

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Batna

Département de LMD ST

Faculté de Technologie

Polycopie

# Machines électriques I

---

Dr. ELKHEIR Merabet

2013/2014

Cette polycopie est destinée aux étudiants de deuxième année et troisième année universitaire (Licence) en sciences et techniques (Module de découverte électrotechnique). Il peut être aussi très utile aux élèves des instituts spécialisées dans la formation professionnelle.

## Tables des matières

<b>ABREVIATIONS &amp; SYMBOLES.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : MACHINES A COURANT CONTINU .....</b>	<b>2</b>
I.1 GENERALITES .....	2
I.2 CONSTITUTION .....	3
I. 2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	4
I. 3 PLAQUE SIGNALÉTIQUE D'UNE MACHINE .....	5
I.4 UTILISATIONS DE LA MACHINE A COURANT CONTINU.....	6
I. 5 QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT .....	6
I. 6 FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE.....	7
<i>I. 6. 1 Fonctionnement à vide et à fréquence de rotation constante.....</i>	<i>7</i>
<i>I. 6. 2 Fonctionnement sur charge résistive.....</i>	<i>8</i>
<i>I. 6. 3 Point de fonctionnement sur charge résistive.....</i>	<i>9</i>
<i>I. 6. 4 Bilan des puissances.....</i>	<i>10</i>
I. 7 FONCTIONNEMENT EN MOTEUR.....	12
<i>I. 7. 1 Fonctionnement en charge .....</i>	<i>12</i>
<i>I. 7. 2 Loi d'Ohm .....</i>	<i>13</i>
<i>I. 7. 3 Bilan des puissances.....</i>	<i>13</i>
<i>I. 7. 4 Essai à vide .....</i>	<i>16</i>
<i>I. 7. 5 Essai en charge .....</i>	<i>16</i>
<i>I. 7. 6 Point de fonctionnement.....</i>	<i>16</i>
I. 8 LES DIFFÉRENTES PERTES .....	17
I. 9 ENTRETIEN D'UN MOTEUR A COURANT CONTINU.....	17
I. 10 DIFFÉRENTS MODES D'EXCITATION.....	17
<i>I. 10. 1 Moteur à excitation indépendante .....</i>	<i>17</i>
<i>I. 10. 2 Moteur à aimant permanent.....</i>	<i>18</i>
<i>I. 10. 3 Moteur à excitation série .....</i>	<i>18</i>
<i>I. 10. 4 Moteur à excitation shunt.....</i>	<i>18</i>
I. 11 TYPES DE COUPLE RESISTANT.....	19
I. 12 AVANTAGES ET INCONVENIENTS.....	19
<i>I. 12. 1 Avantages.....</i>	<i>19</i>
<i>I. 12. 2 Inconvénients.....</i>	<i>19</i>
I. 13 PROBLÈMES DE DEMARRAGE DU MOTEUR .....	19
I. 14 EXERCICES D'APPLICATION .....	20
<i>Exercice 01 Machine à courant continu .....</i>	<i>20</i>
<i>Exercice 02 : machine à courant continu à excitation indépendante .....</i>	<i>20</i>
<i>Exercice 03 : moteur à courant continu à excitation série .....</i>	<i>20</i>

## Tables des matières

Exercice n°4.....	22
Exercice n°5.....	23
Exercice n°6.....	23
Exercice n°7.....	23
<b>CHAPITRE II : TRANSFORMATEURS.....</b>	<b>25</b>
II. 1 INTRODUCTION.....	25
II. 2 SYMBOLES.....	25
II. 3 PRINCIPE.....	26
<i>II. 3. 1 Constitution - Principe.....</i>	<i>26</i>
II. 4 TRANSFORMATEUR IDEAL.....	29
<i>II. 4. 1 Transformateur parfait.....</i>	<i>29</i>
<i>II. 4. 2 Impédance ramenée.....</i>	<i>30</i>
II. 5 TRANSFORMATEUR REEL A VIDE.....	31
<i>II. 5. 1 Influence de la réluctance du circuit magnétique.....</i>	<i>31</i>
<i>II. 5. 2 Influence des pertes fer.....</i>	<i>33</i>
II. 6 TRANSFORMATEUR REEL EN CHARGE.....	34
<i>II. 6. 1 Schéma équivalent.....</i>	<i>34</i>
<i>II. 6. 2 Chute de tension.....</i>	<i>35</i>
<i>II. 6. 3 Essais et propriétés du transformateur.....</i>	<i>37</i>
II. 7 TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ.....	39
<i>II. 7. 1 Grandeurs caractéristiques d'un transformateur triphasé.....</i>	<i>39</i>
<i>II. 7. 2 Rapport de transformation.....</i>	<i>40</i>
<i>II. 7. 3 Groupes de couplage.....</i>	<i>40</i>
II. 8 MISE SOUS TENSION DES TRANSFORMATEURS.....	42
<i>II. 8. 1 Courant d'enclenchement à vide.....</i>	<i>42</i>
<i>II. 8. 2 Procédés employés afin de diminuer les surintensités à l'enclenchement.....</i>	<i>44</i>
II. 9 EXERCICES SUR LE TRANSFORMATEUR.....	45
<i>Exercice N° 1 Calcul du nombre de spires nécessaire pour réaliser un transformateur.....</i>	<i>45</i>
<i>Exercice N° 2 Essai à vide.....</i>	<i>46</i>
<i>Exercice N° 3 Fonctionnement d'un transformateur.....</i>	<i>46</i>
<i>Exercice N° 4 Étude d'un transformateur triphasé.....</i>	<i>46</i>
<i>Exercice N° 5 Transformateur triphasé : modification du couplage du secondaire.....</i>	<i>46</i>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>47</b>

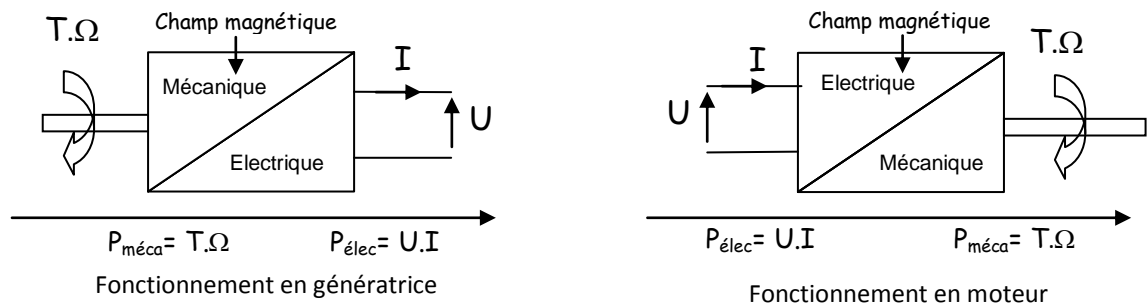
## Abréviations & Symboles

MCC	Machine à Courant Continu ;
$E$	Force électromotrice ;
$T$	Moment du couple mécanique ;
$I$	Courant continu ;
$P_{\text{élec}}$	Puissance électrique ;
$P_{\text{méca}}$	Puissance mécanique ;
$P_{\text{em}}$	Puissance Électromagnétique ;
$P_u$	Puissance utile ;
$B$	Induction magnétique
$\Omega$	Vitesse mécanique ;
$p$	Nombre de paires de pôles ;
$\eta$	Rendement ;
$n_1, n_2$	Nombre de spires ;
$\mathcal{R}$	Réductance de circuit magnétique ;
$\ell_1 \ell_2$	Inductance de fuites ;
$P_j$	Pertes par effet Joule ;
$P_{\text{Fer}}$	Pertes fer ;
$m$	Rapport de transformateur monophasé ;
$M$	Rapport de transformateur triphasé ;
$\omega$	Pulsation de la tension d'alimentation ;
$\varphi_1 \varphi_2$	Déphasage entre le courant et la tension ;
$Z_s$	Impédance interne du transformateur ;
$L_1, L_2$	Inductances propres.

## Chapitre I : Machines à Courant continu

### I.1 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.



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

$$P_{\text{méca}} = T \cdot \Omega \quad \left| \begin{array}{ll} P_{\text{méca}} & \text{Puissance mécanique en watts [W]} ; \\ T & \text{Moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm]} ; \\ \Omega & \text{La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s}^{-1}\text{]} . \end{array} \right.$$

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 :

$$P_{\text{élec}} = U \cdot I \quad \left| \begin{array}{ll} P_{\text{élec}} & \text{Puissance électrique en watts [W]} \\ U & \text{La tension en volts [V]} \\ I & \text{L'intensité du courant en ampères [A]} \end{array} \right.$$

Energie absorbée	Fonctionnement	Energie fournie
Electrique	Moteur	Mécanique
Mécanique	Génératrice	Electrique

## I.2 Constitution

### ➤ 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

Il se compose de lames de cuivre isolées latéralement les unes des autres, disposées de sorte à former un cylindre et reliées aux conducteurs de l'induit en des points régulièrement espacés.

### ➤ Balais

Les balais permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un contact glissant entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques mm<sup>2</sup> à quelques cm<sup>2</sup>, en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisation sévères (courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches, ...). Ils sont équipés d'une tresse de raccordement et maintenus en place par un porte-balais solidaire du stator. Un ressort exerce une pression constante sur la partie en graphite quel que soit le degré d'usure du balai.

**Remarque :** Généralement des pôles auxiliaires sont également présents dans les machines. Ils servent à réduire les étincelles au niveau des balais lors d'un changement de lame de collecteur. Ils sont constitués de bobinages placés perpendiculairement aux lignes de champ de l'inducteur et sont alimentés en série avec l'induit.

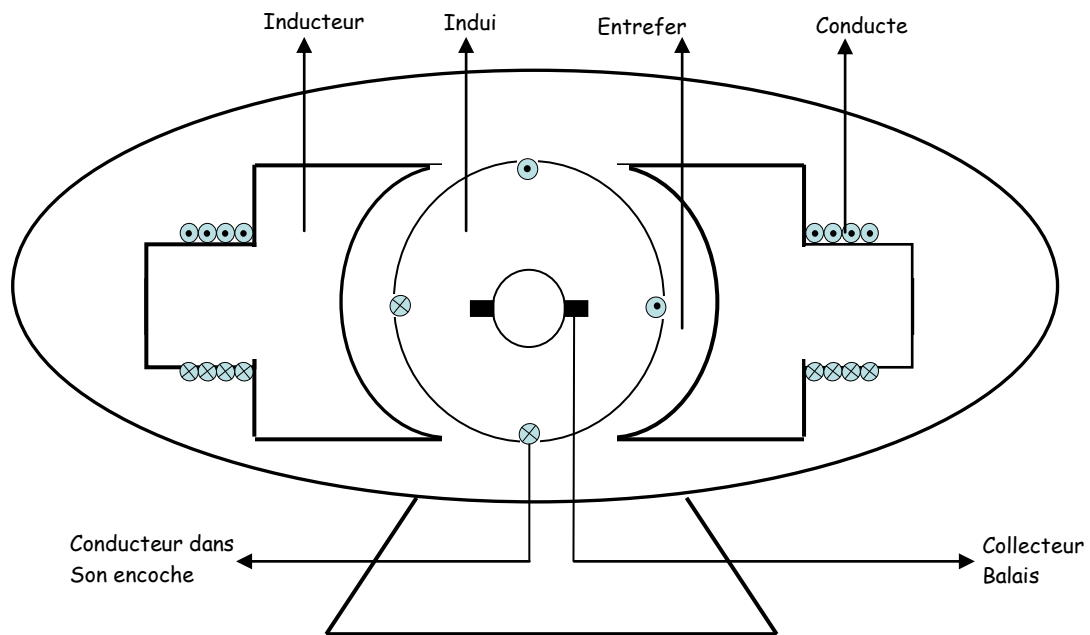


Figure I.2. Vue du Moteur à courant continu

## I. 2 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  $\Phi$ , 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 Fig. I. 3 :

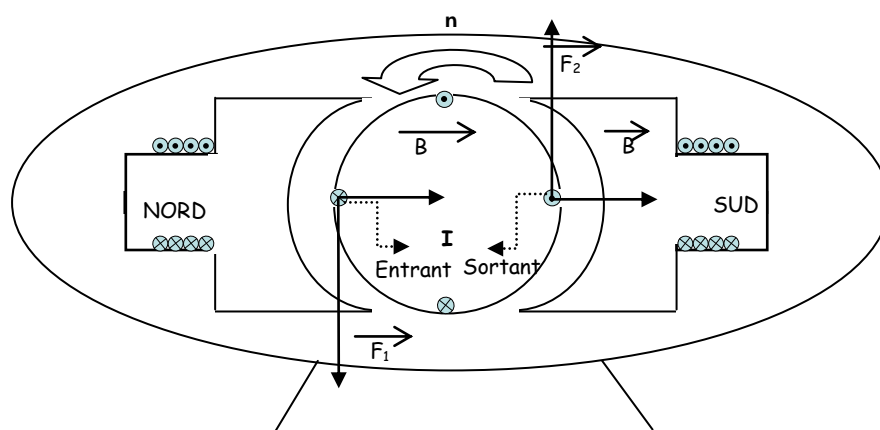


Figure I.3. Principe de fonctionnement.



Courant + Champ magnétique  $\longrightarrow$  Force Electromagnétique

Force + Champ magnétique  $\longrightarrow$  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] ;
$\Phi$	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  $\Phi$  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  $\Omega$  exprimée en radians par seconde :

$$E = K.\Phi.\Omega$$

$E$	La f.e.m en volts [V] ;
$\Omega$	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad/s] ;
$\Phi$	Le flux en webers [Wb] ;
$K=p.N/a$	Constante interne de la machine.

$p$  : nombre de paires de pôles,  $a$  : nombre de paires de voies en parallèles.

### I. 3 Plaque signalétique d'une machine

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.

