctement, de créer un système avec plusieurs paires de pôles

IV. Relation entre vitesse de rotation et nombre de paires de pôles :

La fréquence des tensions est tel que $f = n.p$, avec p = nombres de paires de pôles. Ou encore $2\pi.f = \omega = 2\pi.n.p$ (pulsation de la f.e.m sinusoïdale)

Vitesse du champ tournant = $\Omega = 2.\pi.n = \omega / p = 2.\pi.f / p$ (en rad/s) ou bien $n = f / p = ns$ = vitesse de synchronisme (tr/s) et bien sûr $\Omega = \Omega_s = 2.\pi.ns$

$$n(\text{tr / min}) = 60 \cdot \frac{f}{p} \qquad \Omega_s = \frac{2\pi.f}{p}$$

Exemples de relation entre vitesse et nombres de paires de pôles :

Nombre de paires de pôles P	n (tr/s)	n (tr/min)	Ω (rad/s)
1	50	3000	314
2	25	1500	157
3	16,7	1000	105
4	12,5	750	79
25	2	120	12,6
50	1	60	6,3

V. Constitution et principe de fonctionnement:

V.1 Présentation d'une machine synchrone

Circuits magnétiques en fer doux de perméabilité μ_r infinie, l'un fixe, le STATOR, l'autre en rotation, le ROTOR ; l'entrefer occupe l'espace entre le rotor et le stator.

Il existe deux sources de champ magnétique au niveau de l'entrefer :

- ✚ les circuits de **l'induit** bobinés sur le stator
- ✚ les aimants permanents ou les circuits **inducteurs** alimentés en courant continu et bobinés sur le rotor

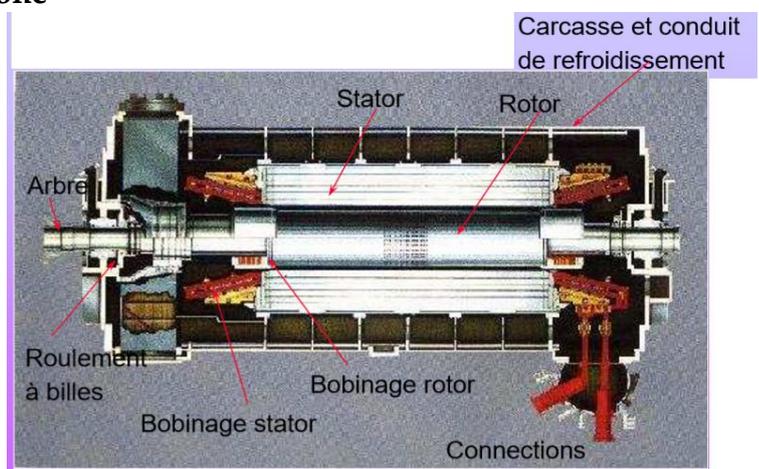


Figure -4- Présentation d'une machine synchrone

Le stator permet de créer un champ tournant au moyen de courants alternatifs alors que le rotor va créer un champ continu qui va tourner lors de la rotation de la machine. Le couplage entre les deux champs nous permettra d'expliquer le fonctionnement du système.

V.2 Constitution

A) Le stator (Fig5)

Il porte le bobinage triphasé qui permet de créer un champ tournant. La vitesse du champ tournant et du rotor sont identiques, on note la relation entre cette vitesse et la fréquence électrique : $N \text{ (tr/min)} = 60 f / p$. Les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

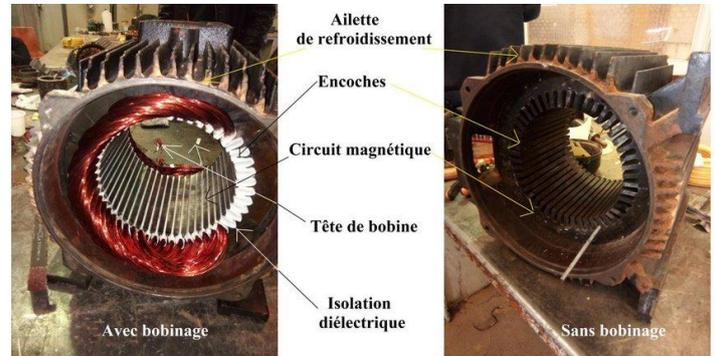


Figure 5 : stator

Remarques:

- + Contrairement au rotor, le stator est siège de variations temporelles de flux magnétique. Pour éviter les courants de Foucault, il va devoir être **feuilleté**.
- + La partie séparant rotor et stator est appelé **entrefer**.

B) Le rotor.

Le rotor va permettre de créer un moment magnétique. Il peut être constitué d'aimants permanents, mais dans le domaine des moyennes et fortes puissances il est plus souvent pourvu d'un bobinage inducteur parcouru par un courant continu : I_e . Dans les deux cas, le rotor comprend un circuit magnétique (matériau doux) qui permet de canaliser le flux, afin d'avoir un meilleur couplage possible entre rotor et stator.

Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants :

1) **rotor bobiné à pôles lisses** (figure 6) :

Dans ce type, l'entrefer est constant. Le rotor est de faible diamètre devant sa longueur, il est utilisé pour des vitesses élevées (3000 tr/min). On les retrouve dans les turbo-alternateurs des centrales thermiques. Il faut donc peut de pôles pour obtenir du 50 Hz.

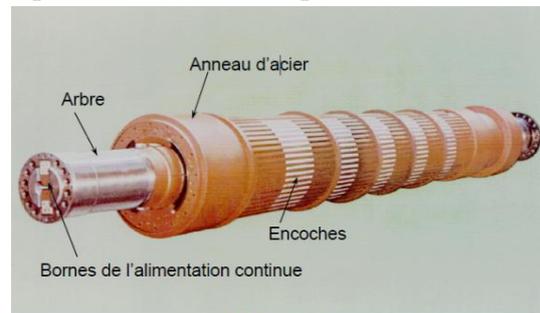


Figure 6

2) rotor bobiné à pôles saillants (figure7):

Utilisé pour les machines à faible vitesse (turbines hydrauliques). Il comporte un nombre important de pôles (60 pôles, $n = 100$ tr/min pour une usine marémotrice) et un grand diamètre devant la longueur.

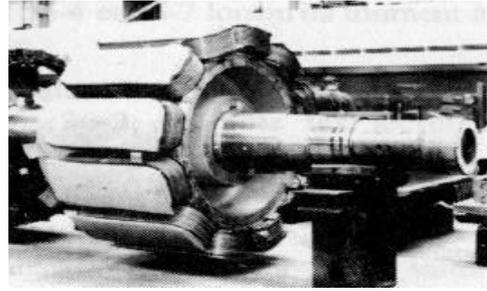


Figure 7

3) rotor à aimant (figure 8) :

Les aimants sont disposés en tuiles. Ils peuvent être collés, vissés ou enserrés dans une frette amagnétique. (on le favorise pour des vitesses élevées).

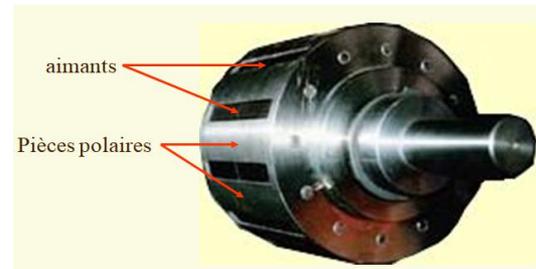


Figure 8

Remarques:

- 1) Nous verrons que, quand la machine fonctionne, le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant créé par le stator. Il n'y a donc pas de phénomènes inductifs à prendre en compte dans la partie massive du rotor, qui n'a pas besoin d'être feuilleté (fabriqué à partir de tôles isolées), ce qui augmente la solidité de l'ensemble.
- 2) Pour les machines à pôles lisses, l'ensemble rotor-stator présente une réluctance pratiquement constante et pour les machines à pôles saillants cette réluctance varie notablement.
- 3) Dans le cas d'une machine à aimants, il n'y a plus de bobinage au rotor (ce qui simplifie la réalisation de la machine).
- 4) Dans le cas d'une machine à pôles lisses, le rotor est pratiquement cylindrique.
- 5) La réalisation du bobinage au stator est très complexe. En fait, le bobinage d'une phase est réparti dans des encoches réalisées sur toute la surface en regard avec le rotor. La position et le nombre de conducteurs des encoches sont calculés pour obtenir un champ à répartition spatiale sinusoïdale.

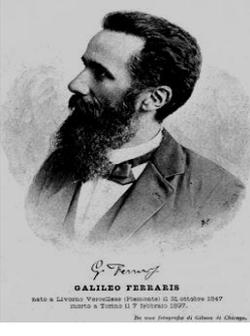
On notera que contrairement à la machine à courant continu, le rotor constitue l'inducteur et le stator l'induit de la machine

V.3 principe de fonctionnement:

Les bobines statoriques alimentées par des courants triphasés de pulsation w créent un champ \vec{B}_s tournant (théorème de FERRARIS) à la vitesse : $\Omega_s(\text{rad/s}) = \frac{w}{p}$ ou $n_s(\text{tr/min}) = 60 \cdot \frac{f}{p}$

Le courant circulant dans le bobinage rotorique crée un champ \vec{B}_r fixe par rapport au rotor. L'interaction des deux champs crée un couple électromagnétique T_{em} . Le rotor est alors entraîné à la vitesse $\Omega = \Omega_s$ (d'où le terme synchrone donné à cette machine). Le couple maximal est obtenu pour $\xi = 90^\circ$ (ξ angle entre \vec{B}_r et \vec{B}_s).

Théorème de FERRARIS:



G. Ferraris
GALILEO FERRARIS
NATO a Livorno (Venezia) (Piemonte) il 30 ottobre 1847
MORTO a Torino il 7 febbraio 1897.
Da una fotografia di G. G. G. G.

Galileo Ferraris (Livorno Ferraris, 30 octobre 1847 – Turin, 7 février 1897) est un ingénieur et un scientifique italien. Il a travaillé sur les champs magnétiques tournants dans les machines électriques alimentées en courant alternatif

***Théorème :** Un bobinage polyphasé (q phases) symétrique et multipolaire (p paires de pôles), alimenté par un système polyphasé équilibré de courants, crée dans l'entrefer un champ multipolaire à répartition sinusoïdale, tournant à la vitesse de synchronisme*

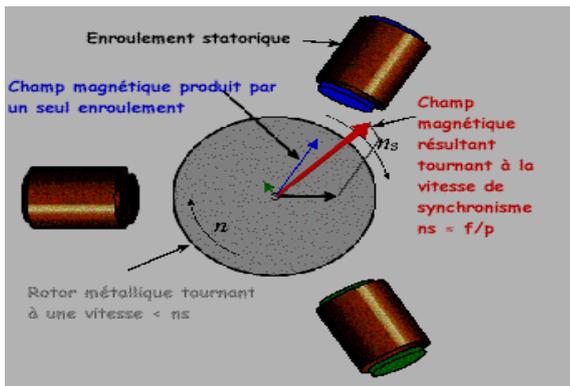


Figure 9

Trois bobines parcourues par un système de courants triphasé équilibré et décalées de 120°, produisent au centre un champ magnétique tournant à la pulsation des courants. (figures 4)

V.4 symbole:

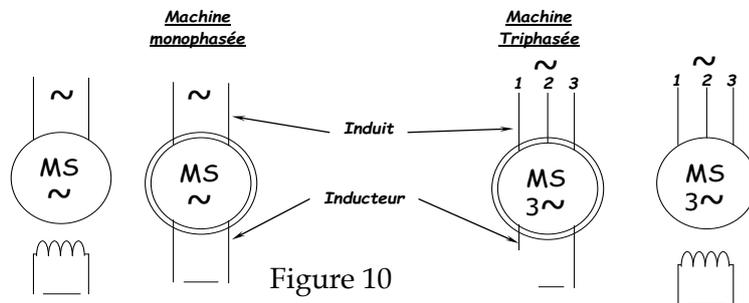


Figure 10

VI- Etude de l'alternateur:

VI.1 Définition:

L'alternateur synchrone est une machine électrique tournante fonctionnant en mode génératrice et produisant de l'énergie électrique alternative (fig 11)

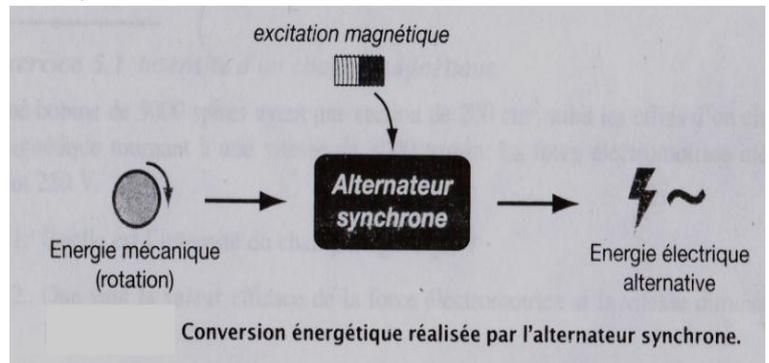


Figure 11 Alternateur

Donc il permet d'avoir une conversion d'une puissance mécanique (sous forme de rotation) en une puissance électrique (sous forme alternative) .Conversion à haut rendement. Ce qui engendre un Spectre d'application très large: système embarqué (groupe électrogène, automobiles, bateaux, avions,...), installation de puissance (barrages hydroélectriques, centrales thermiques et nucléaires,..).Pour toutes ces raisons, l'alternateur synchrone est à la base de presque toute la production d'énergie électrique mondiale.

Actuellement, pour les alternateurs de grande puissance, l'induit est fixe et l'inducteur mobile. Deux formes sont adoptées :

1- Les turbo-alternateurs à inducteurs lisses (figure 12), sont accouplés à des turbines à vapeur ou hydrauliques tournant à grande vitesse Dans ce type de machine l'entrefer est constant, le rotor et de faible diamètre devant sa longueur. Il est utilisé pour des vitesses élevées (3000 tr/min). On les retrouve dans les turbo-alternateurs des centrales thermiques, il faut donc peu de pôles pour obtenir du 50 Hz

2- Les alternateurs à pôles inducteurs saillants (figure 13), dont la vitesse est relativement lente, sont entraînés par des turbines hydrauliques, des moteurs à gaz ou diesel . Utilisé pour les machines à faible vitesse (turbines hydrauliques) Grand diamètre du rotor devant la longueur.



Figure 12



Figure 13

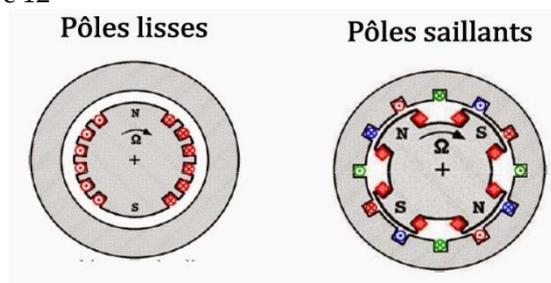


Figure 14 : Les formes d'alternateurs

VI.2 principe de fonctionnement :

VI.2.1 Induction électromagnétique :

- ✚ Un aimant immobile placé à proximité d'une bobine ne produit aucun effet.
- ✚ Le **déplacement** de cet aimant au voisinage de la bobine produit une **tension électrique** aux bornes de celle-ci.
- ✚ Le **déplacement** de l'aimant, donc de son champ magnétique, **induit** une tension aux bornes de la bobine. C'est le phénomène **d'induction électromagnétique**.
- ✚ Le signe **positif** ou **négatif** de la tension dépend du **sens** de déplacement de l'aimant.
- ✚ La **rotation** d'un aimant droit à proximité d'une bobine produit entre ses bornes une tension **alternative**. C'est ce dispositif qui est utilisé dans le fonctionnement de l'alternateur.

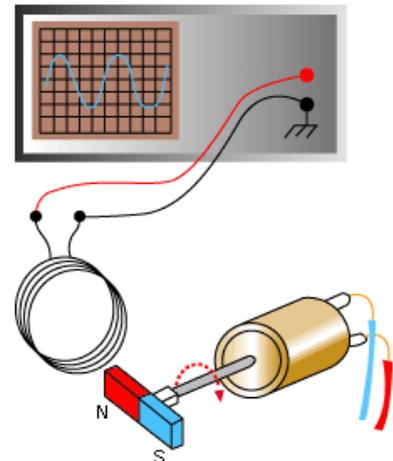


Figure 15 : Production d'une tension alternative lors de la rotation d'un aimant au voisinage d'une bobine.

VI.2 .2 Principe de fonctionnement de l'alternateur :

Le principe d'induction magnétique est généralement expérimenté en déplaçant un aimant permanent dans une bobine. Une tension se crée aux bornes de la bobine. Un alternateur fonctionne selon ce principe, un électroaimant, alimenté par un courant d'excitation, est en rotation à l'intérieur de trois bobines, il produit ainsi trois tensions triphasées alternatives décalées de 120°.

Les circuits électriques :

A) Rotor est inducteur (bobinage d'excitation) : Il est constitué d'un enroulement pratiqué sur le rotor est traversé par un courant continu dit " d'excitation i_e ". C'est lui qui permet la création des pôles magnétiques dits pôle nord et l'instauration d'un flux donné dans le circuit magnétique. Le système triphasé des forces électromotrices doit sa naissance à un champ magnétique tournant à intensité constante. Dans l'alternateur synchrone le rotor met en mouvement ce champ magnétique, il joue le rôle d'inducteur et absorbe la puissance mécanique nécessaire à sa rotation..

B) Stator est induit: Il est constitué de trois bobinages triphasés, de constitution symétrique (constituent le siège de la production électrique), pratiqués sur le stator de façon répartie et par lesquels transite la puissance électrique de la machine.

- Les grandeurs électrique extérieurs à la machines et nécessaires à son fonctionnement**
- ✚ Les tensions appliquées à chaque bobinage et les courants qui les traversent.
 - ✚ La pulsation électrique et la fréquence électrique correspondante.
 - ✚ Le courant inducteur

- Les grandeurs mécaniques externes**
- ✚ Le couple produit (ou reçu) sur l'arbre.
 - ✚ La vitesse de rotation dite ici de synchronisme.
 - ✚ La position angulaire du rotor avec l'axe de la phase de référence.

Remarques :

- ✚ Le rotor, le champ inducteur et le champ statorique tournent tous les trois à la même vitesse. Ce synchronisme entre les trois grandeurs est la raison pour laquelle l'alternateur est dit synchrone.
- ✚ La vitesse de rotation de l'alternateur est appelée la vitesse de synchronisme et est notée Ω_s lorsqu'elle est exprimée en rad/s et n_s lorsqu'elle est exprimée en tr/min.

VI.3 Schémas électrique équivalent:

Chaque phase de l'alternateur constitue un générateur monophasé et peut donc être représenté par un modèle équivalent de Thévenin. Si la machine est non saturée, c'est à dire dans des conditions de fonctionnement raisonnables. Les valeurs de l'impédance et de la force électromotrice ne dépendent pas de la charge électrique. Chaque phase est alors représentée par la modèle de **BEHN-ESCHENBURG**, reporté sur la figure 16.

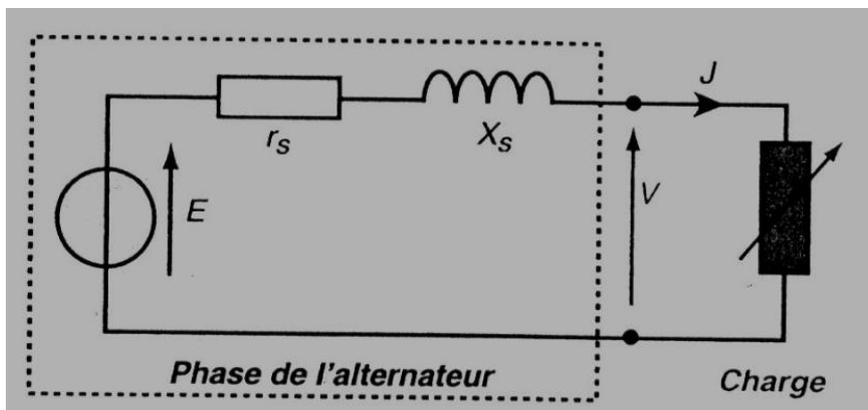


Figure 16 : Modèle de **BEHN-ESCHENBURG** (schéma électrique équivalent d'une phase de l'alternateur)

- ✚ La tension E est la force électromotrice induite par le champ tournant.
- ✚ La résistance r_s de l'enroulement représente les pertes par échauffement dans la phase et occasionne une chute de tension $r_s \cdot I$ en production.
- ✚ La réactance $X_s = L_s \cdot \omega$ est appelée la réactance synchrone et s'exprime en Ω . Elle représente les pertes du flux magnétique mais aussi la réaction magnétique d'induit.

En appliquant la loi des mailles dans le modèle de **BEHN-ESCHENBURG**. On arrive à la relation:

$$E = (r_s + j \cdot X_s) \cdot I + V$$

En pratique, dans un alternateur, la résistance est négligeable devant la réactance synchrone, ainsi:

$$E = j \cdot X_s \cdot I + V$$

VI.4 Détermination des grandeurs d'une phase:

Les grandeurs caractéristiques de chaque phase de l'alternateur peuvent être déterminées par le calcul ou la mesure. L'alternateur étant un système triphasé équilibré E et X_s sont les mêmes dans les trois phases.

A) Force électromotrice:

La force électromotrice induite E dans un bobinage dépend de sa géométrie et du nombre de spires d'une part et de l'intensité du champ magnétique et de la vitesse de rotation d'autre part. Ainsi dans le cas d'un alternateur on a : $E = K.N.\Phi.f$ (avec K coeficient de Kapp)

En régime non saturé, le flux magnétique étant proportionnel au courant inducteur ($\Phi = k.i$) et la fréquences des grandeurs statoriques induites dépendant de la vitesse et du nombre de pôles ($f = ns.p$). Ainsi: $E = K'.N..i.p.ns$

Les constantes K et K' n'étant facilement accessibles , il est plus simple d'évaluer E par la mesure.

Pour cela on réalise une mesure à vide (figure 17) . En effet si l'on supprime la charge, alors I s'annule est $E = V$. de sorte que la valeur efficace de la force électromotrice se mesure à vide à l'aide d'un voltmètre aux bornes de la phase.

