

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hamma Lakhder El-Oued

Faculté de la Technologies

Département de Génie Électrique



Support de Cours

Électrotechnique fondamentale II

Classe concerné: 2^{ème} Licence électrotechnique S4

Proposé par :

Dr. Touil Slimane

Maitre de conférences A

Année Universitaire : 2024 / 2025

Summary

Course Content:

Chapter 1: Review of Magnetostatics and Magnetic Circuits Basic principles and laws of magnetostatics Magnetic circuit concepts

Chapter 2: Transformers

Overview and general principles Operating principle of single-phase transformers. The ideal transformer Calculation of induced electromotive force (EMF) Impedance matching The real transformer Kapp's approximation Evaluation of secondary voltage drop Energy balance and efficiency Measurement techniques for calculating efficiency Three-phase transformers Different types of coupling and phase displacement index

Chapter 3: DC Machines

Overview and operating principles Construction and components DC generator characteristic equations Calculation of EMF and torque Different excitation modes DC motor operating principle Motor starting, braking, and speed control Energy balance and efficiency

Chapter 4: Synchrones Machines

Overview and operating principles Rotating magnetic field Operation as an alternator Study of alternator operating diagrams Synchronous motors

Chapter 5: Asynchronous Machines

Operating principle and construction Equivalent single-phase schematic and equations Mechanical characteristics Simplified circle diagram Energy balance and efficiency Operation as a generator and in braking mode Different types of asynchronous motors Starting methods Speed control of asynchronous motors

Keywords:

Electrical Engineering (ELT); Transformer (TR); Direct Current Machines (DCM); Synchronous Machines (SM); Asynchronous Machines (AM)

Résumé

Objectifs de l'enseignement

Maîtriser le calcul des puissances monophasées et triphasées. - Connaitre les différents modes de couplage. - Déterminer les éléments des modèles équivalents - Maîtriser le fonctionnement des différentes machines
Connaissances préalables recommandées (descriptif succinct des connaissances requises pour pouvoir suivre cet enseignement)

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Rappels sur la magnétostatique et les circuits magnétiques

Chapitre 2 : Transformateur

Généralités, Principe de fonctionnement du transformateur monophasé, Le transformateur idéal, Calcul de la force électromotrice induite, Adaptation d'impédance, Le transformateur réel, Le transformateur dans l'approximation de Kapp, évaluation de la chute de tension au secondaire, Bilan énergétique et rendement, Mesures pour le calcul du rendement, Transformateur triphasé, Différents types de couplage et indice horaire.

Chapitre 3 : Machines à courant continu

Généralités, Principe de fonctionnement – Constitution, Génératrice à courant continu – équations caractéristiques, Calcul de la force électromotrice et du couple, Les différents modes d'excitation, Moteur à courant continu – principe de fonctionnement, Démarrage, freinage et réglage de vitesse des moteurs, Bilan énergétique et rendement.

Chapitre 4 : Machines synchrones

Généralités, Principe de fonctionnement de la machine. Champ tournant, Fonctionnement en alternateur, étude des différents diagrammes de fonctionnement de l'alternateur, Moteurs synchrones.

Chapitre 5 : Machines asynchrones

Principe de fonctionnement – Constitution des machines asynchrones, Mise en équations et schéma monophasé équivalent, Caractéristique mécanique, Diagramme du cercle simplifié, Bilan énergétique et rendement, Fonctionnement en génératrice et en frein, Les différents types de moteurs, Démarrage des moteurs asynchrones, Réglage de vitesse des moteurs asynchrones.

Mot clé

Electrotechnique **ELT** ; **Transformateur** **TR** ; **Machines à courant continu** **MCC**; **Machines synchrones** **MS** ; **Machines asynchrones** **MAS**

Sommaire

Chapitre I Le transformateur monophasé

I	Présentation.....	1
1.	Constitution.....	1
2.	Symbole et convention.....	2
II	Transformateur parfait en sinusoïdal.....	2
1.	relation entre les tensions.....	2
2.	formule de Boucherot.....	2
3.	les intensités.....	3
4.	les puissances.....	3
III	Transformateur réel.....	3
1.	plaque signalétique.....	4
2.	les pertes.....	4
a)	pertes par effet Joule.....	4
b)	pertes magnétiques.....	5
c)	fuites magnétiques.....	6
d)	modèle équivalent.....	6
3.	modèle du transformateur ramené au secondaire.....	6
a)	hypothèse de Kapp.....	6
b)	modèle de Thévenin.....	6
4.	détermination des pertes et du modèle.....	7
a)	essai à vide.....	7
b)	essai en court circuit.....	8
5.	Rendement.....	9
6.	chute de tension en charge.....	11
7.		

Chapitre II Machine a courant continu

I.	Présentation.....	12
a.	Généralités.....	12
b.	Description.....	13
II.	Principe de fonctionnement	14
III.	Fonctionnement en génératrice.....	15
a.	Fonctionnement à vide et à fréquence de rotation constante.....	16
b.	Fonctionnement sur charge résistive.....	17
c.	Point de fonctionnement sur charge résistive.....	18

d. Bilan des puissances.....	19
IV. Fonctionnement en moteur.....	23
a. Fonctionnement en charge.....	23
b. Loi d'Ohm.....	23
c. Plaque signalétique du moteur.....	24
d. Bilan des puissances.....	24
e. Essai à vide.....	27
f. Essai en charge.....	27
g. Point de fonctionnement.....	27
h. Le risque d'emballement du moteur.....	28

Chapitre III Machine Synchrone

1. Présentation	29
a. Principe de l'alternateur.....	29
b. Constitution	29
c. Utilisation	30
d. Symbole	31
2. La F.E.M a vide dans un alternateur.....	31
a. Présentation.....	31
b. Caractéristique à vide	31
c. Idéalisation de la caractéristique à vide.....	32
3. Alternateur en charge	34
a. Présentation.....	34
b. Caractéristique électrique $V = f(I)$	35
c. Etude de la R.M.I.....	35
d. Modèle équivalent d'une phase d'alternateur	36
e. Diagramme de BEHN – ESCHENBOURG.....	37
4. Bilan de puissance.....	38
a. Puissance utile	38
b. Bilan de pertes.....	38

Chapitre VI Moteur Asynchrone

1. Présentation.....	40
a. Le stator.....	40
b. Le rotor.....	40
c. Association entre le rotor et le stator.....	41
d. Le Symbole.....	41
e. Le glissement.....	41
2. La plaque signalétique – Le couplage.....	42
a. Le couplage en étoile	43
b. Le couplage en triangle.....	43
3. La mesure de la puissance absorbée.....	44
a. La puissance active	44
b. La puissance réactive	45
c. La puissance apparente.....	45
d. Facteur de puissance	45
4. Le bilan de puissance.....	45
5. L'essai a vide.....	48

INTRODUCTION

Ce document est un support de cours d'électrotechnique fondamentale 2 destiné essentiellement aux étudiants de 2^{ème} année licence en électrotechnique du département génie électrique pour l'option électrotechnique L2 S4. Il est destiné à accompagner le travail

Personnel de l'étudiant avec l'aide précieuse de l'enseignant.

Le premier chapitre est dévolu à l'étude du transformateur monophasé.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des machine a courant continu

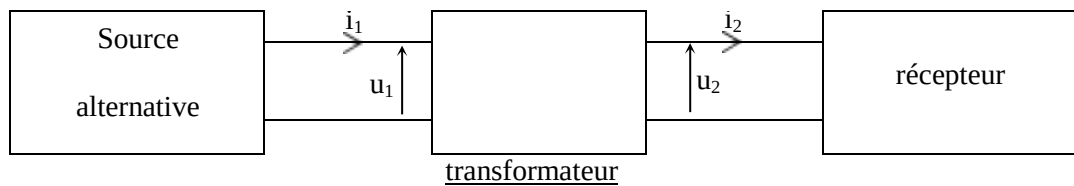
Le troisième chapitre concerné l'étude des machine synchrone ou alternateur monophasé et triphasé.

Le quatrième chapitre traité la machine asynchrone triphasé

Le transformateur Monophasé

I / Présentation

- Le transformateur est une machine statique permettant, en alternatif, la modification de certaines grandeurs (tension, intensité) sans changer leur fréquence.
- Il assure la transmission de la puissance avec un excellent rendement.

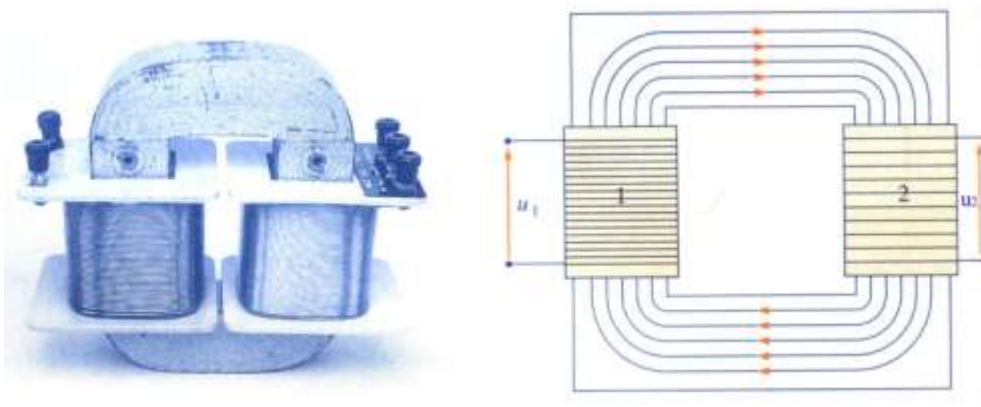


- U_1 et U_2 sont les valeurs efficaces de u_1 et u_2 :
 - . Si $U_2 > U_1$, le transformateur est élévateur de tension
 - . Si $U_2 < U_1$, il est abaisseur de tension
 - . Si $U_2 = U_1$, il assure l'isolement électrique entre la source et la charge.

1. Constitution

Le transformateur est un quadripôle constitué d'un circuit magnétique fermé sur lequel on a bobiné deux enroulements électriquement indépendants.

La tension sinusoïdale u_1 au primaire crée un champ magnétique variable qui, guidé par le noyau, traverse l'enroulement secondaire. Celui-ci est donc le siège d'une tension induite u_2 .

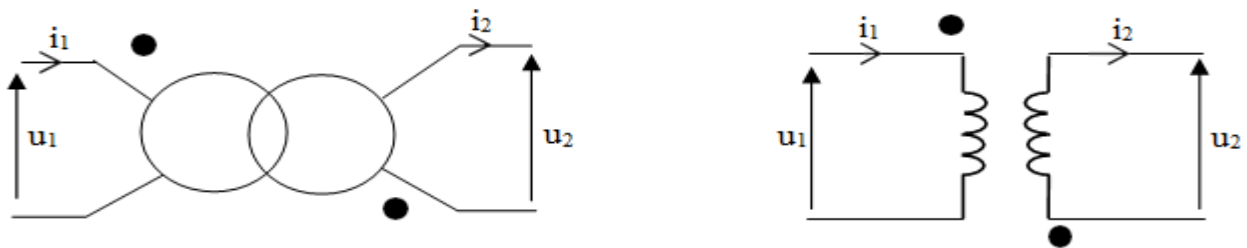


L'enroulement primaire comporte N_1 spires et le secondaire N_2 .

Le primaire reçoit de la puissance du réseau : il se comporte comme un récepteur (convention récepteur)

Le secondaire fournit de la puissance à la charge : il se comporte comme un générateur (convention générateur)

2. symboles



Les bornes sont homologues, repérées par des points sur le schéma, si i_1 entrant par l'une et i_2 entrant par l'autre créent dans le circuit magnétique des champs magnétiques de même sens.

II / Transformateur parfait en sinusoïdal

1. relation entre les tensions

$$\frac{u_2}{u_1} = -\frac{e_2}{e_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -m \text{ où } m : \text{rapport de transformation}$$

en complexe : $\underline{U}_2 / \underline{U}_1 = -m$

en valeur efficace : $U_2 / U_1 = m$

formule de Boucherot

$$E_1 = 4,44 N_1 B_{\max} S f$$

E_1 : valeur efficace de la fém e_1 (V)

N_1 : nombre de spire au primaire

$B_{\max}$: valeur max du champ magnétique dans le circuit (Tesla T)

f : fréquence d'alimentation (Hz)

S : section du circuit magnétique (m^2)

2. les intensités

De même,

En valeurs instantanées : $i_1 = -m.i_2$

en complexe : $\underline{I}_1 = -m. \underline{I}_2$

en valeur efficace : $I_2 / I_1 = 1/m$

3. les puissances

puissances apparentes : $S_1 = U_1 \times I_1 = \frac{U_1^2}{m} \times m \times I_2 = U_2 \times I_2$ donc $S_1 = S_2$

puissances actives : d'après la définition du transformateur parfait $P_1 = P_2$
 $P_1 = S_1 \times \cos \varphi_1 = S_2 \times \cos \varphi_2$

puissances réactives : $Q_1 = S_1 \times \sin \varphi_1 = S_2 \times \sin \varphi_2 = Q_2$

Exercice : Le primaire d'un transformateur parfait, de rapport de transformation $m=0,4$ est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace 220V et de fréquence 50Hz. Le secondaire alimente une bobine de résistance 10Ω et d'inductance $0,03H$. Calculer les différentes puissances fournies par le secondaire.

$$U_2 = m.U_1 = 0,4 \times 220 = 88V$$

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} = 13,7\Omega$$

$$I_2 = U_2 / Z_2 = 88 / 13,7 = 6,4A$$

$$\tan \varphi_2 = 2\pi fL/R = 0,942 \Rightarrow \varphi_2 = 43^\circ$$

Donc :

$$S_2 = U_2.I_2 = 563 \text{ VA}$$

$$P_2 = S_2.\cos \varphi_2 = 410 \text{ W}$$

$$Q_2 = S_2.\sin \varphi_2 = 386 \text{ VAR}$$

III / Transformateur réel1. plaque signalétique

Elle indique : U_1 : tension d'alimentation du primaire
 S_n : puissance apparente nominale
 U_{20} : tension d'utilisation à vide du secondaire
 f : fréquence d'utilisation

on peut alors calculer : le rapport de transformation $m = U_{20} / U_1$
les intensités des courants nominaux $I_{1n} = S_n / U_1$ et $I_{2n} = S_n / U_{20}$