Un exemple d'une plaque signalétique est donné par la figure suivante :

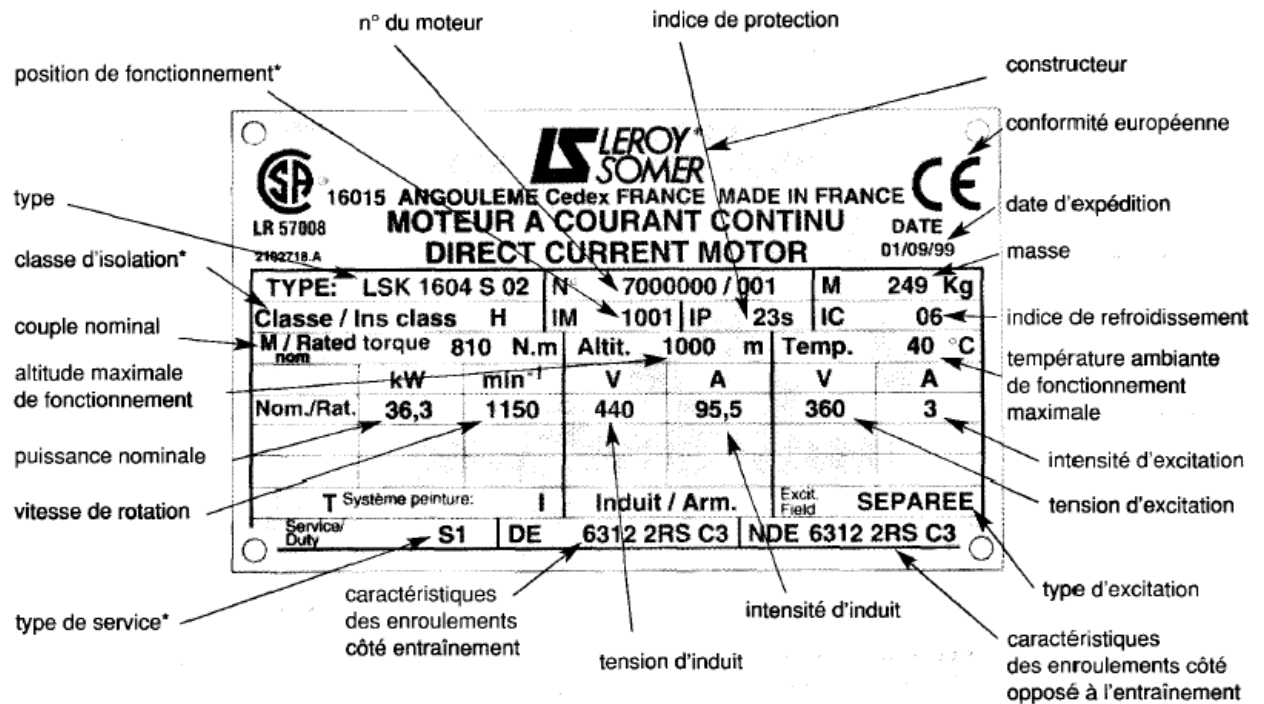


Figure I.4. Plaque signalétique.

## I.4 Utilisations de la machine à courant continu

La machine à courant continu est le plus souvent utilisée en moteur, en concurrence avec les moteurs synchrones et asynchrones principalement.

Les critères dynamiques (démarrage, réglage de la vitesse, décrochage) ne sont plus déterminants car les progrès de l'électronique de puissance permettent de résoudre ces problèmes. Les critères de choix sont aujourd'hui le coût d'achat, de maintenance, la durée de vie, la puissance massique (en W.kg<sup>-1</sup>), le bruit...

On en trouve beaucoup en automobile : démarreur, pompe à carburant, essuie-glaces, lève-vitres, ventilateur, climatiseur, toit ouvrant, etc, et dans les jouets.

Un cas particulier important est celui du moteur dit « universel » : c'est un moteur à excitation série, fonctionnant en courant continu comme en courant alternatif ; il équipe beaucoup d'électroménager : aspirateurs, mixeurs, etc. et d'outils.

## I. 5 Quadrants de fonctionnement

La machine à courant continu est complètement réversible. Les relations  $E = K\phi\Omega$  et  $T_{em} = K\phi I$  sont des relations algébriques. A flux constant et en convention récepteur, on obtient :

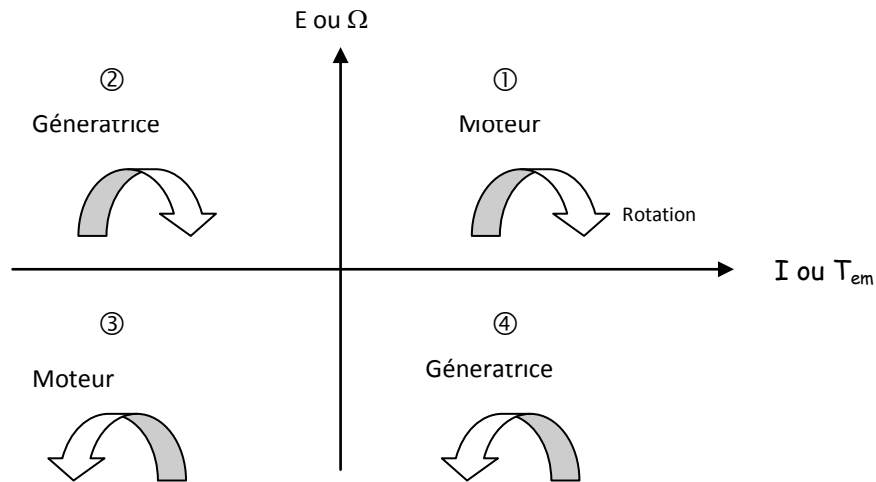


Figure I.5. Quadrants de fonctionnement.

## I. 6 Fonctionnement en génératrice

### I. 6. 1 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.

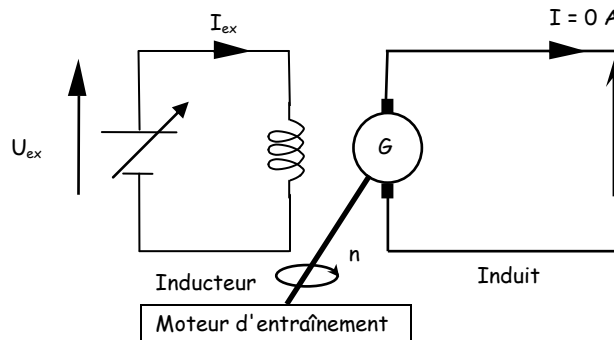
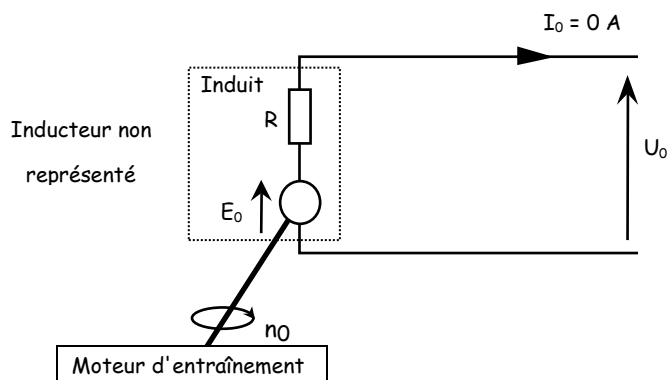


Figure I.6. Fonctionnement d'une génératrice à vide.

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  $\phi$ , 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.



$R$  La résistance totale de l'induit ;

$U_0$  La tension aux bornes de l'induit ;

$E_0$  La f.e.m de la génératrice ;

$I_0$  L'intensité du courant dans l'induit ;

$n_0$  La fréquence de rotation du rotor.

Figure I.7. 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.

### I. 6. 2 Fonctionnement sur charge résistive

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

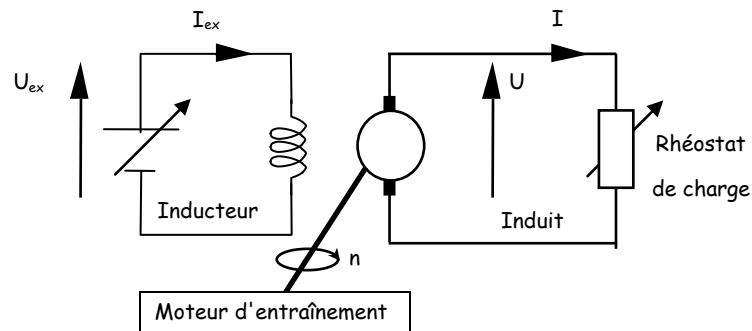


Figure I.8. Fonctionnement d'une génératrice en charge.

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

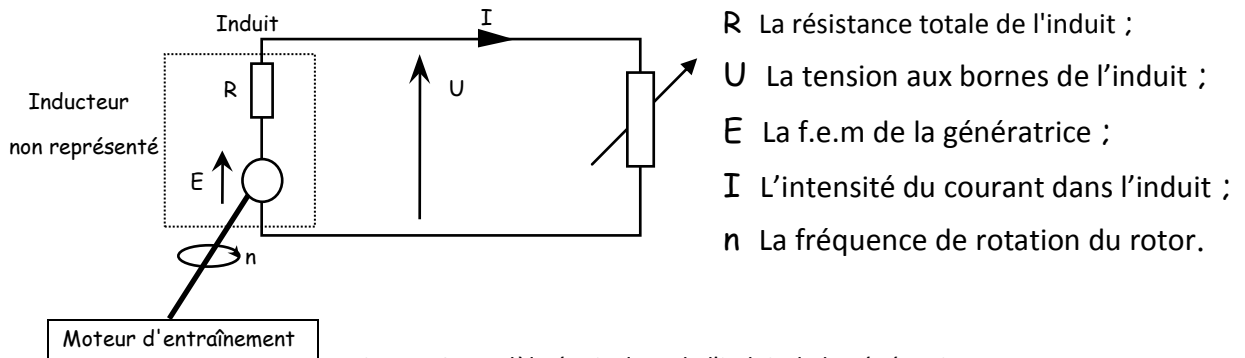


Figure I.9. Modèle équivalent de l'induit de la génératrice.

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

$$U = E - R.I$$

$U$	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 [ $\Omega$ ] ;
$I$	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,  $I = 0A$ .  $I_{cc}$  valeur maximale de l'intensité du courant dans l'induit court-circuité,  $U = 0V$

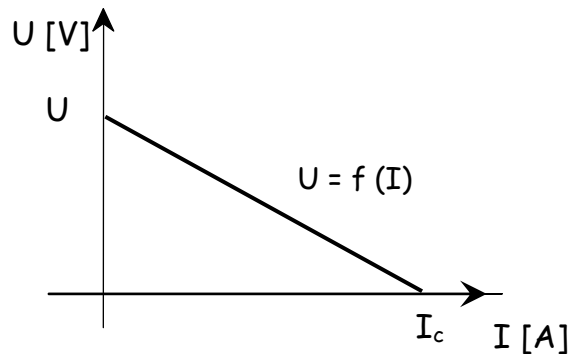


Figure I.10. Caractéristique de fonctionnement d'une génératrice.

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  $R$  :

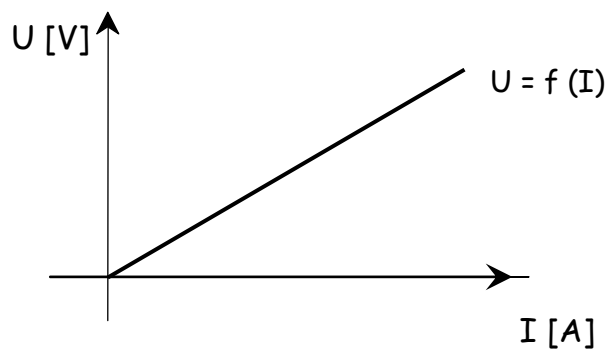


Figure I.11. Caractéristique de la charge résistive : tension en fonction du courant.

### I. 6. 3 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 :

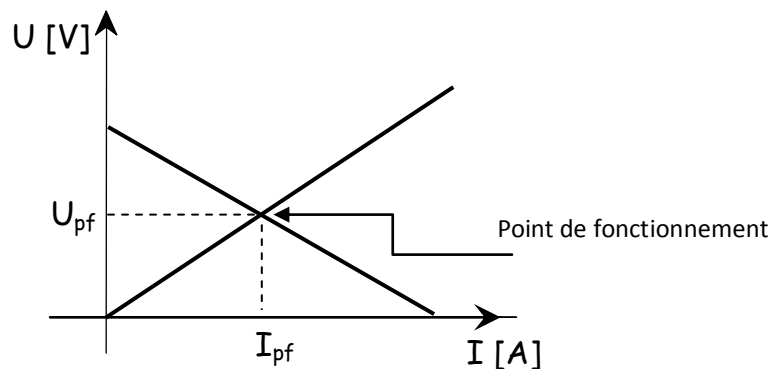


Figure I.12. Evaluation graphique du point de fonctionnement.

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.

#### I. 6. 4 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 :

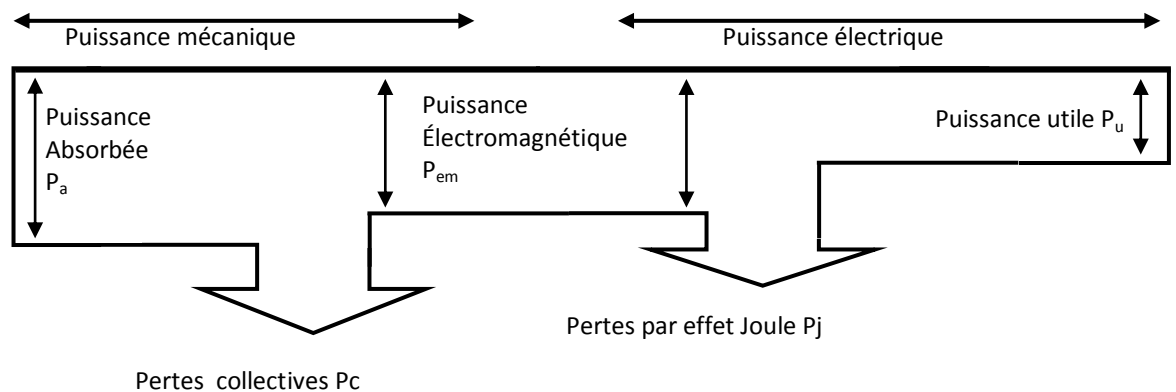


Figure I.13. Bilan des puissances d'une génératrice.

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

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

$P_a = T \cdot \Omega$ <b>Mécanique</b>	$P_a$	La puissance absorbée en watts [W] ;
	$T$	Le moment du couple mécanique en newton-mètre [N.m] ;
	$\Omega$	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad/s].
$P_c = T_p \cdot \Omega$ <b>Mécanique</b>	$P_c$	Les pertes collectives en watts [W] ;
	$T_p$	Le moment du couple de pertes en newton-mètre [N.m] ;
	$\Omega$	La vitesse angulaire en radians par seconde [rad/s].