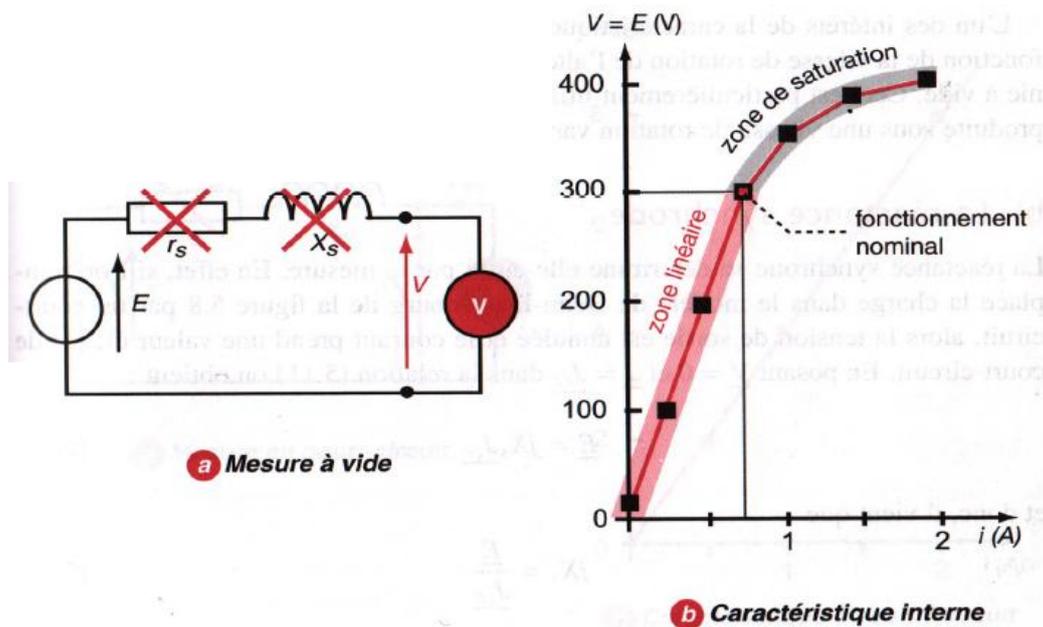


Figure 17 : Essai à vide de l'alternateur, (a) mesure de la force électromotrice, (b) caractéristique interne

- ✚ La force électromotrice induite dans une phase se mesure à l'aide d'un essai à vide.
- ✚ En fixant la vitesse de rotation et en faisant varier le courant inducteur, les valeurs de la force électromotrice décrivent la caractéristique interne de l'alternateur

B) Résistance r_s de l'enroulement :

On peut pour cela utiliser une méthode voltampère métrique ou brancher un ohmmètre entre deux phases de l'alternateur (figure 18) (cet essai se fait hors-tension):

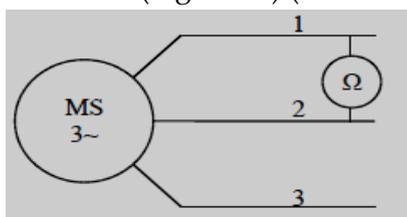


Figure 18

- ✚ L'ohmmètre mesure la résistance R entre deux enroulements
- ✚ La résistance r_s d'un enroulement est: $r_s = R/2$.

C) Réactance synchrone X_s :

La réactance synchrone X_s d'une phase se mesure à l'aide d'un essai en court circuit (figure19)

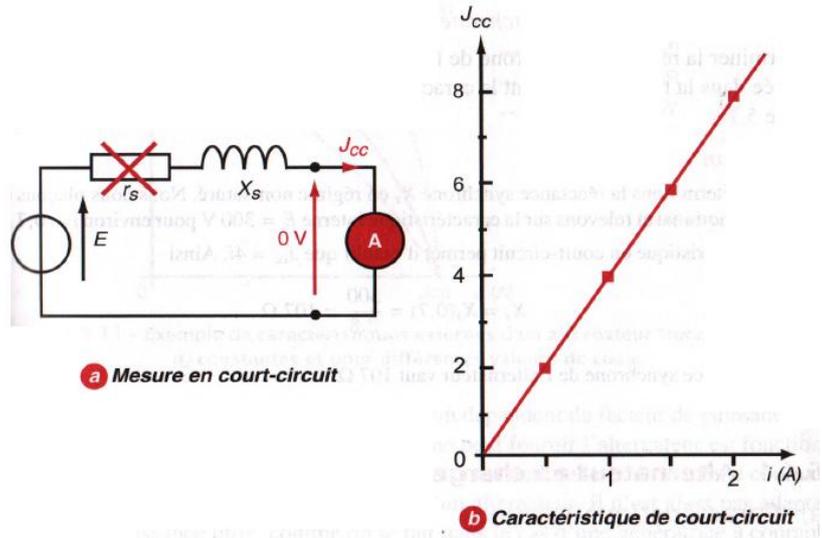
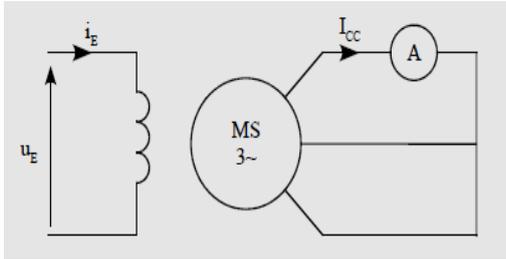


Figure 19: caractéristique en court-circuit
 (a) Méthode de mesure
 (b) Allure générale

Pour cet essai, la vitesse de rotation du rotor est n . Pour cette vitesse de rotation n et pour i_e connu, on connaît la tension E_v déterminée lors de l'essai à vide.

On court-circuite les 3 phases du stator et on mesure l'intensité de court-circuit I_{cc}

On détermine alors la valeur de X_s par la relation :
$$X_s = \sqrt{\left(\frac{E_v}{I_{cc}}\right)^2 - r_s^2}$$

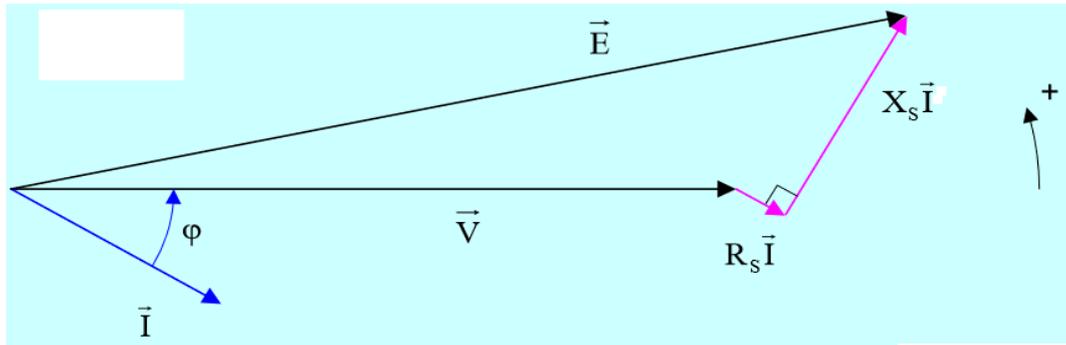
L'intensité du courant du court-circuit d'un alternateur est proportionnelle au courant d'excitation. ($I_{cc} = K \cdot i_e$)

Rapport du court-circuit:

C'est le rapport entre le courant d'excitation qui permet d'avoir la tension nominale à vide et le courant d'excitation qui permet d'avoir le courant nominale en court-circuit. ($acc = I_{e0n} / I_{ecn}$).

VI.5 Diagramme synchrone: (diagramme de BEHN-ESCHENBURG)

	<p>Hans Behn-Eschenburg (1864-1938). Ses travaux sur le moteur monophasé à courant alternatif sont capitaux dans l'électrification des chemins de fer. Il se distingue dans la construction des moteurs monophasés à collecteur pour la traction.</p> <p>Ses travaux portent sur la technique du courant alternatif, notamment sur le moteur asynchrone et sur le moteur monophasé à courant alternatif avec décalage du champ de commutation qui marque un tournant capital dans l'électrification des chemins de fer. Behn-Eschenburg a donné son nom au diagramme à une réactance de la machine synchrone.</p>
--	--



$$\vec{V} = \vec{E} - (R_s \vec{I} + X_s \vec{I})$$

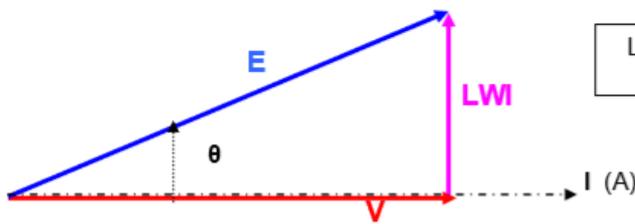
Figure 20

- ⚡ E : fem induite (ou fem synchrone)
- ⚡ I : courant de ligne
- ⚡ V : tension simple
- ⚡ Φ déphasage entre V et I
- ⚡ R_s : résistance d'un enroulement statorique (couplage Y)
- ⚡ $X_s = L_s \cdot \omega$: réactance synchrone d'un enroulement statorique
- ⚡ Chute de tension en charge : $\Delta V = E - V$

VI.6 Alternateur en charge:

a) Diagrammes De Fonctionnement En Charge

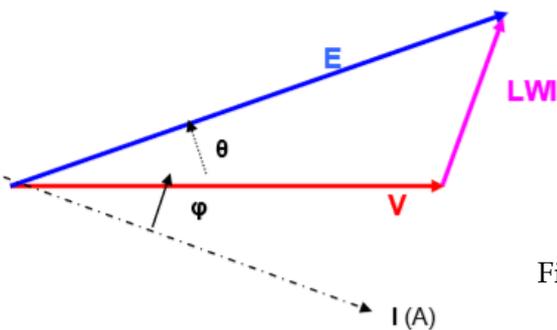
Charge resistive



L'alternateur produit uniquement de la puissance active

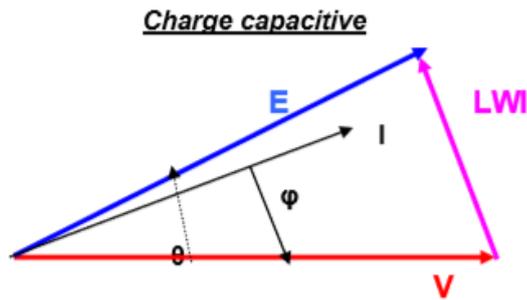
Figure 21

Charge inductive



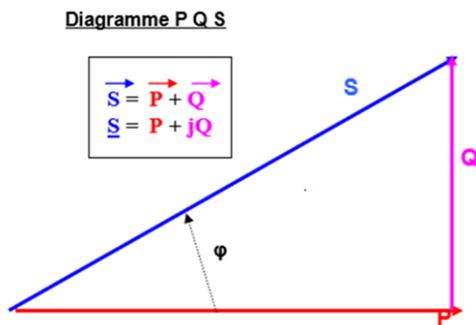
L'alternateur produit de la puissance active et de la puissance réactive
L'alternateur est surexcité

Figure 22



L'alternateur produit de la puissance active et absorbe de la puissance réactive
L'alternateur est sous excité

Figure 23



ALTERNATEUR MONOPHASE
 $P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi$
 $Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi$
 $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$

ALTERNATEUR TRIPHASE
 $P = S \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi$
 $Q = S \sin \varphi = \sqrt{3} UI \sin \varphi$
 $S = \sqrt{3} UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Figure 24

Remarque : Etant donné que seule la puissance active est prise en compte pour la facturation aux abonnés, les alternateurs devront fonctionner avec un bon facteur de puissance

b) Caractéristiques :

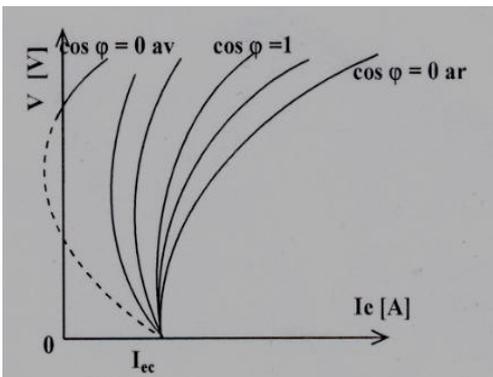


Figure 25

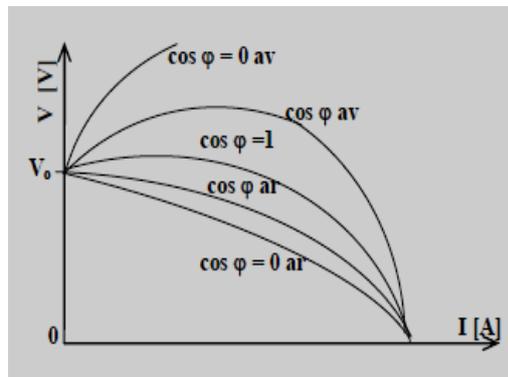


Figure 26

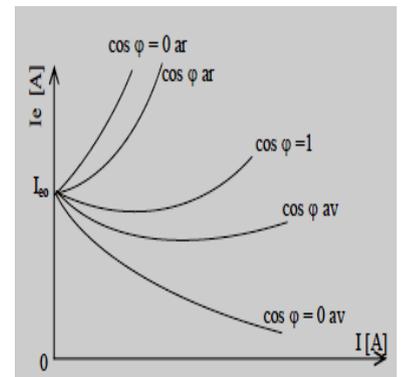


Figure 27

b-1) Caractéristique en charge:

C'est une courbe de type $V = f(I_e)$ à fréquence nominale, courant de charge et déphasage constant (Figure 25). C'est une caractéristique relevée en charge. On remarque bien l'effet démagnétisant d'une charge inductive et l'effet magnétisant d'une charge capacitive.

b-2) Caractéristiques externes:

Ce sont les relations de forme : $V = f(I)$ à fréquence nominale, courant d'excitation et déphasage constants. (figure 26). Prélèvement en charge ou prédétermination

b-3) Caractéristiques de réglage:

C'est les courbes : $I_e = f(I)$ à fréquence et tensions nominales et à $\cos \varphi$ constant (Figure 27). Ces courbes sont très importantes pour le calcul des dispositif d'excitation et de régulation (les alternateurs travaillent généralement à tension constante). Elles sont prélevées expérimentalement quand c'est possible ou bien prédéterminées.

VI.7 Bilan des puissances et des pertes dans un alternateur synchrone:

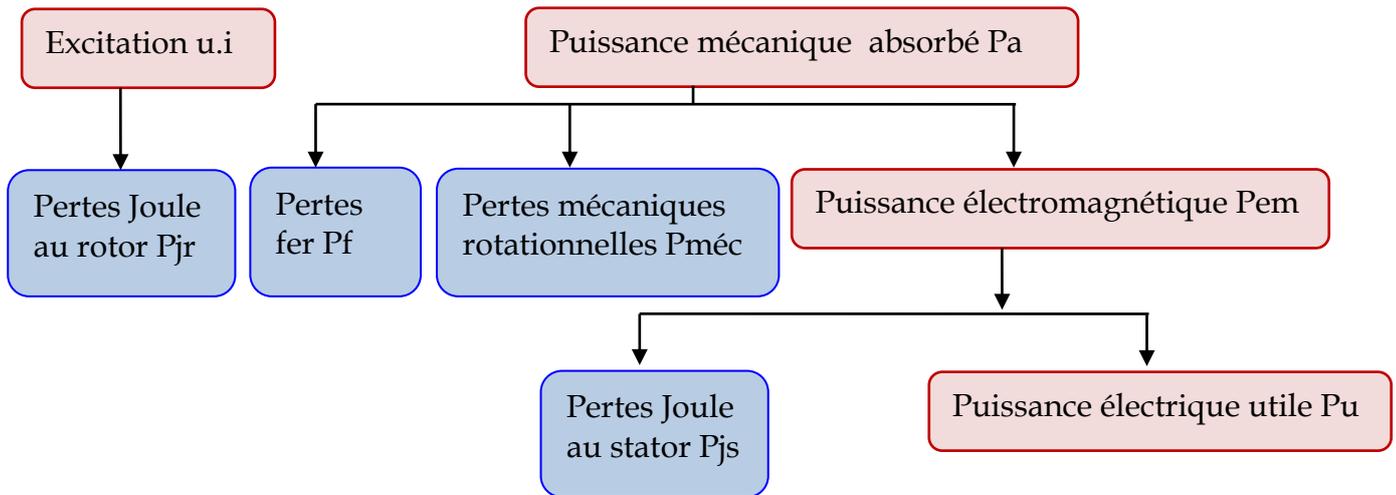


Figure 28 : Bilan des puissances et des pertes dans un alternateur synchrone

A) Couple appliqué et puissance absorbée:

Dans un alternateur la puissance absorbée P_a est une puissance mécanique. Elle correspond au couple appliqué par l'arbre de transmission sur le rotor T_a multiplié par la vitesse angulaire de rotation:

$$P_a = T_a \cdot \Omega_s = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot T_a$$

De plus même si l'alternateur est une génératrice, une puissance électrique $u.i$ doit être fournie au rotor inducteur de la machine synchrone de façon à fournir l'excitation et à créer le champ d'induction. Il faut prendre en compte la puissance P_{jr} consommée par le rotor et dissipée en pertes joule

B) Puissance et couple électromagnétique:

La puissance électromagnétique est à la fois mécanique et électrique. Elle permet la création des grandeurs E et J déphasé de ψ de sorte que: $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega_s = 3 \cdot E \cdot J \cdot \cos\psi$.

C) Puissance utile:

La puissance utile d'un alternateur synchrone est la puissance électrique fournie aux bornes du stator induit. Puisque l'induit fournit une puissance triphasée, celle ci s'exprime comme :

$$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

D) Les pertes:

On trouve dans l'alternateur des pertes constantes et des pertes variables. Comme dans le cas de la génératrice à courant continu, ces pertes peuvent être classées en deux familles.

D.1) Les pertes Joule: Ce sont les pertes par échauffement dans les circuits de l'induit et de l'inducteur.

Au stator-induit, l'énergie électrique est triphasé. Les pertes Joule au stator P_{js} sont alors calculables par la relation: $P_{js} = (3/2) \cdot R \cdot I^2$ (R la résistance entre deux bornes de l'induit et la relation entre R et r_s , dépend du câblage de l'alternateur.

Remarque : La relation qui relie entre R et la résistance de chaque enroulement r_s est:

- ❖ pour un montage étoile: $R = 2 \cdot r_s$
- ❖ pour un montage triangle: $R = (2/3) \cdot r_s$

Au rotor inducteur, l'énergie électrique est continue. Les pertes Joule au rotor se calculent donc selon l'expression: $P_{jr} = u \cdot i = r \cdot i^2$.

D.2) Les pertes collectives Pc:

Ce sont les pertes fer et les pertes rotationnelles, elles sont considérées comme constantes et on les détermine au travers d'un essai à vide. $P_c = P_f + P_{rot}$

Remarque: Une mesure de la puissance absorbée à vide par l'alternateur synchrone suffit à déterminer les pertes collectives de celui-ci.

E) Le rendement:

On établit les relations permettant de déterminer le rendement par une mesure directe:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + u \cdot i} = \frac{P_u}{P_u + p_{js} + p_f + p_{rot} + u \cdot i}$$

VI.8 Alternateur en production:

L'alternateur synchrone de par sa construction et son principe de fonctionnement peut produire des puissances importantes à fréquence fixe. Ne nécessitant pour fonctionner qu'une puissance mécanique pouvant être recueillie via une turbine et du courant continue.

VI.8.1 Production autonome:

Deux exemples concrets de la production autonome par un alternateur triphasé sont le groupe électrogène et l'alternateur de voiture. Dans les deux cas, la valeur efficace de la tension de sortie doit être maintenue constante. Le groupe électrogène doit de plus délivrer une fréquence fixe adaptée à la consommation des appareils et doit donc travailler à vitesse constante.

VI.8.2 Production sur un réseau:

A) Alternateur couplé à un réseau:

Le cas particulier d'un alternateur couplé à un réseau est important à étudier. Dans ce cas, la tension aux bornes de l'alternateur, V , est constante (en amplitude et en phase) puisque c'est la tension du réseau. Par ailleurs, on néglige souvent la résistance r_s du schéma équivalent devant l'inductance synchrone. Le diagramme de Fresnel de la relation de maille du schéma monophasé équivalent est alors représenté sur la figure 29. On y précise les relations particulières qui relient les projections de la tension $jX_s \cdot I$ aux puissances active ($P = 3 V I \cos \varphi$) et réactive ($Q = 3 V I \sin \varphi$)

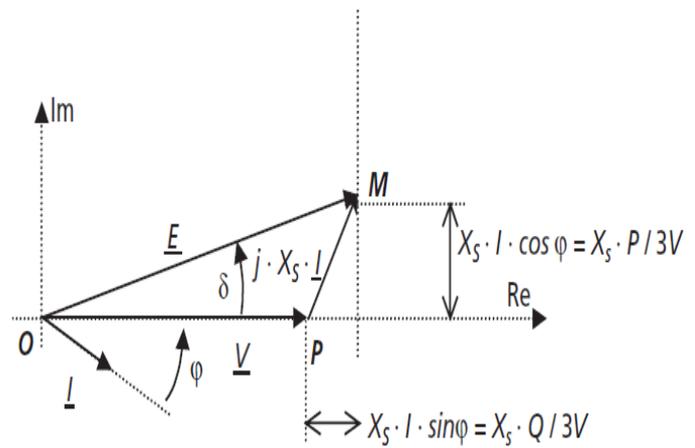


Figure 29

Remarque importante : On constate sur ce graphique que les projections du vecteur $jX_s \cdot I$ sur les axes du repère représentent à un coefficient près la puissance active et la puissance réactive fournies par l'alternateur.

À excitation constante : Si le courant inducteur est constant, la force électromotrice E est d'amplitude constante et le point M est sur un cercle de centre O et de rayon $E = k I_e$. La puissance réactive peut être positive ou négative, et la puissance active possède un maximum pour le cas où $\delta = 90^\circ$. Dans ce cas $P_{\text{Max}} = (3V/X_s) E$

B) Réseau fini : Lorsqu'un alternateur participe à la production sur un réseau, il travaille en parallèle avec d'autres alternateurs. Lorsque le réseau est tel qu'il présente une puissance bien plus importante que celle de l'alternateur lui-même, on dit que l'on a affaire à un réseau fini. C'est bien entendu le cas du réseau SONELGAZ. La tension efficace d'induit V ainsi que sa fréquence sont alors imposées par le réseau et l'alternateur se voit contraint de tourner à une vitesse imposée.

C) Alternateur flottant: Reprenons le modèle Behn-Eschenburg (figure 20) si $V = E$, alors le courant J circulant dans la phase est nul. L'alternateur tourne à la vitesse de synchronisme imposé par V mais ne produit ni n'absorbe aucune puissance (hormis les pertes) on dit que l'alternateur est flottant.