2. les pertes

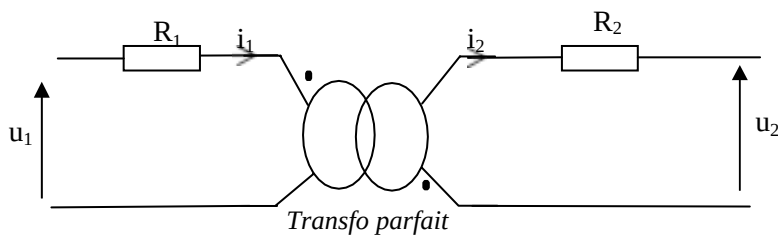
le transformateur réel est un transformateur parfait avec des pertes (Joule, magnétique, fuites)

- les pertes par effet Joule dans les enroulements
- les pertes magnétiques (Foucault, hystérésis)
- les fuites magnétiques : toutes les lignes de champ ne sont pas canalisées par le circuit magnétique fermé.

a) pertes par effet Joule

- elles se produisent dans les résistances R_1 et R_2 des enroulements traversés par les courants i_1 et i_2 :

$$P_{\text{Joule}} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$
- on ajoute donc sur le schéma équivalent du transfo parfait, les résistances R_1 et R_2



b) pertes magnétiques

Le circuit magnétique est le siège de pertes magnétiques :

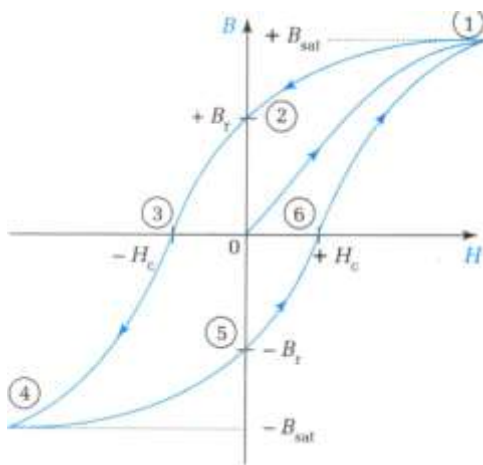
- pertes par courants de Foucault ($\Rightarrow$ échauffement).
- Pertes par hystérésis.

$\Rightarrow$ on limite les pertes par courants de Foucault, en utilisant un circuit magnétique feuilleté (les courants passent plus mal)

par hystérésis, en utilisant des aciers doux (cycle hystérésis étroits)

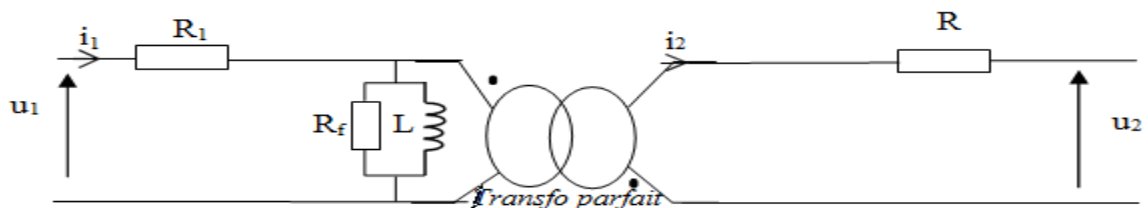
Rappels magnétiques

- Courants de Foucault : courants induits dans un conducteur soumis à un champ variable.
- Hystérésis d'un matériaux :



La désaimantation se fait avec un retard par rapport à l'aimantation.

- Les pertes magnétiques dépendent de U_1 et f .
- ces pertes se produisent dans le circuit magnétique, dès que le primaire est alimenté.
- Ces pertes se traduisent par une consommation supplémentaire de puissance réactive (comme une inductance pure : L_F) et de puissance active (comme une résistance R_F)

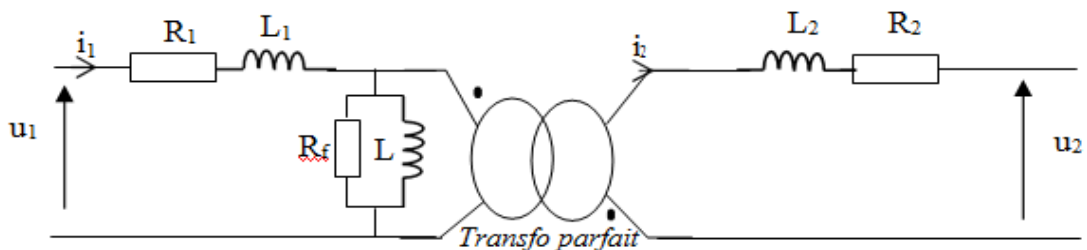


c) fuites magnétiques

toutes les lignes de champ ne sont pas canalisées par le circuit magnétique, certaines se referment dans l'air.

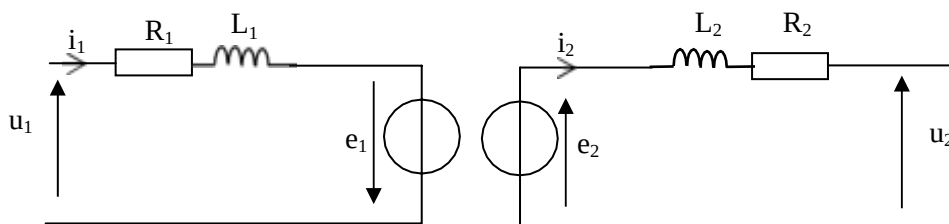
Donc on ajoute L_1 et L_2 sur le schéma précédent, et on obtient le modèle équivalent définitif

d) modèle équivalent

3. modèle du transformateur ramené au secondaire

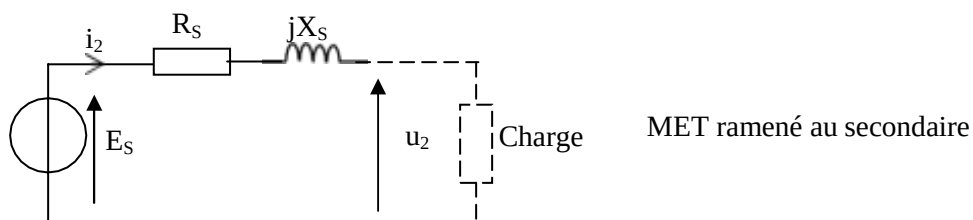
a) hypothèse de Kapp

on néglige i_{10} devant i_1 et i_2 au fonctionnement nominal



Alors comme pour un transfo parfait, on a : $I_1 = m \cdot I_2$

b) Modèle de Thévenin



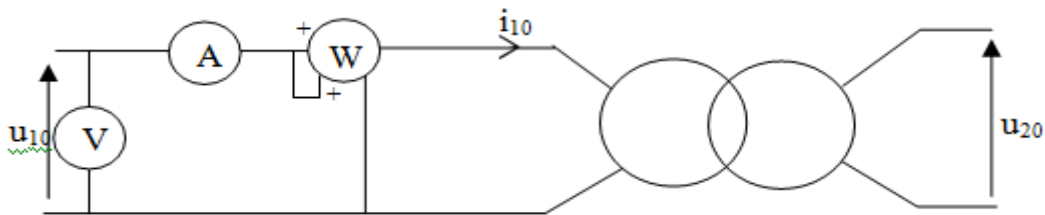
Avec $\underline{Z}_s = \underline{R}_s + j \cdot X_s$ où $R_s = R_2 + m^2 R_1$
 $X_s = X_2 + m^2 X_1$

R_S : résistance du transfo ramenée au secondaire
(rend compte des résistances des enroulements)
 X_S : réactance du transfo ramenée au secondaire
(rend compte des fuites magnétiques)

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_S - \underline{Z}_S \cdot \underline{I}_2$$

4. détermination des pertes et du modèle

a) essai à vide



- On se place à U_1 nominal
- Le wattmètre mesure la puissance absorbée à vide par le transfo : P_{10}
- $P_{10} = P_{Fe} + R_1 I_{10}^2$

$\nwarrow$
Perte
Fer

$\nwarrow$
Perte
joule à
vide

or I_{10} très faible (car à vide donc I_2 nul)

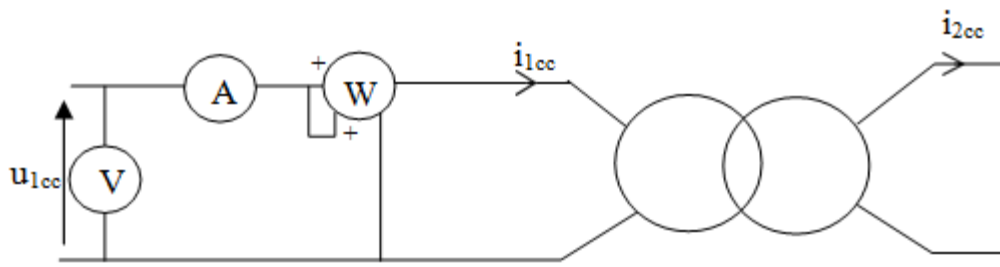
donc $R_1 I_{10}^2 \ll P_{Fe}$

Et finalement

$$P_{10} = P_{Fe}$$

- l'essai à vide permet de mesurer les pertes Fer
- les pertes Fer dépendent de U_1
- A vide : $I_2 = 0$ $\underline{E}_S = \underline{U}_{20}$

b) essai en court circuit



- on se place à U_{1cc} réduite, de façon à avoir $i_{2cc} = i_{2n}$ (valeur nominale)
- le wattmètre mesure la puissance absorbée en court-circuit par le transfo : P_{1cc}
- $P_{1cc} = P_{Fecc} + P_{Joule}$

$\nwarrow$
 Perte Fer
 en court-
 circuit

$\nwarrow$
 Perte
 joule

or U_{1cc} faible

donc P_{Fecc} négligeable

finalement : $P_{1cc} = P_{Joule}$

- l'essai en court-circuit permet de mesurer les pertes Joule

- En court circuit : on détermine :

$$Z_s = m^2 \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}}$$

$$R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

$$\begin{aligned}
 \text{en effet : } P_{1cc} &= R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2 \\
 &= m^2 R_1 I_{2cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2 \\
 &= (m^2 R_1 + R_2) I_{2cc}^2
 \end{aligned}$$

(on néglige les pertes Fer)

$$\text{car } I_{1cc} = m \cdot I_{2cc}$$

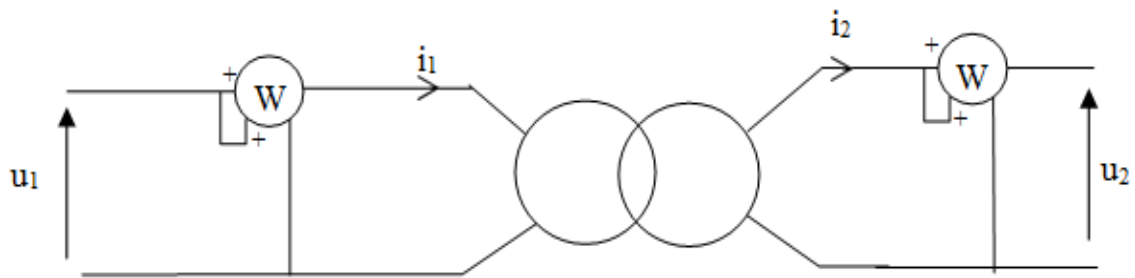
$$\text{donc } R_s = P_{1cc} / I_{2cc}^2$$

et donc on en déduit :

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

5. rendement

- méthode directe :



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}$$

Puissance au secondaire
Puissance au primaire

- méthode des pertes séparées :

essai à vide : P_{Fer}

essai en court circuit : P_{Joule}

essai en charge : P_2

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fe}} + P_{\text{J}}}$$

Exercice :

Un transfo 230/24V ; 63VA

Un essai à vide : $P_{10} = 5W$

Un essai en court circuit : $P_{1cc} = 10W$

Un essai sur résistance permet de mesurer $P_2 = 50W$

Déterminer :

1/ I_{1n} ; I_{2n} ; m

2/ η

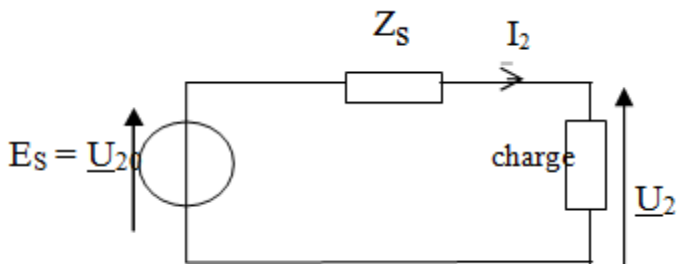
3/ R_1 et R_2 sachant que $R_2 = 100.R_1$

1/ $I_{1n} = 270mA$; $I_{2n} = 2,6A$; $m = 0,11$

2/ $\eta = 50 / (50 + 5 + 10) = 0.77$

3/ $R_1 \times 0.27^2 + R_2 \times 2.6^2 = 10$ et $R_2 = 100.R_1$
donc $R_1 = 15m\Omega$ et $R_2 = 1,5\Omega$

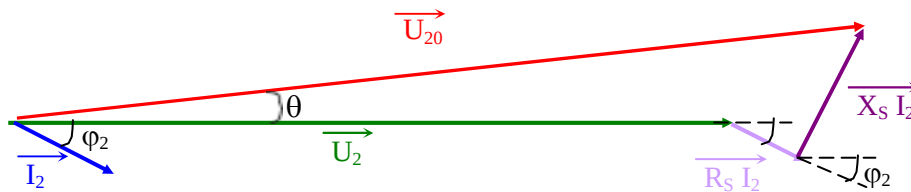
6. chute de tension en charge



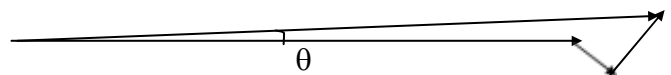
Loi des mailles $\underline{U}_{20} = \underline{U}_2 + \underline{Z}_s \cdot \underline{I}_2$

$$= \underline{U}_2 + \underline{R}_s \cdot \underline{I}_2 + j\underline{X}_s \cdot \underline{I}_2$$

Diagramme de Fresnel : $\vec{U}_{20} = \vec{U}_2 + \vec{R}_s \cdot \vec{I}_2 + \vec{X}_s \cdot \vec{I}_2$



θ Faible, donc on fait l'approximation $\theta =$



0 d'où la formule approchée :

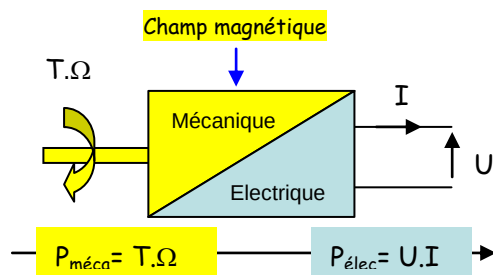
$$\Delta U_2 = R_s I_2 \cos \varphi + X_s I_2 \sin \varphi$$

LA MACHINE A COURANT CONTINU

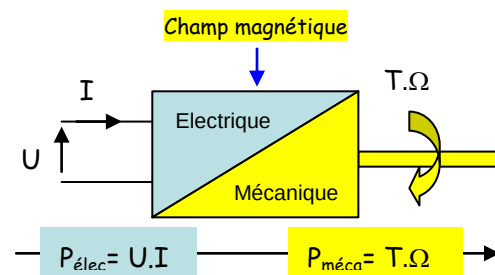
I Présentation

a Généralités

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique.