$P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$ <p><b>Mécanique</b></p> <p style="text-align: center;">↕</p> $P_{em} = E \cdot I$ <p><b>Electrique</b></p>	$P_{em}$ La puissance électromagnétique en watts [W] ; $T_{em}$ Le moment du couple électromagnétique en newton-mètres [Nm] ; $\Omega$ La vitesse angulaire en radians par seconde [rad/s] .
$P_j = R \cdot I^2$ <p><b>Electrique</b></p>	$P_{em}$ 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].  $P_j$ Les pertes par effet Joule en watts [W] ; $R$ La résistance de l'induit en ohms [ $\Omega$ ] ; $I$ L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A] .
$P_u = U \cdot I$ <p><b>Electrique</b></p>	$P_u$ 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 :

$P_{em} = P_a - P_c$ <p><b>Mécanique</b></p>	$P_{em}$ La puissance électromagnétique en watts [W] ; $P_a$ La puissance absorbée en watts [W] ; $P_c$ Les pertes collectives en watts [W].
--	--

Et

$P_u = P_{em} - P_j$ <p><b>Electrique</b></p>	$P_u$ La puissance utile en watts [W] ; $P_{em}$ La puissance électromagnétique en watts [W] ; $P_j$ Les pertes par effet Joule en watts [W].
---	---

Donc

$P_u = P_a - P_c - P_j$ <p><b>Mécanique</b> <b>Electrique</b></p>	$P_u$ 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 :

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

$\eta$	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].

Ou

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

$P_{ex}$	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W] ;
$r$	La résistance de l'inducteur en ohms [ $\Omega$ ] ;
$I_{ex}^2$	L'intensité du courant dans l'inducteur en ampères <sup>2</sup> [A <sup>2</sup> ].

Le rendement est donc

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

$\eta$	Rendement de la machine complète [sans unités]
$P_u$	La puissance utile en watts [W]
$P_a$	La puissance absorbée en watts [W]

## I. 7 Fonctionnement en moteur

### I. 7. 1 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  $n$ .

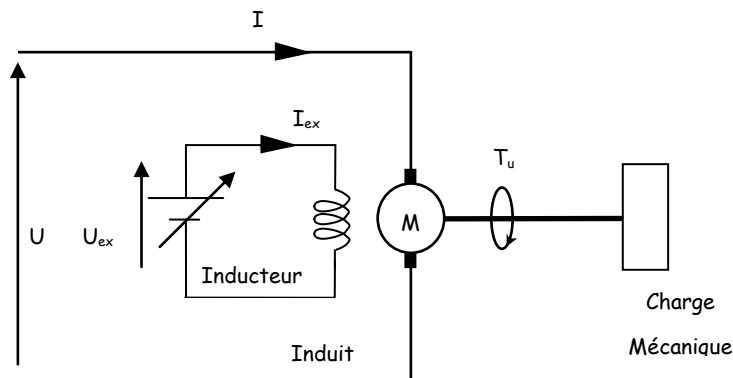


Figure I.14. Fonctionnement d'un moteur en charge.



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

### I. 7. 2 Loi d'Ohm

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

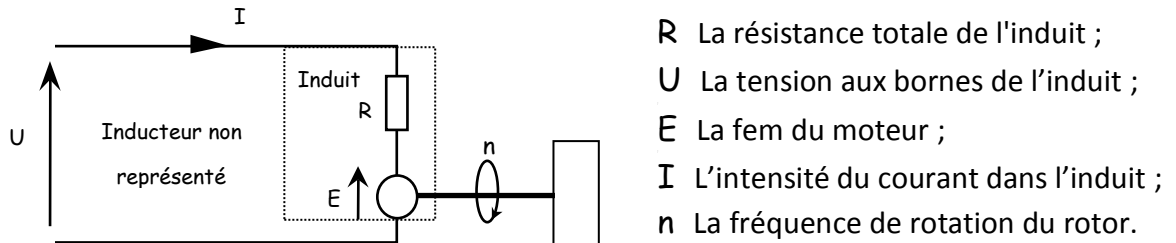


Figure I.15. Modèle équivalent de l'induit du moteur.

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 [ $\Omega$ ] ;
$I$	L'intensité du courant dans l'induit en ampères [A].

### I. 7. 3 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 :

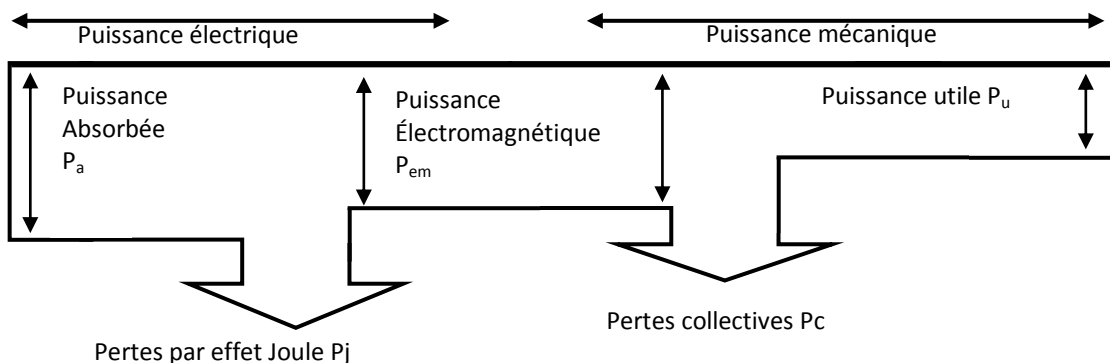


Figure I.16. Bilan des puissances d'un moteur

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.

$P_a = U \cdot I$ <p><b>Electrique</b></p> $P_j = R \cdot I^2$ <p><b>Electrique</b></p>	$P_a$ 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].  $P_j$ Les pertes par effet Joule dans l'induit en watts [W] ; $R$ La résistance de l'induit en ohms [ $\Omega$ ] ; $I^2$ L'intensité du courant dans l'induit en ampères <sup>2</sup> [A <sup>2</sup> ].
$P_{em} = E \cdot I$ <p><b>Electrique</b></p> <p style="text-align: center;">↕</p> $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$ <p><b>Mécanique</b></p>	$P_{em}$ 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-mètre [Nm] ; $\Omega$ La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s <sup>-1</sup> ].
$P_c = T_p \cdot \Omega$ <p><b>Mécanique</b></p> $P_a = T \cdot \Omega$ <p><b>Mécanique</b></p>	$P_c$ Les pertes collectives en watts [W] ; $T_p$ Le moment du couple de pertes en newton-mètres [Nm] ; $\Omega$ La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s <sup>-1</sup> ] ; $P_a$ La puissance utile en watts [W]. $T$ Le moment du couple mécanique en newton-mètres [Nm] ; $\Omega$ La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s <sup>-1</sup> ].

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 :

$P_{em} = P_a - P_j$ <p><b>Electrique</b></p> <p>Et</p>	$P_{em}$ La puissance électromagnétique en watts [W] ; $P_a$ La puissance absorbée en watts [W] ; $P_j$ Les pertes par effet Joule en watts [W].
$P_u = P_{em} - P_c$ <p><b>Mécanique</b></p>	$P_u$ 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 Mécanique	$P_u$	La puissance utile en watts [W] ;
		$P_a$	La puissance absorbée en watts [W] ;
		$P_j$	Les pertes par effet Joule en watts [W] ;
		$P_c$	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 :

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

	$\eta$	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].

ou

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

	$P_{ex}$	La puissance absorbée par l'inducteur en watts [W] ;
	$U_{ex}^2$	La tension d'alimentation de l'inducteur en volts <sup>2</sup> [V <sup>2</sup> ] ;
	$r$	La résistance de l'inducteur en ohms [ $\Omega$ ].

Le rendement est donc

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

	$\eta$	Rendement du moteur complet [sans unités] ;
	$P_u$	La puissance utile en watts [W] ;
	$P_a$	La puissance absorbée en watts [W].

### I. 7. 4 Essai à vide

Nous dirons que le moteur fonctionne à vide s'il n'entraîne aucune charge sur son arbre. L'indice «<sub>o</sub>» caractérise cet essai. Sa fréquence de rotation est notée  $n_o$ , elle est légèrement supérieure à sa fréquence de rotation nominale, l'intensité du courant dans l'induit  $I_o$  est très faible devant sa valeur nominale et la tension d'alimentation  $U_o$  de l'induit est réglée à sa valeur nominale. En faisant varier  $U_o$ , la tension aux bornes de l'induit mesurée en volts, nous pouvons relever en ampères l'intensité du courant dans l'induit  $I_o$ , et la fréquence de rotation  $n_o$  en tours par seconde.

### I. 7. 5 Essai en charge

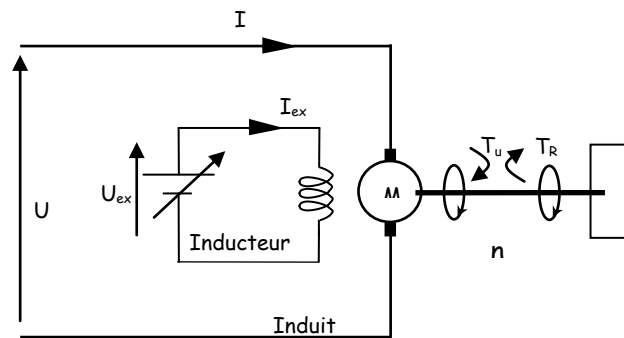


Figure I.17. Moteur en charge.

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-mètre .
$T_R$	Le moment du couple résistant en newton-mètre.

### I. 7. 6 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.

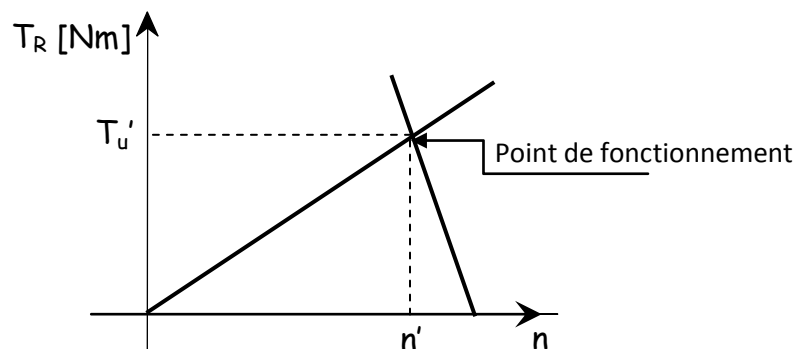


Figure I.18. Evaluation graphique du point de fonctionnement.

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

## I. 8 Les différentes pertes

Pertes	Pertes magnétiques $p_{\text{fer}}$ ou pertes ferromagnétiques ou pertes fer	Pertes joules $p_j$	Pertes mécaniques $P_{\text{meca}}$
Causes	<b>ELLES SONT DUES A L'HYSTERESIS (CHAMP REMANENT) ET AUX COURANTS DE FOUCAULT (COURANT INDUIT DANS LE FER) ET DEPENDENT DE B ET DE <math>\Omega</math>.</b>	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistances des bobinages.	<b>ELLES SONT DUES AUX FROTTEMENTS DES DIVERSES PIECES EN MOUVEMENT.</b>
Parades	<b>UTILISATION DE MATERIAUX A CYCLES ETROITS, COMME LE FER AU SILICIUM ET LE FEUILLETAGE DE L'INDUIT.</b>	<b>IL FAUT SURTOUT EVITER L'ECHAUFFEMENT PAR VENTILATION.</b>	<b>UTILISATION DE ROULEMENTS ET DE LUBRIFIANTS.</b>

## I. 9 Entretien d'un moteur à courant continu

Par rapport aux moteurs asynchrones, les machines à courant continu nécessitent une maintenance préventive plus importante :

- surveillance de l'état des balais et du collecteur,
- remplacement régulier des balais.

De plus, il est nécessaire d'assurer une ventilation intérieure du moteur pour évacuer les résidus issus de l'usure des balais et du collecteur car ces résidus conducteurs pourraient entraîner des courts-circuits.

La conception des moteurs à courant continu est telle qu'ils coûtent en moyenne trois fois plus cher qu'un moteur asynchrone.

## I. 10 Différents modes d'excitation

Nous allons voir qu'il existe plusieurs méthodes pour alimenter l'inducteur de la machine, chacune d'entre elles conduisant à des caractéristiques de fonctionnement différentes. Nous allons nous placer dans le cas où la machine fonctionne en moteur.

### I. 10. 1 Moteur à excitation indépendante

Ce moteur est caractérisé par une vitesse réglable par tension et indépendante de la charge. En association avec un convertisseur statique (hacheur) fournissant une tension réglable, la vitesse peut varier sur un large domaine. Il fournit un couple important à faible

vitesse (machines-outils, levage). En petite puissance, il est souvent utilisé en asservissement avec une régulation de vitesse.

### I. 10. 2 Moteur à aimant permanent

Ces moteurs sont généralement utilisés en robotique (micromoteur). Le bobinage inducteur est remplacé par un aimant en matériau ferromagnétique.

### I. 10. 3 Moteur à excitation série

Ce moteur possède un fort couple de démarrage. Il convient très bien dans le domaine des fortes puissances (1 à 10 MW) pour obtenir un fonctionnement satisfaisant en faible vitesse (traction, laminoirs). En petite puissance il est employé comme démarreur des moteurs à explosion.

Remarque : Avant de faire un couplage série, on doit vérifier que l'inducteur peut supporter le courant d'induit!

**Attention !** 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.

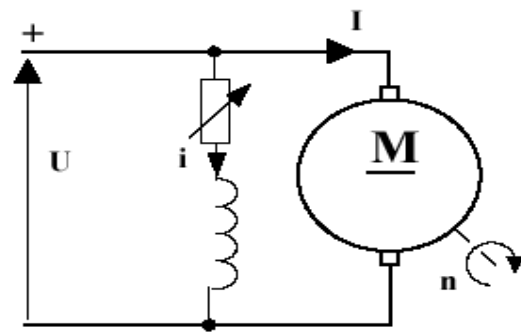
➡ UNE COUPURE DANS LE CIRCUIT D'EXCITATION ENTRAINE DONC UN EMBALLEMENT DU MOTEUR.

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.

### I. 10. 4 Moteur à excitation shunt

Caractéristique  $n = f(I)$  à excitation constante ( $U = u_{ex} = \text{cste}$ ),  $n = (U - RI) / k.\Phi$   
 $\Rightarrow n = k (U - RI)$

La vitesse  $n$  diminue progressivement lorsque la charge augmente.