D) Perte de synchronisme: En production reliée au réseau il y a décrochage des lors que l'alternateur n'est plus synchronisé; on parle de perte de synchronisme. Lorsqu'il décroche, un alternateur ne fournit plus de puissance électrique au réseau et doit être déconnecté. Si le décrochage se produit en période de forte consommation énergétique, la demande se reporte sur d'autres alternateurs qui risquent à leur tour de décrocher. Pour éviter cela le réseau et les alternateurs sont surveillés en permanence.

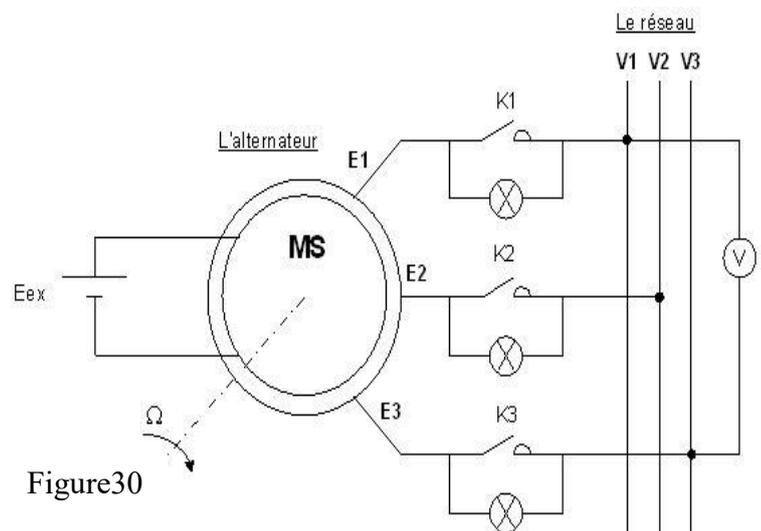
E) Couplage d'un alternateur triphasé sur le réseau:

Le couplage est l'opération qui consiste à connecter les bornes de l'alternateur à celles du réseau triphasé pour débiter de la puissance électrique.

On n'effectue le couplage que lorsque les bornes homologues de l'alternateur et du réseau sont au même potentiel; sinon la connexion s'accompagne de courants importants susceptibles de provoquer des chutes de tension, la disjonction des appareils de protection et un couple important qui pourront causer la rupture de l'accouplement rotor turbine.

Le couplage est opéré en fermant simultanément les interrupteurs K_1 , K_2 et K_3 à l'extinction simultanée des lampes.

Pour éviter l'apparition de courants importants dans les enroulements d'un alternateur le fait de le connecter sur le réseau, on effectue le couplage lorsque les bornes homologues (connectées entre elles) de l'alternateur et du réseau sont aux mêmes potentiels. Il faut que



les systèmes de tensions étoilées triphasées V_1, V_2, V_3 (aux bornes du réseau) et E_1, E_2, E_3 (aux bornes de la machine) satisfont aux conditions suivantes :

- ✚ avoir le même ordre de succession,
- ✚ avoir la même valeur efficace des tensions,
- ✚ sont à la même fréquence,
- ✚ les tensions homologues (exemple V_1, E_1) ont le même déphasage.

La connexion de l'alternateur sur le réseau ne se fait qu'au moment où toutes les conditions citées ci-dessus soient satisfaites.

VII. Moteur synchrone:

VII.1 Principe de fonctionnement :

Le moteur synchrone converti la puissance électrique en puissance mécanique. Pendant longtemps, ce moteur fût relativement peu utilisé en raison de sa difficulté à réguler sa vitesse. Ce problème est maintenant résolu grâce au progrès de l'électronique de puissance et des onduleurs qui lui sont associés. Le stator de la machine est alimenté en triphasé ; il se crée alors un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation $n = f/p$ ce qui fait que le rotor de la machine tourne lui-aussi à la fréquence de rotation n .

Le moteur synchrone est aussi un moteur utilisé pour la motorisation des ascenseurs. Ces dernières années on a vu ce type de moteur revenir en force parallèlement au développement des variateurs de vitesse.

Le moteur synchrone se compose, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La figure 31 montre un rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés en courant continu.

Après le démarrage, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge. On notera aussi que :

- ✚ La charge (le système d'ascenseur) ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
- ✚ Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes

Remarques :

1. Les moteurs synchrones sont construits de manière identique ou semblable aux alternateurs triphasés.
2. Le rotor des moteurs synchrones tourne en synchronisme avec le champ magnétique tournant généré par le stator.
3. On peut faire varier le facteur de puissance (F.P) des moteurs synchrones en variant le courant d'excitation.
4. Lorsqu'il est sous-excité, le moteur synchrone a un F.P. arrièrè. Au contraire, lorsqu'il est surexcité, il a un F.P. avant.

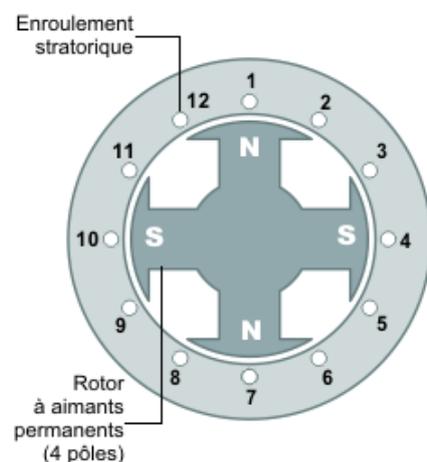


Figure 31

5. On désigne par l'expression "compensateur synchrone" un moteur synchrone tournant à vide et dont la fonction est d'augmenter le F.P. du réseau.
6. Pour des applications à basse vitesse les moteurs synchrones offrent un meilleur rendement que les moteurs asynchrones.

VII.2 Schéma électrique équivalent:

La figure 32 représente le modèle de Behen-Eschenburg de la machine en mode moteur. Toutes les grandeurs ont la même signification que dans le cas de l'alternateur.

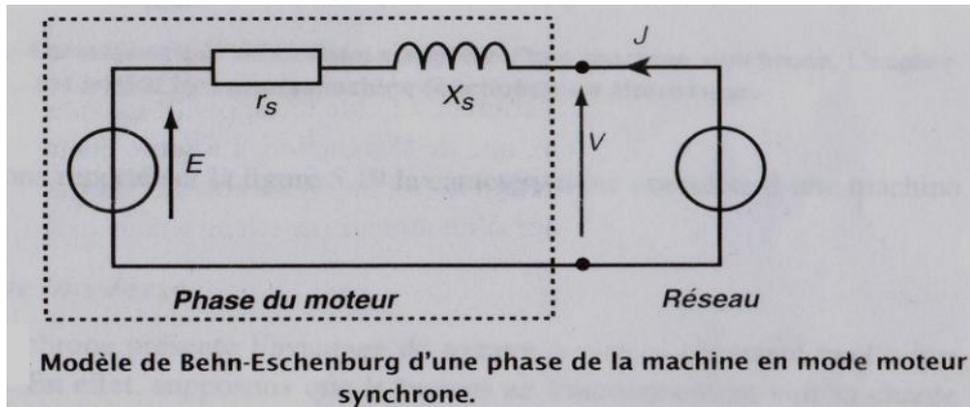


Figure 32

Remarque: Une fois couplée au réseau, si la machine est chargée mécaniquement, elle représente tout simplement un récepteur connecté au réseau. Les schémas équivalents sont les mêmes que précédemment mais en convention récepteur, ce qui ne modifie en rien la maîtrise de l'énergie réactive basée sur la modification du courant inducteur.

VII.3 Diagramme synchrone: (diagramme de BEHN-ESCHENBURG)

Les relations entre les grandeurs électriques du moteur sont reportées dans le diagramme synchrone de la figure 34. On trouve deux situations:

- ✚ la machine est sous-excitée ($E < V$).
- ✚ la machine est sur excitée ($V < E$)

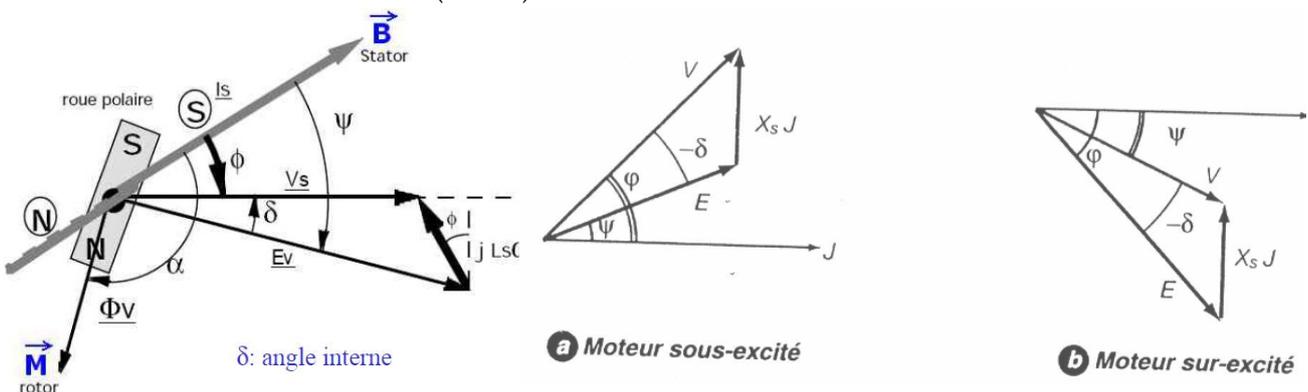


Figure 33: angle interne δ , induction B et moment magnétique M

Figure 34 : Diagramme de Behn-Eschenburg d'une phase du moteur dans le cas (a) sous excité et le cas (b) sur excité.

Remarque: Lorsque le moteur est sous-excité la tension du réseau est en avance sur le courant et le moteur consomme de la puissance réactive. En revanche, lorsqu'il est fortement surexcité la tension du réseau est en retard sur le courant et le moteur produit de la puissance réactive.

VII.4 Angle de décalage mécanique et décrochage:

L'angle δ (voir figures 33 et 34) représente également l'angle de décalage mécanique entre le rotor et le champ statorique lors d'un fonctionnement moteur. Si cet angle dépasse 90° , le moteur rentre dans une phase instable où le rotor « décroche » de l'attraction du champ tournant. La conséquence est que le moteur s'arrête et qu'il faut le redémarrer. Toutes les commandes qui permettent de faire fonctionner les moteurs synchrones à vitesse variable permettent en réalité d'asservir la position du champ tournant pour que l'angle mécanique reste à une valeur toujours inférieure à 90° . On parle alors de « machine synchrone autopilotée ».

VII.5. Rendement:

Le moteur synchrone présente un rendement très élevé de l'ordre de 95% à 99%. Il peut déployer de plusieurs MW. Le rendement d'un moteur synchrone est:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{T_u \cdot \Omega \text{ (puissance mécanique)}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi + \text{pertes Joule inducteur}} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{\sqrt{3}UI\cos\varphi - p_{\text{fer}} - p_{\text{méca}} - P_{\text{Jinduit}}}{\sqrt{3}UI\cos\varphi + P_{\text{Jinducterlr}}}$$

VII.6 Décrochage:

La stabilité en vitesse du moteur, si elle a ses avantages, a aussi un inconvénient majeur. La vitesse ne variant pas, toute augmentation de la charge augmente un peu plus l'angle interne. Tant que la charge n'est pas trop importante la vitesse reste la même, mais dès que le couple devient trop important le moteur s'arrête immédiatement.

VIII. Avantages et inconvénients des moteurs synchrones:

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✚ Autour d'un point de fonctionnement donné et à puissance constante, le réglage du courant inducteur permet d'obtenir un facteur de puissance unitaire. ✚ L'absence des contacts glissants permet de faire fonctionner le moteur synchrone de la même manière qu'une MCC, mais sans usure et donc à des vitesses beaucoup plus grandes. L'illustration la plus médiatique réside dans le record du monde de vitesse sur rail de 600 km/h attribué à une rame de TGV entraînée par des motrices synchrones autos pilotées. ✚ Il peut travailler avec un facteur de puissance proche de 1 ($\cos \varphi \sim 1$). Il contribue donc à redresser le $\cos \varphi$ global de l'installation électrique. ✚ la vitesse du moteur est constante quelle que soit la charge (intéressant dans le cas des ascenseurs). ✚ Il peut supporter des chutes de tension important sans décrocher. 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ S'il n'est pas associé à un variateur de vitesse, il a des difficultés à démarrer. ✚ il peut décrocher en cas de forte charge (pas intéressant au niveau des ascenseurs nécessitant un couple important)....

IX- Réversibilité:

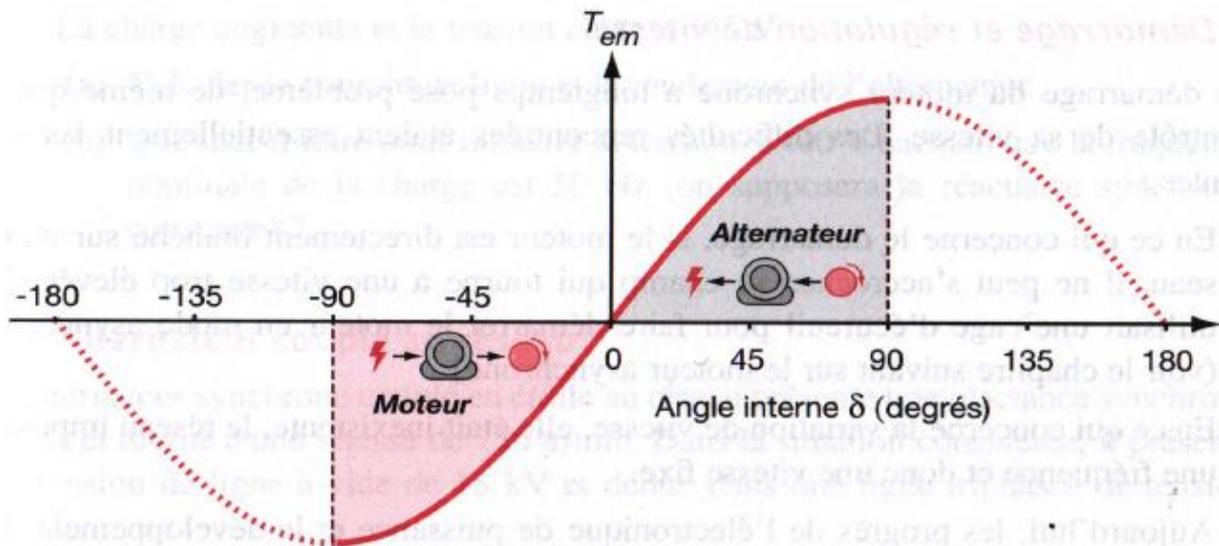


Figure 35 : caractéristique mécanique complète d'une machine synchrone. L'angle δ est positif lorsque la machine.

X. Exercices :**Exercice N°1 :**

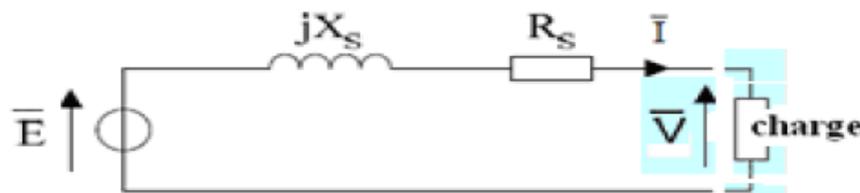
I). Un alternateur hexa polaire tourne à 1000 tr/min. Calculer la fréquence des tensions produites. Même question pour une vitesse de rotation de 1200 tr/min.

II) Un alternateur triphasé a une tension entre phases de 400 V. Il débite un courant de 10 A avec un facteur de puissance de 0,80 (inductif). Déterminer les puissances active, réactive et apparente mise en jeu.

III) Un alternateur triphasé débite un courant de 20 A avec une tension entre phases de 220 V et un facteur de puissance de 0,85. L'inducteur, alimenté par une source de tension continue de 200 V, présente une résistance de 100. L'alternateur reçoit une puissance mécanique de 7,6 kW. Calculer : la puissance utile fournie à la charge, la puissance absorbée, le rendement.

Exercice N°2 (Ex3 concours doctorat TIARET 2021-2022) :

Le schéma équivalent de l'induit de l'alternateur est :



La résistance de l'enroulement de l'induit est : $R_S = 0,3 \Omega$.

La caractéristique à vide, pour une vitesse de rotation de 1500 tr/min est donnée par :

$E = 200 \cdot i$ avec : i le courant d'excitation (en A) ; E la valeur efficace de la fem (en V)

- 1) Calculer le nombre de paires de pôles de l'alternateur sachant qu'il doit tourner à 1800 tr/min pour fournir une tension sinusoïdale de fréquence $f = 60$ Hz.
- 2) Un essai en court-circuit à 1500 tr/min, donne un courant d'induit $I_{CC} = 20$ A pour un courant d'excitation $i = 0,4$ A. Montrer que la réactance synchrone (en \square) peut s'écrire : $X_s = \sqrt{\left(\frac{E}{I_{CC}}\right)^2 - (R_s)^2}$ Faire l'application numérique.
- 3) L'alternateur alimente une charge résistive R qui consomme un courant d'intensité efficace $I = 20$ A. La tension $v(t)$ aux bornes de la résistance a pour valeur efficace $V = 220$ V et pour fréquence $f = 50$ Hz.
 - a) Quelle est la vitesse de rotation de l'alternateur (en tr/min) ?
 - b) Calculer la résistance R de la charge.
 - c) Calculer la puissance utile fournie par l'alternateur à la charge.
 - d) Montrer que la fem de l'alternateur E est égale à 240 V.
 - e) En déduire l'intensité du courant d'excitation i .
 - f) Les pertes collectives de l'alternateur sont évaluées à 300 W. La résistance de l'excitation est $r = 200 \Omega$. En déduire le rendement de l'alternateur.

Exercice N°3 (concours doctorat DJELFA 2024-2025) :

Un alternateur triphasé dont les enroulements du stator sont couplés en étoile, fournit en charge normale un courant d'intensité efficace $I = 200$ A sous une tension efficace entre phases $U = 5$ kV ($f = 50$ Hz) lorsque la charge est inductive ($\cos\varphi = 0,87$). L'expression de la tension simple $\bar{V} = V e^j$. La

résistance d'un enroulement du stator est égale à $R_s = 0,2 \Omega$. La résistance des enroulements du rotor est $r = 50 \Omega$. La vitesse de rotation du rotor est $n = 750 \text{tr/mn}$. Les pertes dites "collectives ou constantes" sont évaluées $P_c = 70 \text{ kW}$

- ✚ Un essai à vide a permis d'établir que $E = 60.6xi$ avec: i est l'intensité du courant d'excitation en Ampères et E la valeur efficace par phases en Volts.
 - ✚ Un essai en court-circuit a donné, pour un courant d'excitation rotor d'intensité $i = 40 \text{ A}$, un courant dans les enroulements du stator d'intensité $I_{cc} = 250 \text{ A}$.
- 1) Quel est le nombre de pôles du rotor ? Calculer la réactance synchrone X_s de l'alternateur.
 - 2) Trouver la f.é.m. synchrone E en charge nominale. En déduire l'impédance de la charge Z_c .
 - 3) Quelles sont les pertes joules stators P_{js} et les pertes joules rotor P_{jr} . Calculer la puissance P_u nominale.
 - 4) Calculer la puissance absorbée P_a de l'alternateur. En déduire le rendement au fonctionnement nominal. Dans ces conditions en déduire la puissance P_{mec} reçu.

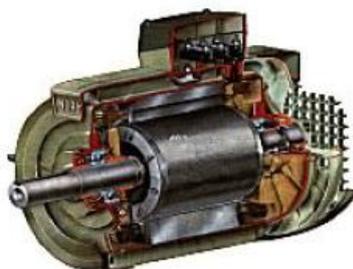
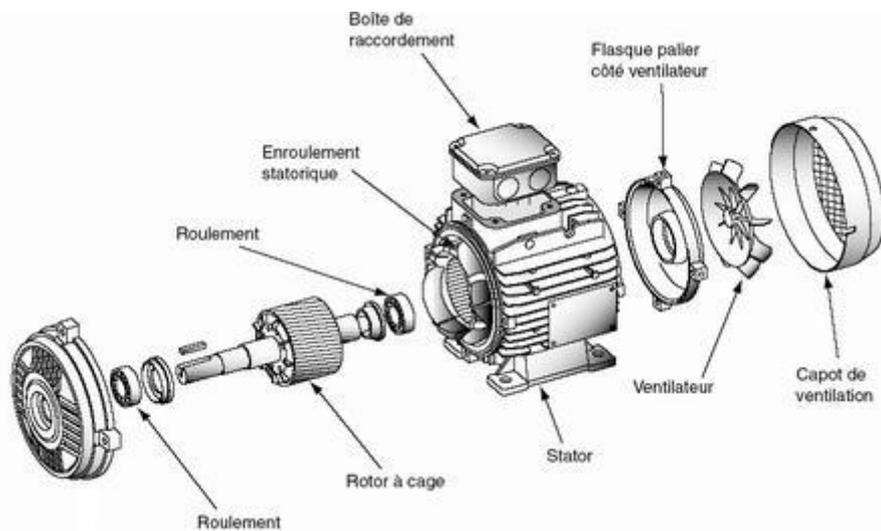
Exercice N°4:

Un alternateur triphasé couplé en étoile fournit un courant de 250 A sous une tension entre phase $U = 400 \text{ V}$ à 50 Hz avec un facteur de puissance de $\sqrt{3}/2$ (charge inductive)

- 1) Calculer la puissance utile de l'alternateur.
- 2) La résistance mesurée entre phase et neutre du stator est $0,03 \Omega$. Calculer les pertes Joule au stator.
- 3) L'ensemble des pertes collectives et par effet Joule au rotor s'élève à 6 kW . Calculer le rendement de l'alternateur.
- 4) La réactance synchrone de l'alternateur est $X_s = 0,75 \Omega$, la tension entre phase et neutre est $V = 230 \text{ V}$. En utilisant le diagramme de Behn-Eschenburg déterminer la tension à vide E entre phase et neutre ($1 \text{ cm} = 20 \text{ V}$)

CHAPITRE IV

MACHINES ASYNCHRONES



I. Introduction:

On appelle machine asynchrone, une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, qui à 2 enroulements dont un seul (le primaire) est alimenté par un réseau électrique de pulsation ω ; alors que la 2ème (le secondaire) est fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques, généralement ce type de machines est plus utilisée en moteur asynchrone (en triphasé).