Fonctionnement en génératrice



Fonctionnement en moteur

- L'énergie mécanique se caractérise par un couple de moment T associé à une vitesse angulaire Ω , le produit de ces deux grandeurs définit la puissance mécanique :

$$P_{\text{méca}} = T \cdot \Omega$$

$P_{\text{méca}}$	Puissance mécanique en watts [W]
T	Moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm]
Ω	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s ⁻¹]

- L'énergie électrique est évaluée par un courant continu I et une tension continue U , la puissance électrique sera le produit de ces deux grandeurs :

$$P_{\text{élec}} = U \cdot I$$

$P_{\text{élec}}$	Puissance électrique en watts [W]
U	La tension en volts [V]
I	L'intensité du courant en ampères [A]

Energie absorbée	Fonctionnement	Energie fournie
Electrique	Moteur	Mécanique
Mécanique	Génératrice	Electrique

. b Description

➤ Vue d'ensemble :

La machine à courant continu comporte les parties principales suivantes :

- Une partie fixe appelée STATOR qui aura le rôle d'inducteur.
- Une partie mobile appelée ROTOR qui aura le rôle d'induit.
- Une liaison rotor - éléments extérieurs à la machine appelée COLLECTEUR.

➤ L'inducteur :

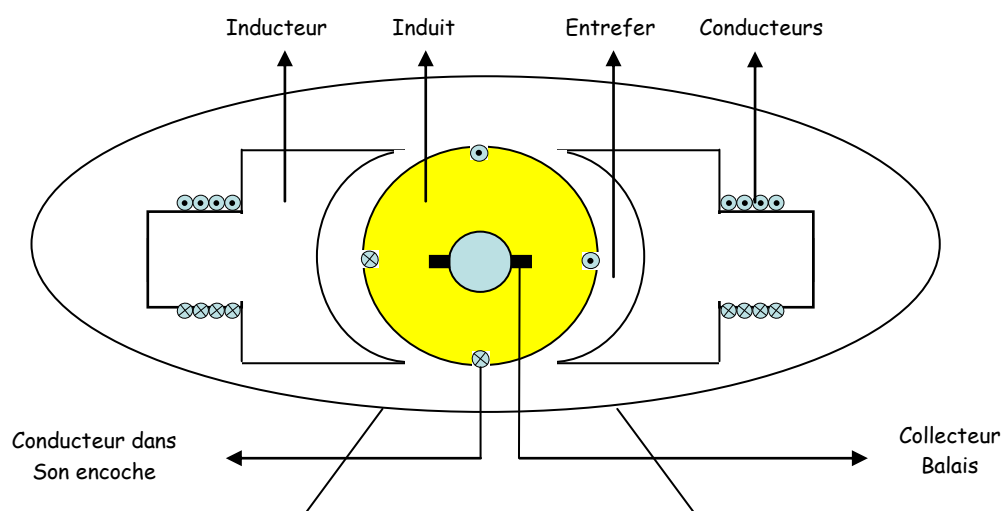
Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie mobile, où se situent les conducteurs.

➤ L'induit :

Le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.

➤ Collecteur et balais :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre isolées, disposées sur l'extrémité du rotor, les balais portés par le stator frottent sur le collecteur.



Vue du Moteur à courant continu

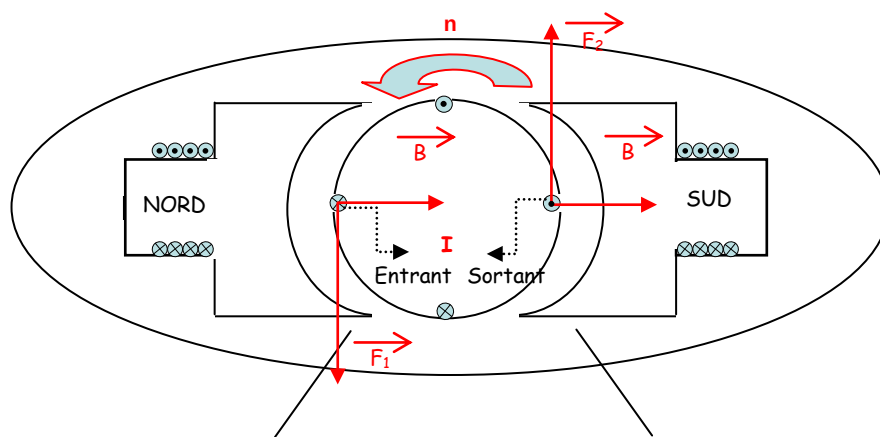
. II Principe de fonctionnement

Une machine à courant continu possède un nombre N de conducteurs actifs, le flux utile sous un pôle créé par l'inducteur est Φ , exprimé en webers, et n représente la fréquence de rotation de l'arbre du rotor, en tours par seconde.

Deux cas peuvent se présenter :

- Soit un conducteur est à la fois traversé par un courant électrique et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors soumis à une force électromagnétique.
- Soit un conducteur est à la fois en mouvement de rotation et plongé à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors le siège d'une force électromotrice

Ces deux cas peuvent être décrits par le schéma suivant :



Courant + Champ magnétique



Force Electromagnétique

Force + Champ magnétique



Force Electromotrice

Les conducteurs actifs, de nombre N , coupent les lignes du champ magnétique, ils sont donc le siège de forces électromotrices induites, la force électromotrice f.e.m résultante de l'ensemble de ces N spires :

$$E = N.n.\Phi$$

E	La f.e.m en volts [V]
n	La fréquence de rotation en tours par seconde [tr.s ⁻¹]
Φ	Le flux en webers [Wb]
N	Le nombre de conducteurs actifs

➡ Cette relation est essentielle pour la machine, car elle est le lien entre le flux Φ une grandeur magnétique, la tension E une grandeur électrique, et la fréquence de rotation n , une grandeur mécanique.

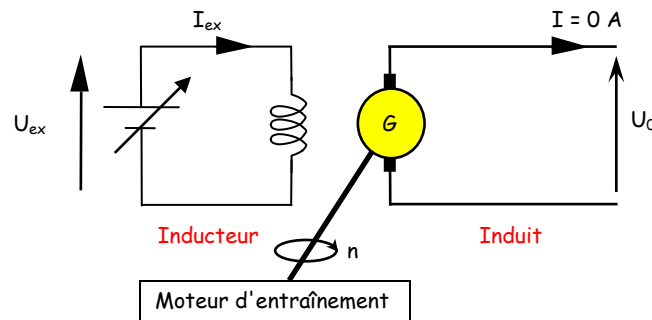
➡ Sachant que $\Omega = 2\pi.n$, une autre relation, reliant les trois types de grandeurs, est fréquemment utilisée, elle prend en compte la vitesse angulaire Ω exprimée en radians par seconde :

$E = K.\Phi.\Omega$	E	La f.e.m en volts [V]
	Ω	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s^{-1}]
	Φ	Le flux en webers [Wb]
	K	Constante

. III Fonctionnement en génératrice

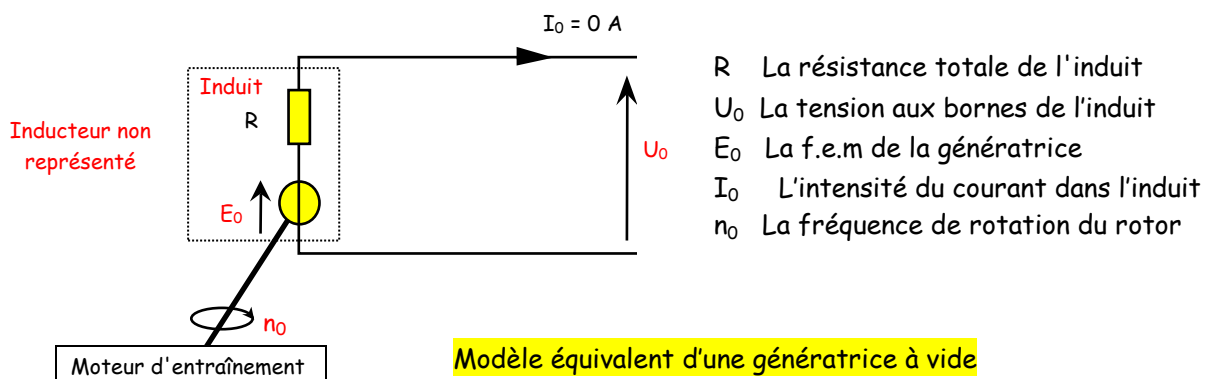
. a Fonctionnement à vide et à fréquence de rotation constante

Le rotor de la machine est entraîné par une source extérieure à la fréquence de rotation n . Nous dirons que la génératrice fonctionne à vide lorsqu'elle ne débite aucun courant.



Fonctionnement d'une génératrice à vide

La relation $E = N.n.\phi$ se caractérise donc par deux constantes, le nombre de conducteurs N , et la fréquence de rotation n avec laquelle est entraînée la génératrice. La f.e.m E est dans ce cas proportionnelle au flux ϕ , elle est donc à un coefficient près l'image de la courbe de magnétisation de la machine. L'indice «₀» caractérise le fonctionnement à vide.

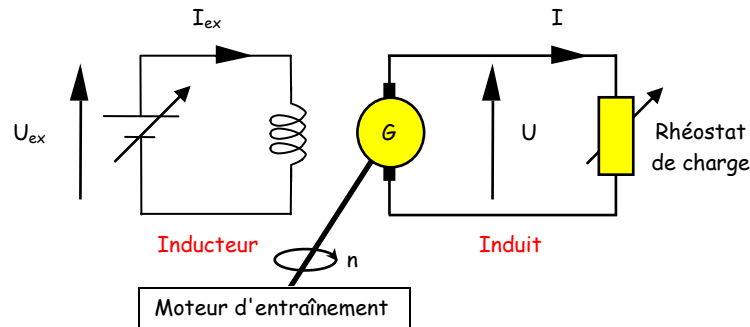


Modèle équivalent d'une génératrice à vide

La tension U_0 mesurée directement sur l'induit de la génératrice est exactement égale à la f.e.m E_0 de la machine car l'intensité du courant est nulle, il n'y a donc pas de chute de tension due à la résistance de l'induit.

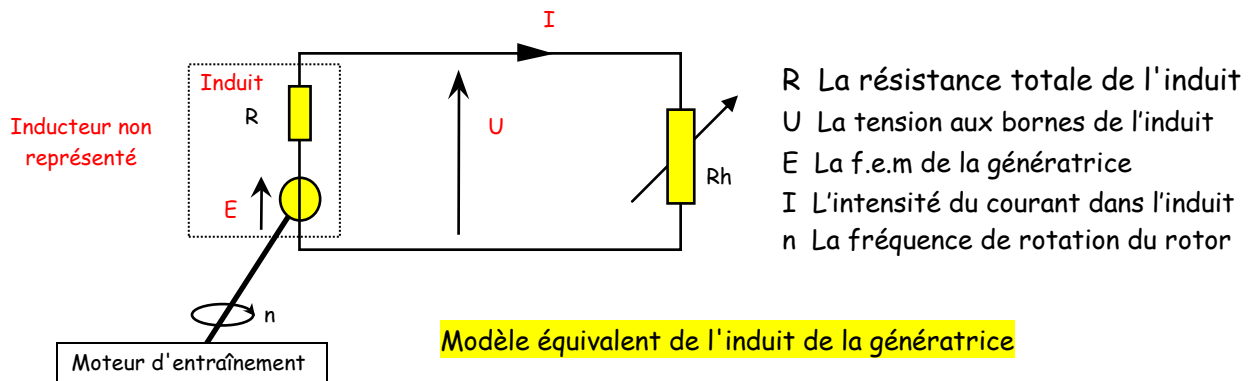
b Fonctionnement sur charge résistive

La génératrice est entraînée par un moteur auxiliaire, elle débite un courant d'intensité I dans un rhéostat de charge



Fonctionnement d'une génératrice en charge

L'induit de la génératrice peut être remplacé par son modèle équivalent :



Modèle équivalent de l'induit de la génératrice

La loi d'Ohm de l'induit se déduit facilement de son modèle équivalent :

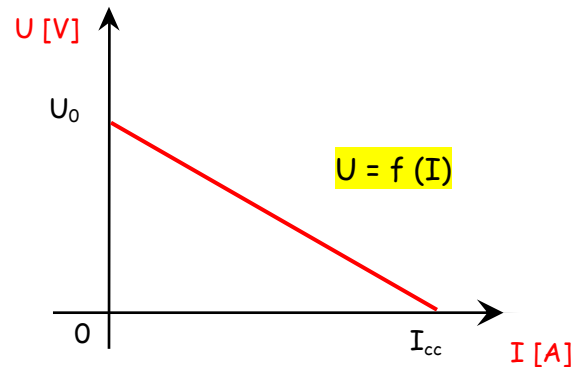
$$U = E - R \cdot I$$

U	La tension aux bornes de l'induit en volts [V]
E	La fem de la génératrice en volts [V]
R	La résistance de l'induit en ohms [Ω]
I	L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