## I. 11 Types de couple résistant

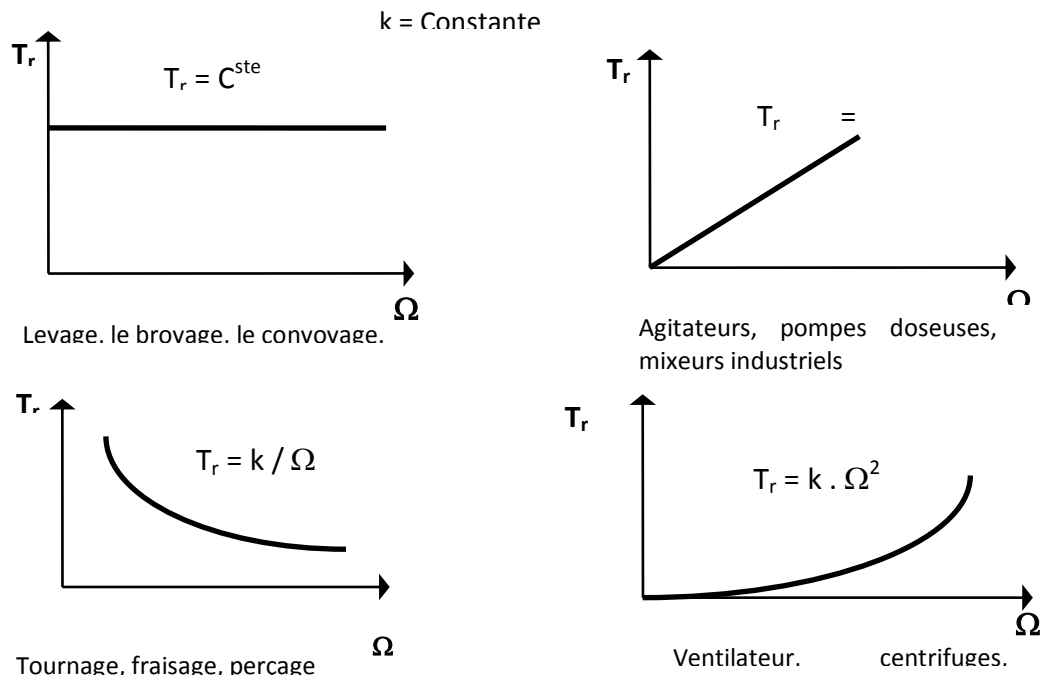


Figure I.19. Couples résistants en fonction de la vitesse

## I. 12 Avantages et Inconvénients

### I. 12. 1 Avantages

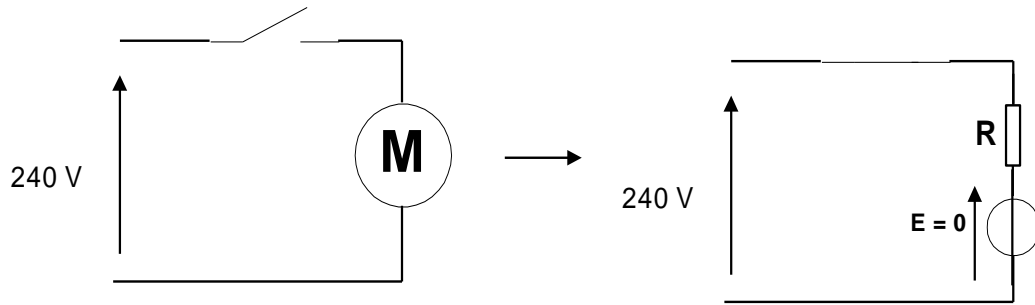
- Plage de variation de vitesse très grande ( $> 1000$  en boucle d'asservissement) ;
- Couple de démarrage important, idéal pour l'entraînement de charges à forte inertie ;
- Rendement élevé.

### I. 12. 2 Inconvénients

- Prix élevé ;
- Puissance massique très faible, comparée à toutes les autres technologies ;
- Maintenance coûteuse (remplacement des balais en graphite, usure du collecteur).

## I. 13 Problèmes de démarrage du moteur

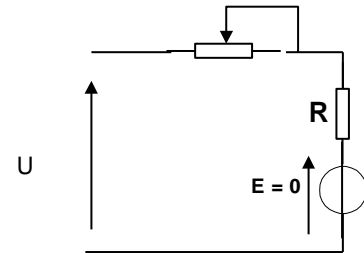
Surintensité du courant de démarrage lors l'alimentation de l'induit directement par la tension nominale.



Au démarrage,  $E = k \Phi \Omega = 0$  donc  $U = RI = 240 \text{ V}$  soit  $I = 240 \text{ A}$  si  $R = 1$ , c'est impossible

Solution :

- rhéostat de démarrage
- augmentation progressive de la tension  $U$  jusqu'à la valeur nominale (industrielle, utilisation du pont mixte ou du hacheur en faible puissance)



## I. 14 Exercices d'application

### Exercice 01 Machine à courant continu

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

**Solution**

Le couple utile est  $T_u = 3000 / (1500 \times 2\pi / 60) = 19,1 \text{ N.m.}$

### Exercice 02 : machine à courant continu à excitation indépendante

La force électromotrice d'une machine à excitation indépendante est de 210 V à 1500 tr/min. Calculer la fem pour une fréquence de rotation de 1000 tr/min, le flux étant constant.

**Solution**

$E = k\Phi\Omega$  : à flux constant, la fem est proportionnelle à la vitesse de rotation.

$$E = 210 \times 1000 / 1500 = 140 \text{ V.}$$

### Exercice 03 : moteur à courant continu à excitation série

1- Donner le schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu à excitation série.

2- On donne :

Tension d'alimentation du moteur :  $U = 200 \text{ V.}$

Résistance de l'inducteur :  $r = 0,5 \Omega.$

Résistance de l'induit :  $R = 0,2 \Omega.$

Courant consommé :  $I = 20 \text{ A.}$



Vitesse de rotation :  $n = 1500 \text{ tr/mn}$ .

Calculer :

2-1- La f.e.m. du moteur.

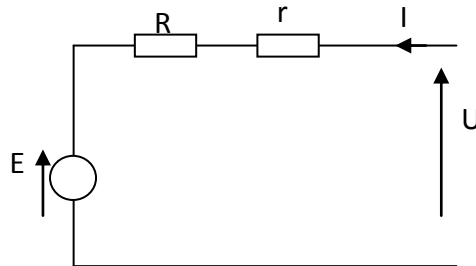
2-2- La puissance absorbée, la puissance dissipée par effet Joule et la puissance utile si les pertes collectives sont de  $100 \text{ W}$ .

En déduire le moment du couple utile et le rendement.

2-3- Au démarrage, le courant doit être limité à  $I_d = 40 \text{ A}$ .

Calculer la valeur de la résistance du rhéostat à placer en série avec le moteur.

### Solution



2-1- La f.e.m. du moteur.

$$E = U - (R + r)I = 200 - (0,2 + 0,5) \times 20 = 186 \text{ V}$$

$$\text{Puissance absorbée} = UI = 200 \times 20 = 4000 \text{ W}$$

$$\text{Pertes Joules totales} = (R + r)I^2 = (0,2 + 0,5) \times 20^2 = 280 \text{ W}$$

$$\text{Puissance utile} = 4000 - (280 + 100) = 3620 \text{ W}$$

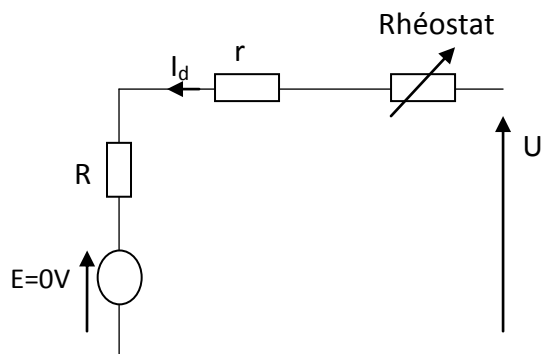
$$T_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{3620}{1500 \times \frac{2\pi}{60}} = \frac{3620 \text{ W}}{157 \text{ rad/s}} = 23 \text{ N.m}$$

$$\text{Rendement} = 3620 \text{ W} / 4000 \text{ W} = 90,5 \%$$

2-3- Au démarrage, la fem est nulle (vitesse de rotation nulle).

$$U = (R + r + R_h)I_d$$

$$\Rightarrow R_h = \frac{U}{I_d} - (R + r) = \frac{200}{40} - 0,7 = 4,3 \Omega$$



Le courant doit être limité à la valeur  $40 \text{ A}$ . Résistance du rhéostat à placer en série

**Exercice n°4**

Un moteur CC est composé:

- d'un inducteur fournissant un champ  $B$  proportionnel au courant d'excitation  $I'$  suivant la loi  $B = 0,50 I'$ :

- d'un induit composé de 24 encoches contenant 10 brins conducteurs chacune. La largeur de contact des frotteurs sur les lames de collecteurs permet au courant d'induit  $I$  de parcourir simultanément 20 encoches. La longueur des brins est  $L = 35$  cm, et le diamètre séparant deux encoches opposées sur le rotor est  $D = 14$  cm.

→ On impose un courant  $I' = 2$  A à l'inducteur:

1°) calculer le champ  $B$ .

2°) calculer le nombre de brins actifs  $N$  présents dans le rotor.

En fait il y a 4 encoches soit 40 brins réparties sur les lignes neutres et non alimentées en courant

→ On impose un courant d'intensité  $I = 3$  A à l'induit.

3°) calculer la force de Laplace subie par chaque brin actif.

4°) en déduire le moment du couple  $T$  agissant sur le rotor

5°) calculer la puissance mécanique  $P_m$  fournie par ce moteur à la fréquence de rotation 20 tr/s (

tour/s )

→ sur la plaque du moteur on lit :

fréquence nominale de rotation: 20 tr/s, rendement nominal de l'induit: 91%

6°) calculer la puissance électrique absorbée par l'induit

7°) en déduire la tension appliquée  $U$  entre les balais (frotteurs)

**Réponse**

1) on utilise la loi  $B = 0,5I'$  qui donne  $B=1$  T ( T= tesla unité de champ magnétique)

2) 20 encoches à 10 brins en contact avec les frotteurs →  $N = 200$  brins actifs

3)  $F = BIL$  donne  $F = 1 \times 3 \times 0,35 = 1,05$  N

4) 200 brins sont soumis en même temps au champ  $B$  et au courant  $I$

la force résultante tangentielle d'un seul côté agissant sur le rotor sera donc dans le cas d'une répartition homogène du champ:  $F_{\text{tot}} = N/2 \cdot F$  soit  $F = 105$  N

le moment de cette force par rapport à l'axe de rotation du rotor (arbre) vaut  $M = F_{\text{TOT}} \cdot D$  soit :  $T = 105 \times 0,14 = 14,7$  N.m

5) soit  $n$  la fréquence de rotation ( en tr/s) et  $\Omega$  la vitesse angulaire ( en rad/s)

$P_m = M \cdot \Omega$  avec  $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n$   $P_m = M \cdot 2 \pi \cdot n$  qui donne  $P_m = 1847$  W

6) soit  $\eta$  le rendement

le moteur étant un convertisseur électromécanique sa loi de rendement est la suivante:

$P_m = P_a \cdot \eta$  ou  $P_a$  est la puissance électrique absorbée.

on a donc  $P_a = P_m / \eta$  qui donne:  $P_a = 1847 / 0.91 = 2030$  W soit environ 2 kW

7) entre les balais, c'est l'intensité  $I = 3$  A qui est injectée dans le rotor

à partir de loi de puissance en courant continu on obtient  $P_a = UI$  et  $U = P_a/I$

soit ici:  $U = 2030/3 = 676 \text{ V}$  soit environ 700V On sera peut être étonné de la grande valeur trouvée, en effet elle n'est pas courante dans le domaine industriel, par contre elle tout à fait en accord avec celles utilisées dans le domaine de la traction électrique.

Une telle tension est obtenue en redressant la tension triphasée 400V/700V/50Hz.

### Exercice n°5

Une génératrice débite sous une tension  $U = 100\text{V}$ , un courant de  $I_{ch}=15\text{A}$  à une vitesse  $n=1500\text{tr/mn}$ . Si le couple moteur  $T_m=12\text{N.m}$ , déterminer le rendement et les pertes totales de la génératrice.

**Réponse :  $\eta=79.9\%$ ,  $P_{tot}=385\text{W}$ .**

### Exercice n°6

La caractéristique à vide d'une génératrice à excitation séparée  $E=f(j)$  pour  $N=1000\text{tr/mn}$ .

E(V)	100	132	151	170	183	190
j(A)	0.64	1	1.28	1.62	1.92	2.11

- Résistance de l'induit  $= 0.12\Omega$ .

a) On souhaite alimenter une résistance  $R_{ch}=2\Omega$  sous une tension  $U=150\text{V}$  et avec une vitesse  $1000\text{tr/mn}$ . Calculer le courant  $j$  pour obtenir ces conditions.

b)  $j$  est maintenu constante. La vitesse chute de 15%. Calculer la tension aux bornes de la génératrice et le courant d'induit.

c) Déterminer la valeur de  $j$  pour les conditions précédentes  $U=150\text{V}$ ,  $I=75\text{A}$ .

### Exercice n°7

Le disque du lecteur de CD-ROM est entraîné en rotation par un petit moteur à courant continu à aimants permanents.

En vitesse normale, on a relevé pour l'induit du moteur :  $U = 13,5 \text{ V}$  ;  $I = 3 \text{ A}$  ;  $n = 6000 \text{ tr/min}$  ;  $R = 0,1 \Omega$

3.1) Dessiner le schéma du modèle équivalent à l'induit du moteur.

Ecrire la relation entre la tension  $U$  et le courant  $I$ .

3.2) Justifier que, pour ce type de moteur fonctionnant à flux constant, les relations donnant la f.é.m.  $E$  et le moment  $T_e$  du couple électromagnétique peuvent s'écrire :

$$E = k \Omega \quad \text{et} \quad T_e = k I$$

**Préciser les unités employées dans ces relations.**

3.3) Calculer la f.é.m.  $E$  et déduire la valeur de  $k$  de la relation  $E = k \Omega$ .

3.4) Déterminer le moment  $T_e$  du couple électromagnétique.

a) En déduire le moment  $T_u = T_e - T_p$  du couple utile, sachant que le moment  $T_p$  du couple de pertes est égal à  $6 \times 10^{-3}$  N.m.

b) Calculer la puissance utile  $P_u$  du moteur.

c) En déduire le rendement  $\eta$  du moteur, en %.

## Chapitre II : Transformateurs

### II. 1 Introduction

Le transformateur est un convertisseur alternatif-alternatif qui permet de modifier la valeur efficace d'une tension alternative en maintenant la fréquence et la forme de l'onde inchangées.

Les transformateurs sont des machines 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 et le réseau de transport, puis ils permettent l'abaissement de la tension du réseau vers l'utilisateur. En outre, le transformateur procure un isolement entre réseaux et permet de changer de régime de neutre.

Nous étudierons tout d'abord le transformateur monophasé et nous verrons comment en déduire les propriétés des transformateurs triphasés.

### II. 2 Symboles

On peut employer deux symboles pour représenter le transformateur monophasé. Sur celui de la Figure II. 1, les trois barres verticales symbolisent le noyau magnétique qui permet à l'énergie magnétique de passer du bobinage primaire au bobinage secondaire.