Les machines asynchrones, également appelées " machines à induction" présentent l'énorme avantage de produire un couple moteur inconditionnel ne pouvant souffrir d'un quelconque phénomène de décrochage. La stabilité de la vitesse de ce type de machines (toujours légèrement inférieur à la vitesse de synchronisme imposé par le stator), la facilité de leurs construction et leurs robustesse ont longtemps justifié leurs utilisations massive dans des divers applications.

Aujourd'hui, ce type de machine est très utilisé en variation de vitesse grâce à l'existence de convertisseurs statiques qui permettent la maîtrise de la fréquence des courants d'alimentation. La commande dite scalaire de la machine permet, malgré les variations de la fréquence correspondant aux différentes vitesses désirées de garantir un couple maximal constant.

NB : Comme les autres machines électriques (machine à courant continu, machine synchrone), la machine asynchrone est un convertisseur électromécanique basé sur l'électromagnétisme permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant électrique (alternatif) et un dispositif mécanique.

II. Le moteur asynchrone:

II.1 Historique :

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : En 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone^{1,2}, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1883.



Mikhaïl Ossipovitch Dolivo-Dobrovolsky ;(1861 -1919) est un spécialiste d'origine russe du génie électrique. Il est l'inventeur d'un générateur de courants triphasés qui prendra le pas sur les générateurs de courants alternatifs biphasés et de courant continu.

En 1889, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891

II.2 Généralités

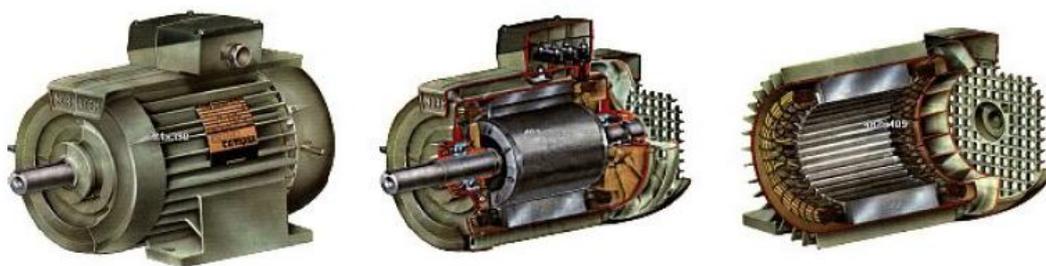
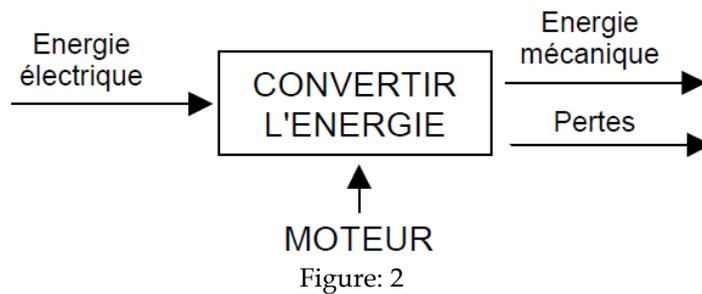


Figure: 1

Le moteur asynchrone converti l'énergie électrique en énergie mécanique (Figures 1 et 2) :

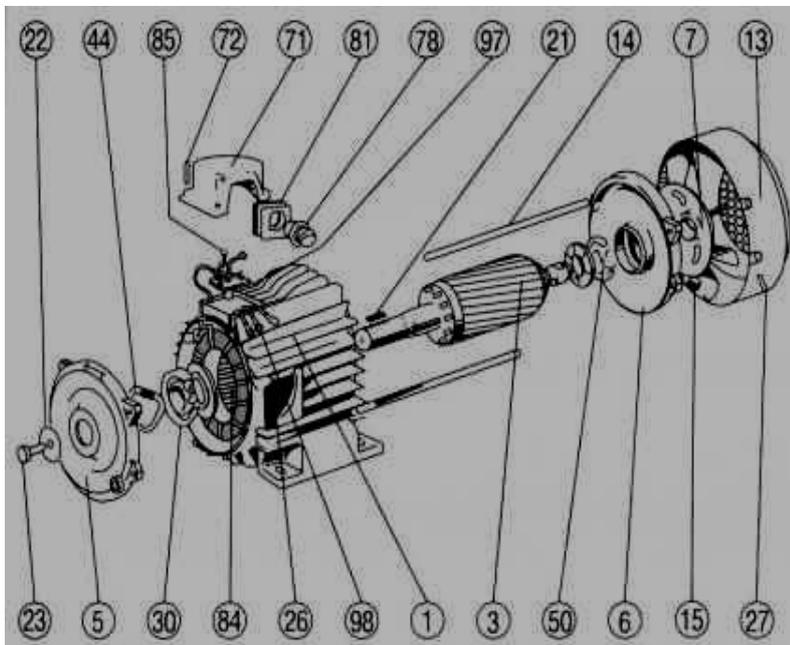


La particularité du moteur asynchrone est de fonctionner avec un induit (rotor) en court-circuit sur lequel il n'y a pas besoin de connexion électrique. Ceci permet de s'affranchir des problèmes liés aux collecteurs et aux balais rencontrés dans les moteurs à courant continu par exemple.

Le moteur asynchrone peut selon sa construction être connecté par son circuit inducteur à un réseau électrique alternatif monophasé ou polyphasé. Ceci étant les moteurs triphasés présentent pour une masse donnée de meilleurs rendements et de plus grands couples que leurs homologues monophasés.

Pour une puissance donnée le moteur asynchrone offre un excellent rapport qualité prix. En effet l'absence **de collecteurs et des balais** fait de lui un moteur facile à construire, robuste et demandant très peu d'entretien. Il offre de plus sous sa forme triphasée un fort couple de démarrage. Par ailleurs l'existence d'un glissement de vitesse lui permet de ne pas décrocher lors d'une variation de la charge ou lorsque la tension d'alimentation chute légèrement. Le **moteur asynchrone** est de beaucoup le moteur le plus utilisé dans l'ensemble des applications industrielles (80%).

II.3 Constitution :



85 Vis de fixation planchette à bornes

97 Vis bornes de masse

98 Barrettes de connexion

- 1 Carter et stator bobiné
- 3 Rotor
- 5 Flasque côté accouplement
- 6 Flasque côté ventilation
- 7 Ventilateur
- 13 Capot de ventilateur
- 14 Tige d'assemblage
- 15 Ecrou de tige d'assemblage
- 21 Clavette de bout d'arbre
- 22 Rondelle de bout d'arbre
- 23 Vis de serrage rondelle
- 26 Plaque signalétique
- 27 Vis fixation capot
- 30 Roulement côté accouplement
- 44 Rondelle élastique
- 50 Roulement côté ventilateur
- 71 Boîte à bornes
- 72 Vis fixation boîte à bornes
- 78 Presse-étoupe
- 81 Plaque support presse-étoupe
- 84 Planchette à bornes

Figure 3

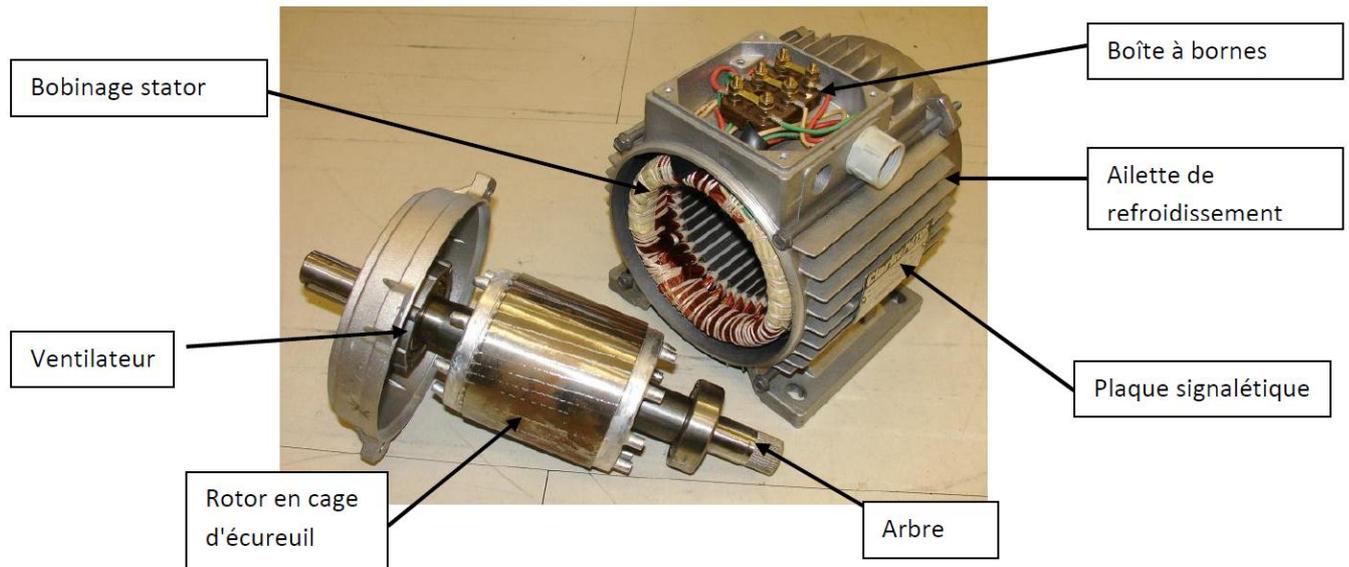


Figure 4

Un moteur asynchrone comprend deux parties principales, le stator (partie fixe) et le rotor (partie mobile) (figure 4) :

A) Le stator : comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles ferromagnétiques identiques qui constituent un cylindre creux ; ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé 2p polaires. Ce bobinage logé dans le circuit magnétique est appelé **primaire** de la machine asynchrone (Fig 5).

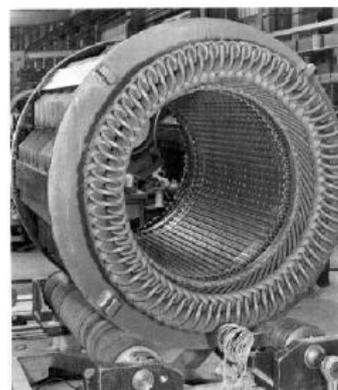
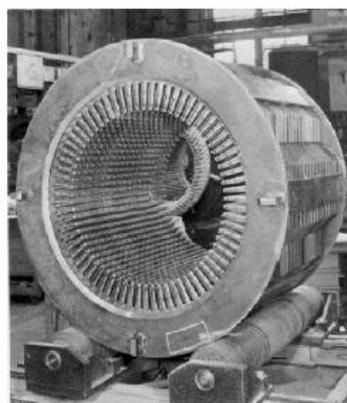


Figure 5

Remarque1 : Le stator des moteurs asynchrones triphasés est le même que celui du moteur synchrone ou de l'alternateur, c'est lui qui crée le champ tournant.

Remarque 2 : L'enroulement est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de la plaque à bornes de la machine, ce qui le permet de l'alimenter en couplage Y ou en Δ (figure 6).

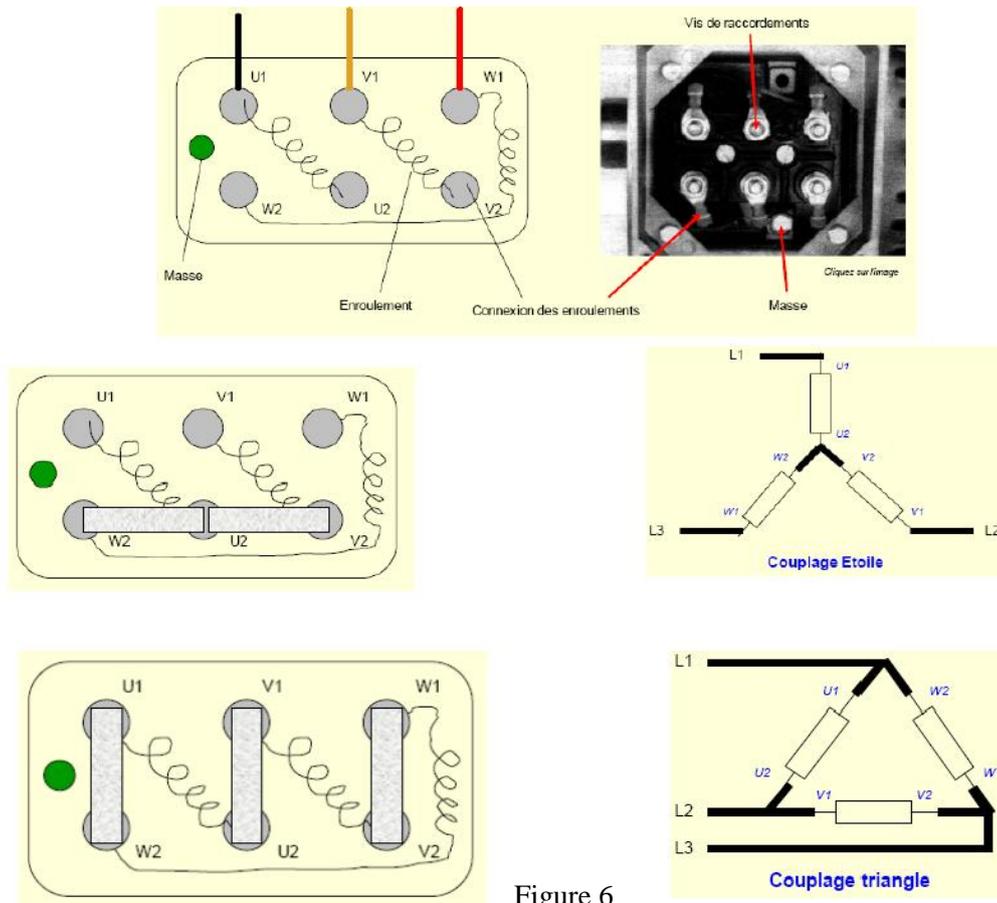


Figure 6

Remarque3 : Le stator peut être alimenté selon deux couplages : étoile ou triangle. La tension aux bornes des enroulements (bobinages) ne sera pas la même suivant le couplage.
 On trouve ce type d'indication sur la plaque signalétique comme indiqué sur la figure 7 :

Type LS 90 Lz : moteur de 90 mm de hauteur d'axe	COS ϕ : 0,78 : facteur de puissance	595257/3 : numéro de série
---	--	-----------------------------------

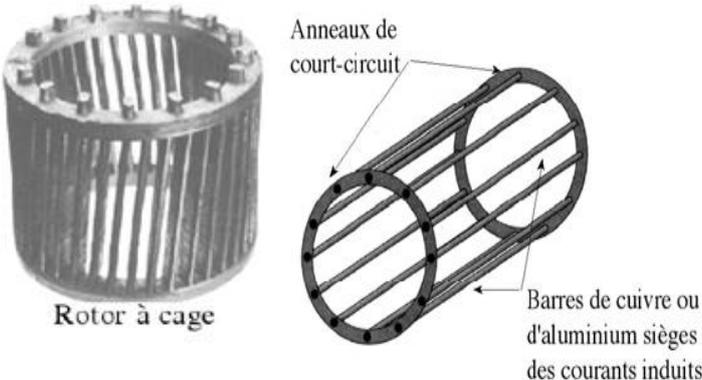
KW : 1,5 : Puissance mécanique		ΔV 220 A 6,65 : valeur de tension et courant correspondant au couplage triangle	
1440 Tr/min : Fréquence de rotation		Y 380 A 3,84 : valeur de tension et courant correspondant au couplage étoile	

Hz 50 : fréquence de fonctionnement 50Hz	Ph 3 : moteur triphasé	Rd^t % 76 : Rendement	T^c : température ambiante maximale pour l'utilisation
---	-------------------------------	--	---

LEROY SOMER 16015 ANGOULÊME FRANCE			
MOTEUR ASYNCHRONE - NFC 51-111 NOV.79			
Type	LS 90 Lz	595257/3	
kW	1,5	cos ϕ 0,78	ΔV 220 A 6,65
		rd ^{to} % 76	λY 380 A 3,84
tr/min	1440	isoclasse	amb ^{ce} °C 40
Hz	50	ph 3	S. ce S1
Roulements Made in FRANCE Autres Pièces Made in FRANCE			

Figure 7

b) **Le rotor** : il se compose d'un cylindre de tôles ferromagnétiques poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il existe deux type de rotor ; le rotor bobiné (Fig 9) et le rotor à cage d'écureuil (rotor en court-circuit) (Fig 8).

Le rotor à cage d'écureuil	Le rotor bobiné
 <p style="text-align: center;">Figure 8</p>	 <p style="text-align: center;">Figure 9</p>
 <p style="text-align: center;">Figure 10</p> <p>(dans ce dernier cas, le bobinage est remplacé par une structure pleine en cuivre ou en aluminium (figure 8) ayant la forme d'une cage d'écureuil (figure 10)), il est constitué de barres conductrices nues (en cuivre ou en aluminium) traversant l'empilement de tôles du rotor, parallèlement à l'axe, et court-circuitées, aux deux extrémités de la machine, par des anneaux conducteur de faible résistance.</p>	<p>comprend un bobinage généralement triphasé logé dans les encoches (figure 9) , de même nombre de paires de pôle que le primaire. Ce bobinage dit secondaire de la machine asynchrone est le plus souvent connecté en étoile ; les sommets de l'étoile sont reliés à des bagues portées sur l'arbre du moteur. Ces bagues permettent d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements du bobinage triphasé. Ces résistances sont utilisées au démarrage de la machine asynchrone.</p>

Symbole :

Les moteurs asynchrones triphasé sont symbolisés d'après le type de rotor de la machine (figure 11).

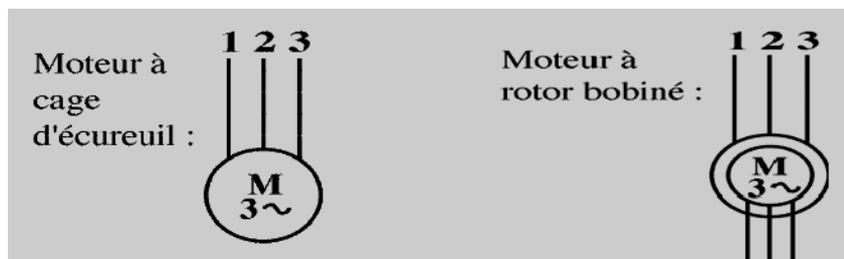


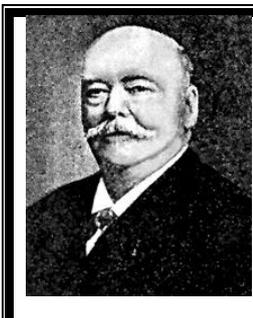
Figure 11

NB : Les moteurs à cage d'écureuil sont de loin les plus utilisés : ils représentent de 80 à 85 % des applications en milieu industriel

II.4 Principe de fonctionnement:

L'enroulement statorique (primaire) reçoit de l'énergie électrique du réseau de pulsation ω , ce qui crée un champ tournant à la vitesse angulaire synchrone $\Omega = \omega/p$ (voir théorème de Maurice Leblanc); ce champ, en balayant les enroulements rotoriques (secondaires) y induit des f.e.m et donc des courants, car les spires sont fermées sur elles-mêmes. Ces courants induits produiront à leur tour un champ qui sera de sens opposé au champ du stator (d'après la loi de Lenz : la f.e.m induite tend à s'opposer à la cause qui l'a produite). La réaction du courant secondaire sur le champ primaire provoquera un couple moteur qui entrainera la mise en mouvement du rotor dans les sens du champ tournant primaire. A fin et à mesure que le rotor augmentera sa vitesse de rotation, la différence entre la vitesse angulaire du champ tournant et la vitesse angulaire du rotor diminuera. Et la pulsation des courants secondaires diminuera aussi :

$\omega' = \omega_s - \omega_r$ avec : ω_s : pulsation du champ statorique. et ω_r : vitesse (mécanique) de rotor



Charles Léonard Armand Maurice Leblanc, (1857 -1923), est un ingénieur et industriel français, concepteur de plusieurs appareils en électricité et en hydraulique.

On lui doit les avanceurs de phase, les circuits amortisseurs pour obtenir le synchronisme des alternateurs, une machine d'induction pour remplacer les alternateurs, une excitation d'un alternateur, ainsi qu'un transformateur de fréquence et de tension (1891).

Théorème de Leblanc : Une bobine alimentée par une tension alternative et créant de ce fait un champ magnétique pulsant le long de son axe créé en fait deux champs magnétiques, de même module, tournant en sens inverses. Ce théorème constitue la base théorique du fonctionnement des moteurs asynchrones monophasés.

Que se passerait-il si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme ?

Si le moteur tournait à la même vitesse que le champ magnétique tournant (vitesse synchrone), le flux magnétique ne couperait pas les conducteurs : la tension et le courant induits dans les conducteurs du rotor seraient nuls. Soumis à de telles conditions, le moteur ne pourrait pas tourner. Pour produire un couple moteur, il est donc essentiel que la vitesse du rotor soit légèrement inférieure à la vitesse synchrone du champ tournant (figure12). L'écart relatif entre la vitesse de synchronisme et la vitesse du rotor donné $g = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s$ est appelé le glissement.

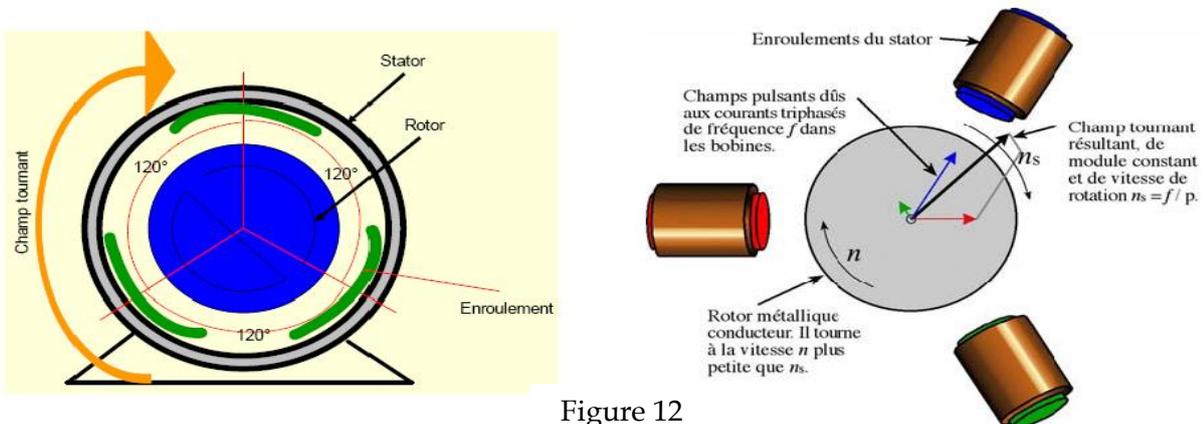


Figure 12

Cas d'un rotor à cage d'écureuil :

Le rotor est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique (figure 13). Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil". Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance

Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier.