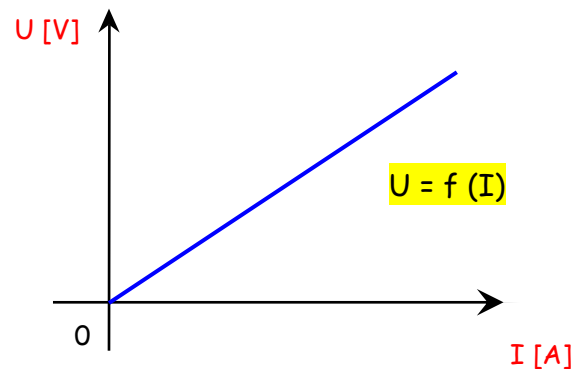
Suivant les valeurs prises par la charge résistive, le moment du couple ($U ; I$) de la tension aux bornes de l'induit et de l'intensité du courant dans l'induit ne peut se déplacer que sur la droite déterminée par deux valeurs particulières :

U_0 valeur maximale de la tension aux bornes de l'induit de la génératrice à vide, $I = 0$ A

I_{cc} valeur maximale de l'intensité du courant dans l'induit court-circuité, $U = 0$ V

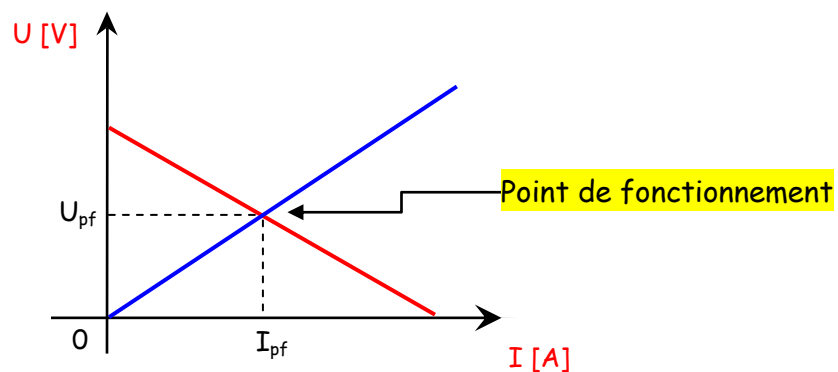


Nous pouvons tracer la caractéristique de la charge ohmique R en utilisant la loi d'Ohm, le moment du couple (U ; I) de la tension aux bornes de la charge et de l'intensité du courant qui la traverse se déplace que sur la droite de coefficient directeur égal à la valeur de R :



. c Point de fonctionnement sur charge résistive

Le point de fonctionnement du groupe Induit - Charge résistive peut se déterminer graphiquement. Il correspond au fonctionnement simultané de l'alimentation et du récepteur. Les deux couples (courant ; tension) issus des deux caractéristiques doivent impérativement être égaux puisqu'ils sont associés, ainsi :



Evaluation graphique du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement peut également se calculer à partir des deux équations :

$$\begin{cases} U = E - R.I \\ U = R_h.I \end{cases}$$

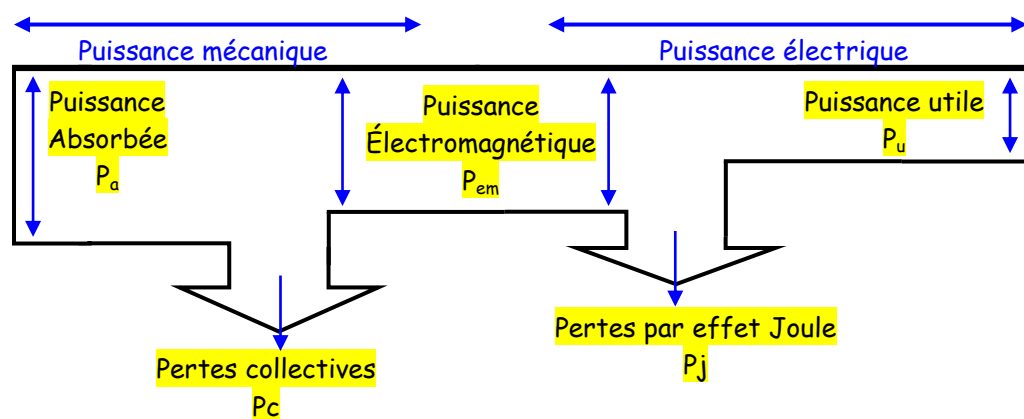
Le point d'intersection (U_{pf} ; I_{pf}) de ces deux droites donne les grandeurs communes aux deux dipôles.

. d Bilan des puissances

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine mécanique jusqu'à la puissance utile de nature électrique.

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance mécanique à la puissance électrique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :



Bilan des puissances d'une génératrice

La génératrice reçoit une puissance P_a , produit du moment du couple mécanique T provenant d'un système auxiliaire et de la vitesse angulaire Ω .

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

$P_a = T \cdot \Omega$ Mécanique	P_a La puissance absorbée en watts [W] T Le moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s ⁻¹]
$P_c = T_p \cdot \Omega$ Mécanique	P_c Les pertes collectives en watts [W] T_p Le moment du couple de pertes en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s ⁻¹]
$P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$ Mécanique ↕ $P_{em} = E \cdot I$ Electrique	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] T_{em} Le moment du couple électromagnétique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s ⁻¹] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] E La fem de la génératrice en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]
$P_j = R \cdot I^2$ Electrique	P_j Les pertes par effet Joule en watts [W] R La résistance de l'induit en ohms [Ω] I^2 L'intensité du courant dans l'induit en ampères ² [A ²]
$P_u = U \cdot I$ Electrique	P_u La puissance utile en watts [W] U La tension délivrée par l'induit de la génératrice en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

Et	$P_{em} = P_a - P_c$ Mécanique	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_c Les pertes collectives en watts [W]
Donc	$P_u = P_{em} - P_j$ Electrique	P_u La puissance utile en watts [W] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]
	$P_u = P_a - P_c - P_j$ { Mécanique Electrique	P_u La puissance utile en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_c Les pertes collectives en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]

- P_c représente la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans la génératrice. T_p est le moment du couple de pertes correspondant à cette puissance perdue.

Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent dans les tôles du rotor.

- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers.

Le rendement est le rapport entre la puissance électrique utile et la puissance mécanique absorbée par l'induit, d'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

η Rendement de l'induit de la génératrice [sans unités]

P_u La puissance utile en watts [W]

P_a La puissance absorbée en watts [W]

Le rendement de la génératrice complète tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur, P_{ex} , dans la mesure où celui-ci est alimenté électriquement. Cette puissance sert uniquement à magnétiser la machine, toute la puissance active absorbée par le circuit d'excitation est entièrement consommée par effet Joule donc :

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}$$

P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]

U_{ex} La tension d'alimentation de l'inducteur en volts [V]

I_{ex} L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères [A]

$$P_{ex} = r \cdot I_{ex}^2$$

P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]

r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

I_{ex}^2 L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères² [A²]

$$P_{ex} = \frac{U_{ex}^2}{r}$$

P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W]

U_{ex}^2 La tension d'alimentation de l'inducteur en volts² [V²]

r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

Le rendement est donc

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + P_{ex}}$$

η Rendement de la machine complète [sans unités]

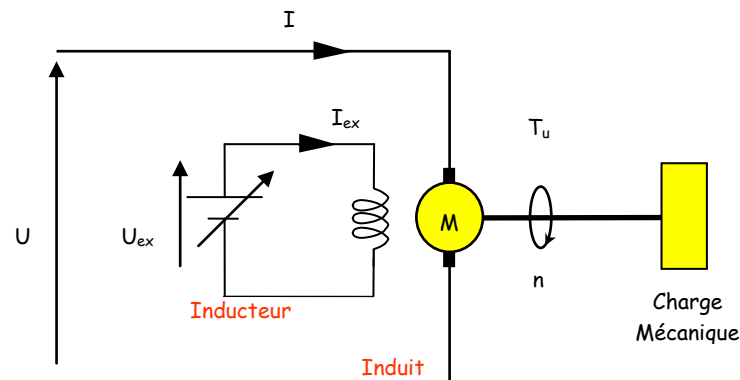
P_u La puissance utile en watts [W]

P_a La puissance absorbée en watts [W]

. IV Fonctionnement en moteur

. a Fonctionnement en charge

L'induit du moteur est alimenté par une seconde source de tension continue, il entraîne une charge mécanique à la fréquence de rotation n .

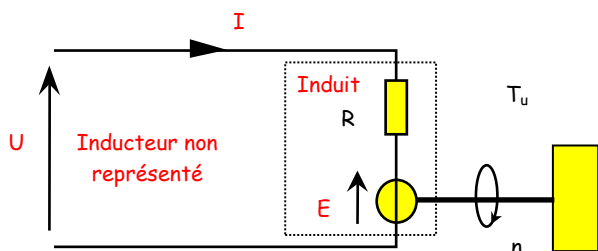


Fonctionnement d'un moteur en charge

Le moteur absorbe une puissance électrique et restitue une puissance mécanique, combinaison du moment du couple utile et de la fréquence de rotation.

. b Loi d'Ohm

L'induit du moteur peut être remplacé par son modèle équivalent :



- R La résistance totale de l'induit
- U La tension aux bornes de l'induit
- E La fem du moteur
- I L'intensité du courant dans l'induit
- n La fréquence de rotation du rotor

Modèle équivalent de l'induit du moteur

La loi d'Ohm de l'induit se déduit facilement de son modèle équivalent :

$$U = E + R.I$$

- U La tension aux bornes de l'induit en volts [V]
- E La f.e.m du moteur en volts [V]
- R La résistance de l'induit en ohms [Ω]
- I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]

. c Plaque signalétique du moteur

La plaque signalétique d'un moteur donne de précieux renseignements, ils concernent le fonctionnement le mieux approprié, c'est-à-dire celui qui permet un très bon rendement, pas forcément le plus élevé, mais qui assure une très bonne longévité de la machine. Les valeurs mentionnées pour l'induit, sont appelées les valeurs nominales, elles ne doivent pas être dépassées de plus de 1,25 fois, elles se décomposent ainsi :

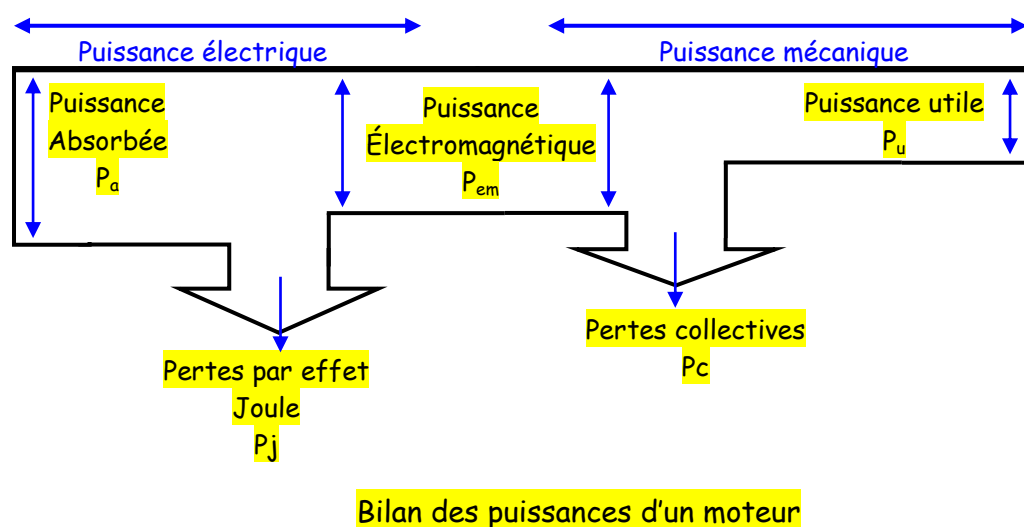
- U Tension nominale à appliquer aux bornes de l'induit.
- I Intensité nominale du courant dans l'induit
- n Fréquence de rotation nominale du rotor
- P_u Puissance utile nominale, d'origine mécanique délivrée par le moteur.

. d Bilan des puissances

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance électrique à la puissance mécanique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :



Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

Le moteur reçoit une puissance P_a , produit de la tension, appliquée sur les bornes de l'induit et de l'intensité du courant qui le traverse.

$P_a = U \cdot I$ Electrique	P_a La puissance absorbée en watts [W] U La tension aux bornes de l'induit en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A]
$P_j = R \cdot I^2$ Electrique	P_j Les pertes par effet Joule dans l'induit en watts [W] R La résistance de l'induit en ohms [Ω] I^2 L'intensité du courant dans l'induit en ampères ² [A^2]
$P_{em} = E \cdot I$ Electrique $\updownarrow$ $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$ Mécanique	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] E La f.e.m du moteur en volts [V] I L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] T_{em} Le moment du couple électromagnétique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]
$P_c = T_p \cdot \Omega$ Mécanique	P_c Les pertes collectives en watts [W] T_p Le moment du couple de pertes en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]
$P_u = T \cdot \Omega$ Mécanique	P_u La puissance utile en watts [W] T Le moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm] Ω La vitesse angulaire en radians par seconde [$rad.s^{-1}$]

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

$P_{em} = P_a - P_j$ Electrique	P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]
------------------------------------	---

Et

$P_u = P_{em} - P_c$ Mécanique	P_u La puissance utile en watts [W] P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W] P_c Les pertes collectives en watts [W]
-----------------------------------	--

Donc

$P_u = P_a - P_j - P_c$ { Electrique	P_u La puissance utile en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W] P_j Les pertes par effet Joule en watts [W]
---	--

Mécanique P_c Les pertes collectives en watts [W]

- P_c représente la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans le moteur. T_p est le moment du couple de pertes correspondant à cette puissance perdue.
- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent dans les tôles du rotor.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers.