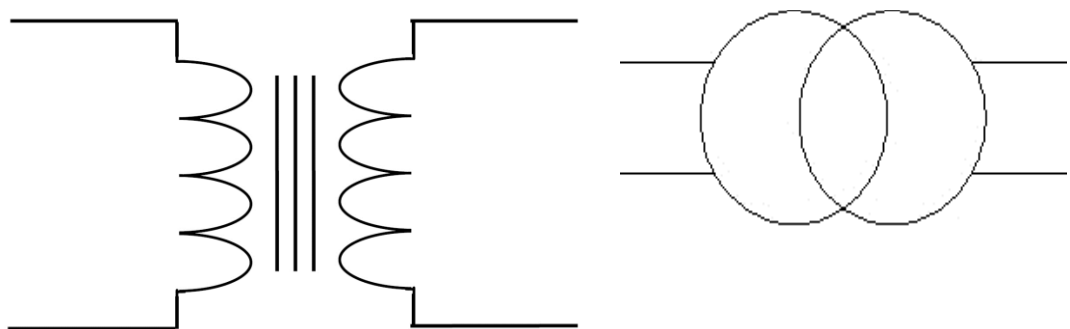


Figure II.1 Symboles du transformateur monophasé.

## II. 3 Principe

### II. 3. 1 Constitution - Principe

Un transformateur comprend :

- \* un circuit magnétique fermé :
  - de perméabilité magnétique aussi haute que possible afin de faciliter le plus possible le passage des lignes de champ magnétique ;
  - d'hystérésis aussi faible que possible pour limiter les pertes ;
  - feuilleté (tôles de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur) afin de limiter les courants de Foucault ;
  - de résistance électrique aussi élevée que possible, toujours dans le but d'affaiblir les courants de Foucault, à cette fin on utilise des aciers au silicium (2 à 3 %).
- \* deux enroulements (bobines) :
  - le primaire alimenté par un générateur de tension alternative de tension  $V_1$  et comportant  $n_1$  spires. Il absorbe le courant  $I_1$ . Le primaire transforme l'énergie électrocinétique reçue en énergie magnétique ;
  - le secondaire comporte  $n_2$  spires ; il fournit, sous la tension  $V_2$ , un courant  $I_2$  au dipôle récepteur. Le secondaire transforme l'énergie magnétique reçue du primaire en énergie électrocinétique. Les deux enroulements sont isolés électriquement, mais magnétiquement couplés par le flux.

L'un des deux bobinages joue le rôle de primaire, il est alimenté par une tension variable et donne naissance à un flux variable dans le circuit magnétique. D'après la loi de Faraday, ce flux magnétique variable induit une force électromotrice (f.é.m.) dans le deuxième bobinage qui est appelé secondaire du transformateur, Figure II. 2.

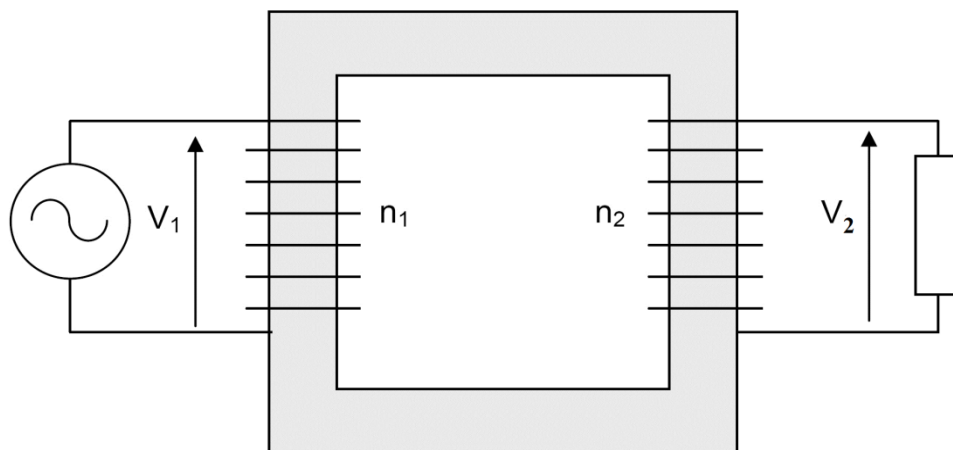


Figure II.2 Transformateur monophasé.

Si le dipôle alimenté par le transformateur absorbe une puissance  $P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$ , ( $\varphi_2$  étant le déphasage dû au dipôle), le primaire qui se comporte comme un récepteur vis à vis du réseau absorbe  $P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$  ( $\varphi_1$  étant le déphasage entre  $V_1$  et  $I_1$ ).

La conservation de la puissance permet d'écrire au rendement près :  $P_1 = P_2$ .

De par son principe, le transformateur ne peut pas fonctionner s'il est alimenté par une tension continue. Le flux doit être variable pour induire une f.é.m. au secondaire, il faut donc que la tension primaire soit variable.

Le transformateur est réversible, chaque bobinage peut jouer le rôle de primaire ou de secondaire. Le transformateur peut être abaisseur ou élévateur de tension.

Il peut y avoir plus d'un enroulement secondaire. Par exemple, dans le cas d'un transformateur abaisseur fournissant une tension efficace de 24 V, une tension de 12 V et une autre de 5 V, on a un primaire et trois secondaires. L'isolement électrique et l'échauffement constituent les limitations des enroulements.

Nous appellerons  $\phi$  le flux commun aux deux enroulements, ce flux circule dans le circuit magnétique.

Les enroulements primaires et secondaires sont épais. À part la couche de spires enroulée directement sur le circuit magnétique, toutes les autres sont à des distances croissantes de celui-ci. Cela entraîne qu'un certain nombre de lignes de champ se referment dans l'air plutôt que par le circuit magnétique comme le montre la figure II. 3. Ce phénomène est à l'origine d'un flux de fuite au primaire et au secondaire. A un instant donné, le flux de fuite à travers une spire du primaire  $F_1$  a le même sens que le flux magnétique commun  $\phi$  tandis qu'au même instant, le flux de fuite à travers une spire du secondaire circule dans le sens contraire du flux commun comme le montre la figure II. 3.

Soit  $F_1$  et  $F_2$  les flux de fuites propres à chaque enroulement:

Le flux total traversant une spire du primaire est :  $\phi_1 = \phi + F_1$

Le flux total traversant une spire du secondaire est :  $\phi_2 = \phi - F_2$

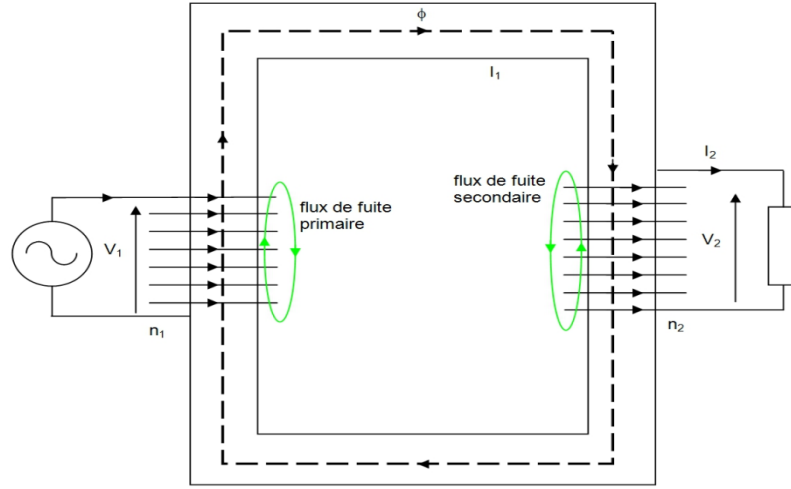


Figure II.3 Flux de fuite au primaire et au secondaire à un instant donné.

Si  $R_1$  et  $R_2$  sont les résistances des enroulements, on peut écrire, en régime sinusoïdal (en supposant le circuit magnétique non saturé) :

$$\bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j\omega n_1 \bar{\Phi}_1 \quad (II.1)$$

$$\bar{V}_2 = -R_2 \bar{I}_2 + j\omega n_2 \bar{\Phi}_2 \quad (II.2)$$

Le flux commun  $\Phi$  est donné par la relation de Hopkinson dans laquelle on néglige les fuites devant  $\Phi$  :

$$n_1 \bar{I}_1 - n_2 \bar{I}_2 = \mathcal{R} \bar{\Phi} \quad (II.3)$$

$\mathcal{R}$  : Étant la réluctance de circuit magnétique.

Les lignes de champ des flux de fuite se referment dans l'air, aussi les flux de fuite sont-ils proportionnels aux intensités qui les produisent. Le flux de fuites propres au primaire,  $F_1$  est proportionnel au courant dans le primaire, on écrit :

$$n_1 \bar{F}_1 = \ell_1 \bar{I}_1 \quad (II.4)$$

$\ell_1$  : Inductance de fuites du primaire

De même pour le secondaire :

$$n_2 \bar{F}_2 = \ell_2 \bar{I}_2 \quad (II.5)$$

$\ell_2$  : Inductance de fuites du secondaire

On obtient finalement l'ensemble des équations du transformateur :

$$\bar{V}_1 = (R_1 + j\omega \ell_1) \bar{I}_1 + jn_1 \omega \bar{\Phi} \quad (II.6)$$

$$\bar{V}_2 = -(R_2 + j\omega \ell_2) \bar{I}_2 + jn_2 \omega \bar{\Phi} \quad (II.7)$$



## II. 4 Transformateur idéal

Afin de dégager les aspects fondamentaux, et compte tenu des ordres de grandeurs, il est commode d'utiliser la notion de transformateur idéal (sans pertes ni fuites) ou transformateur parfait. Nous verrons ensuite qu'un transformateur réel peut être étudié à partir de ce modèle en y introduisant les paramètres négligés ici.

### II. 4. 1 Transformateur parfait

Un transformateur parfait :

- n'a pas de fuite magnétiques :  $\ell_1 = \ell_2 = 0$  ;
- n'a pas de pertes Joule :  $R_1 = R_2 = 0$  ;
- possède un circuit magnétique infiniment perméable :  $\mathcal{R} = 0$  « supra-réductant » ;
- n'a pas de pertes fer.

NOTA : Le transformateur réel est, numériquement, assez proche de ces hypothèses.

Les équations se simplifient :

$$\bar{V}_1 = j n_1 \omega \bar{\phi} \quad (\text{II.8})$$

$$\bar{V}_2 = j n_2 \omega \bar{\phi} \quad (\text{II.9})$$

$$n_1 \bar{I}_1 - n_2 \bar{I}_2 = 0 \quad (\text{II.10})$$

En éliminant le flux commun et en utilisant la relation d'Hopkinson, on obtient la relation fondamentale :

$$\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \quad (\text{II.11})$$

Les tensions sont dans le rapport des nombres de spires. Le nombre  $\frac{n_2}{n_1}$  (ou son inverse, selon les auteurs) est appelé *rapport de transformation*. Le transformateur permet d'élever ou de diminuer la tension.

On remarque d'autre part que le flux  $\phi$  est lié à la tension d'alimentation ; on a en module :

$$\phi = \frac{V_1}{\omega n_1} \quad (\text{II.12})$$

Dans le circuit magnétique, si  $S$  est sa section, l'induction a pour valeur efficace :

$$B_{eff} = \frac{\phi}{S} = \frac{B_{max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{II.13})$$

### II. 4. 2 Impédance ramenée

Les équations complexes précédentes montrent que si le déphasage dû au dipôle de charge est  $\varphi_2$ , on retrouve ce même angle entre  $V_1$  et  $I_1$  : Le rendement est évidemment égal à un :

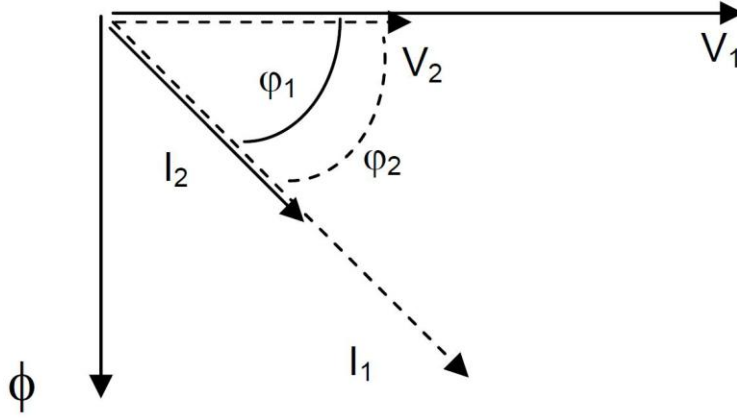


Figure II.4 Déphasage tension courant au primaire d'un transformateur parfait.

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (\text{II.14})$$

Le dipôle alimenté par le secondaire peut être représenté par une f.é.m.  $E_2$  et une impédance  $Z_2$  (modèle de THÉVENIN) comme le montre la figure II. 5.

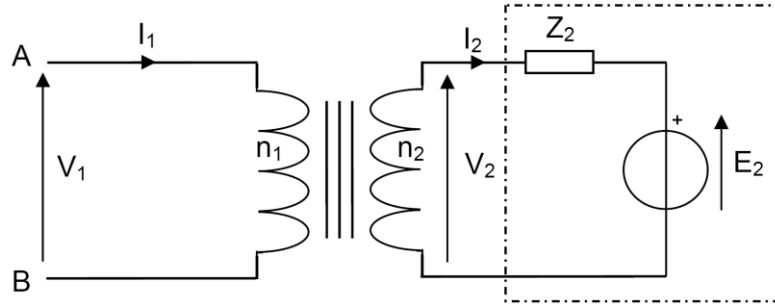


Figure II.5 Transformateur parfait alimentant un dipôle modélisé par THEVENIN.

Cherchons à quel générateur ( $E_1, Z_1$ ) est équivalent le montage vu des bornes A et B :

$$\bar{V}_2 = \bar{E}_2 + \bar{Z}_2 \bar{I}_2 \quad (\text{II.15})$$

Éliminons  $V_2$  et  $I_2$  en les remplaçant par leur expression en fonction des grandeurs primaires :

$$\bar{V}_1 = \frac{n_1}{n_2} \left( \bar{E}_2 + \bar{Z}_2 \frac{n_1}{n_2} \bar{I}_1 \right) = \frac{n_1}{n_2} \bar{E}_2 + \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \bar{Z}_2 \bar{I}_1 \quad (\text{II.16})$$

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + \bar{Z}_1 \bar{I}_1 \quad (\text{II.17})$$

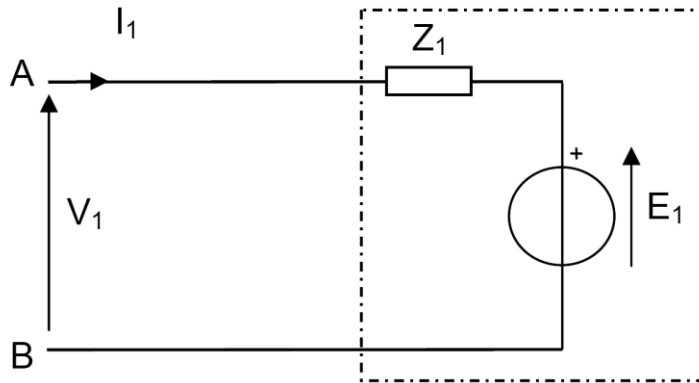


Figure II.6 Modèle de Thevenin du transformateur parfait alimentant un dipôle.