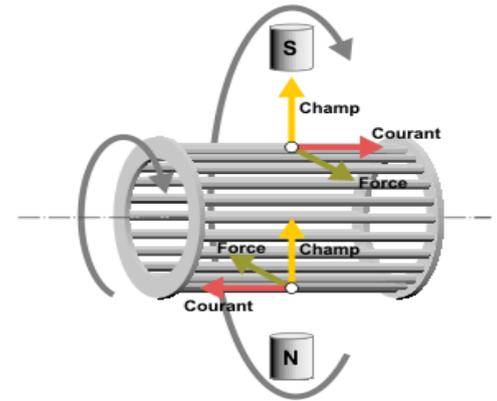


Figure 13

Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de **moteur asynchrone**.

II.5 Glissement :

Le rotor tourne à la vitesse n plus petite que la vitesse de synchronisme n_s . On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant. On introduit alors une variable caractérisant la vitesse de rotation du rotor. Ce glissement g va dépendre de la charge

$$g = \frac{n_s - nr}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad \text{Avec : } n_s : \text{vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant}$$

nr : vitesse de rotation du rotor.

$\Omega_s : 2\pi.n_s \text{ (rad.s}^{-1}\text{) et } \Omega_r : 2\pi.nr \text{ (rad.s}^{-1}\text{)}$

De la relation précédente, on peut aussi tirer l'expression : $\Omega_r = (1 - g) \times \Omega_s = (1 - g) \times \frac{\omega}{p}$

Remarque 1 : le glissement s'exprime aussi en pourcentage : $g \times 100 \%$

Exemple d'application de cette équation :

Un moteur comptant 4 pôles par phase est alimenté à une source de tension d'une fréquence de 60 Hz. Il tourne à 1725 tr/min. Calculez la valeur du glissement du moteur.

1. Calcul de la vitesse synchrone

Pour pouvoir calculer la valeur du glissement du moteur, on doit connaître la vitesse synchrone du champ magnétique tournant. On applique donc l'équation suivante : $n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} = 1800 \text{ tr/min} \Rightarrow p = 2$

2. Calcul du glissement

Il ne reste plus qu'à effectuer le calcul suivant : $g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1800 - 1725}{1800} = 0,04$

Le glissement du moteur est donc de 0,042 ou de 4,2 %.

II.6 Schéma électrique équivalent:

De façon assez simple une machine asynchrone est constituée de deux ensembles de bobinages triphasés enroulés sur le même circuit magnétique. Il est alors d'usage de faire une analogie entre cette machine et un transformateur triphasé.

La figure 14 représente le schéma de principe de la machine asynchrone et il est facile d'y constater que l'enroulement secondaire court-circuité représente un circuit triphasé équilibré. Sur ce schéma apparaissent alors les éléments d'imperfections classiques: résistances séries des bobinages primaires et secondaires, inductance de fuites, inductance magnétisante et résistance équivalente aux pertes fer.

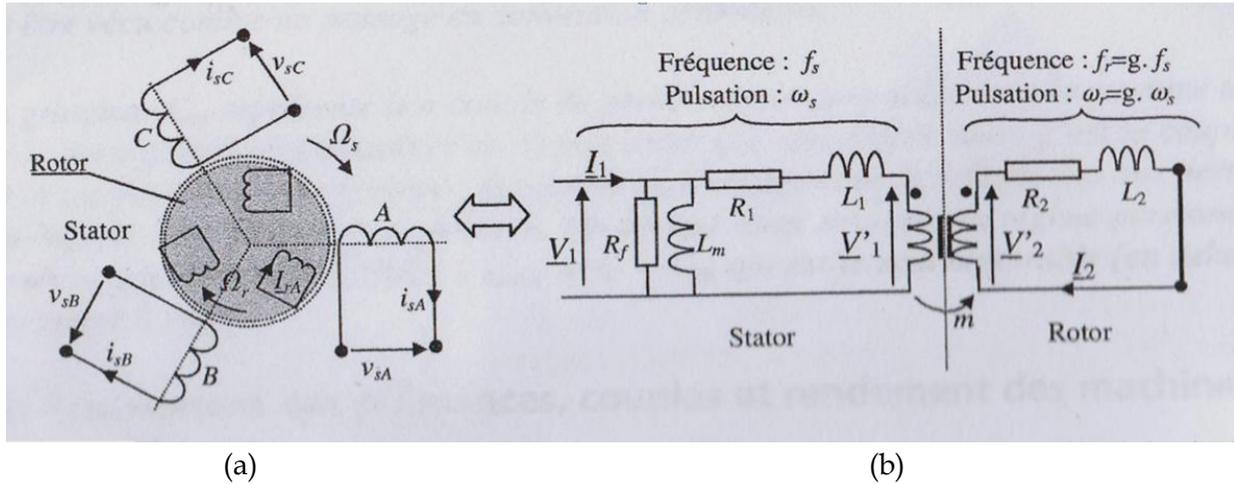


Figure13 : (a) schéma de principe de la machine asynchrone. (b) schéma monophasé équivalent

Les relations de maille qui caractérisent les deux circuits s'écrivent alors:

✚ Au stator (équivalent primaire) : $V_1 = R_1 \cdot I_1 + jL_1 \cdot \omega_s \cdot I_1 + V'_1$

✚ Au rotor (équivalent secondaire): $0 = R_2 \cdot I_2 + jL_2 \cdot g \cdot \omega_s \cdot I_2 - V'_2$ soit : $0 = \frac{R_2}{g} \cdot I_2 + jL_2 \cdot \omega_s \cdot I_2 - \frac{V'_2}{g}$

La division par g de l'équation secondaire (on dehors du cas g=0) fait apparaître la résistance (R_2/g) et la réactance $L_2 \cdot \omega_s$. Comme la pulsation ω_s correspondant à cette réactance est la même que la pulsation du circuit primaire, il est possible d'effectuer le passage de ces deux impédances au stator.

La figure 14 représente le schéma monophasé équivalent ramené au stator:

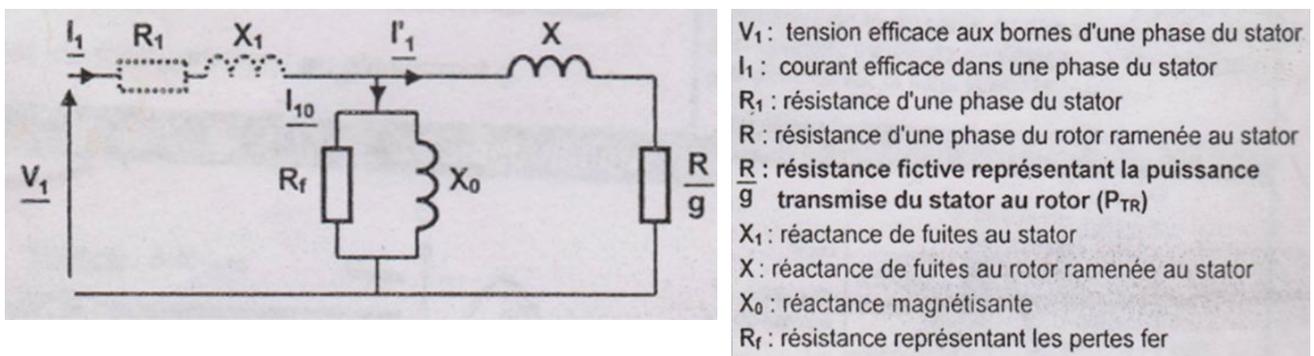
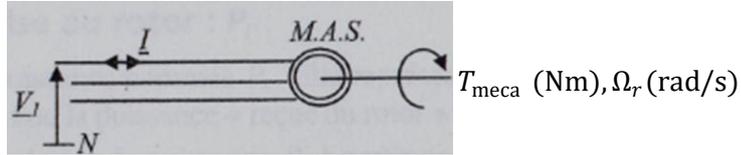
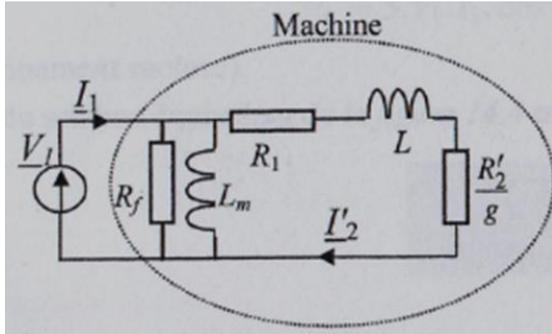


Figure 14

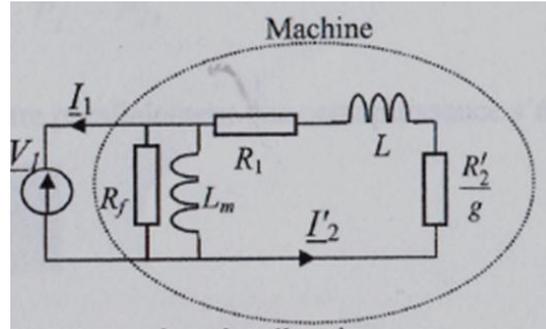
La figure 15 présente de façon synthétique, les deux schémas équivalents monophasés possibles d'une machine asynchrone autour de son symbole officiel. Ces schémas correspondent aux modes de fonctionnement moteur et générateur. Cette figure fait apparaître les équations électriques et mécaniques propres aux deux modes de fonctionnement. La première constitue la loi de maille du circuit induit. la deuxième la loi fondamentale de la dynamique en rotation.



Fonctionnement en moteur



Fonctionnement en génératrice



Equation électrique :

$$\underline{V}_1 = \left(R_1 + \frac{R'_2}{g} \right) \underline{I}'_2 + jL_s \underline{I}_2$$

$$0 < g < 1 (N_r < N_s)$$

Equation mécanique :

$$\sum \text{Couples} = T - T_m - T_{n \text{ sts tant}} = J \frac{d\Omega_r}{dt}$$

Equation électrique :

$$\underline{V}_1 = \left(R_1 + \frac{R'_2}{g} \right) \underline{I}_2 + jL_s \underline{I}_2$$

$$g < 0 (N_r > N_s)$$

Equation mécanique :

$$\sum \text{Couples} = T_{\text{moteur}} - T_m - T = J \frac{d\Omega_r}{dt}$$



Figure 15 : Modèle et réactions importantes de la machine asynchrone

NB: La grandeur T_m représente le couple de pertes mécaniques lorsque la machine tourne à vide c'est-à-dire sans entraîner de charge autre que son propre rotor, c'est le couple qui subsiste et qui représente la résultante des forces de frottements et des efforts due aux pertes fer qui s'appliquent sur les parties en rotation.

II.7 Caractéristiques du moteur asynchrone triphasé

a) Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

Conséquence : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

A vide : $g = 0$ et donc $n_0 = n_s$

b) Fonctionnement en charge

Le moteur fournit maintenant de la puissance active, le stator appelle un courant actif.

Remarque : le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

c) Caractéristique mécanique en fonction de la vitesse $T_u = f(n)$

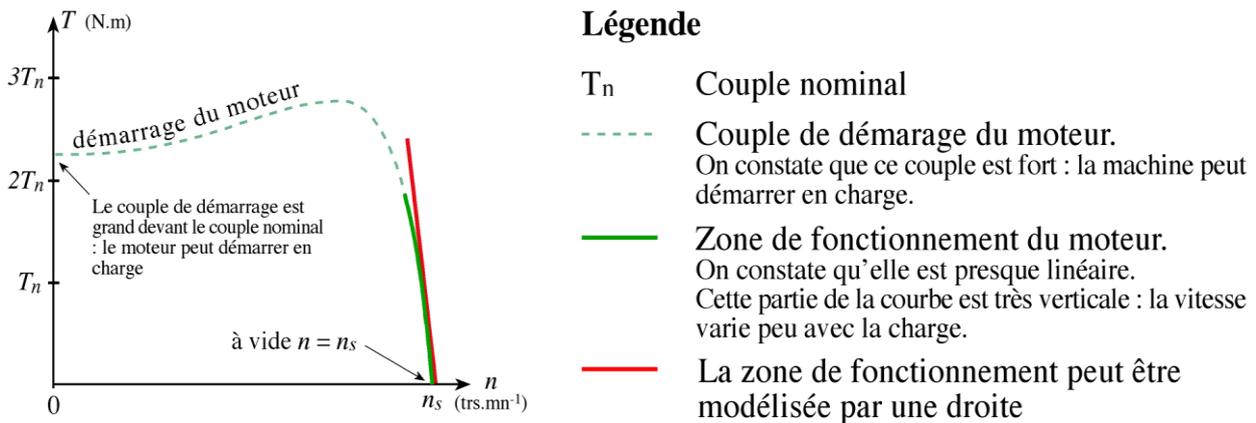


Figure 16

Modélisation de la partie utile de la courbe

On veut déterminer l'équation de la droite qui modélise la partie utile de la caractéristique mécanique.

Il faut deux points : 1^{er} point évident : $A_1(n_s;0)$ 2^e point : il faut un essai de la machine $A_2(n_2;T_2)$

Equation d'une droite : $y = a.x + b$ soit $\frac{T_u}{n} = a + \frac{b}{n}$

Coefficient directeur (pente) : $a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ soit $a = \frac{T_2 - 0}{n_2 - n_s}$

$|a|$ est grand (droite presque verticale) et a est négatif.

Ordonnée à l'origine : point A_1 $0 = a.n_s + b$ soit $b = -a.n_s$

On peut écrire : $T_u = a(n - n_s)$

Remarque : le point A_2 peut aussi être fourni par les informations figurant sur la plaque signalétique de la machine (couple nominal T_n et vitesse nominale n_n).

d) Caractéristique mécanique en fonction du glissement

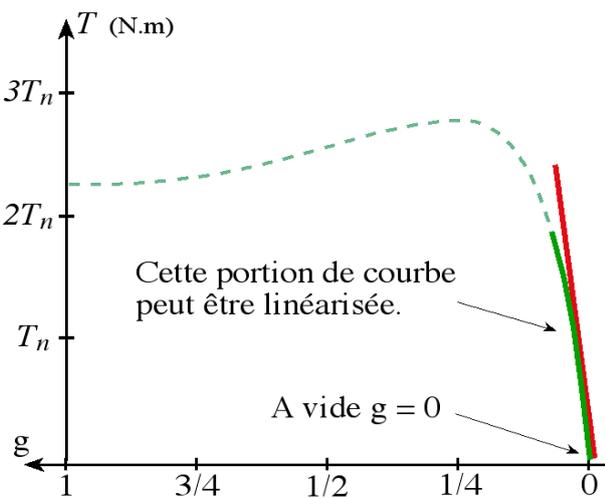


Figure 17

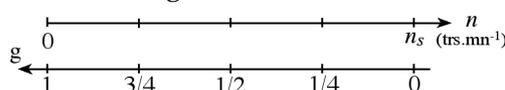
D'où la même caractéristique avec l'axe en g . Cette fois ci le modèle est une droite passant par l'origine, donc d'équation :

$y = k.x$ soit $T_u = k.g$

Au voisinage du point de fonctionnement nominal, le couple utile est proportionnel au glissement.

$T_u = k.g$

k est une constante de proportionnalité (coefficient directeur) en N.m.



L'axe en n et l'axe en g sont inversés

Relation entre a et k

Nous avons vu que :

$$T_u = a.n + b \quad \text{avec} \quad b = -a.n_s$$

Ce qui donne :

$$T_u = a.n - a.n_s = -a(n_s - n)$$

En remarquant que :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{soit} \quad n_s - n = n_s.g$$

On obtient :

$$T_u = -a.n_s.g = k.g \quad \text{avec} \quad \underline{k = -a.n_s}$$

Résumé des caractéristiques

- ✚ A vide, le courant est non négligeable, mais la puissance absorbée est surtout réactive (Q)
- ✚ Le couple et le courant de démarrage sont importants ;
- ✚ L'intensité du courant absorbée augmente avec le glissement ;
- ✚ La machine asynchrone peut démarrer en charge.

On retiendra que :

- ✚ La vitesse du champ tournant est : $n_s = \frac{f}{p}$ (f la fréquence et p le nombre de paires de pôles)
- ✚ Le glissement représente la différence de vitesse entre le champ et le rotor : $g = \frac{n_s - n}{n_s}$;
- ✚ A vide $g = 0$ et $n_0 = n_s$;
- ✚ Quelle que soit la charge la vitesse de rotation varie très peu ($n \approx n_s$) ;
- ✚ En fonctionnement nominal le couple utile est proportionnel au glissement $T_u = k.g$

e) Point de fonctionnement du moteur en charge

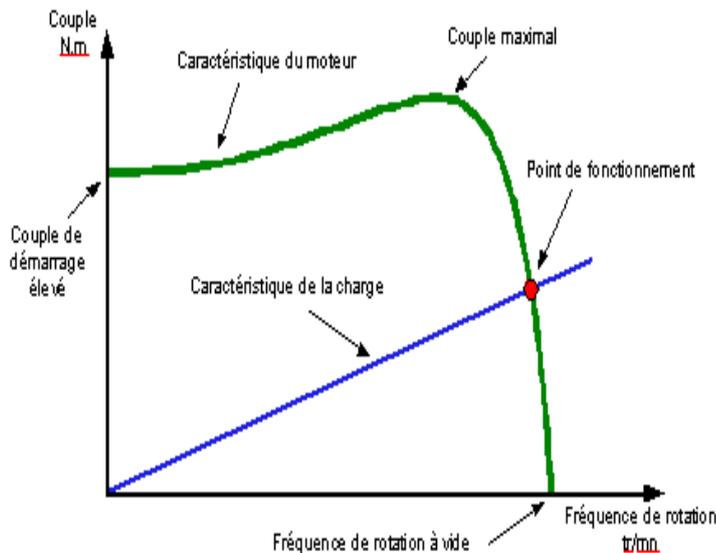


Figure 18

Le couple T (N.m) varie avec la fréquence de rotation n (tr/min) du moteur accouplé à la charge entraînée (supposée fixe) . Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteur et résistant sont identiques.

D'une manière générale, le point de fonctionnement en moteur doit être choisi pour $N < N_s$ et doit être placé dans la partie verticale de la courbe, au plus près de la vitesse de rotation nominale N_r (appelée aussi N_n).

Remarque :

- ✚ T_u : couple utile du moteur
- ✚ T_r : couple résistant de la charge

Méthode de résolution graphique

Tracer à l'échelle sur du papier millimétré les deux caractéristiques et relever les coordonnées du point d'intersection.

Méthode de résolution par le calcul

Il faut résoudre : $T_u = T_r$

Exemple :

Cas d'une charge ayant un couple résistant proportionnel au carré de la vitesse : $T_r = c.n^2$

Le couple utile du moteur est : $T_u = a.n + b$

$$T_u = T_r \Rightarrow a.n + b = c.n^2 \Rightarrow c.n^2 - a.n - b = 0$$

Finalement, il faut résoudre une équation du second degré. Une solution sur les deux trouvées sera la bonne (une des solutions n'aura pas de signification physique).

f) Autres informations

Réglage de la vitesse : Comme la vitesse n reste très proche de la vitesse n_s de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut en fait varier la fréquence f_s à l'aide d'un onduleur.

$$\frac{V}{f} = \text{constante}$$

Mais pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile, il faut garder le rapport tension / fréquence constant.

V : est la tension d'alimentation d'un enroulement. Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la fréquence et la tension d'alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

Intérêts et utilisation : Le moteur asynchrone triphasé, d'une puissance de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible.

Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine.