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par l'induit, d'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

 η Rendement de l'induit du moteur [sans unités] P_u La puissance utile en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W]

Le rendement du moteur complet tient compte de la puissance absorbée par l'inducteur, P_{ex} , dans la mesure où celui-ci est alimenté électriquement. Cette puissance sert uniquement à magnétiser le moteur, toute la puissance active absorbée par le circuit d'excitation est entièrement consommée par effet Joule donc :

$$P_{ex} = U_{ex} \cdot I_{ex}$$

 P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W] U_{ex} La tension d'alimentation de l'inducteur en volts [V] I_{ex} L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères [A]

$$P_{ex} = r \cdot I_{ex}^2$$

 P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W] r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω] I_{ex}^2 L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères² [A²]

$$P_{ex} = \frac{U_{ex}^2}{r}$$

 P_{ex} La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W] U_{ex}^2 La tension d'alimentation de l'inducteur en volts² [V²] r La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

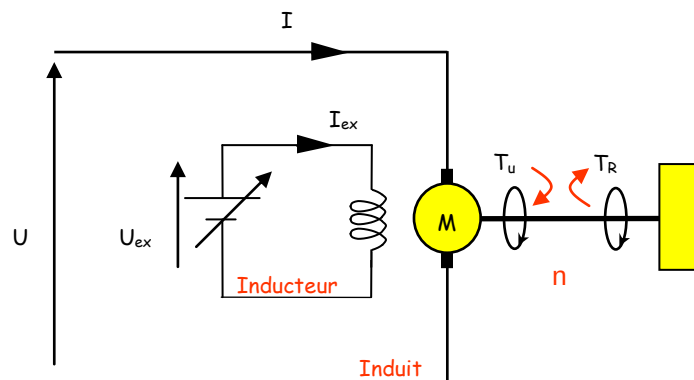
Le rendement est donc

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + P_{ex}}$$

 η Rendement du moteur complet [sans unités] P_u La puissance utile en watts [W] P_a La puissance absorbée en watts [W]

. e Essai à vide

Nous dirons que le moteur fonctionne à vide s'il n'entraîne aucune charge sur son arbre. L'indice «₀» caractérise cet essai. Sa fréquence de rotation est notée n_0 , elle est légèrement supérieure à sa fréquence de rotation nominale, l'intensité du courant dans l'induit I_0 est très faible devant sa valeur nominale et la tension d'alimentation U_0 de l'induit est réglée à sa valeur nominale. En faisant varier U_0 , la tension aux bornes de l'induit mesurée en volts, nous pouvons relever en ampères l'intensité du courant dans l'induit I_0 , et la fréquence de rotation n_0 en tours par seconde. Les éléments U_0 , I_0 et n_0 nous permettent de calculer la fem à vide E_0 en utilisant la relation :

. f Essai en charge

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.

En régime établi, le moment du couple utile délivré par le moteur est égal au moment du couple résistant que lui oppose la charge mécanique.

En régime permanent

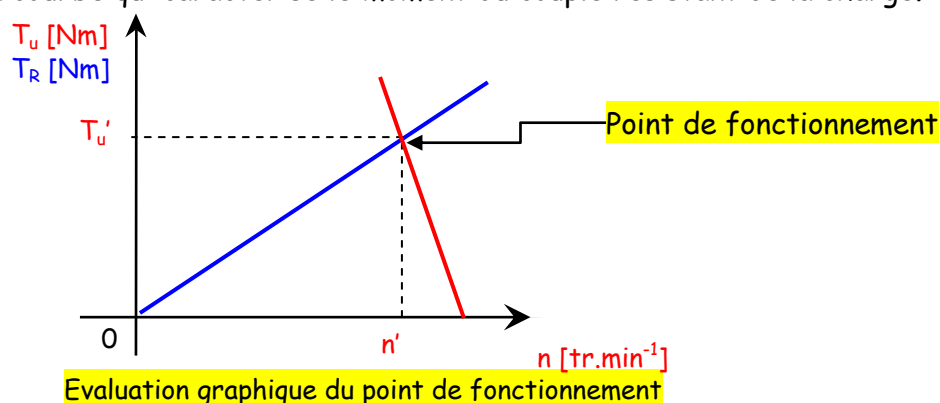
$$T_u = T_R$$

T_u Le moment du couple utile en newton-mètres [Nm]

T_R Le moment du couple résistant en newton-mètres [Nm]

. g Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le moment du couple résistant de la charge.



Le point de fonctionnement donne graphiquement n' , la fréquence de rotation du moteur ainsi que T_u' le moment du moment du couple utile.

. h Le risque d'emballement du moteur

Dans la relation :

$$E = N.n.\Phi \quad \Rightarrow \quad n = \frac{E}{N\Phi}$$

Si l'intensité du courant dans l'inducteur s'annule, le flux tend alors vers zéro. Suivant la loi d'Ohm la valeur de la fem n'est pas nulle

$$E = U - R.I \quad \Rightarrow \quad n = \frac{U - R.I}{N\Phi}$$

La fréquence de rotation d'un moteur alimenté tend vers l'infini si le flux s'annule.

 Une coupure dans le circuit d'excitation entraîne donc un emballement du moteur.

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

MACHINE SYNCHRONE

- 1 - PRESENTATION :

La machine synchrone, appelée ALTERNATEUR si elle fonctionne en génératrice, fournit un courant alternatif. En fonctionnement MOTEUR sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit.

- A - PRINCIPE DE L'ALTERNATEUR :

Une génératrice synchrone transforme de l'énergie mécanique (T, Ω) en énergie électrique (V, I de fréquence f).

Un aimant tourne à la fréquence n , la spire est traversée par un flux variable $\varphi(t)$ d'où la création d'une f.e.m induite $e(t) = - \frac{d\varphi}{dt}$.

La fréquence de cette f.e.m est telle que : $f = n$, soit $\Omega = \omega$ avec Ω vitesse de rotation du rotor (aimant) et ω , la pulsation de la f.e.m sinusoïdale induite, en rad / s.

- B - CONSTITUTION :

L'alternateur possède deux parties principales :

- L'inducteur porté le plus souvent par le rotor
- L'induit porté par le stator parcouru par des courants alternatifs

- a - Inducteur :

Le champ magnétique est créé par un aimant permanent ou par un électroaimant alimenté par un courant continu I_e , appelé courant d'excitation. Le rotor tourne à la fréquence f , et crée un nombre p de paires de pôles.

Remarque : si I_e est constant, il crée un champ magnétique B , constant, tournant à la fréquence de synchronisme $n_s = n$.

Rotor à pôles saillants :

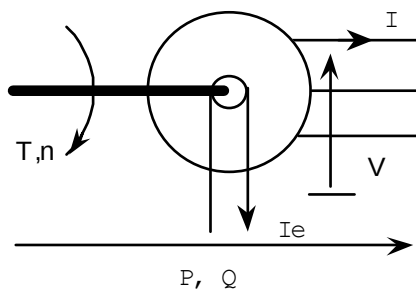
C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine.

Rotor à pôles lisses ou Turboalternateur :

Le rotor est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède le plus souvent deux pôles.

- b - Induit :

Il est au stator, bobines fixes, le plus souvent triphasé. Il est le siège de f.e.m induites



Convention générateur

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cos \phi$$

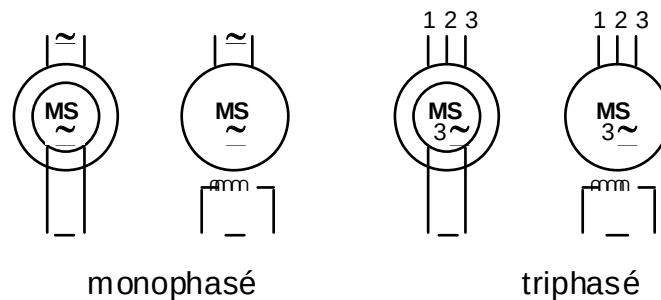
ϕ déphasage entre V et I

Il est soumis à un flux tournant, il est donc le siège d'hystérésis et de courants de Foucault. Comme pour le transformateur, nous raisonnerons sur un schéma équivalent.

- C - UTILISATION :

La puissance d'un alternateur à pôles saillants va de quelques kilovolts ampères à 250000 kVA. Il est principalement utilisé, dans les centrales hydrauliques, pour la production d'énergie électrique pour le réseau national. Le turboalternateur, est lui utilisé dans les centrales thermiques ou nucléaires, sa puissance est supérieure à 50000 kVA.

- D- SYMBOLE :

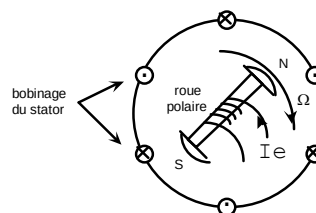


- 2 - LA F.E.M A VIDE DANS UN ALTERNATEUR :

- A - ESSAI A VIDE :

- a - Présentation :

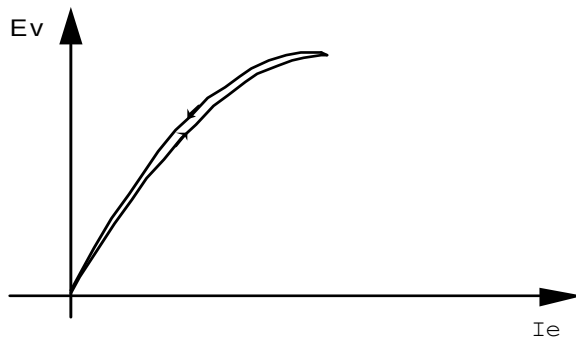
Le stator n'est traversé par aucun courant. Le champ tournant est issu de la roue polaire (traversée par un courant d'excitation I_e), entraîné par un système auxiliaire.



Nous récupérons trois f.e.m induites sinusoïdales de valeur efficace E_v , aux bornes du stator.

- b - Caractéristique à vide :

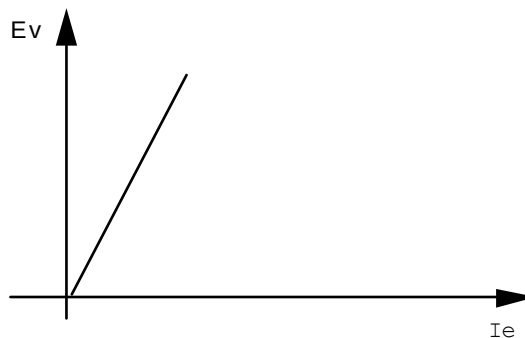
I_e varie par valeurs croissantes puis décroissantes, nous relevons E_v , tension à vide aux bornes d'une phase.



Nous noterons le phénomène d'hystérésis sur la courbe, ainsi que la saturation de la machine

- c - Idéalisation de la caractéristique à vide :

Nous supposons que la machine n'est pas saturée, seule la partie linéaire de la caractéristique ne sera retenue, pour la suite de notre étude, E_v restera proportionnelle à I_e .



- B - ETUDE DE LA F.E.M A VIDE :

- a - Valeur théorique :

La f.e.m induite $e_v(t) = E_v \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\tau)$ est sinusoïdale. Elle est créée par le flux $\varphi(t)$ issu du champ magnétique tournant porté par la roue polaire, ce flux a pour expression $\varphi(t)$ avec : $\varphi(t) = \varphi_{\max} \cdot \cos(\omega t)$.

Le stator comporte N conducteurs, donc $N/2$ spires; ainsi :

$$e_v(t) = - \frac{N}{2} \frac{d\varphi}{dt} = - \frac{N}{2} \omega \cdot \varphi_{\max} \cdot \sin(\omega t) = E_v \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

La valeur théorique de la valeur efficace de la f.e.m E_v est donc :

$$E_v = - \frac{N}{\sqrt{2}} \cdot \pi \cdot f \cdot \varphi_{\max}$$

Cette valeur efficace est celle de la f.e.m à vide aux bornes de l'alternateur monophasé ou bien celle aux bornes d'une phase et du neutre de l'alternateur triphasé.

- b - Valeur réelle :

En réalité $\varphi(t)$ n'est pas vraiment sinusoïdale et les différentes f.e.m ne sont pas en phase. La résultante $e_v(t)$ est le module d'une somme vectorielle. Pour traduire ces imperfections, on introduit un coefficient K qui caractérise la machine. La valeur efficace réelle de la f.e.m à vide s'exprime par la relation :

EN MONOPHASE :

A l'intérieur d'une même spire, les forces électromotrices induites s'ajoutent et les différentes spires sont mises en série : tous les conducteurs sont finalement en série. Pour l'enroulement, on aura donc :

$$E_v = K.f.N.\varphi_{\max.}$$

avec :

E_v	F.e.m induite dans un enroulement	en volts
f	Fréquence des f.e.m induites	en hertz
$\varphi_{\max.}$	Flux utile maximal sous un pôle	en webers
N	Nombre de conducteurs par phase.	
K	Coefficient de Kapp constant pour un alternateur donné tel que : $K = 2,22.K_D.K_F$ K_D facteur de distribution voisin de 0,7 K_F facteur de forme voisin de 1,05	

EN TRIPHASE :

Trois enroulements monophasés identiques sont décalés d'un tiers de l'intervalle compris entre deux pôles consécutifs de même nom. L'alternateur est ainsi équivalent à trois alternateurs monophasés identiques que l'on couple soit en triangle soit en étoile. La force électromotrice entre deux enroulements dépend du mode de couplage : la relation précédente donne donc la valeur efficace d'une tension simple si les enroulements sont couplés en étoile, et la valeur d'une tension composée s'ils sont couplés en triangle.

- c - Exercice :

Un alternateur triphasé, monté en étoile, a pour tension entre phase $U = 660 \text{ V}$, il débite un courant de 500 A avec un $\cos \phi = 0,8$, à la fréquence de 50 Hz .

- 1 - Calculer les puissances P , Q et S .