Par identification, on a :

$$\overline{E_1} = \frac{n_1}{n_2} \overline{E_2} \quad (\text{II.18})$$

$$\frac{\overline{Z_1}}{\overline{Z_2}} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad (\text{II.19})$$

On retiendra ce dernier résultat en notant que, pour les impédances, c'est le carré du rapport des nombres de spires qui compte (théorème du *transfert d'impédance*). Cela va nous permettre de simplifier des schémas équivalents du transformateur. Dans le domaine de l'électronique, cette relation est souvent utilisée afin de calculer les transformateurs chargés d'adapter les impédances des hauts parleurs à l'impédance de sortie des amplificateurs.

## II. 5 Transformateur réel à vide

Un transformateur parfait à vide, c'est à dire tel que  $I_2 = 0$ , n'absorberait aucun courant primaire, et serait équivalent, vu des bornes d'entrée du primaire, à une impédance infinie. En fait, le transformateur réel absorbe un courant à vide, faible devant le courant nominal et qui dépend de la qualité du circuit magnétique (réductance, pertes fer).

### II. 5. 1 Influence de la réductance du circuit magnétique

Si on ne néglige plus  $\mathcal{R}$ , on a :

$$\overline{V_1} = jn_1\omega\overline{\phi} \quad (\text{II.20})$$

$$\overline{V_2} = jn_2\omega\overline{\phi} \quad (\text{II.21})$$

$$n_1 \bar{I}_1 - n_2 \bar{I}_2 = \mathcal{R} \bar{\Phi} \quad (\text{II.22})$$

Le rapport des tensions n'est pas modifié, mais pour les courants, on peut écrire :

$$\bar{I}_1 = \frac{n_2}{n_1} \bar{I}_2 + \frac{\mathcal{R}}{n_1} \bar{\Phi} = \frac{n_2}{n_1} \bar{I}_2 + \frac{\mathcal{R} \bar{V}_1}{j\omega n_1^2} \quad (\text{II.23})$$

Le second terme de cette expression est le courant magnétisant du transformateur  $\bar{I}_{10}$  :

$$\bar{I}_{10} = \frac{\bar{V}_1}{j\omega \frac{n_1^2}{\mathcal{R}}} = \frac{V_1}{j\omega L_1} \quad (\text{II.24})$$

Avec  $L_1 = \frac{n_1^2}{\mathcal{R}}$  l'inductance propre de l'enroulement primaire.

A vide,  $I_2 = 0$ , et le primaire du transformateur absorbe le courant  $I_{10}$  ; nous trouvons évidemment que le primaire, utilisé seul, se comporte comme une inductance de  $n_1$  spires, placées sur un circuit magnétique de réluctance  $\mathcal{R}$ .

Si  $V_1$  et  $\omega$  sont des constantes,  $I_{10}$  est constant.

On peut donc écrire :

$$I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 + I_{10} ; \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{II.25})$$

Il est recommandé de traduire ces équations par un schéma équivalent au transformateur réel (voir la figure II. 7) et qui comprend :

- un transformateur parfait de même nombres de spires  $n_1$  et  $n_2$  que le transformateur réel ;
- une inductance  $L_1$  en parallèle et dans laquelle passe le courant magnétisant  $I_{10}$ .

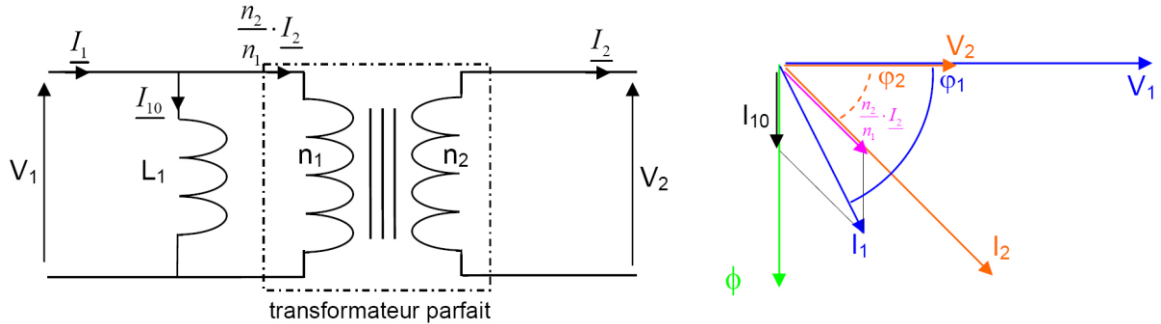


Figure II.7 Modèle du transformateur réel à vide, représentation vectorielle des courants.

## II. 5. 2 Influence des pertes fer

Le flux alternatif engendre, par hystérésis et courants de Foucault, un échauffement du circuit magnétique : les «pertes fer». Cela correspond à une absorption supplémentaire de puissance active approximativement proportionnelle au carré du champ magnétique  $B$  et à la fréquence  $f$ . Le flux étant déterminé par la tension appliquée (à fréquence donnée), les pertes fer seront proportionnelles au carré de la tension. Elles interviendront en permanence dans le rendement mais seront particulièrement mises en évidence lors du fonctionnement à vide. Un transformateur sans pertes fer n'absorberait, à vide, aucune puissance active (l'inductance  $L_1$  n'absorbe que de la puissance réactive) ; le transformateur réel à vide absorbe en fait une puissance correspondant à ces pertes fer.

Cela signifie qu'à vide, le transformateur réel absorbe un courant  $I_{1V}$  qui comporte, outre le courant magnétisant  $I_{10}$ , un courant  $I_{1F}$ , en phase avec la tension, correspondant aux pertes fer :

$$P_V = P_{fer} = V_1 I_{1F} = V_1 I_{1V} \cos \varphi_{1V} \quad (\text{II.26})$$

$\varphi_{1V}$  étant le déphasage entre  $V_1$  et  $I_{1V}$ .

La relation ci-dessous se traduit par les vecteurs de Fresnel disposés suivant la figure II. 8 :

$$\overline{I_{1V}} = \overline{I_{10}} + \overline{I_{1F}} \quad (\text{II.27})$$

A fréquence constante,  $I_{1F}$  est proportionnel à  $V_1$ .

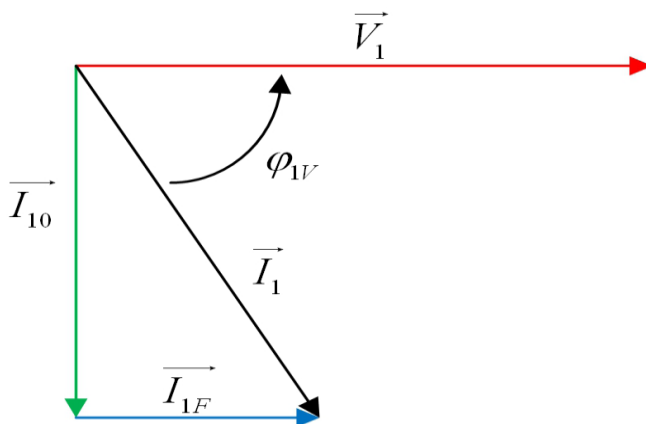


Figure II.8 Décomposition du courant  $I_{1V}$  absorbé à vide en courant dû aux pertes fer  $I_{1F}$  et en courant dû à la création du flux  $I_{10}$ .

Il est commode de compléter le schéma équivalent en représentant les pertes fer par une résistance fictive  $R_F$ , absorbant sous la tension  $V_1$  le courant  $I_{1F}$ ;  $R_F$  est telle que :

$$P_{fer} = V_1 I_{1F} = \frac{V_1^2}{R_F} \quad (II.28)$$

On aura donc finalement :

$$\bar{I}_1 = \frac{n_2}{n_1} \bar{I}_2 + \bar{I}_{1V} \quad \text{et} \quad \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (II.29)$$

## II. 6 Transformateur réel en charge

### II. 6. 1 Schéma équivalent

Lorsque les courants sont importants, on doit tenir compte des chutes de tension dans les résistances et dans les inductances de fuites. Le courant magnétisant et les pertes fer restent liés au flux. Le schéma équivalent de la figure 1.16 traduit les équations complètes :

$$\bar{V}_1 = (R_1 + j\omega\ell_1) \bar{I}_1 + jn_1\omega\bar{\Phi} \quad (II.30)$$

$$\bar{V}_2 = -(R_2 + j\omega\ell_2) \bar{I}_2 + jn_2\omega\bar{\Phi} \quad (II.31)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{n_2}{n_1} \bar{I}_2 + \bar{I}_{1V} \quad (II.32)$$

En pratique, la chute de tension dans  $R_1$  et  $\ell_1$  est faible devant  $V_1$  et, pour le calcul du courant  $I_{1V}$ , lui-même faible, il est inutile d'en tenir compte. On obtient alors un schéma plus simple et suffisamment précis, figure. II. 9.

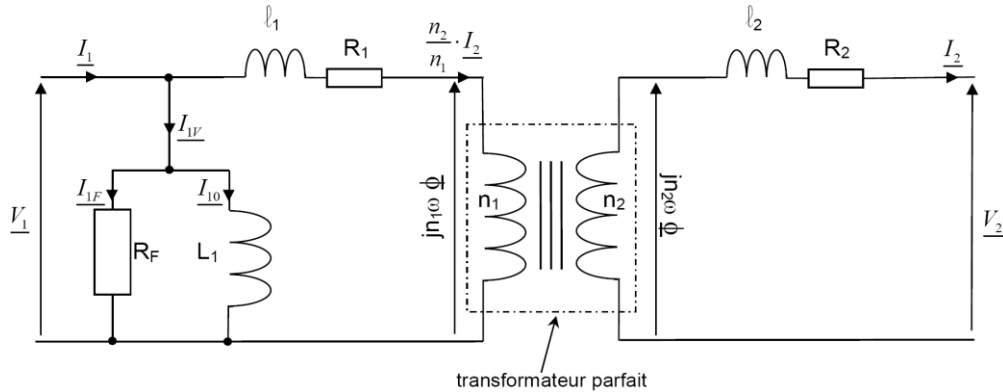


Figure II.9 Schéma équivalent du transformateur réel en charge : simplification.

On peut enfin réduire ce schéma en utilisant le théorème du transfert d'impédance, on peut ramener  $R_1$  et  $\ell_1$  au secondaire en les multipliant par  $\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$  et en les regroupant avec  $R_2$  et  $\ell_2$  ; on pose :

$$R_s = R_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_1 \quad \text{Résistance des enroulements ramenée au secondaire ;}$$

$$\ell_s = \ell_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \ell_1 \quad \text{Inductance de fuite ramenée au secondaire.}$$

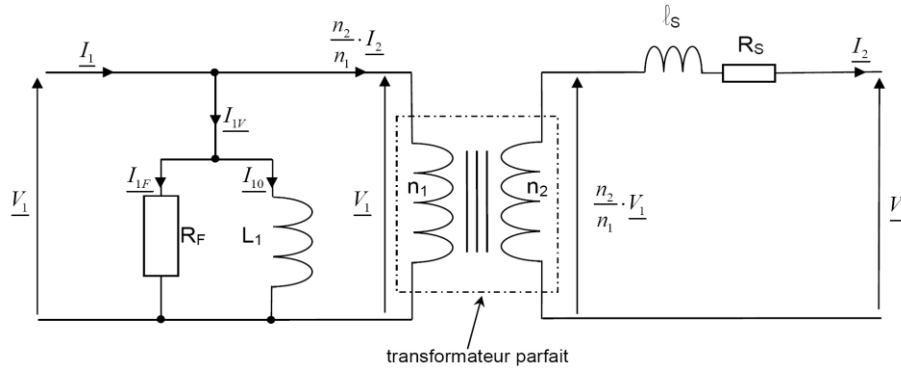


Figure II.10 Schéma équivalent du transformateur réel en charge : utilisation du théorème du transfert d'impédance pour ramener la résistance et l'inductance du primaire au secondaire.

Le schéma final de la figure II. 10, aussi appelé *schéma de Kapp*, permet l'étude complète du transformateur réel qui, si  $V_1$  est constante, se présente au secondaire comme un générateur de f.é.m.  $\frac{n_2}{n_1} V_1$  et d'impédance interne  $Z_s = R_s + j\omega \ell_s$

Outre le phénomène essentiel traduit par le transformateur parfait, on localise les imperfections :

- réluctance du circuit magnétique :  $L_1$  ;
- fuites de flux :  $\ell_s$  ;
- pertes fer :  $R_F$  ;
- pertes cuivre (effet Joule) :  $R_s$  .

**REMARQUE** : En raison de  $R_1$  et  $\ell_1$ , la valeur efficace du flux  $\phi$  dans le circuit magnétique n'est pas rigoureusement constante en charge ; on négligera ce phénomène.

## II. 6. 2 Chute de tension

Le schéma précédent conduit pour les tensions à l'équation :

$$\frac{n_2}{n_1} \bar{V}_1 = \bar{V}_2 + (R_s + j\omega \ell_s) \bar{I}_2 \quad (\text{II.33})$$

(Equation de Kapp)

Supposons que le transformateur débite le courant  $I_2$  sous la tension  $V_2$  dans un dipôle qui présente le déphasage  $\varphi_2$  : on peut construire le diagramme des tensions (diagramme de Kapp) comme le montre la figure II. 11, sur cette figure, les amplitudes des vecteurs associés aux tensions  $R_s \bar{I}_2$  et  $j\omega \ell_s I_2$  ont été largement exagérées afin de les rendre plus visibles.

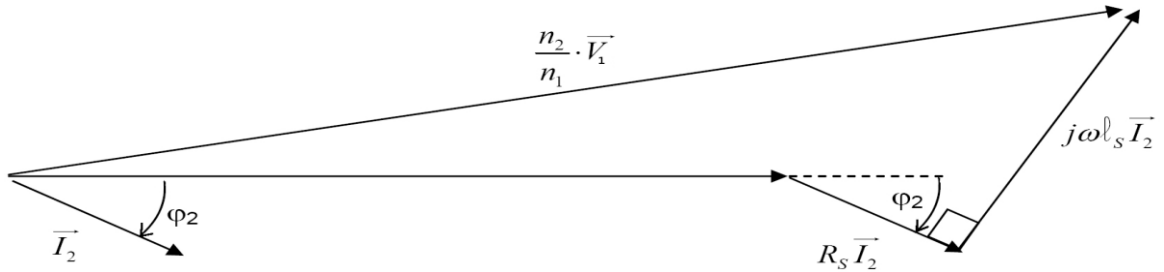


Figure II.11 Diagramme de Kapp des tensions.