Toutefois l'emploi de ce type de moteur est évité en très forte puissance ($P > 10$ MW) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

Remarques :

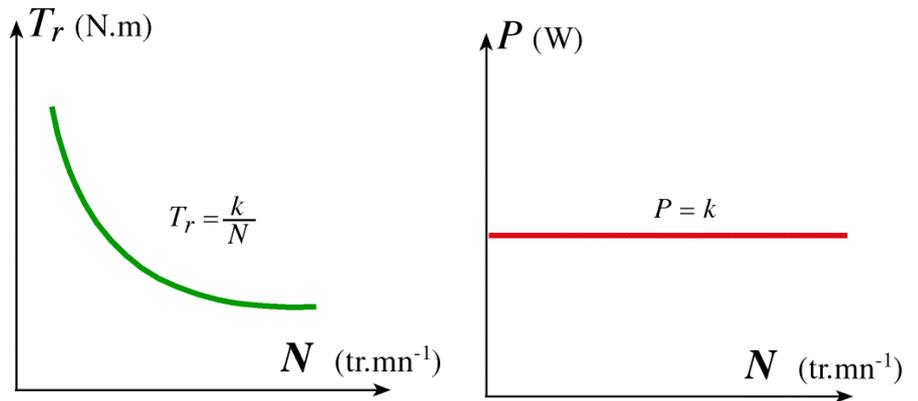
En électroménager (lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrones n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

Réversibilité :

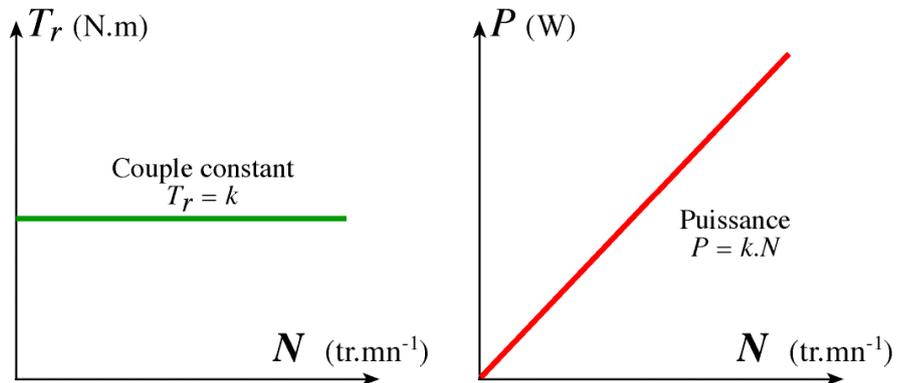
Toutes les machines électriques tournantes sont réversibles.

g) Complément : caractéristiques $T_r=f(n)$ de quelques charges :

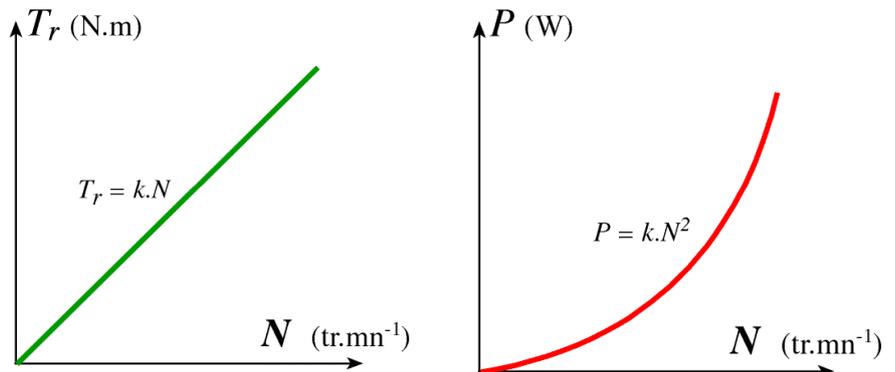
Machine à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse)



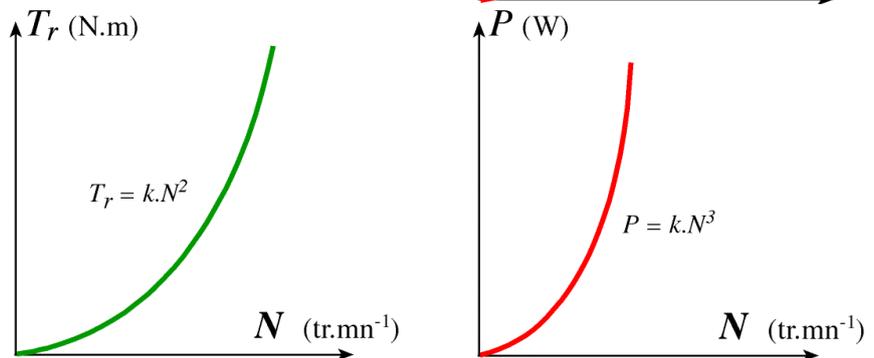
Machine à couple constant (levage, pompe)



Machine à couple proportionnel à la vitesse (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)



Figures 19

II.8 Régime de fonctionnement d'une machine asynchrone :

Fonctionnement en moteur	Fonctionnement génératrice	Fonctionnement en frein électrique
$g = \frac{ns - n}{ns}$ <p>Cas limites :</p> <p>-au synchronisme $ns = n$ donc : $g = 0$</p> <p>- au démarrage $n = 0$ donc : $g = 1$</p> <p>Ce qui donne : $0 < g < 1$</p> <p>Pour le fonctionnement moteur n est en retard par rapport à ns ($n < ns$)</p>	$g = \frac{ns - n}{ns}$ <p>Cas limites :</p> <p>-au synchronisme $ns = n$ donc : $g = 0$</p> <p>lorsque la vitesse dépasse la vitesse de synchronisme $n \rightarrow +\infty$ donc $g \rightarrow -\infty$</p> <p>n sera en avance par rapport à ns car le rotor est entraîné par un moteur d'entraînement.</p> <p>$n > ns$ donc $g < 0$</p>	<p>La machine fonctionne en frein, lorsque la vitesse n est négative par rapport à ns ; c'est-à-dire que le rotor tourne dans le sens inverse par rapport au champ tournant statorique.</p> <p>Cas limites :</p> <p>à l'arrêt $n = 0$ donc : $g = 1$</p> <p>- lorsque la vitesse dépasse la vitesse de synchronisme $n \rightarrow -\infty$ donc $g \rightarrow +\infty$</p> <p>ce qui donne : $g \geq 1$</p>

On peut résumer ce qui suit :

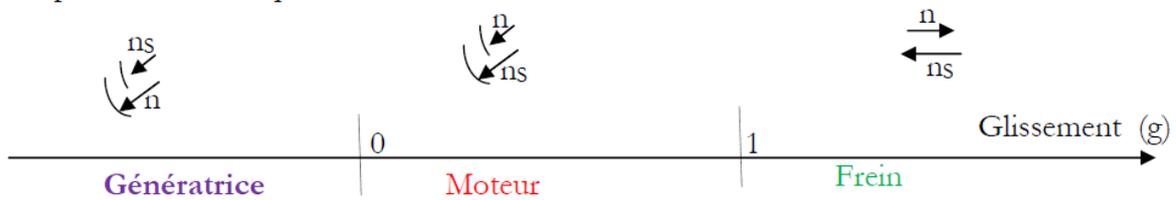


Figure 20

II.9 Bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone triphasé :

Le bilan des puissances et des pertes dans un moteur asynchrone est reporté sur la figure 21

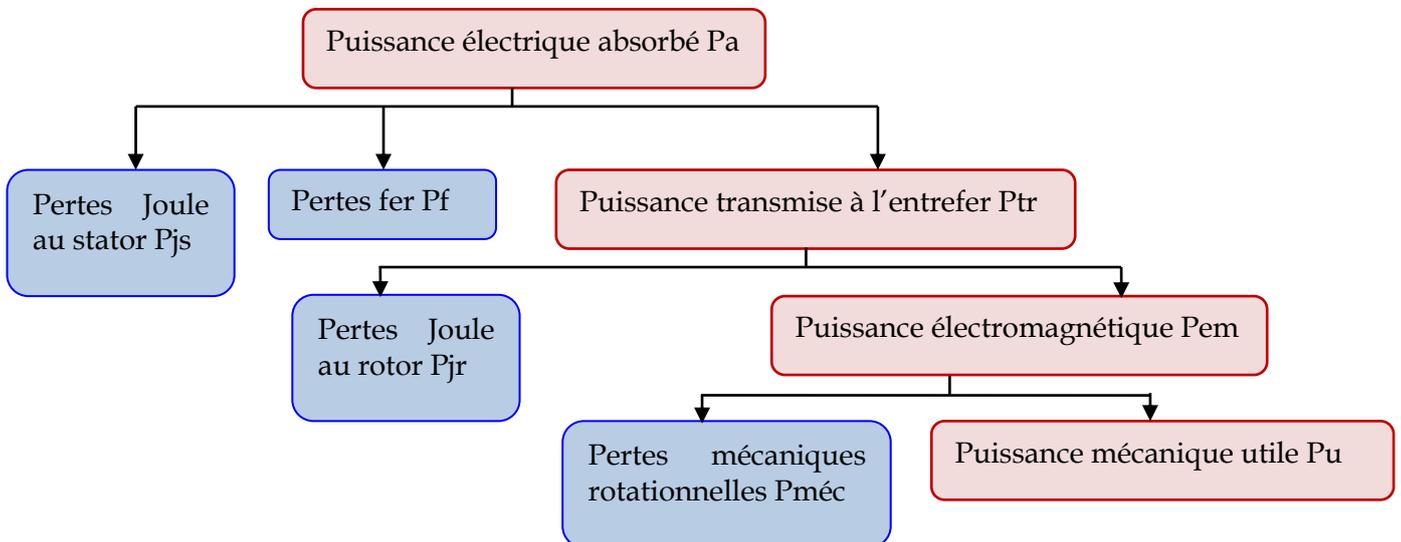


Figure 21

Tout d'abord le moteur absorbe sur le réseau une puissance électrique active triphasée P_a . Une partie P_{js} de cette puissance est dissipée par effet joule dans les enroulements du stator. Par la suite le champ magnétique inducteur entraîne des pertes dans le fer P_f , par hystérésis et par courant de Foucault. Le reste de la puissance P_{tr} est transmis au rotor à travers l'entrefer.

La majeure partie de cette puissance est alors utilisée pour produire une puissance électromécanique P_{em} , tandis que la présence d'un courant induit dans le rotor provoque des pertes par effet Joule P_{jr} .

La puissance électromagnétique fournie par le stator est responsable de la mise en mouvement du rotor, qui produit la puissance mécanique utile P_u qui sera par la suite transmise à la charge par le biais d'un arbre de transmission. Toutefois dans le mouvement du rotor une partie de la puissance est perdue par divers mécanismes de frottements, c'est ce que l'on appelle les pertes rotationnelles P_{rot}

A) puissance absorbée:

La puissance absorbée par le moteur asynchrone est une puissance active électrique. Lorsque le moteur est connecté à un réseau triphasé P_a vérifie la relation: $P_a = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi = 3.V_1.I_1.\cos\varphi$

Ou U et I sont respectivement la tension et le courant ligne, $\cos\varphi$ le facteur de puissance du moteur.

B) pertes par effet Joule au stator P_{js} :

le stator peut être câblé en étoile ou en triangle. Puisque le moteur constitue un récepteur triphasé équilibré alors: $P_{js} = \frac{3}{2}R.I^2$ (R est la résistance entre deux bornes).

La relation qui relie entre R et la résistance de chaque enroulement r est:

- ✚ pour un montage étoile: $R = 2.r$
- ✚ pour un montage triangle: $R = (2/3).r$

C) Puissance transmise au rotor P_{tr} :

La puissance transmise au rotor à travers l'entrefer P_{tr} est la partie de puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer aussi: $P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_f)$

L'étude du schéma équivalent de la fig 22 montre parallèlement que cette puissance s'écrit:

$$P_{tr} = 3 \cdot \frac{R'_2}{g} \cdot I'_2$$

A partir de l'expression du courant I'_2 il vient:

$$P_{tr} = 3 \cdot \frac{R'_2 \cdot V_1^2}{g \cdot ((R_1 + R'_2/g)^2 + L^2 \cdot \omega_s^2)}$$

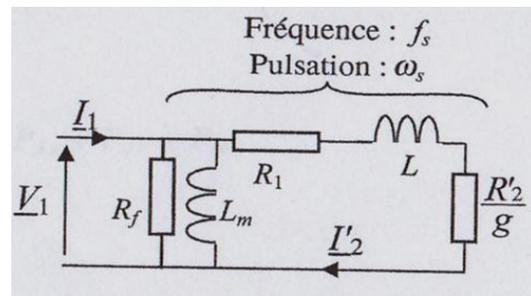


Figure 22 : schéma équivalent monophasé du moteur asynchrone

D) pertes Joule rotoriques P_{jr} :

Les pertes Joule dissipées dans les conducteurs rotoriques sont fonction de la puissance transmise à celui-ci. On peut par ailleurs montrer qu'elles sont aussi fonctions du glissement. En effet les grandeurs P_{jr} et P_{tr} sont liées par la relation: $P_{jr} = g.P_{tr}$

E) Puissance électromagnétique P_{em} et moment du couple électromagnétique T_{em} :

La puissance électromagnétique P_{em} transmise au rotor est : $P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1-g).P_{tr}$

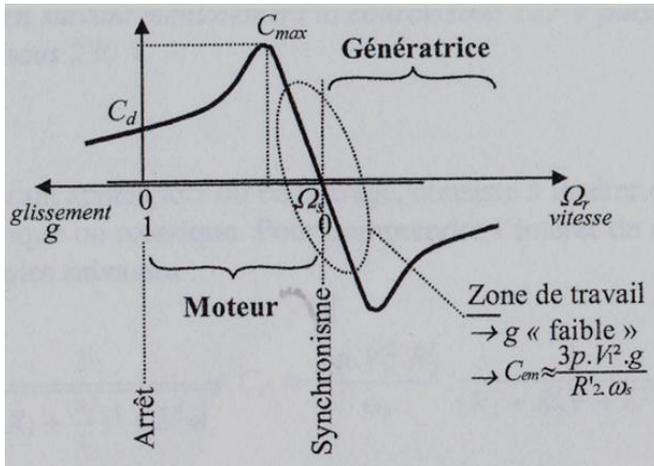
Le rotor tournant à la vitesse Ω est soumis à un couple électromagnétique égale à: $P_{em} = T_{em}.\Omega$

$$\text{Donc } T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{P_{tr} - P_{jr}}{\Omega} = \frac{P_{tr} - g.P_{tr}}{(1-g).\Omega_s} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$$

Cette écriture est très pratique puisque la puissance P_{tr} est facile à exprimer et la pulsation Ω_s constante. En y introduisant l'expression de P_{tr} , il vient : $T_{em} = 3 \cdot \frac{R'_2 \cdot V_1^2}{\Omega_s \cdot g \cdot ((R_1 + R'_2/g)^2 + L^2 \cdot \omega_s^2)}$

En remarquant que la pulsation statorique et la vitesse de rotation du champ tournant sont liées par la relation

$\Omega_s = \omega_s / p$ il vient : $T_{em} = 3 \cdot \frac{p \cdot R'_2 \cdot V_1^2}{\omega_s \cdot g \cdot ((R_1 + R'_2/g)^2 + L^2 \cdot \omega_s^2)}$



Couple maximal: $T_{max} = 3 \cdot \frac{p \cdot R'_2 \cdot V_1^2}{2 \cdot L \cdot \omega_s^2}$

NB: sans négliger la résistance des enroulements statoriques, l'expression complète est: $T_{max} = 3 \cdot \frac{p \cdot R'_2 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + L^2 \cdot \omega_s^2})}$

NB: La fig 22 représente ainsi l'allure de la caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone, tracée à partir de la formule:

Figure 23 : caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone

$$T_{em} = 3 \cdot \frac{p \cdot R'_2 \cdot V_1^2}{\omega_s \cdot g \cdot ((R_1 + R'_2/g)^2 + L^2 \cdot \omega_s^2)}$$

F) Puissance mécanique utile P_u et couple utile T_u :

Le rotor déploie un couple utile P_u à la vitesse Ω . Il délivre une puissance utile $P_u = T_u \cdot \Omega$

G) Pertes fer et pertes rotationnelles:

Les pertes fer et les pertes rotationnelles contrairement aux autres pertes, ne sont pas mesurables à chaque instant. En effet les pertes fer sont fonction du flux magnétique tandis que les pertes rotationnelles sont dues à la résistance de l'air. On regroupe alors ces deux grandeurs dans un ensemble de pertes que l'on nomme pertes collectives et on les évalue au travers d'un couple de pertes collectives T_c défini par :

$$T_c = \frac{P_c}{\Omega}$$

Remarquons que dans le moteur asynchrone, la vitesse et le flux magnétique ne varient que peu avec la charge, de sorte que l'on peut raisonnablement considérer les pertes collectives comme constantes.

H) Rendement: $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - P_{js} - P_f - P_{jr} - P_{rot}}{P_a}$

I) Détermination des pertes collectives:

Les pertes collectives P_c sont déterminées à l'aide d'un essai à vide. En effet à partir du bilan des pertes et des puissances on établit que: $P_{u0} = P_{a0} - P_{js0} - P_c - P_{jr0}$. Or, à vide le glissement est nul et par conséquent les pertes Joule au rotor sont nulles ($P_{jr} = 0$). De plus à vide le moteur ne délivre pas de puissance utile et donc $P_{u0} = 0$ donc il vient que $P_c = P_{a0} - P_{js0}$.

Pour mesurer les pertes collectives dans un moteur asynchrone, il suffit de placer le moteur à vide à la vitesse de synchronisme, de mesurer la puissance absorbée et de retrancher les pertes Joule au stator (calculées après une mesure à l'ampèremètre).

II.10 Essais de la machines asynchrone :

Ils permettent de déterminer les éléments du schémas monophasé équivalent et ainsi des comprendre et de prévoir le comportement du moteur dans les diverse situations ou il peut être mis en œuvre.

En négligeant l'inductance de fuites au stator (et la résistance statorique éventuellement) on se ramène au schéma monophasé équivalent suivant : (figure 24)

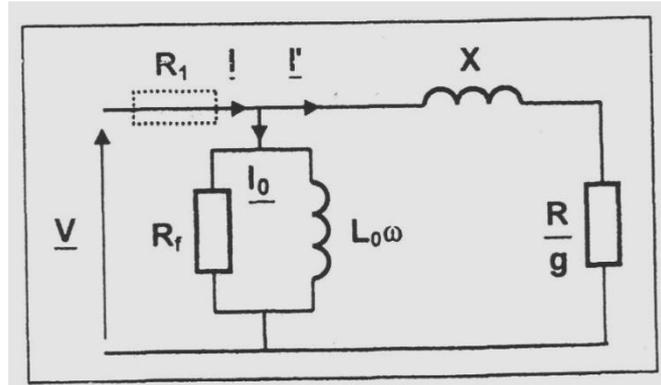


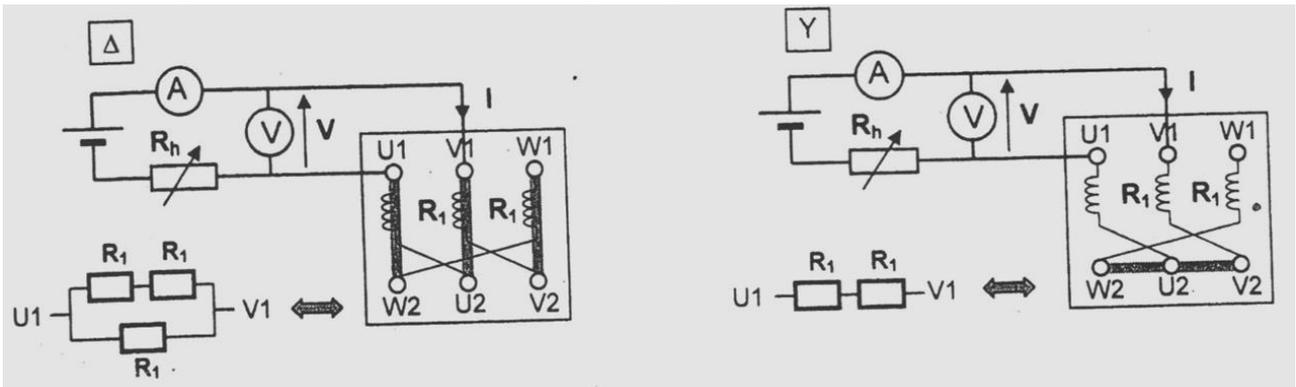
Figure 24

V : Tension efficace aux bornes d'une phase du stator (prendre V si couplage Y et U si couplage Δ)

I/ Courant efficace dans une phase du stator (prendre I si couplage Y et J si couplage Δ)

a) Mesure de la résistance d'une phase du stator (figures 25)

On mesure à chaud en continu, sous basse tension la valeur de la résistance Rs entre deux bornes du stator (couplé en Δ ou Y), on veillera à ne pas dépasser In (courant nominale).



On obtient : $R_B = \frac{V}{I} = \frac{2}{3} R_1$

Figures 25

$R_B = \frac{V}{I} = 2R_1$

b) Essai à vide avec une machine désaccouplée : g = 0 (figure 26)

Le moteur à vide et alimenté sous sa tension nominale Un . Sa vitesse n et proche de ns .On relève l'intensité efficace du courant en ligne I0, les puissances active P0 et réactive Q0.

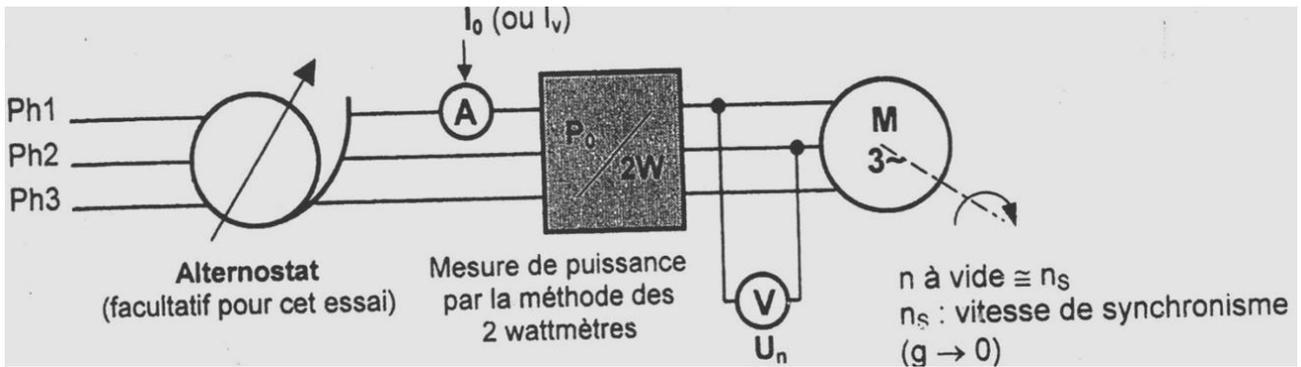


Figure 26

$$P_0 = W_1 + W_2$$

$$Q_0 = \sqrt{3} \cdot (W_1 - W_2)$$

On peut déduire de cet essai les valeurs de R_f et X_0

✚ Détermination de X_0 : (figure 27)

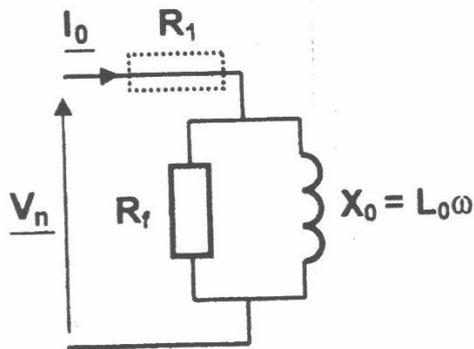


Figure 27

Si on néglige la chute de tension aux bornes de R_f

$$X_0 = 3 \cdot \frac{V_n^2}{Q_0}$$

Q_0 est la puissance réactive absorbée par les 3 phases.

✚ Détermination de R_f : (figure 28)

On affine la mesure de R_f en séparant les pertes fer P_{fer} et les pertes mécaniques P_{pm} dans P_0

On effectue $P_0 = P_{fer} + P_{JS} + P_{pm}$ soit $P_{fer} + P_{pm} = P_0 - 3/2 \cdot R_s \cdot I_0^2$

- ✚ Les pertes fer sont proportionnelles à B_m^2 donc à U^2 . Elles sont nulles pour $U = 0$
- ✚ Si on alimente à vide sous tension variable U , sa vitesse Ω varie peu, les pertes mécaniques P_{pm} dépendant de Ω , sont donc quasiment constantes. On peut considérer que ce sont les mêmes en charge, puisque Ω diffère peu entre la marche à vide et en charge. (g faible)

On fait varier avec l'alternostat la tension efficace entre phase U et on trace $P_0 - P_{JS} = f(U^2)$ (figure 28) ;

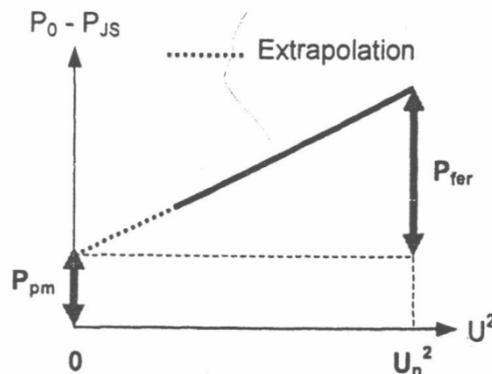


Figure 28

c'est par extrapolation linéaire, on en déduit P_{fer} et P_{pm} . Si on néglige la chute de tension aux bornes de R_1 :

$$R_f = 3 \cdot \frac{V_n^2}{P_{fer}}$$

Si on ne dispose pas d'alternostat on pourra admettre l'équipartition des pertes : $P_{fer} = P_{pm}$

c) Essai en court-circuit rotor bloqué ($g = 1$) : (figure 29)

Le rotor en court-circuit est bloqué, on alimente le moteur sous tension réduite U_{cc} (10 à 20 % environ de U_n) de telle sorte que le courant appelé I_{cc} soit proche du courant nominal I_n . On relève l'intensité efficace du courant en ligne I_{cc} , les puissances active P_{cc} et réactive Q_{cc} .