- 2 - Sachant que l'induit comporte 372 spires et que la valeur maximale du flux est de $0,027 \text{ Wb}$, calculer K en supposant qu'il n'y a aucune chute de tension entre le fonctionnement à vide et en charge.

$$S = 572 \text{ kVA} - P = 457,3 \text{ kW} - Q = 343,2 \text{ kvars} - K = 2,28$$

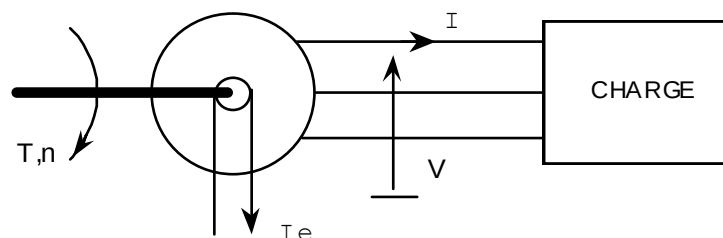
- 3 - ALTERNATEUR EN CHARGE :

- A - ETUDE EN CHARGE :

- a - présentation :

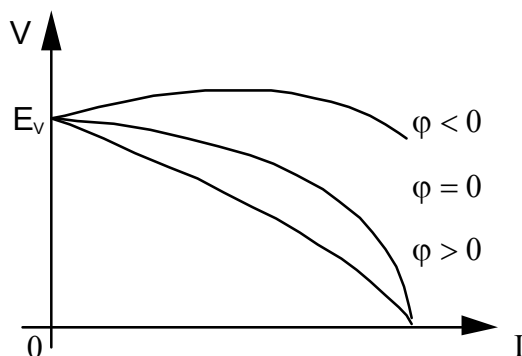
L'état de l'alternateur est fixé par le point de fonctionnement P , qui dépend de deux paramètres variables et trois paramètres constants $P = f(V ; I ; n ; I_e ; \phi)$

V	tension entre phase et neutre	en volts
I	courant dans un fil de phase	en ampères
n	fréquence de rotation de l'alternateur	en tr / s
I_e	courant d'excitation	en ampères
ϕ	déphasage entre v et i .	



- b - Caractéristique électrique $V = f(I)$:

L'alternateur triphasé est entraîné à vitesse constante. Il alimente une charge équilibrée. L'intensité I_e du courant d'excitation est maintenue constante, le déphasage tension courant est imposé par la charge.



Nous remarquons l'effet démagnétisant (qui contraint d'augmenter I_e) d'une charge inductive et l'effet magnétisant d'une charge capacitive.

Les chutes de tension sont importantes (20 à 30 fois plus grandes que pour le transformateur) elles ne sont que très partiellement dues aux résistances des enroulements (1 % seulement), la cause principale de ces chutes de tension est l'existence du champ magnétique B_i , créé par le stator. Lorsque l'induit débite du courant, il crée un champ magnétique, appelé **Réaction Magnétique d'Induit**, **R.M.I**, qui vient modifier le champ issu de l'inducteur.

- c - Etude de la R.M.I :

L'inducteur, porté par le rotor, crée un flux, $\Phi(t)$, à l'origine d'une f.e.m induite E_v au stator (induit). Lorsque l'induit est fermé sur une charge, il est parcourue par des courants sinusoïdaux induits, i_1 , i_2 et i_3 qui vont à leurs tours créer un flux variable $\Phi_i(t)$ qui va diminuer considérablement (cas d'une charge R/L) le flux $\Phi_{ch}(t)$ résultant, en charge, donc agir sur la f.e.m E_{ch} de la machine. Cette diminution de E_{ch} par rapport à E_v implique une diminution importante de la tension V .

Le flux Φ crée par l'inducteur, induit : $\underline{E_v} = -j\omega \Phi$

La R.M.I introduit le flux Φ_i qui induit : $\underline{E_i} = -j\omega \Phi_i$

Le flux résultant Φ_{ch} s'exprime par la relation vectorielle :

$$\vec{\phi}_{ch} = \vec{\phi} + \vec{\phi}_i$$

En charge, la f.e.m est donc donnée pour une machine non saturée par la relation :

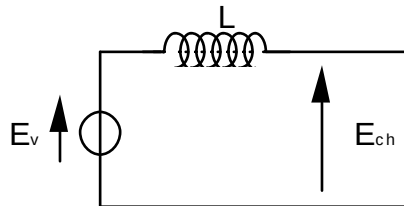
$$\underline{E}_{ch} = \underline{E}_v + \underline{E}_i$$

- B - MODELE EQUIVALENT D'UNE PHASE DE L'ALTERNATEUR :

- a - Représentation du modèle :

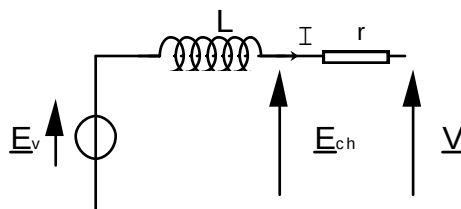
Les hypothèses simplificatrices suivantes seront respectées dans toute la suite de notre étude :

- Charge équilibrée - Régime permanent - Rotor à pôles lisses - Machine non saturée -
Pour tenir compte de la R.M.I, on la modélise électriquement par une bobine d'inductance L :



$X = L\omega$: appelée réactance synchrone.

Schéma, auquel il faut ajouter une résistance qui rendra compte des pertes par effet joule dans les enroulements. Soit, r , la résistance d'un enroulement, le modèle équivalent d'une phase de l'alternateur est :



$$v = e_v - L \frac{di}{dt} - r.i$$

$$\underline{V} = \underline{E}_v - j.L\omega.I - r.I$$

Soit : $X = L\omega$: la réactance synchrone.

Soit : $Z = \sqrt{r^2 + L\omega^2}$: l'impédance synchrone

- b - Diagramme de BEHN - ESCHENBOURG :

La loi des mailles s'écrit : $v = e_v - u_L - r.i$

Donc :

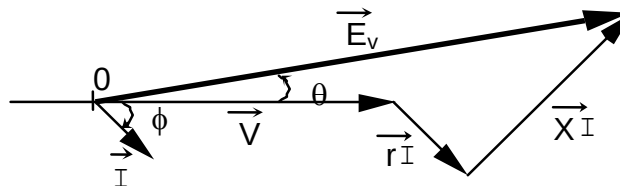
$$\vec{V} = \vec{E}_v - \vec{X.I} - \vec{r.I}$$

Connaissant :

- ϕ Déphasage courant tension, angle imposé par la charge.
- $X = L.\omega$ Réactance synchrone
- I Intensité du courant dans la charge
- V Tension simple

Nous pouvons calculer E_v :

- On trace $\vec{V}$.
- Connaissant ϕ , on trace $\vec{I}$, puis $\vec{r.I}$, colinéaire à $\vec{I}$.
- On trace $\vec{X.I}$.
- On en déduit $\vec{E}_v$.
- On peut mesurer θ , angle de décalage interne, $(\vec{V}; \vec{E}_v)$.



Remarque : nous pouvons utiliser le même procédé pour évaluer V , connaissant E_v . Pour cela :

Tracer une droite symbolisant la direction de $\vec{I}$, puis tracer $\vec{r.I}$, $\vec{X.I}$, tracer la direction de $\vec{V}$, et enfin à l'aide d'un compas rechercher le point d'intersection de $\vec{V}$ et $\vec{E}_v$.

- C - Détermination des éléments du modèle :

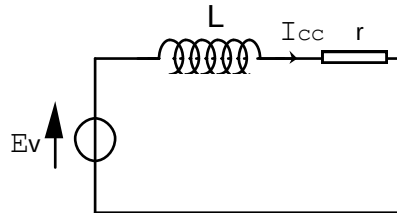
La détermination du modèle de l'alternateur non saturé se fait en trois étapes :

- Tracé de la caractéristique à vide :

La f.e.m synchrone est égale à la f.e.m à vide. On relève, donc, à vitesse constante, E_v en fonction de I_e , courant dans l'inducteur, on trace $E_v = f(I_e)$

- Relevé de la caractéristique en court-circuit :

Les trois enroulements du stator sont couplés en étoile. Le modèle équivalent d'un enroulement de l'alternateur est le suivant :



$$\underline{E_v} = (r + jL\omega) \cdot \underline{I_{cc}} = \underline{Z} \cdot \underline{I_{cc}}$$

L'alternateur est entraîné à vitesse nominale, on mesure les intensités du courant d'excitation et d'un des courants de court-circuit débités dans l'induit, on trace $I_{cc} = f(I_e)$.

- Calcul de l'impédance synchrone :

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

$$Z = \frac{E_v}{I_{cc}}$$

- 4 - BILAN DES PUISSANCES :

- a - PUISSANCE UTILE :

U : Tension entre deux bornes de phases.
 I : Intensité du courant de ligne.
 $\cos\phi$: Facteur de puissance imposé par la charge.

En monophasé : $P_u = UI \cdot \cos\phi$
 En triphasé : $P_u = UI \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\phi$

- b - BILAN DES PERTES :

- La puissance reçue :

L'alternateur reçoit une puissance mécanique P_M qui lui est fournie par le moteur d'entraînement :

$$P_M = T_M \cdot \Omega$$

- Les pertes collectives :

Ce sont des pertes mécaniques (P_m), qui ne dépendent que de la fréquence de rotation et les pertes dans le fer (P_f), qui ne dépendent que de la fréquence et de la valeur maximale du flux. Ces pertes seront mesurées au cours d'un essai à vide dans lequel la machine tourne à la fréquence de rotation nominale, sous une tension égale à la tension qu'elle aurait en charge. En effet, l'égalité des tensions efficaces entraîne celle des flux.

- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :

U_e : Tension aux bornes de l'inducteur.

I_e : Intensité du courant d'excitation.

$$P_{je} = U_e \cdot I_e$$

- Les pertes par effet Joule dans l'induit :

- En monophasé :

r : Résistance de l'enroulement induit.

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

$$P_j = r \cdot I^2$$

- En triphasé :

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

I : Intensité efficace du courant de ligne.

$$P_j = \frac{3}{2} r \cdot I^2$$

- Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{UI\sqrt{3}\cos\varphi + P_m + P_{je} + P_j}$$

LE MOTEUR ASYNCHRONE

. I Présentation

Un champ magnétique tournant produit la rotation d'un disque métallique tournant à une fréquence de rotation inférieure à celle du champ : sa rotation est asynchrone.

. a Le stator

Il est constitué de trois enroulements alimentés par des tensions triphasées de fréquence, f , qui produisent ainsi un champ magnétique tournant $\vec{B}$ à la fréquence de rotation, n_s , appelée fréquence de synchronisme :

$$n_s = \frac{f}{p}$$

- n_s La fréquence de rotation du champ $\vec{B}$ en tours par seconde [tr.s^{-1}]
- f La fréquence des tensions d'alimentation en Hertz [Hz]
- p Le nombre de paires de pôles du rotor

Une autre relation se déduit de la précédente :

$$\Omega_s = 2\pi.n_s = 2\pi.\frac{f}{p} \quad \Omega_s \text{ La vitesse angulaire du champ } \vec{B}, \text{ en radians par seconde } [\text{rad.s}^{-1}]$$

. b Le rotor

La fréquence de rotation du rotor est appelée n , il tourne moins vite que le champ tournant du stator, l'enroulement rotorique n'est relié à aucune source extérieure. Les seuls courants qui le traversent sont les courants de Foucault induits par la rotation du champ statorique.

➤ Rotor à cage d'écureuil :

Il est constitué de barres métalliques identiques dont les extrémités sont réunies entre elles par des couronnes métalliques peu résistives. L'ensemble présente une résistance électrique très faible, on dit que le rotor est en court-circuit.

➤ Rotor bobiné :

Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant un bobinage le plus souvent triphasé, trois bagues et trois balais sont prévus pour accéder à ces enroulements, permettant de modifier certaines des caractéristiques électriques du circuit rotorique.

. c Association entre le rotor et le stator

Si la fréquence des tensions d'alimentation est égale à 50 Hz, la relation entre n'_s en tours par minute, et p le nombre de paires de pôles peut s'écrire :

$$n'_s = \frac{3000}{p} \quad \left| \quad n'_s \text{ La fréquence de rotation du champ } \vec{B} \text{ en tours par minute [tr.min}^{-1}\text{]} \right.$$

Sachant que, n , la fréquence du rotor, donc du moteur, est très légèrement inférieure à celle du champ tournant, n_s , la relation ci-dessus permet de donner très rapidement le nombre de paires de pôles ainsi que la fréquence de synchronisme lorsque la fréquence de rotation du moteur est connue, en complétant le tableau suivant.

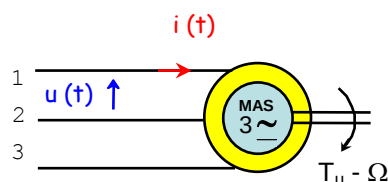
La fréquence de rotation du moteur est de 980 tr.min⁻¹, la fréquence du réseau est de 50 Hz, ainsi :

p	1	2	3	4...
n_s [tr.min ⁻¹]	3000	1500	1000	750

Dans l'exemple proposé, la fréquence de synchronisme est de 1000 tr.min⁻¹ et le nombre de pôles est de 6.

Un tableau du même genre peut être adapté avec une quelconque fréquence du réseau.

. d Le Symbole



. e Le glissement

Le rotor tourne à la fréquence de rotation n , il tourne moins vite que le champ tournant qui lui tourne à la fréquence de rotation n_s . La différence Δn entre ces deux fréquences de rotation est donnée par la relation :

$$\Delta n = n_s - n$$

Δn n_s n	La fréquence de rotation du glissement en tours par seconde [tr.s^{-1}] La fréquence de rotation du champ $\vec{B}$ en tours par seconde [tr.s^{-1}] La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s^{-1}]
----------------------------	--

On appelle glissement d'un moteur asynchrone le rapport de la fréquence de glissement à la fréquence de synchronisme :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s}$$

g n_s n	Le glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités] La fréquence de rotation du champ $\vec{B}$ en tours par seconde [tr.s^{-1}] La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde [tr.s^{-1}]
---------------------	---

. II La plaque signalétique - Le couplage

Sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone, deux tensions sont indiquées, par exemple 230 V et 400 V.

Seule la plus petite des deux tensions est à prendre en considération pour le couplage, elle doit être appliquée aux bornes d'un enroulement.

Pour vérifier que cette tension est bien appliquée sur un enroulement, le réseau doit être connu et représenté ainsi que les couplages possibles. Un seul sera retenu.

C'est donc à partir des deux informations suivantes que le couplage peut être déterminé :

- La plus petite des deux tensions, elle figure sur la plaque signalétique du moteur.
- La nature du réseau, valeur de la tension simple, et celle de la tension composée.

Pour le réseau :

- Si deux tensions sont mentionnées, il s'agit des valeurs efficaces V de la tension simple $v(t)$ et U de la tension composée $u(t)$.
- Si une seule tension est indiquée il s'agit de la valeur efficace U de la tension composée $u(t)$.