On voit que, en général,  $V_2$  sera différente de  $\frac{n_2}{n_1} V_1$  et dépendra de  $I_2$  et de  $\varphi_2$ . A vide,  $I_2 = 0$ , on aura une tension  $V_2 = V_{20} \frac{n_2}{n_1} V_1$ .

On appelle *chute de tension* la quantité :  $\Delta V_2 = |V_{20}| - |V_2|$  différence des valeurs efficaces de la tension secondaire à vide et en charge pour une même tension primaire  $V_1$ . Le diagramme de Kapp permet de déterminer graphiquement cette chute de tension. En réalité,  $(R_s I_2)$  et  $(\ell_s \omega I_2)$  sont faibles devant  $V_2$  et on peut souvent utiliser une relation simplifiée tirée du schéma de la figure II. 12.

Si :  $R_s I_2 \ll V_2$  et  $\ell_s \omega I_2 \ll V_2$ , on peut considérer que le rayon du cercle est très grand et confondre la projection  $ab$  avec  $\Delta V_2$ . On a alors :

$$\Delta V_2 \cong R_s I_2 \cos \varphi_2 + \ell_s I_2 \sin \varphi_2$$

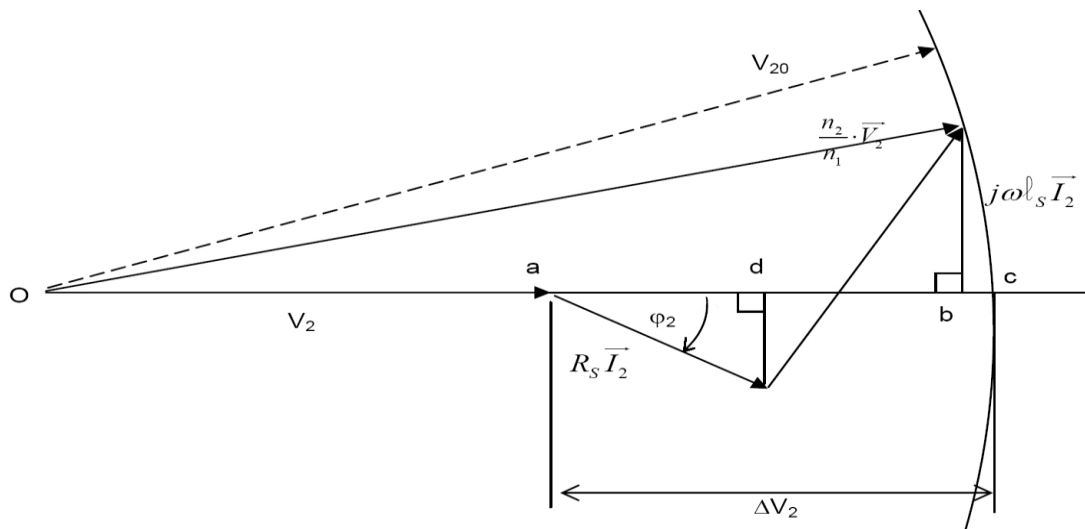


Figure II.12 Justification graphique du calcul de la chute de tension.



### II. 6. 3 Essais et propriétés du transformateur

Les paramètres du schéma équivalent (figure II. 10) doivent être déterminés par des essais expérimentaux. On peut effectuer des mesures directement sous tensions et courants nominaux. Il est préférable de séparer les essais, ce qui, en outre, permet de travailler à puissance réduite.

#### II. 6. 3. 1 Essai à vide

Le secondaire du transformateur étant à vide ( $I_2 = 0$ ), on mesure  $V_1$ ,  $V_2 = V_{20}$ ,  $P_{1V}$ ,  $I_{1V}$ .

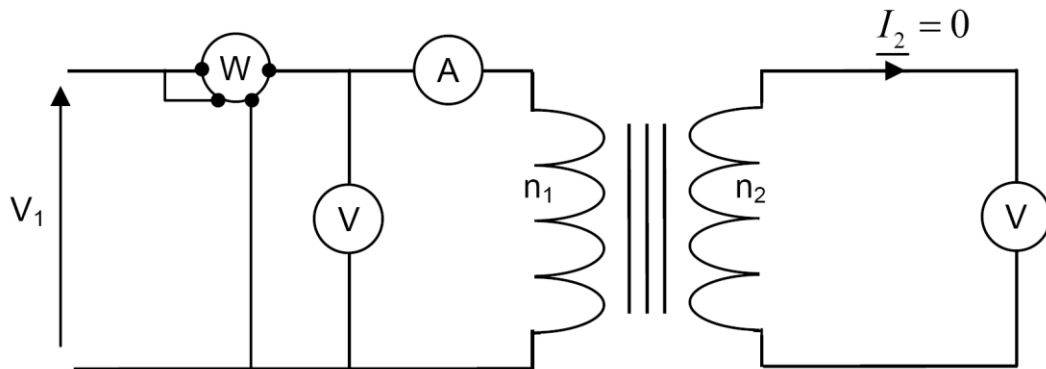


Figure II.13 Essai à vide du transformateur.

Les courants primaires et secondaires étant respectivement très faible et nul, on négligera les pertes « cuivre », c'est à dire les pertes Joule. On aura :  $R_1 I_1^2 \approx 0$  et  $R_2 I_2^2 \approx 0$ . La puissance mesurée est assimilée aux seules pertes fer.

On en déduit :  $\frac{n_2}{n_1} = \frac{V_{20}}{V_1}$  et  $\cos \phi_{1V} = P_{1V} / V_1 I_{1V}$ ;  $I_{1F} = I_{1V} \cos \phi_{1V}$  et  $I_{10} = I_{1V} \sin \phi_{1V}$ .

#### II. 6. 3. 2 Essai en court circuit

Le secondaire est mis en court circuit par un ampèremètre comme le montre la figure II. 14.

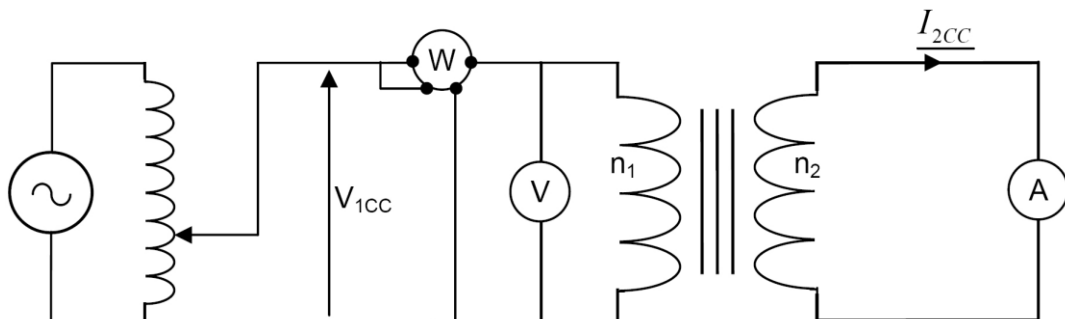


Figure II.14 Essai en court-circuit du transformateur.

Le primaire doit être alimenté sous une tension *réduite*  $V_{1CC}$ . On mesure :

$V_{1CC}$ ,  $P_{1CC}$ ,  $I_2 = I_{2CC}$ . Comme  $V_{1CC}$  est très faible, les pertes fer sont négligeables et il ne reste que les pertes Joule :

$$P_{1CC} \approx R_s I_{2CC}^2 \quad (\text{II.34})$$

d'où  $R_s$ . On peut également mesurer  $R_1$  et  $R_2$  en courant continu et faire le calcul. Le diagramme de Kapp se réduit à un triangle rectangle ( $V_2 = 0$ ) dont on connaît le côté ( $R_s I_{2CC}$ ) et l'hypoténuse.

On en déduit ( $\ell_s \omega$ ) :

$$\ell_s \omega I_{2CC} = \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1} V_{1CC}\right)^2 - (R_s I_{2CC})^2} \quad (\text{II.35})$$

Par le diagramme de Kapp (figure II. 15), ou en utilisant la relation approchée du paragraphe précédent, on peut, à partir de ces résultats, prédéterminer la tension  $V_2$  (ou la chute de tension) pour tout courant  $I_2$  débité et tout déphasage  $\varphi_2$ .

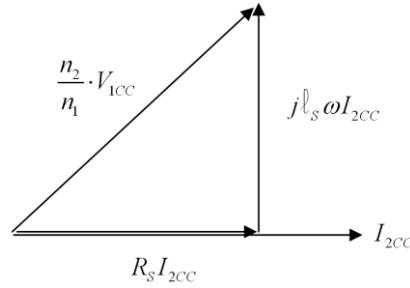


Figure II.15 Essai en court circuit du transformateur.

**REMARQUES :** On applique le théorème de Boucherot :

Puissance absorbée = Puissance fournie + pertes ;

Puissance fournie :  $P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$

Pertes Joule :  $P_J = R_1 I_2^2 + R_2 I_2^2 = R_s I_2^2$

Pertes fer :  $P_F = \frac{V_1^2}{R_F} = P_V \propto E$

D'où le rendement :

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_s I_2^2 + P_F} \quad (\text{II.36})$$

L'essai à vide donne les pertes fer et l'essai en court circuit donne les pertes Joule. Numériquement, ce rendement est excellent pour un transformateur industriel ( $\eta > 95\%$ ). Il dépend de  $V_2$ ,  $I_2$ ,  $\varphi_2$ .

**REMARQUE :** Le rendement est nul pour  $I_2 = 0$  et  $I_2 = \infty$ .

Si on suppose  $V_2$  et  $\varphi_2$  constants, il est maximum lorsque  $R_s I_2 = P_F / I_2$  soit lorsque :  $P_J = P_F$

$$\eta = \frac{V_2 \cos \varphi_2}{V_2 \cos \varphi_2 + R_s I_2 + \frac{P_F}{I_2}} \quad (\text{II.37})$$

## II. 7 Transformateur triphasé

En triphasé, on peut utiliser trois transformateurs monophasés identiques dont on groupe les primaires et les secondaires en étoile ou en triangle.

Il est possible de disposer les enroulements sur le même circuit magnétique.

Dans les deux cas, le rapport de transformation dépend des couplages utilisés et, en outre, un déphasage peut apparaître entre les tensions primaires et secondaires.

Afin de simplifier la réalisation du circuit magnétique et de diminuer le volume occupé par le transformateur ainsi que la masse de fer utilisée, on réalise souvent des transformateurs triphasés à noyaux coplanaires possédant 3 colonnes. Cela a pour effet de contraindre les flux dans les colonnes à satisfaire à :

$$\overline{\phi_1} = \overline{\phi_2} = \overline{\phi_3} = 0 \quad (\text{au flux de fuites dans l'air près}).$$

### II. 7. 1 Grandeurs caractéristiques d'un transformateur triphasé

La plaque signalétique d'un transformateur triphasé porte, comme en monophasé, les valeurs nominales :

- de la puissance apparente utile  $S_{2n}$  ;
- des tensions primaires et secondaires composées, c'est à dire entre fils de ligne ; si le mode de connexion des enroulements n'est pas fixé on indiquera les valeurs nominales des tensions correspondant à chaque couplage possible. Exemple : si une plaque porte :
  - \* Primaire : étoile  $U_{1ny} = 380V$ , triangle  $U_{1n\Delta} = 220V$  ;
  - \* Secondaire : étoile  $U_{2ny} = 220V$ , triangle  $U_{2n\Delta} = 127V$ .

Cela signifie que les enroulements sont prévus pour travailler sous les tensions normales suivantes :

$$\text{➤ au primaire : } V'_{1n} = \frac{U_{1ny}}{\sqrt{3}} = U_{1n\Delta} = 220V ;$$

$$\text{➤ au secondaire : } V'_{2n} = \frac{U_{2ny}}{\sqrt{3}} = U_{2n\Delta} = 127V$$

- des intensités des courants secondaires en ligne, qui se déduisent des valeurs précédentes par :

$$I_{2ny} = \frac{S_{2n}}{\sqrt{3}U_{2ny}} \quad (\text{II.38})$$

$$I_{2n\Delta} = \frac{S_{2n}}{\sqrt{3}U_{2n\Delta}} \quad (\text{II.39})$$

Les enroulements secondaires sont donc prévus pour être traversés par des courants d'intensité efficace :

$$J_{2n} = I_{2ny} = \frac{I_{2n\Delta}}{\sqrt{3}} \quad (\text{II.40})$$

- du facteur de puissance secondaire, valeur du facteur de puissance de la charge qui permet d'obtenir le fonctionnement nominal (tensions primaires et secondaires normales, puissance apparente utile normale).

## II. 7. 2 Rapport de transformation

On nommera ainsi le rapport des valeurs des tensions secondaire et primaire de même définition (toutes deux simples ou toutes deux composées) à vide :

$$M = \frac{V_{ao}}{V_{Ao}} = \frac{U_{abo}}{U_{ABo}} \quad (\text{II.41})$$

**REMARQUE :** la valeur de M ne sera plus nécessairement égale à celle du rapport des nombres de spires secondaire et primaire noté m.

## II. 7. 3 Groupes de couplage

Comme tout système triphasé, les enroulements primaires et secondaires peuvent être couplés en *étoile* ou en *triangle*. Il existe une troisième variante consistant à mettre en série, afin de constituer une phase, deux demi-enroulements placés sur des noyaux différents et à coupler les trois phases ainsi obtenues en étoile. Ce mode de couplage est dit en *zig-zag*.

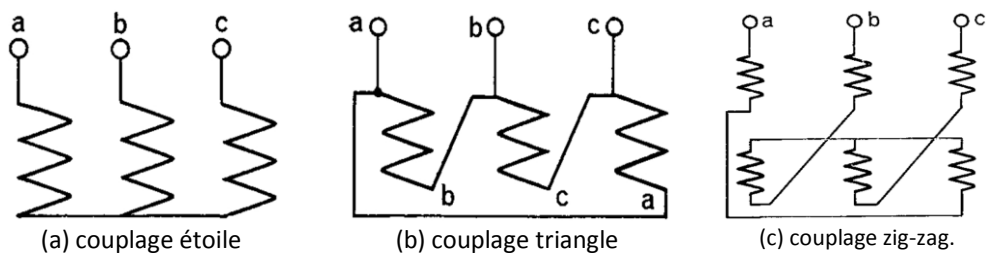


Figure II.16 Différents couplages d'un primaire ou d'un secondaire.