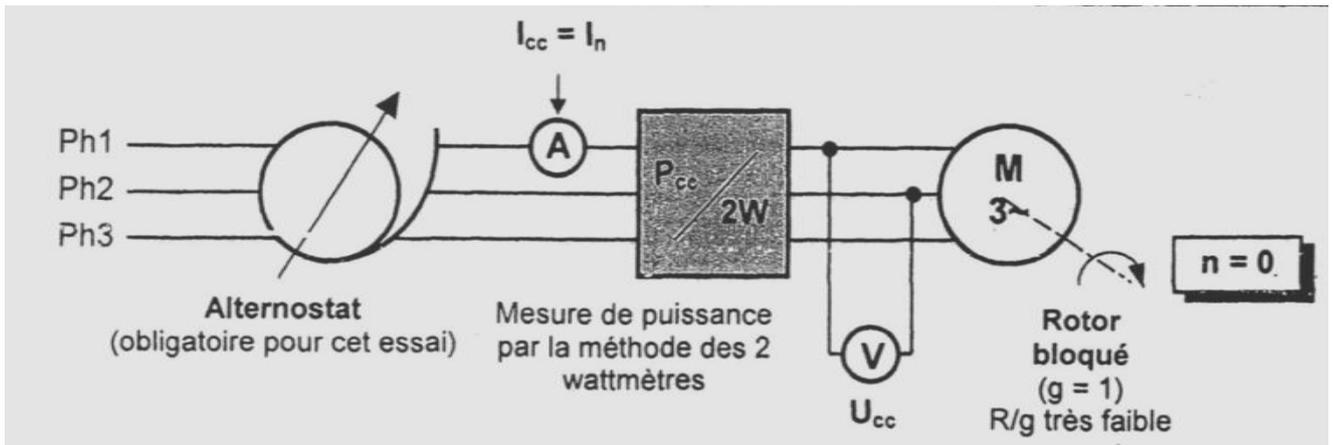
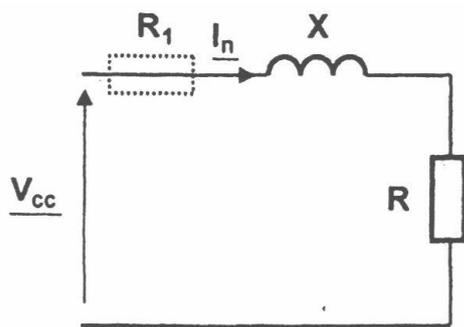


Figure 29

Dans le cas d'une alimentation sous tension réduite, les pertes fer sont très faibles (car $P_{fer} = k \cdot U^2$). Dans ces conditions, la composante active I_{0a} (dans R_f) de I_0 est négligeable, il en est de même de la composante réactive I_{0r} (dans X_0)

Le rotor étant bloqué ($g = 1$) le schéma équivalent se simplifié d'après la figure 30

On peut déduire de cet essai les valeurs de R et X



$$R = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_n^2} - R_1 \quad \text{et} \quad X = \frac{Q_{cc}}{3 \cdot I_n^2}$$

Figure 30

d) Essai en charge :

Mettons les bagues du rotor en court circuit ; le rotor est entraîné sa vitesse normale. La tension induite E_2 par le champ tournant statorique \vec{B}_1 va engendrer dans le rotor des courants de fréquence gf_1 ; ces courants vont engendrer à leur tour un champ tournant rotorique \vec{B}_2 de fréquence gf_1 par rapport au rotor, ou bien de fréquence f_1 par rapport au stator.

$$ns = \frac{60 \cdot f_1}{p} \Rightarrow g = \frac{ns - n}{ns} = \frac{n_2}{ns}$$

n : vitesse du rotor par rapport au stator.

ns : vitesse du champ statorique.

n_2 : vitesse du champ rotorique par rapport au rotor.

Les 2 champs \vec{B}_1 et \vec{B}_2 se superposent et on aura un champ résultant $\vec{B}_r = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$ ce champ produit dans chacune des spires du stator et du rotor un flux alternatif Φ .

En négligeant la résistance et l'inductance de fuites dans les phases du stator on aura : $V_1 = E_1 = 4,44fN_1\Phi$.

Conclusion :

Quelle que soit la charge de la machine, et pour une tension statorique $V_1 = \text{constante}$; le flux est toujours constant.

II.11 différents types de moteurs asynchrones :

a) Moteur asynchrones à cage normale :

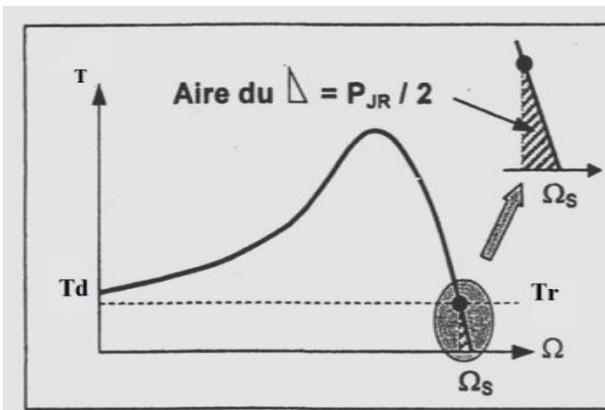


Figure 31

- ⊕ Technologie robuste et économique ;
- ⊕ La cage du moteur est de faible résistance pour que le glissement en marche normale soit faible, ce qui donne un bon "rendement" $1 - g$;
- ⊖ Le couple de démarrage τ_d est faible.

b) Moteur asynchrone à cage résistante :

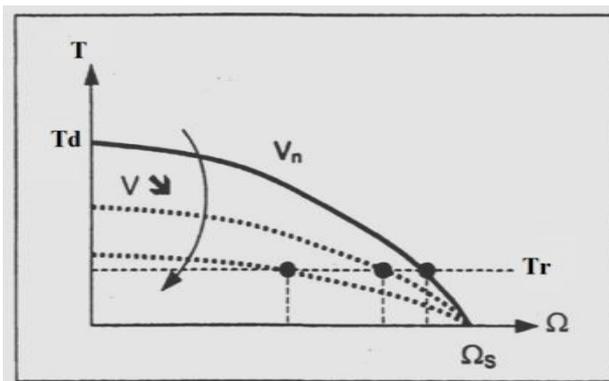


Figure 32

- ⊕ Fort couple au démarrage ;
- ⊕ Variation de vitesse par action sur la tension statorique tout en conservant un couple de démarrage satisfaisant ;
- ⊖ Le glissement est élevé ce qui conduit à un faible rendement.

c) Moteur asynchrone à double cage ou à encoches profondes :

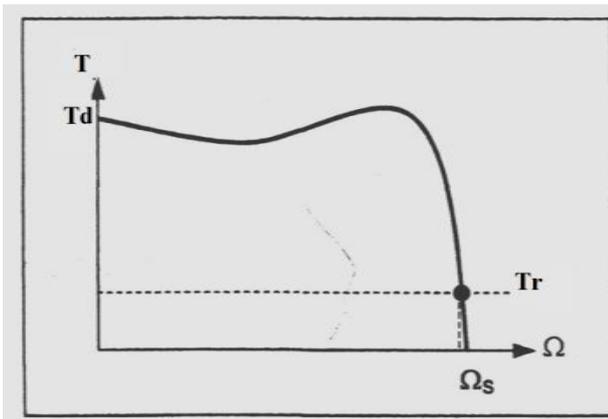


Figure 33

- ⊕ Fort couple au démarrage ;
- ⊕ Appel de courant au démarrage inférieur à un moteur à cage normale ;
- ⊖ Plus gros et plus chers que les moteurs à cage normale

NB : ils sont de plus en plus utilisés

d) Moteur asynchrone à rotor bobiné :

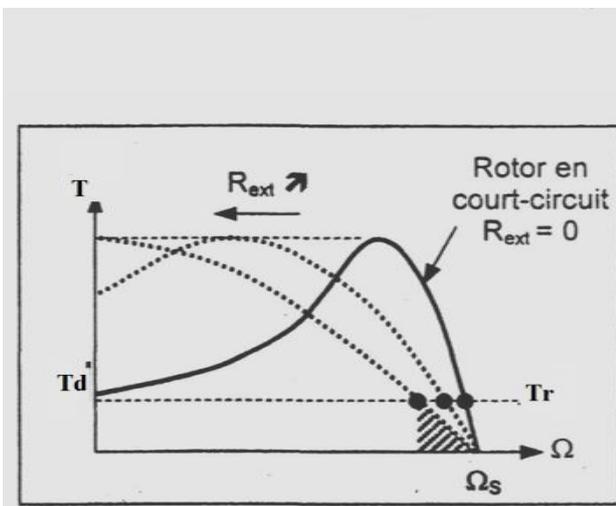
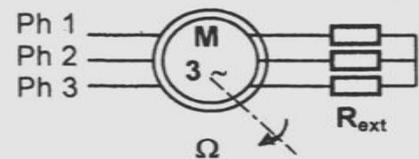


Figure 34



On peut faire varier la vitesse par action sur la résistance des enroulements rotoriques.

En effet, $\Omega \searrow$ si $R_{ext} \nearrow$ mais $g \nearrow$, $P_{JR} \nearrow$ et $\eta \searrow$.

On peut surtout choisir T_d par action sur R_{ext} .

En effet, si $R_{ext} \nearrow$ alors $T_d \nearrow$ (accélération \nearrow et temps de démarrage \searrow).

II.12 Démarrage Des Moteurs Asynchrones

Lors du démarrage, le couple, et donc le courant, passe par une valeur maximale bien supérieure aux ordres de grandeurs nominaux. L'appel de courant du démarrage, tout particulièrement, pose un problème de dimensionnement des protections du moteur et de ses alimentations. Il est ainsi très commun de prévoir un dispositif particulier de démarrage de la machine.

II.12.1 Démarrage sous tension réduite

C'est le procédé le plus simple mais aussi le plus brutal, il est réservé aux moteurs de petite puissance ($P < 3 \text{ kW}$). De façon assez générale, il est possible de faire démarrer le moteur sous une tension beaucoup plus faible que la tension nominale, ce qui a pour conséquence de diminuer de façon proportionnelle le courant de démarrage. Cette opération est possible grâce à l'utilisation d'autotransformateurs à prises réglables, d'altmostats, etc. Ce matériel additionnel peut s'avérer lourd et cher, et donc souvent prohibitif.

II.12.2 Démarrage « étoile / triangle »

Pour effectuer un démarrage sous tension réduite sans ajout important de matériel, il est intéressant, et très répandu, de profiter des possibilités naturelles qu'offrent les systèmes triphasés. Il suffit pour cela de démarrer le moteur en couplant ses enroulements en étoile afin de les placer sous la tension la plus faible. Une fois le démarrage effectué, il suffit par un jeu d'interrupteurs de permuter en couplage triangle pour alors placer les bobinages statoriques sous leur tension nominale (voir figures 35 et 36).

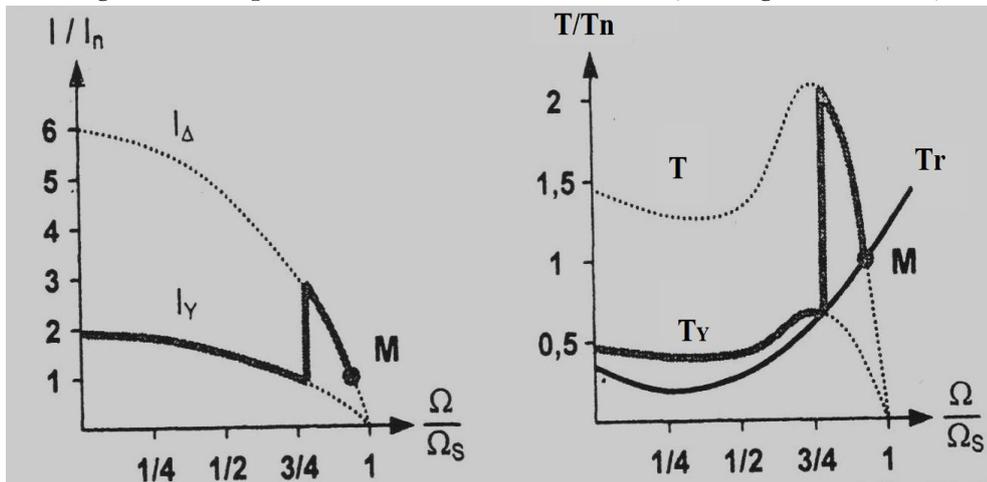


Figure 36

figure 35

Le démarrage « Étoile / Triangle » impose les particularités suivantes :

- ✚ Le moteur doit être destiné à travailler en couplage triangle.
- ✚ Les six bornes des enroulements statoriques doivent être accessibles.
- ✚ A partir d'un réseau de type U/V, il faut utiliser un moteur de type $\sqrt{3}.U/\sqrt{3}.V$

II.12.3 Utilisation de résistances

Une autre solution, destinée à limiter le courant appelé lors du démarrage, consiste à insérer des résistances en série avec le bobinage statorique ou rotorique.

Il est alors possible de caractériser facilement les deux techniques évoquées :

- ✚ **Démarrage par rhéostat statorique** : L'opération consiste à insérer trois Résistances identiques en série avec les trois bobinages statoriques. Cela revient à augmenter artificiellement la valeur de la résistance R_1 , ce qui revient à diminuer d'autant le couple maximal et le courant appelé. Le gros inconvénient de la méthode est que le couple de démarrage est inversement proportionnel au carré de R_1
- ✚ **Démarrage par rhéostat rotorique** : L'opération consiste à insérer trois Résistances identiques en série avec les trois bobinages rotoriques. Il faut pour cela qu'ils soient accessibles, c'est-à-dire que le rotor soit « bobiné ». L'effet sur le courant est strictement le même que précédemment à la différence que le couple maximal ne change pas et que le couple de démarrage a même tendance à augmenter. C'est l'intérêt majeur de l'utilisation de rotors bobinés.

II.12.4 Dispositifs particuliers : moteur à double cage ou à encoches profondes :

On peut résoudre le problème posé le démarrage des moteurs asynchrones en disposant deux cages concentriques distinctes et éloignées (figure 37);

La cage extérieure la plus proche de l'enroulement statorique a une inductance de fuites L_f plus faible que la cage intérieure.

Au démarrage les courants induits de fréquences élevée ($f_r = g.f = 50$ Hz) circulant de préférence dans la cage extérieur de réactance la plus faible.

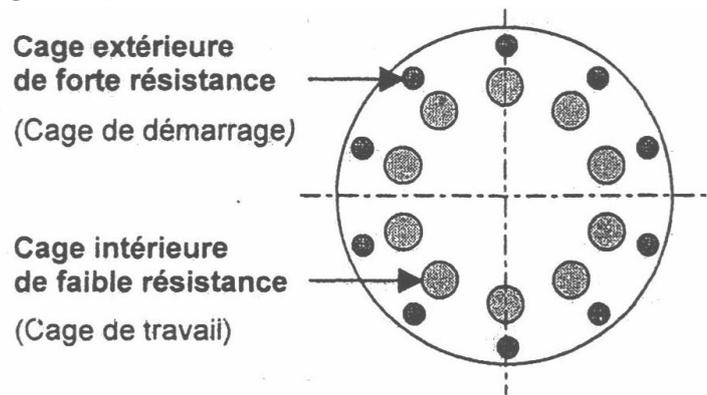


Figure 37

II.13 Freinage du moteur Asynchrone :

Le freinage du moteur asynchrone peut être effectuée par le biais d'un frein qui lui est associé ou bien par le biais de la machine asynchrone elle-même. Nous intéressons à ce seconde type de freinage. Si le freinage ne présente par un caractère d'urgence et que les conditions le permettent, on peut tout simplement couper l'alimentation du moteur et laisser les forces de frottement le ralentir mais si l'on veut procéder à freinage plus efficace, il faut appliquer au rotor un couple électromagnétique opposé au mouvement du rotor. On envisage essentiellement deux solutions : le freinage par injection de courant et le freinage par récupération au travers du fonctionnement en génératrice

II.13.1 Freinage par injection de courant

a) Freinage à contre-courant

Pour arrêter rapidement un moteur, on inverse le sens du champ tournant et ceci en permettant deux phases d'alimentation alors que le moteur est encore en rotation, le moteur freine, s'arrête et repart en sens inverse si on ne coupe pas l'alimentation. (figure 38).

Le freinage à contre-courant est associé à un freinage brutal, utilisé essentiellement en cas d'urgence. Si l'on considère que le champ tourne à la vitesse n_s , le rotor a alors une vitesse négative et, de fait, le glissement devient supérieur à 1. Il s'agit d'un freinage en mode récepteur d'électricité : au vu du glissement, l'appel de courant mis en jeu est très important. De plus, puisque le couple moteur s'oppose à sa propre rotation, la machine ne déploie plus la puissance mécanique mais, au contraire, l'absorbe. Elle doit donc évacuer à la fois la puissance électrique et a puissance mécanique qu'elle absorbe lors du freinage, et ce par le biais des seules pertes Joule. Le freinage à contre-courant est donc associé à un effet Joule très important et à des pointes de courant.

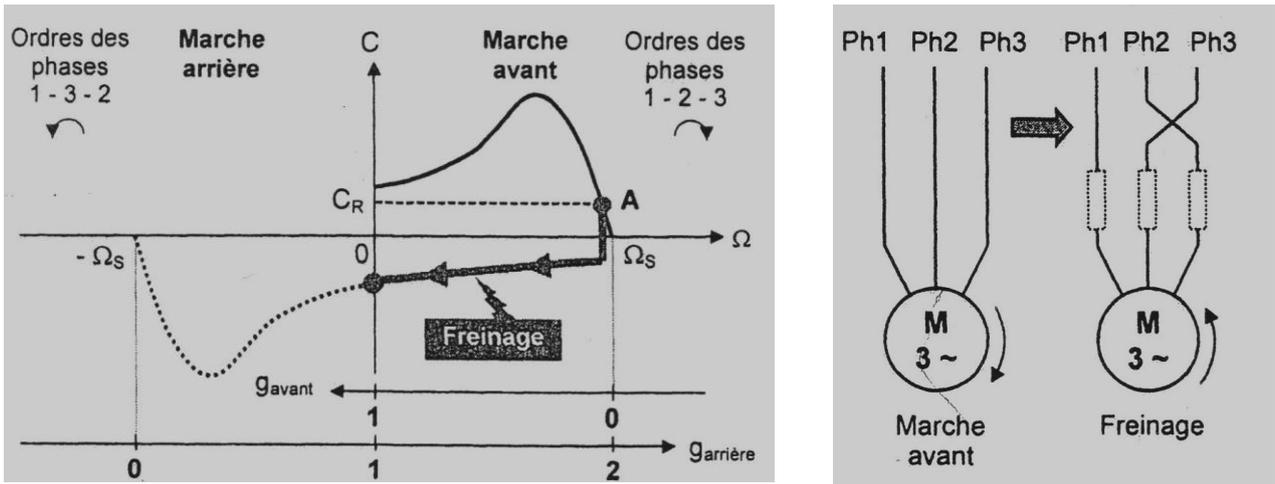


Figure 38

b) Injection de courant continu

il consiste à interrompre l'alimentation triphasé du stator et à alimenter le stator par une source de courant continu très basse tension (20 à 24 V), grâce à un étage redresseur (figure 39). Le flux magnétique est alors fixe, alors que le rotor est en mouvement. Celui-ci et le siège de courants induits qui le freinent. On règle le couple de freinage par le courant continu statorique I_f ($1,3.I_n \leq I_f \leq 1,5.I_n$)

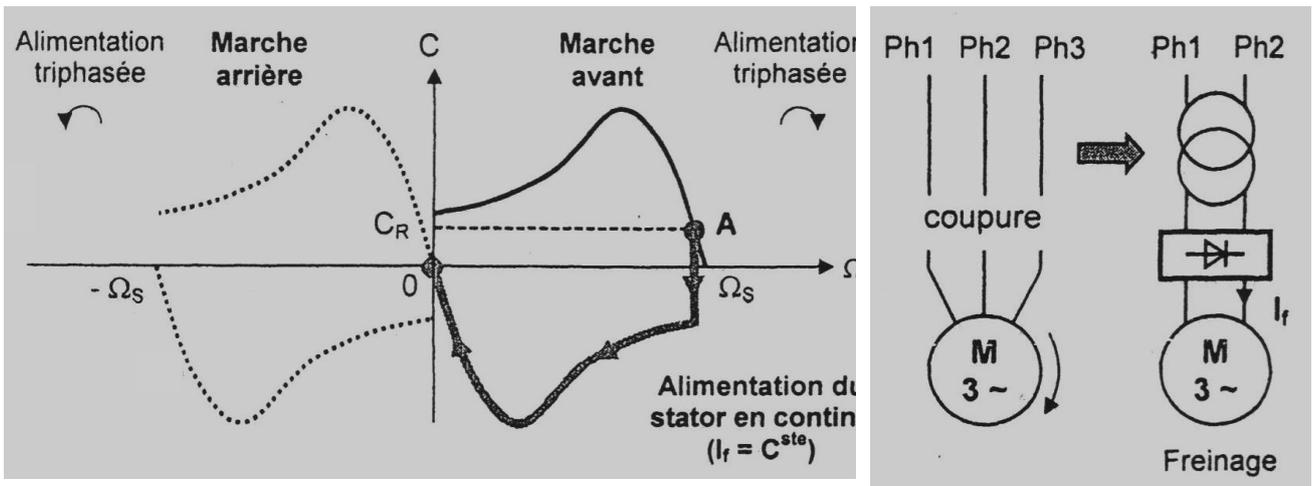


Figure 39

Remarque :

- ✚ Le freinage par injection de courant est moins efficace que celui du à une inversion du champ magnétique, mais il est plus économique et implique des effets calorifiques moins importants
- ✚ Le freinage par injection de courant est souvent intégré dans les variateurs de vitesse électroniques

III. Génératrice Asynchrone

III-1 Principe

Comme toutes les machines électriques tournantes, le moteur asynchrone est réversible et peut fonctionner en génératrice de puissance électrique. Le fonctionnement en mode génératrice est associé à un freinage : lorsqu'il est atteint, le couple électromagnétique s'oppose à la rotation du rotor. Le basculement en mode génératrice se fait lorsque le rotor tourne dans le même sens que le champ magnétique mais plus vite que lui. On dit que la machine est *hyper synchrone*. La réaction magnétique d'induit donne naissance dans les bobinages de l'inducteur à une force électromotrice supérieure à la tension du réseau et génère de ce fait un courant et une puissance électriques qui sont renvoyés vers le réseau.