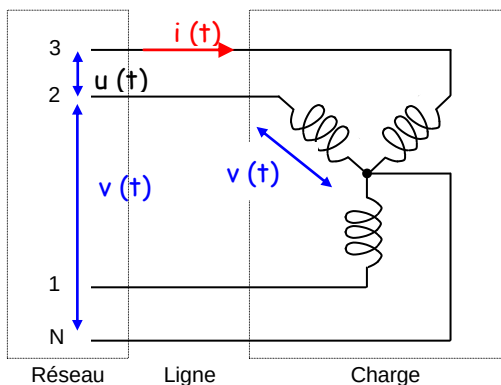
La valeur efficace V de la tension simple $v(t)$ est mesurée entre une phase et le neutre, la valeur efficace U de la tension composée $u(t)$ est évaluée entre deux phases.

La relation entre les valeurs efficaces de ces deux tensions est :

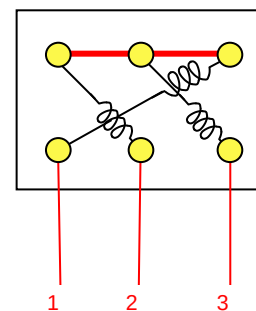
$$U = V\sqrt{3}$$

U La valeur efficace de la tension composée $u(t)$ en volts [V]
 V La valeur efficace de la tension simple $v(t)$ en volts [V]

. a Le couplage en étoile



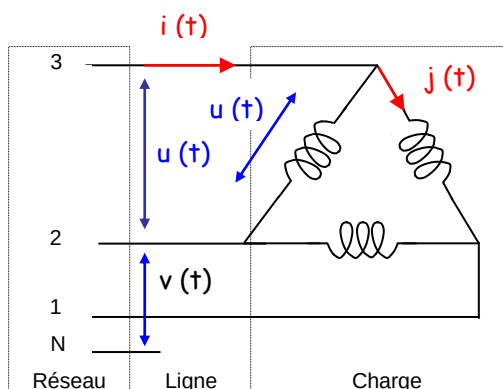
Couplage en étoile



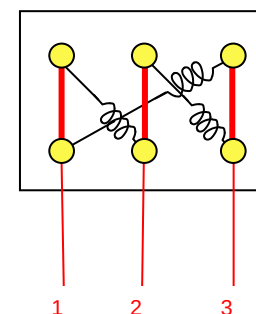
Câblage du stator

Dans un couplage en étoile, chaque enroulement est soumis à la tension simple $v(t)$, tension entre phase et neutre. Chaque enroulement est traversé par le courant de ligne $i(t)$.

. b Le couplage en triangle



Couplage en triangle



Câblage du stator

Dans un couplage en triangle, chaque enroulement est soumis à la tension composée, $u(t)$, tension entre deux phases. Chaque enroulement est traversé par le courant $j(t)$ de valeur efficace J , ce courant n'a de raison d'être que pour ce type de couplage.

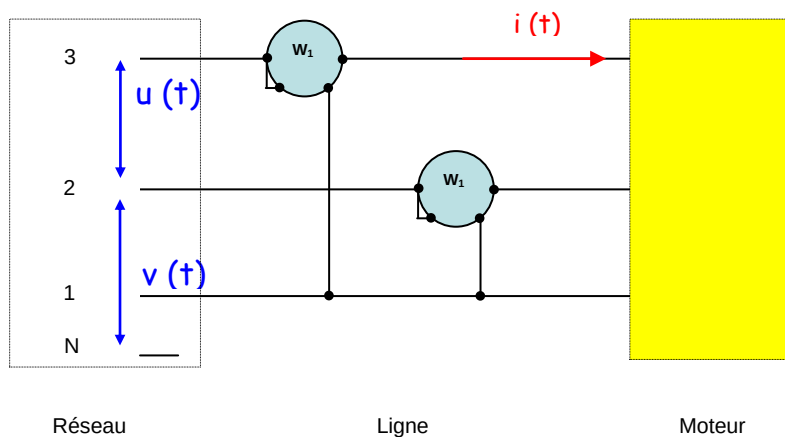
La relation entre les valeurs efficaces de ces deux courants est :

$$I = J\sqrt{3}$$

- | | |
|--|--|
| <div style="border-left: 2px solid black; padding-left: 5px; margin-bottom: 10px;">I</div> <div style="border-left: 2px solid black; padding-left: 5px;">J</div> | <div style="margin-bottom: 10px;">La valeur efficace du courant de ligne $i(t)$ en ampères [A]</div> <div>La valeur efficace du courant $j(t)$ dans un enroulement dans le cas d'un couplage en triangle, en ampères [A]</div> |
|--|--|

. III La mesure de la puissance absorbée

Cette méthode reste identique que le couplage soit en étoile ou en triangle, il utilise deux wattmètres numériques qui doivent être branchés comme suit :



Pour cette mesure le fil de neutre n'est jamais utilisé.

- Le premier wattmètre W_1 indique une grandeur P_1
- Le second wattmètre W_2 indique une grandeur P_2

. a La puissance active

La puissance active P absorbée par le moteur se calcule à partir des informations des wattmètres, en utilisant la relation suivante :

$$P = P_1 + P_2$$

- | | |
|---|---|
| <div style="border-left: 2px solid black; padding-left: 5px; margin-bottom: 10px;">P</div> <div style="border-left: 2px solid black; padding-left: 5px; margin-bottom: 10px;">P_1</div> <div style="border-left: 2px solid black; padding-left: 5px;">P_2</div> | <div style="margin-bottom: 10px;">La puissance active absorbée en watts [W]</div> <div style="margin-bottom: 10px;">La lecture du premier wattmètre [sans unités]</div> <div>La lecture du second wattmètre [sans unités]</div> |
|---|---|

P_1 et P_2 sont les lectures des deux wattmètres, elles sont soit positives soit négatives. Sachant que la puissance absorbée P est une puissance active, elle est nécessairement positive. Il est donc indispensable de donner à P_1 la valeur positive correspondant à la plus

grande des deux indications en valeurs absolues. La valeur prise par P_2 sera l'indication de l'autre wattmètre, affublé du signe « plus » si les deux grandeurs étaient de même signe et du signe « moins » dans le cas contraire.

. b La puissance réactive

La puissance réactive Q absorbée par le moteur se calcule à partir des informations des wattmètres, en utilisant la relation suivante :

$$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2)$$

Q	La puissance réactive absorbée en V.A.R [vars]
P_1	La lecture du premier wattmètre [sans unités]
P_2	La lecture du second wattmètre [sans unités]
V.A.R : Volts ampères réactifs	

. c La puissance apparente

La puissance apparente du moteur peut se déduire des deux calculs précédents par la relation :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

S	La puissance apparente du moteur en V.A [VA]
P	La puissance active absorbée en watts [W]
Q	La puissance réactive absorbée en V.A.R [vars]
V.A.R : Volts ampères réactifs	

. d Le facteur de puissance

Le facteur de puissance peut se déduire des deux calculs précédents par la relation :

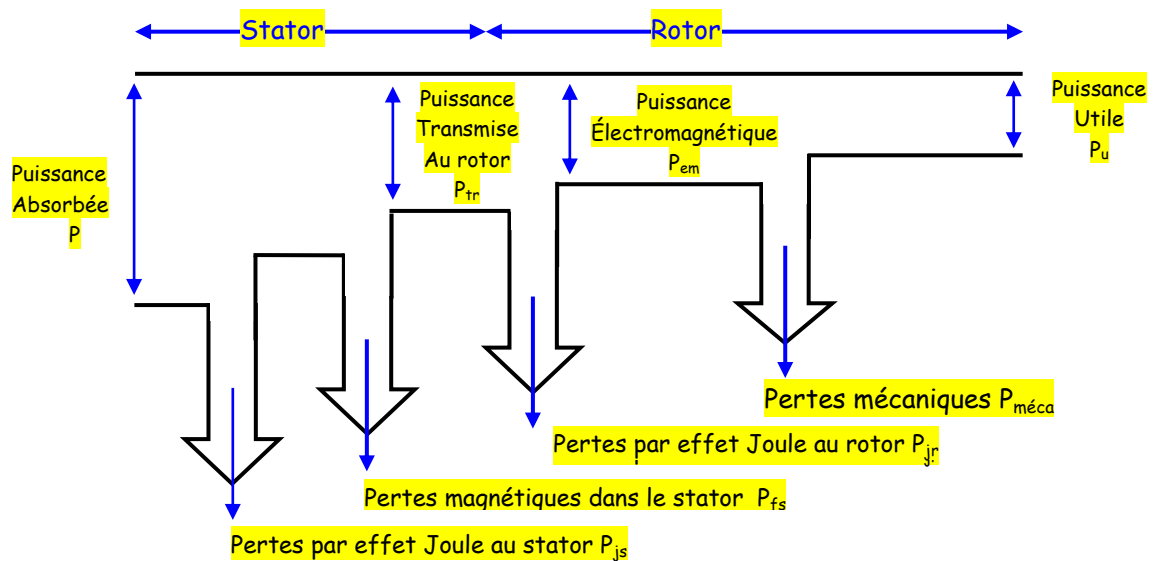
$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

φ	L'angle de déphasage entre courant et tension en degrés [°]
P	La puissance active absorbée en watts [W]
Q	La puissance réactive absorbée en V.A.R [vars]
V.A.R : Volts ampères réactifs	

. IV Le bilan des puissances

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :



Bilan des puissances d'un moteur asynchrone

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent.

STATOR

$$P = UI \sqrt{3} \cos \varphi$$

- P La puissance électrique absorbée en watts [W]
- U La tension entre deux phases en volts [V]
- I L'intensité du courant de ligne en ampères [A]
- φ L'angle de déphasage entre courant et tension en degrés [°]

1^{er} cas

$$P_{js} = \frac{3}{2} RI^2$$

La résistance R est donnée entre deux bornes de phases

- P_{js} Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W]
- R La résistance entre deux bornes de phases en ohms [Ω]
- I^2 L'intensité du courant de ligne en ampères² [A^2]

2^{ème} cas

La résistance R' est celle d'un enroulement

Couplage étoile

$$P_{js} = 3R'I^2$$

- P_{js} Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W]
- R' La résistance d'un enroulement en ohms [Ω]
- I^2 L'intensité du courant de ligne en ampères² [A^2]

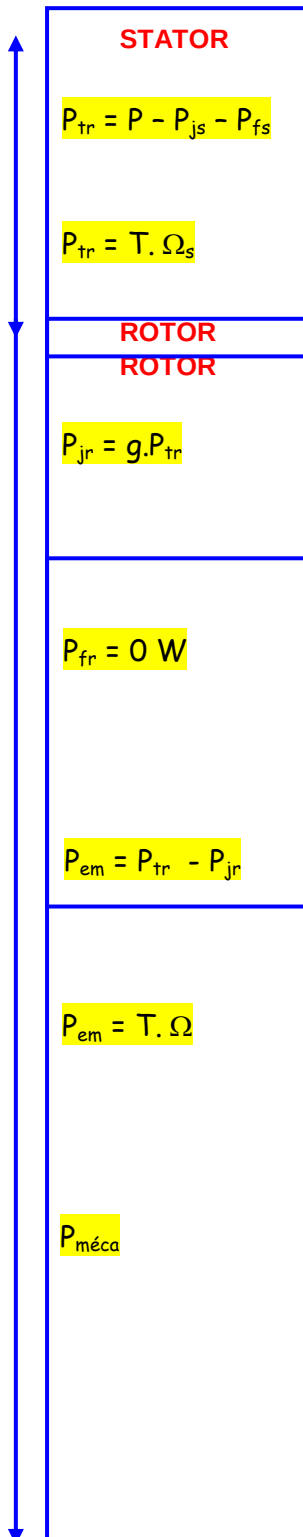
Couplage triangle

$$P_{js} = 3R'J^2$$

- P_{js} Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W]
 R' La résistance d'un enroulement en ohms [Ω]
 J^2 L'intensité du courant dans un enroulement en ampères² [A^2]

$$P_{fs} = P_{\text{magnétiques}}$$

- P_{fs} Les pertes dans le fer du stator en watts [W]
 Les pertes magnétiques, dans les tôles de l'armature du stator sont pratiquement indépendantes de la charge, elles sont liées à la valeur efficace U et à la fréquence f de la tension composée $u(t)$. Pour un réseau donnée, ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide.



- P_{tr} La puissance transmise au rotor en watts [W]
 P La puissance électrique absorbée en watts [W]
 P_{js} Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W]
 P_{fs} Les pertes dans le fer du stator en watts [W]
 P_{tr} La puissance transmise au rotor en watts [W]
 T Le moment du couple transmis au rotor en Newton-mètres [Nm]
 Ω_s La vitesse angulaire du champ $\vec{B}$ en radians par seconde [rad.s^{-1}]
 P_{jr} Les pertes par effet Joule dans le rotor en watts [W]
 g Le glissement du moteur asynchrone [sans unités]
 P_{tr} La puissance transmise au rotor en watts [W]
 P_{fr} Les pertes dans le fer du rotor en watts [W]
 Le rotor est également le siège d'un autre type de pertes. Les pertes fer ou magnétiques. Cependant ces pertes seront toujours négligées devant les autres, la fréquence des courants étant très faible
 P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W]
 P_{tr} La puissance transmise au rotor en watts [W]
 P_{jr} Les pertes par effet Joule dans le rotor en watts [W]
 P_{em} La puissance électromagnétique en watts [W]
 T Le moment du couple transmis au rotor en Newton-mètres [Nm]
 Ω La vitesse angulaire du rotor en radians par seconde [rad.s^{-1}]
 $P_{méca}$ Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W]
 Ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide. Très souvent elles sont égales aux pertes dans le fer du stator, la somme de ces deux types de pertes sera communément appelée les pertes constantes.

$$P_u = T_u \cdot \Omega$$

P_u	La puissance mécanique utile sur l'arbre du rotor en watts [W]
T_u	Le moment du couple utile disponible en Newton-mètres [Nm]
Ω	La vitesse angulaire du rotor en radians par seconde [rad.s ⁻¹]

Le bilan met en évidence le fait que la puissance absorbée est obligatoirement la puissance la plus importante, elle ne cesse de diminuer en progressant vers la puissance utile qui est évidemment la plus faible, ainsi :

$$P_{tr} = P - P_{js} - P_{fs}$$

P_{tr}	La puissance transmise au rotor en watts [W]
P	La puissance électrique absorbée en watts [W]
P_{js}	Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W]
P_{fs}	Les pertes dans le fer du stator en watts [W]

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr}$$

P_{em}	La puissance électromagnétique en watts [W]
P_{tr}	La puissance transmise au rotor en watts [W]
P_{jr}	Les pertes par effet Joule dans le rotor en watts [W]

$$P_u = P_{em} - P_{méca}$$

P_u	La puissance utile en watts [W]
P_{em}	La puissance électromagnétique en watts [W]
$P_{méca}$	Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W]

$$P_u = P - P_{js} - P_{fs} - P_{jr} - P_{méca}$$

P_u	La puissance utile en watts [W]
P	La puissance absorbée en watts [W]
P_{js}	Les pertes par effet Joule dans le stator en watts [W]
P_{fs}	Les pertes dans le fer du stator en watts [W]
P_{jr}	Les pertes par effet Joule dans le rotor en watts [W]
$P_{méca}$	Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W]

- Les pertes magnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault se produisent uniquement dans les tôles du stator.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements se situent au niveau des paliers du rotor.