III.2 Avantages et inconvénients :

La génératrice asynchrone ou hyper synchrone présente de nombreux avantages mais aussi quelques inconvénients.

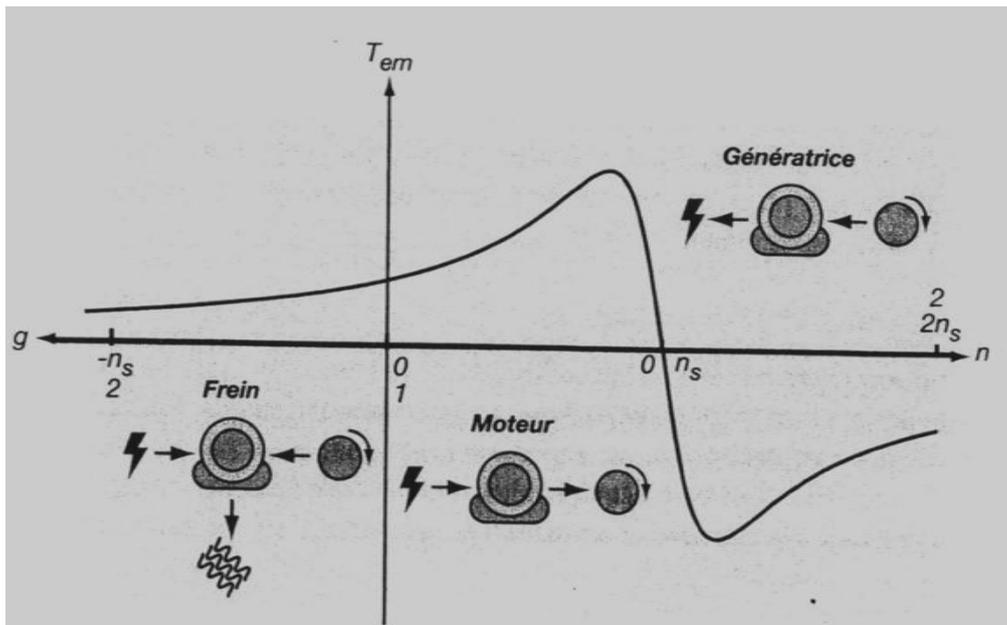
Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✚ Le rotor n'a pas besoin d'être alimenté et l'absence de balais et de collecteur minimise l'entretien de la machine. ✚ La fréquence et la tension générées par la machine s'adaptent à la tension du réseau et ne sont pas fonction de la vitesse de rotation. ✚ Du fait du glissement, la machine asynchrone supporte sans problème les variations de vitesses imposées par la source mécanique. Elle peut aussi supporter d'importantes survitesses. Ce n'est pas le cas de l'alternateur synchrone qui doit tourner à vitesse constante..' ✚ La production d'une génératrice asynchrone débute d'elle-même, dès que la vitesse de synchronisme est dépassée. Elle ne demande aucune surveillance, contrairement à l'alternateur synchrone qui demande une adaptation de son couple et de son excitation. 	<ul style="list-style-type: none"> ✚ La génératrice, asynchrone doit disposer d'un champ magnétique tournant, c'est-à-dire d'une puissance réactive et d'une fréquence. Elle n'est donc pas adaptée à la production en site isolé et doit être réservée à la production couplée au réseau. ✚ La production ne débute que lorsque la vitesse de rotation dépasse la vitesse de synchronisme. ✚ De par sa construction, la machine asynchrone n'est pas adaptée à la production de très grande puissance (de l'ordre du MW) qui est plutôt réservée à la machine synchrone. ✚ La machine asynchrone ne permet pas d'agir sur le facteur de puissance des grandeurs électriques, contrairement à l'alternateur synchrone.

Production d'énergie : Dans le domaine de la production d'énergie électrique, on préfère la génératrice asynchrone lorsque l'on souhaite faire de la production couplée au réseau pour des puissances moyennes. C'est le cas des éoliennes et de la production hydroélectrique au fil de l'eau.

Pour les grandes puissances, dans les barrages hydroélectriques ou les centrales nucléaires par exemple, on préfère utiliser l'alternateur synchrone, plus robuste et mieux adapté. De même, en site isolé, il est plus simple d'utiliser une machine synchrone, capable d'imposer la fréquence sans nécessiter de puissance réactive.

III.3 Caractéristique mécanique complète :

Afin de synthétiser la description que nous avons faite de trois modes de fonctionnement possibles de la machine asynchrone, nous reportons sur la figure 40 la caractéristique mécanique complète de la machine asynchrone triphasée.



.Figure 40 : Caractéristique mécanique complète.de la machine asynchrone triphasée.

La vitesse n du rotor est positive quand elle tourne dans le même sens que le champ magnétique.

Zone moteur : le couple électromagnétique et la vitesse travaillent de concert : la puissance mécanique est déployée et la puissance électrique est absorbée.

Zone frein : la machine absorbe de la puissance électrique mais le couple s'oppose à la rotation : la puissance mécanique est absorbée. La dissipation de puissance est faite par effet Joule.

Zone génératrice : le couple électromagnétique s'oppose à la rotation : la puissance mécanique est absorbée. La machine produit de la puissance électrique.

IV. Exercices :**Exercice N°1 :**

I) Un moteur asynchrone tourne à 965 tr/min avec un glissement de 3,5 %.

Déterminer le nombre de pôles du moteur sachant que la fréquence du réseau est $f = 50$ Hz.

II) Un moteur asynchrone triphasé possédant 6 pôles est alimenté par un réseau 220V, 50Hz

1) Quelle est la vitesse du synchronisme n_s ?

2) Au régime nominal la vitesse de rotation de l'arbre du moteur est $n = 16$ tr/s, quel est le glissement ?

III) Les tensions indiquées sur la plaque signalétique d'un moteur triphasé sont : 400 V / 690 V 50 Hz (cela signifie que la tension nominale aux bornes d'un enroulement est de 400 V).

Quel doit être le couplage du moteur sur les deux réseaux triphasés : 230 V/400 V Et 400V/690V ?

Exercice N°2 :

Un moteur asynchrone à cage est alimenté par un réseau triphasé de fréquence 50 Hz, de tensions entre phases égales à 380 V. Il a été soumis aux essais suivants :

✚ A vide: Puissance absorbée : $P_0 = 360$ W, courant de ligne : $I_0 = 3,6$ A, Fréquence de rotation : $n_0 = 2995$ tr/min.

✚ En charge : Puissance absorbée: $P = 4560$ W, courant de ligne: $I = 8,1$ A, Fréquence de rotation : $n = 2880$ tr/min

Les enroulements du stator sont couplés en étoile ; la résistance de chacun d'eux vaut 0,75 W. Les pertes fer sont évaluées à 130 W.

1) Quelle est la vitesse de synchronisme ? En déduire le glissement en charge.

2) Pour le fonctionnement à vide : Calculer les pertes Joule au stator. Justifier que les pertes Joule au rotor sont négligeables. En déduire les pertes mécaniques.

3) Calculer pour le fonctionnement en charge : les pertes Joule au stator et au rotor, la puissance utile et le moment du couple utile T_u , le rendement du moteur

4) Le moteur entraîne maintenant une pompe dont le moment du couple résistant T_r est proportionnel à la fréquence de rotation et vaut 18 Nm à 3 000 tr/min. Dans sa partie utile, la caractéristique mécanique $T_u(n)$ du moteur peut être assimilée à une droite. Déterminer la vitesse de rotation du groupe moteur-pompe.

Exercice N°3 : (examen ETTF2 /2022-2023)

Un moteur asynchrone triphasé, a les caractéristiques nominales suivantes : $P_u = 40$ kW ; 220V (tension aux bornes d'un enroulement), 50 Hz, $I = 131$ A, $n_r = 1455$ tr/min, la résistance mesurée à chaud entre 2 bornes du stator est de 0,038 Ω . Dans tout le problème, le moteur est alimenté par le réseau 220 V, 50 Hz. Les pertes mécaniques, supposées constantes, sont égales à $P_{méc} = 740$ W.

Un essai à vide a donné : puissance absorbée : $P_0 = 1850$ W, $I_0 = 31,2$ A.

1) Quel couplage doit-on adopter pour ce moteur ? Quel est le nombre de pôles du stator (sachant que $n_s = 1500$ tr/min)?

2) Calculer pour la charge nominale : Le glissement, la puissance transmise au rotor, les pertes dans le fer et les pertes par effet Joule du stator, la puissance absorbée, le rendement, le facteur de puissance et le moment du couple utile.

3) D'après le schéma électrique équivalent pour une phase de la machine asynchrone, exprimer les relations de la puissance transmise et du couple électromagnétique en fonction de V , R_r , L_r , ω et g .

- 4) Entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement nominal, la caractéristique mécanique du moteur $T_u=f(n)$ est assimilable à un segment de droite, donner l'expression numérique de T_u en fonction de n . Le moteur fonctionne au-dessous de sa charge nominale : il entraîne une machine présentant un couple résistant indépendant de la vitesse et de moment $T_r = 0,75.n$, Quelle est la vitesse de rotation du groupe et la puissance utile du moteur.
- 5) Si la tension aux bornes d'un enroulement du stator est 127 V. Comment et connectée l'enroulement du stator sur le réseau 220 V de fréquence 50 Hz? Calculer le moment du couple utile T_u pour $n = 1425$ tr/min, et donner la nouvelle équation de la caractéristique mécanique $T_u(n)$.

Exercice N°4 : (examen ETTF2 /2023-2024)

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé porte les indications suivantes : 220V/380V, $n_r = 1460$ tr/min, $\cos\phi = 0,85$, $P_u = 3600$ W. Le moteur est alimenté par le réseau 220V-50 Hz

- 1) Représenter un schéma équivalent d'une phase du moteur. On précisera la signification des divers éléments introduits
- 2) Quel couplage doit-on adopter pour ce moteur ? Quel est le nombre de pôles du stator (sachant que $n_s = 1500$ tr/min)? Calculer le glissement.
- 3) Dans un essai à vide, le moteur tourne à la vitesse de synchronisme on a mesuré : $P_{a0} = 300$ W, $I_{10} = 4$ A , pertes mécaniques $P_{méc} = 150$ W , résistance d'un enroulement statorique $r_s = 0,5\Omega$. Donner la valeur des pertes joule statoriques puis déterminer les pertes fer (sans négliger les pertes Joules).
- 4) Sachant que le rendement du moteur est égal à 0,9 pour le fonctionnement nominal. Calculer : la puissance absorbée par le moteur, le courant de ligne I, les pertes par effet Joule au stator et au rotor, le couple utile.
- 5) Entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement nominal, la caractéristique mécanique du moteur $T_u=f(n)$ est assimilable à un segment de droite, donner l'expression numérique de T_u en fonction de n . Le moteur fonctionne au-dessous de sa charge nominale : il entraîne un ventilateur dans le couple résistant $T_r = 0,01n$. Quelle est la vitesse de rotation du groupe (moteur + ventilateur) et la puissance utile fournie par le moteur au ventilateur.

Exercice N°5 (examen ETTF2/ 2021-2022) :

Dans cet exercice, nous souhaitons étudier un moteur asynchrone utilisé pour le malaxage :

Mt1 est un moteur asynchrone tétra polaire (4 pôles) qui porte sur sa plaque signalétique les indications suivantes : 230/400 V ; 50 Hz ; 370 W ; 1425 tr/min. La mesure de la résistance entre phases du stator donne $R_s=10\Omega$.

- 1) Le moteur Mt1 est alimenté par un réseau 230 V/ 400 V, 50 Hz, comment doit-on coupler ses enroulements à partir de sa plaque à bornes. Représenter ce couplage.

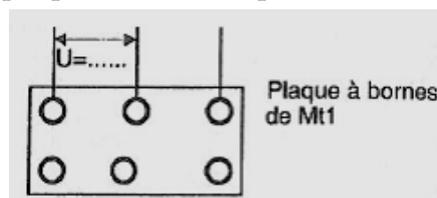


Figure 1

2) Pour vérifier certaines indications de la plaque signalétique et évaluer le rendement du moteur, on a réalisé les mesures suivantes :

✚ Essai à vide : $P_{a0} = P_0 = 30W$; $I_{a0} = I_0 = 0,2 A$.

✚ Essai en charge nominale : $\cos \varphi = 0,63$; $g = 5\%$; courant absorbé $I = 1A$; ($U = 400V$).

2.1) A partir de l'essai à vide, calculer : les pertes par effet Joule au stator P_{js} , les pertes fer (P_{fer}) et les pertes mécaniques (P_{mec}) sachant que : $P_{fer} = P_{mec}$.

2.2) A partir de l'essai en charge, calculer : la vitesse du champ tournant N_s en tr/min, la vitesse nominale N en tr/min, les pertes par effet Joule au stator P_{js} , la puissance absorbée P_a par le moteur, la puissance transmise au rotor P_{tr} , les pertes Joule au rotor P_{jr} , la puissance utile P_u , le rendement du moteur $Mt1$, le couple utile T_u .

3) Le moteur entraîne une machine dont la caractéristique mécanique est une droite d'équation :

$T_r = 0.04n - 50$ (n s'exprime en tr/min et T_r en Nm). La partie utile de la caractéristique mécanique du moteur est assimilée à une droite en fonctionnement normal. Déterminer : la relation entre T_u et n , la vitesse de rotation du groupe, la puissance utile du moteur.

Exercice N°6 (concours doctorat DJELFA 2024-2025) :

Un moteur asynchrone tétra-polaire, stator monté en étoile, fonctionne dans les conditions suivantes : tension entre phases $U = 400V$; fréquence $f = 50$ Hz; puissance utile $P_u = 39$ kW; vitesse de rotation $n_r = 1440$ tr/min. Les pertes joule statoriques, les pertes fer rotoriques ainsi que les pertes mécaniques sont négligées.

On donne le modèle équivalent pour une phase de la machine asynchrone (figure2):

R_f : représente les pertes fer ; X_m : la réactance magnétisante du stator ; X : la réactance totale de fuite vue du stator; ω : la pulsation des courants statoriques ; R : la résistance du rotor ramenée au stator ; g : le glissement.

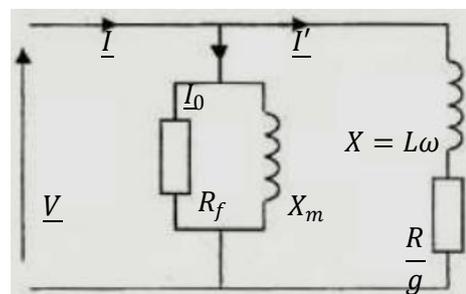


Figure 2

On donne les valeurs des éléments du modèle équivalent :

$R_f = 183 \Omega$; $X_m = 25 \Omega$; $X = 0,55 \Omega$; et $R = 0.3 \Omega$.

- 1) Calculer la vitesse de synchronisme n_s , en tr.min⁻¹. En déduire le glissement g .
- 2) Calculer la puissance transmise P_{tr} , les pertes fer statoriques p_{fs} et la puissance absorbée P_a .
- 3) Calculer le rendement η de la machine asynchrone.
- 4) A partir de la Figure 2, exprimer l'intensité efficace I' en fonction de V , R , L , ω et g .
- 5) Exprimer la puissance P_{tr} transmise au rotor en fonction de V , R , L , ω et g .
- 6) Montrer que l'on peut exprimer le moment du couple électromagnétique C_{em} de la façon suivante :

$$C_{em} = 3 \frac{pR}{g\omega} \frac{V^2}{(L\omega)^2 + \left(\frac{R}{g}\right)^2}$$

Exercice N°7 (concours doctorat TIARET 2018/2019) :

Soit le schéma équivalent d'un moteur à induction à quatre pôles spécial (IP44) monté en étoile et alimenté entre phase d'une tension de 380V et une fréquence de 50Hz. Le moteur est installé à l'extérieur d'un bâtiment sous une température de 14°C, soit 287,15 Kelvin. On donne : $r_s = 0,5 \Omega$, $r_r = 0,25 \Omega$, $L_s = 2,90 \text{ mH}$, $L_r = 1,20 \text{ mH}$, $L_m = 70 \text{ mH}$.

Si on considère que les pertes fer sont négligeable et les pertes mécaniques sont constantes et égale 1100 W

Déterminer pour un glissement de 2 % :

- 1) La vitesse mécanique en rd/s.
- 2) Les différents courants dans le circuit (I_s et I_r)
- 3) Le facteur de puissance
- 4) Bilan de puissance (puissance absorbé, puissance transmise, perte rotorique, puissance utile et rendement)
- 5) Le couple utile, couple électromécanique

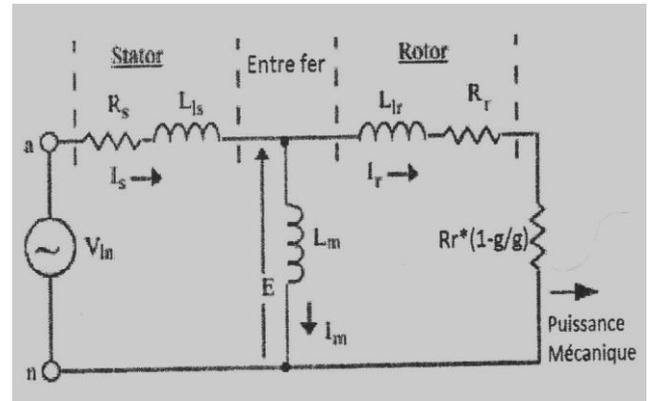


Figure 3

Exercice N°8 : (examen ETTF2/2019-2020)

Un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné et à bagues est alimenté par un réseau triphasé 50 Hz dont la tension entre phases est $U = 380 \text{ V}$. Les enroulements du stator et du rotor sont en étoile. La résistance mesurée à chaud entre deux bornes de phases du stator est $R_s = 0,2 \Omega$, celle mesurée à chaud entre deux bagues du rotor est $R_r = 0,08 \Omega$.

A vide, le moteur tourne pratiquement à 1500 tr/min et la méthode des deux wattmètres donne :

$$W_{10} = 900 \text{ W} \text{ et } W_{20} = -410 \text{ W}.$$

- 1) Représenter un schéma équivalent monophasé de la machine. On précisera la signification des divers éléments introduits
- 2) Calculer : le nombre de pôles du stator, le facteur de puissance et l'intensité du courant en ligne à vide I_0 .
- 3) Les pertes mécaniques sont constantes et égales à 100 W. Calculer : les pertes joule au stator à vide P_{js0} et les pertes dans le fer du stator qui seront considérées comme constantes.
- 4) Lors d'un essai en charge, on obtient : $n = 1440 \text{ tr/min}$; et la méthode des deux wattmètres donne : $W_1 = 4500 \text{ W}$; $W_2 = 2000 \text{ W}$. Calculer : le glissement, le facteur de puissance, le courant au stator, le rendement et le moment du couple utile.
- 5) Le moteur entraîne une machine dont la caractéristique mécanique est une droite d'équation : $Tr = 20 + 0,01n$ (n s'exprime en tr/min et Tr en Nm).
 - a) La partie utile de la caractéristique mécanique du moteur est assimilée à une droite en fonctionnement normal. Déterminer : la relation entre T_u et n , la vitesse de rotation du groupe, la puissance utile du moteur.
 - b) Quelle résistance doit-on mettre en série avec chacun des enroulements du rotor pour que la vitesse du groupe précédent devienne 1410 tr/min.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES



Références bibliographiques

- [1] D.Barielle. L.Mossion. C.Garnieur, « L'Essentielle d'électrotechnique », Dunod, 2018.
- [2] L.Lasne, « Électrotechnique et énergie électrique », Dunod, 2014.
- [3] C.Palermo, « Électrotechnique - parcours IUT », Dunod, 2012.
- [4] V.Léger, « Physique appliquée », Ellipes, 2010.
- [5] C.Francois, « Génie électrique : électrotechnique & électronique de puissance », Ellipes, 2005.
- [6] F.Milsant, « Machines électriques - transformateurs et réseaux électriques », Berti, 1992.
- [7] F.Milsant, « Machines électriques - machines synchrones et asynchrone, commande électronique », Berti, 1993.
- [8] M.Jufer. Y.Perriard, « Électrotechnique -base de l'électricité », Presses polytechniques et universitaires romandes- suisse, 2014.
- [9] R.Mérat. R.Moreau. L.Allay. J.Lafargue, « Électrotechnique - manuel de cours et exercices corrigés », Berti, 2014.
- [10] C.Francois, « Mémento de génie électrique - 50 fiches de synthèse », Ellipes, 2008.
- [11] H.Djelouah, « Électromagnétisme et ondes électromagnétiques », Page bleues, 2019.
- [12] P.Mayé, « Aide mémoire d'électrotechnique », Dunod, 2008.
- [13] B.Grabowski. C.Ripoll, « Aide mémoire d'électronique », Dunod, 2008.
- [14] H.Largeaud, « Schéma électrique », Eyrolles, 2010.
- [15] M.Lamara, « Électronique fondamentale - cours et exercices corrigés », Page bleues, 2017.
- [16] A. Fouillé, « Électrotechnique à l'Usage des Ingénieurs », 10e édition, Dunod, 1980
- [17] D. Hong, « Circuits et mesures électriques, Dunod », 2009.
- [18] A. Fitzgerald, « Electric Machinery », McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [19] J. Lesenne, « Introduction à l'électrotechnique approfondie », Technique et Documentation, 1981.
- [20] P. MAYE, « Moteurs électriques industriels », Dunod, 2005
- [21] Kouznetsov, Fondement de l'électrotechnique
- [22] M. Kostenko L. Piotrovski, Machines Electriques - Tome 1, Tome 2, Editions MIR, Moscow, 1979.
- [23] H. Lumbroso, Problèmes résolus sur les circuits électriques, Dunod