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par, d'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P}$$

η	Rendement du moteur [sans unités]
P_u	La puissance utile en watts [W]
P	La puissance absorbée en watts [W]

. V L'essai à vide

- Nous dirons que le moteur fonctionne à vide s'il n'entraîne aucune charge sur son arbre. L'indice «_o» caractérise cet essai. Le couple utile $T_{uo} = 0 \text{ Nm}$
- La fréquence de rotation du rotor est notée n_o , elle est considérée comme identique à la fréquence de rotation n_s du champ tournant Les fréquences de rotation $n_o = n_s$

Toutes les puissances mises en jeu dans le bilan des puissances peuvent être recalculées dans le cas de l'essai à vide en tenant compte des deux relations précédentes.

Puissance absorbée à vide à vide

$P_o = UI_o \sqrt{3} \cos \varphi_o$	P_o	La puissance électrique absorbée à vide en watts [W]
	U	La tension entre deux phases en volts [V]
	I_o	L'intensité du courant de ligne à vide en ampères [A]
	φ_o	L'angle de déphasage entre courant et tension à vide en degrés [°]

Pertes par effet Joule dans le stator

- Si la résistance R est donnée entre deux bornes de phases

$P_{jso} = \frac{3}{2} RI_o^2$	P_{jso}	Les pertes par effet Joule à vide dans le stator en watts [W]
	R	La résistance entre deux bornes de phases en ohms [Ω]
	I_o^2	L'intensité du courant de ligne à vide en ampères ² [A^2]

- Si la résistance R est la résistance d'un enroulement avec un couplage en étoile

$P_{jso} = 3R'I_o^2$	P_{js}	Les pertes par effet Joule à vide dans le stator en watts [W]
	R'	La résistance d'un enroulement en ohms [Ω]
	I^2	L'intensité du courant de ligne à vide en ampères ² [A^2]

- Si la résistance R est la résistance d'un enroulement avec un couplage en triangle

$P_{jso} = 3R'J_o^2$	P_{jso}	Les pertes par effet Joule à vide dans le stator en watts [W]
	R'	La résistance d'un enroulement en ohms [Ω]
	J^2	L'intensité du courant dans un enroulement à vide en ampères ² [A^2]

Pertes magnétiques dans le stator à vide

P_{fs}	P_{js}	Les pertes dans le fer à vide dans le stator en watts [W] Elles sont constantes donc identiques à vide et en charge
----------	----------	--

Puissance transmise au rotor à vide

$P_{tro} = P_o - P_{jso} - P_{fs}$	P_{tro}	La puissance transmise à vide au rotor en watts [W]
	P_o	La puissance électrique absorbée à vide en watts [W]
	P_{jso}	Les pertes par effet Joule à vide dans le stator en watts [W]
	P_{fs}	Les pertes dans le fer du stator en watts [W]

Les pertes par effet joule à vide dans le rotor

$n_o = n_s$	n_s	La fréquence de rotation du champ $\vec{B}$ en tours par seconde [tr.s ⁻¹]
	n_o	La fréquence de rotation à vide du rotor en tours par seconde [tr.s ⁻¹]

On rappelle que le glissement à vide d'un moteur asynchrone est donné par la relation :

$$g_o = \frac{n_s - n_o}{n_s} \quad g_o \quad \text{Le glissement du moteur à vide en pourcentage [sans unités]}$$

Les deux relations précédentes donnent :

 $g_o = 0 \%$ Le glissement du moteur à vide est nul

Sachant que :

$P_{jro} = g_o \cdot P_{tro}$	P_{jro}	Les pertes par effet Joule à vide dans le rotor en watts [W]
	g_o	Le glissement à vide du moteur asynchrone [sans unités]
	P_{tro}	La puissance transmise à vide au rotor en watts [W]

 $P_{jro} = 0 \text{ W}$ Les pertes par effet joule à vide dans le rotor sont nulles

Les pertes mécaniques dans le stator à vide

$P_{méca}$	$P_{méca}$	Les pertes mécaniques à vide dans le stator en watts [W] Elles sont constantes donc identiques à vide et en charge
------------	------------	---

La puissance utile à vide

$P_u = T_{uo} \cdot \Omega_o$	P_{uo}	La puissance utile à vide en watts [W]
	T_{uo}	Le moment du couple utile à vide en Newton-mètres [Nm]
	Ω_o	La vitesse angulaire du rotor à vide en radians par seconde [rad.s ⁻¹]

Sachant que :

$g_o = 0 \%$ Le glissement du moteur à vide est nul

 $P_{uo} = 0 \text{ W}$ La puissance utile à vide est nulle

Le bilan des puissances complet donne :

$$P_o = P_{jso} - P_{fs} - P_{méca}$$

P_o	La puissance absorbée à vide en watts [W]
P_{jso}	Les pertes par effet Joule à vide dans le stator en watts [W]
P_{fs}	Les pertes dans le fer du stator en watts [W]
$P_{méca}$	Les pertes mécaniques dans le rotor en watts [W]

La puissance absorbée à vide se mesure aisément avec la méthode des deux wattmètres, Connaissant la résistance des enroulements du stator, les pertes par effet Joule à vide sont facilement calculables. La différence entre la puissance absorbée et la puissance perdue par effet Joule, donne les deux puissances restantes, c'est-à-dire les pertes magnétiques au niveau du stator et les pertes mécaniques.

Plusieurs études sont possibles :

- Soient les pertes magnétiques dans le stator sont données, nous calculons alors la puissance absorbée, les pertes par effet joule dans le stator et nous en déduisons les pertes mécaniques.
- Soient les pertes mécaniques sont données, nous calculons la puissance absorbée, les pertes par effet joule dans le stator et nous en déduisons les pertes magnétiques dans le stator.
- Soit, le cas le plus fréquent, il est précisé que les pertes mécaniques et les pertes magnétiques dans le stator sont égales, nous calculons alors la puissance absorbée, les pertes par effet joule dans le stator et nous en déduisons les pertes mécaniques ainsi que les pertes magnétiques dans le stator.

. VI L'essai en charge

. a Le point de fonctionnement

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.

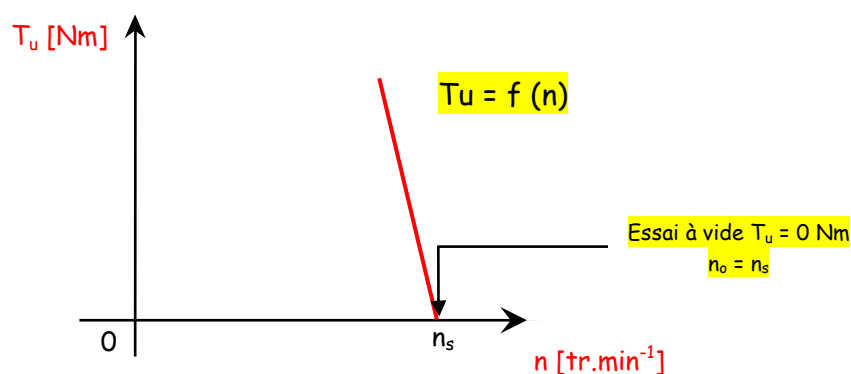
En régime permanent, ou régime établi, le couple utile T_u délivré par le moteur est égal au couple résistant T_R que lui oppose la charge mécanique :

En régime permanent :

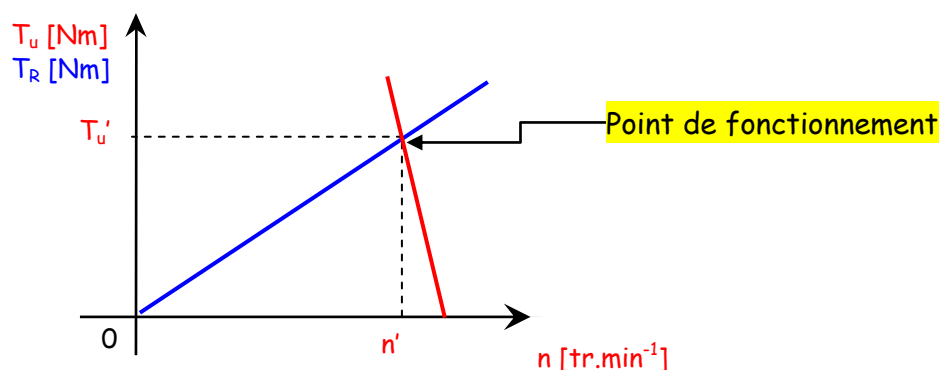
$T_u = T_R$	T_u Le couple utile délivré par le moteur en newtons mètres [Nm]
	T_R Le couple résistant de la charge mécanique en newtons mètres [Nm]

Sur sa partie utile, la caractéristique mécanique est un segment de droite. Pour la tracer, il suffit de deux points. Le premier est généralement donné par l'étude d'un cas précis, le second se déduit de l'essai à vide. Dans cet essai, le couple utile est nul, il est associé à une fréquence de rotation considérée comme égale celle du synchronisme, $n_0 = n_s$.

Le moment du couple utile T_u en fonction de la fréquence de rotation en tours par minute est la suivante



Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le couple résistant de la charge.

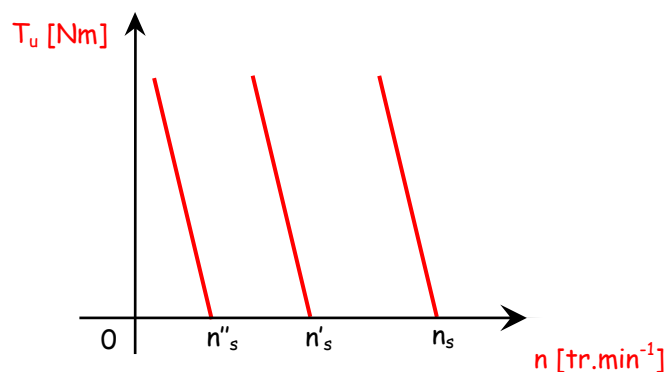


Evaluation graphique du point de fonctionnement

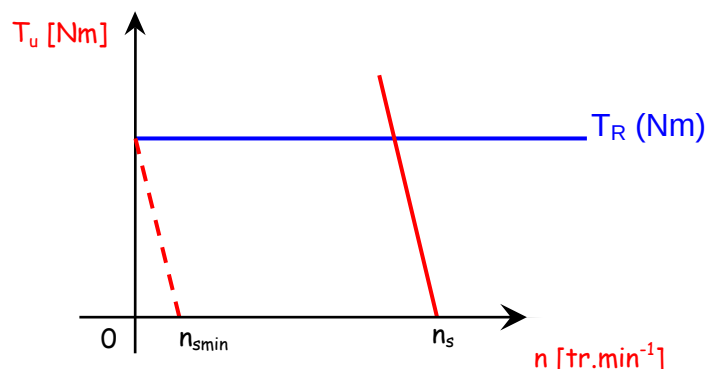
Le point de fonctionnement (T_u' ; n') permet de calculer très facilement le glissement et la puissance utile dans ce cas bien précis.

. b Le fonctionnement à V/f constant

Si les propriétés électriques de l'alimentation du moteur sont telles que le rapport entre la valeur efficace et la fréquence f de la tension $v(t)$ reste constant $\frac{V}{f} = \text{Constante}$, le moment du couple magnétique T_{em} ne dépend que de la différence entre les fréquences de rotation n_s et n . Dans ce cas, toutes les caractéristiques mécaniques sont parallèles les unes avec les autres.



. c Le fonctionnement à V/f constant et à couple résistant constant



En traçant successivement les différentes caractéristiques toutes parallèles entre elles, il est possible de trouver la fréquence minimale qui permet le démarrage du moteur lorsque le couple résistant qui s'oppose au couple utile du moteur est fixé, en utilisant la relation :

$$f_{\min} = n_{s\min} \cdot p$$

Références

- 1- Jacques LESENNE, Francis NOTELET et Guy SEGUIER : Introduction à l'électrotechnique approfondie. Technique et Documentation, 1981
- 2- Pierre MAYÈ : Moteurs électriques industriels. Dunod, 2005
- 3- R. Annequin et J. Boutigny. Cours de sciences physiques, électricité 3. Paris, Vuibert.
- 4- M. Kouznetsov. Fondement de l'électrotechnique.
- 5-H. Lumbroso. Problèmes résolus sur les circuits électriques. Dunod.
- 6-J.P Perez, R. Carles et R. Fleekinger, Electromagnétisme Fondements et Applications 3ème Edition, 1997.
- 7- A. Fouillé, Electrotechnique à l'Usage des Ingénieurs, Dunold, 1963
- 8- M. Kostenko L. Piotrovski, Machines Electriques - Tome 1, Tome 2, Editions MIR Moscow, 1979.
- 9- MARCEL Jufer, Electromécanique, Presses polytechniques et universitaires romandes Lausanne, 2004
- 10- A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umans, Electric Machinery McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- 11- Edminster. Théorie et applications des circuits électriques. Mc.Graw.Hill