Afin de caractériser d'une manière conventionnelle les couplages des transformateurs triphasés, le primaire est désigné par une lettre MAJUSCULE et le secondaire par une lettre MINUSCULE. Les lettres employées sont les suivantes :

- Y : couplage étoile primaire ;
- y : couplage étoile secondaire ;
- D : couplage triangle primaire ;
- d : couplage triangle secondaire ;
- Z : couplage zig-zag primaire ;
- z : couplage zig-zag secondaire.

Les différents couplages possibles peuvent induire un déphasage  $\alpha$  entre tensions homologues primaire et secondaire. Ce déphasage est toujours un multiple de  $30^\circ$ . On définit l'*indice horaire* par un nombre entier compris entre 0 et 11 caractérisant le

déphasage  $\alpha$  des tensions primaire et secondaire homologues. L'indice horaire est défini comme :  $n = \alpha/30^\circ$ . Par analogie avec les divisions d'un cadran de montre (montre à aiguille), on parle de *groupe horaire* du transformateur.

La détermination du groupe horaire s'effectue comme suit : A, B, C désignent les bornes des enroulements primaires reliées aux phases R, S, T du réseau primaire, a, b, c celles du secondaire reliées aux phases r, s, t du réseau secondaire. Les bornes homologues étant repérées par un point, on dispose au centre d'un cadran de montre les vecteurs correspondant aux tensions primaire et secondaire de façon à placer la borne A à 12 heures (chiffre zéro). Le groupe horaire est fourni par l'heure de la borne a.

### II. 7. 3. 1 Etablissement des diagrammes de vecteurs de Fresnel associés aux tensions

Généralement, on utilise des points afin de représenter les entrées des enroulements. On connaît grâce à ces points le sens de l'enroulement dans une colonne. On peut alors établir une règle au niveau des déphasages entre le primaire et le secondaire sur une colonne.



Figure II.17 Tensions homologues en phase.

Dans le cas de la figure II. 17, on admettra que  $V_{an}$  sera en phase avec  $U_{AB}$ . On admet ainsi que si les deux pointes des flèches représentant les tensions sont sur les points, alors on considère que les tensions sont en phases l'une par rapport à l'autre (à condition bien sûr que les deux enroulements soient sur la même colonne).

Dans le cas de la figure II. 18, on admettra que  $V_{an}$  est en opposition de phase avec  $U_{AB}$ .



Figure II.18 Tensions homologues en opposition de phase.

Exemple : Déterminons l'indice horaire du transformateur de la figure II .17

1. On trace les tensions des enroulements du primaire (ici ce sont des tensions composées).

2. On trace les tensions dans les enroulements du secondaire (phase ou opposition de phase selon les sens des flèches et l'emplacement des étoiles ou des points) en respectant les règles (ici dans notre cas  $V_{an}$  en phase avec  $U_{AB}$ , etc.).
3. On mesure le déphasage entre la tension simple du primaire et la tension simple du secondaire et ceci quelque soit le couple du primaire et du secondaire). Dans le cas présent, le déphasage est de  $330^\circ$ .
4. On donne alors l'indice horaire qui est  $330/30 = 11$ , ou bien on considère que la tension primaire est la grande aiguille d'une montre placée sur midi et on regarde quelle heure indique la petite aiguille qui est la tension secondaire homologue.

Il est aisé de modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes : toute permutation correspond à une augmentation ou à une diminution de 4 de la valeur de l'indice horaire.

**REMARQUE** : les couplages les plus fréquemment rencontrés sont les suivants :  $Yy0$ ,  $Yd1$ ,  $Yz11$ ,  $Dy11$ ,  $Dd0$ ,  $Zy1$ .

## II. 8 Mise sous tension des transformateurs

La mise sous tension d'un transformateur (enclenchement) s'accompagne d'un phénomène transitoire généralement de courte durée mais dont les effets peuvent être extrêmement gênants voire dangereux. Par exemple :

- efforts électrodynamiques importants entre spires ou bobines ;
- échauffements prohibitifs ;
- contraintes diélectriques dangereuses pour l'isolation ;
- creux de tension au primaire si le réseau n'est pas « infiniment puissant ».

### II. 8. 1 Courant d'enclenchement à vide

La mise sous tension d'un transformateur dont le secondaire est ouvert peut s'accompagner d'un appel de courant très important  $i_{encl}$ . À l'enclenchement, la valeur instantanée de la tension appliquée au primaire vaut :

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) = R_1 i_{encl} + n_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (II.42)$$

où  $\phi_1$  représente le flux propre du primaire créé par  $i_{encl}$ .

La relation entre  $\phi_1$  et  $i_{encl}$  n'est pas linéaire à vide, il se produit un effet de saturation très marqué. Néanmoins, pour cette étude, on supposera que le flux peut être exprimé à partir d'une inductance propre  $L_1$  constante, avec :

$$L_1 = \frac{n_1 \phi_1}{i_{encl}} \quad (\text{II.43})$$

Il vient :

$$\sqrt{2} \cdot V_1 \cdot \sin(\omega t + \alpha) = R_1 \frac{n_1 \phi_1}{L_1} + n_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (\text{II.44})$$

Ou encore :

$$\frac{R_1}{L_1} \phi_1 + \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_1}{n_1} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (\text{II.45})$$

Le flux  $\phi_1$  solution de l'équation se décompose en deux termes :

$$\phi_1 = \phi_{\text{permanent}} + \phi_{\text{transitoire}} \quad (\text{II.46})$$

En supposant  $R_1$  négligeable devant  $L_1 \omega$  Est fournie par :

$$\phi_{\text{permanent}} = \hat{\phi}_1 \cdot \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) = -\hat{\phi}_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) \quad (\text{II.47})$$

Où  $\hat{\phi}_1$  représente l'amplitude maximale du flux total permanent à vide.

La composante transitoire est de la forme :

$$\phi_{\text{transitoire}} = C \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \quad (\text{II.48})$$

Où la constante d'intégration  $C$  se détermine à partir des conditions initiales.

Si le circuit magnétique est le siège d'un flux rémanent  $\phi_{\text{rémanent}}$ , on a, à  $t = 0$  :

$$\phi_1 = \phi_{\text{permanent}} + \phi_{\text{transitoire}} = \pm \hat{\phi}_1 \cos(\alpha) + C \quad (\text{II.49})$$

$$\rightarrow C = \hat{\phi}_1 \cos(\alpha) \pm \phi_{\text{rémanent}}$$

La composante transitoire s'écrit ainsi :

$$\phi_{\text{transitoire}} = \hat{\phi}_1 \cos(\alpha) \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \pm \phi_{\text{rémanent}} \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \quad (\text{II.50})$$

Le flux s'écrit donc :

$$\phi_1 = -\hat{\phi}_1 \cdot \cos(\omega t + \alpha) + \hat{\phi}_1 \cos(\alpha) \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \pm \phi_{\text{rémanent}} \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \quad (\text{II.51})$$

soit :

$$\phi_1 = -\hat{\phi}_1 \left[ \cos(\omega t + \alpha) + \cos(\alpha) \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \right] \pm \phi_{\text{rémanent}} \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \quad (\text{II.52})$$

L'instant le plus favorable pour l'enclenchement correspond à  $\alpha=\pi/2$ , c'est-à-dire au passage de la tension par son maximum.

Si  $\phi_{\text{rémanent}} = 0$ , le flux normal s'établit immédiatement à son régime permanent, soit :

$$\phi_{\text{permanent}} = -\hat{\phi}_1 \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \hat{\phi}_1 \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II.53})$$

L'instant le plus défavorable correspond à  $\alpha=0$ , c'est-à-dire au passage par zéro de la tension :

$$\phi_1 = -\hat{\phi}_1 \cdot \cos(\omega t) + \hat{\phi}_1 \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} \cdot t} \pm \phi_{\text{rémanent}} \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1} \cdot t} \quad (\text{II.54})$$

Avec habituellement :  $\phi_{\text{rémanent}} \approx (0.2 \text{ à } 0.3)\hat{\phi}_1$

Normalement :  $R_1 \ll L_1 \omega$ .

D'où  $e^{-\frac{R_1}{L_1} \cdot t} \approx 1$  pour  $\omega t = \pi$

La valeur du courant magnétisant nécessaire à la création d'un tel flux est fournie par la caractéristique d'aimantation des tôles du circuit magnétique.

Dans la réalité, compte tenu des valeurs maximales d'induction choisies par les constructeurs (de 1,5 à 1,7 T), la caractéristique d'aimantation est saturée et le courant d'enclenchement à vide croît beaucoup plus que proportionnellement au flux.

Des relevés oscillographiques ont montrés des rapports  $i_{\text{enclenchement}}/I_{10}$  allant de 80 à 120 ( $I_{10}$  est le courant magnétisant en régime permanent, à ne pas confondre avec le courant nominal !). La composante apériodique du courant d'enclenchement s'amortit et disparaît pratiquement après un temps de l'ordre de 2 secondes pour de petits transformateurs et de 20 secondes pour des transformateurs de grande puissance. Le courant d'enclenchement ne présente normalement pas de danger pour le transformateur mais il risque de provoquer des déclenchements intempestifs si les relais de protection ne sont pas temporisés convenablement voire neutralisés pendant la mise sous tension.

## II. 8. 2 Procédés employés afin de diminuer les surintensités à l'enclenchement

On pourrait penser à employer les moyens utilisés pour le démarrage des moteurs asynchrones. Cependant, ces solutions ne sont pas satisfaisantes. Le démarrage par insertion de résistances est à éviter à cause des pertes, prohibitives dans le cas des gros



transformateurs. Le démarrage étoile-triangle nécessiterait deux couplages des primaires, ce qui, sans compter les problèmes de déphasage, n'est pas viable économiquement.

Une solution élégante consiste à créer une force contre électromotrice aux bornes du primaire du transformateur avant de l'enclencher. Ceci peut s'effectuer par la connexion aux bornes secondaires (en respectant les polarités, les points) d'un petit transformateur comme le montre la figure II. 19.

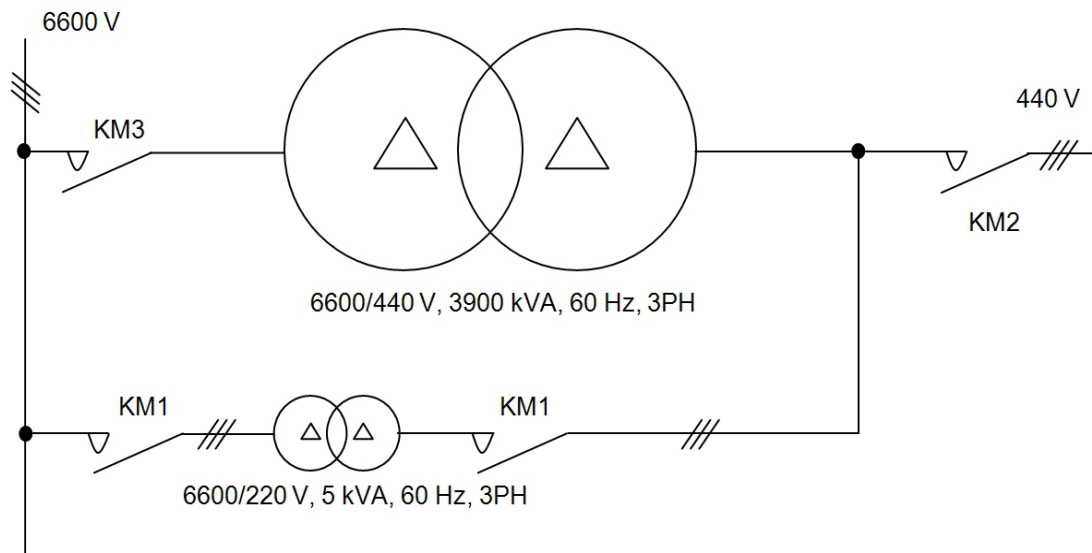


Figure II.19 Procédé de « démarrage » d'un gros transformateur.

## II. 9 Exercices sur le transformateur

### Exercice N° 1 Calcul du nombre de spires nécessaire pour réaliser un transformateur

On veut réaliser un transformateur monophasé 5000 V / 200 V, 50 Hz. La section du circuit magnétique sera de  $1\text{dm}^2$ . L'induction maximale dans le circuit magnétique ne doit pas dépasser 1,5 T.

1. Calculer les nombres de spires du primaire et du secondaire.
2. Recalculer les nombres de spires si la fréquence d'utilisation est de 60 Hz au lieu de 50 Hz.

#### Solution

$$n_1 = \frac{V \times \sqrt{2}}{2\pi f \hat{B} S}$$

On en tire les valeurs suivantes :  $n_1 = 1500$  spires,  $n_2 = 60$  spires en 50 Hz;  
en 60 Hz,  $n_1 = 1250$  spires et  $n_2 = 50$ .

**Exercice N° 2 Essai à vide**

Un transformateur monophasé a été soumis à un essai à vide, on a mesuré les valeurs suivantes :

$$V_1 = 220\text{V}, V_2 = 110\text{V}, I_1 = 0,3\text{A}, I_2 = 0\text{A}, P_1 = 10\text{W}, f = 50\text{Hz}.$$

L'enroulement primaire présente une résistance  $R_1 = 8\Omega$  et le secondaire, une résistance  $R_2 = 2\Omega$ .

On néglige les fuites magnétiques.

1. Calculer le facteur de puissance à vide, le courant magnétisant  $I_{10}$ , le courant  $I_F$ , la résistance  $R_F$  et l'inductance  $L_1$ .

Le courant appelé par le secondaire étant  $I_2 = 2\text{A}$ , en phase avec la tension, calculer :

2. la tension obtenue, le primaire restant alimenté sous 220 V.

3. le rendement du transformateur.

**Réponse**

$$1) \cos\varphi = P_1/V_1 \cdot I_1 = 0.15 ; I_{10} = I_1 \sin\phi_{1V} = 296\text{mA} ; I_{1F} = I_1 \cdot \cos\phi_{1V} = 45\text{mA}, R_F = V_1^2 / P_1 = 4.84\text{k}\Omega$$

$$L_1 = V_1 / \omega I_{10} = 2.36\text{H}.$$

$$2) V_2 = 102\text{V}$$

$$3) \eta = 0.887.$$

**Exercice N° 3 Fonctionnement d'un transformateur**

On considère un transformateur monophasé dont le rapport de transformation est  $m = 23$ . L'impédance totale du transformateur ramenée au secondaire a un module de  $1,33\Omega$  et un argument de  $70^\circ 30'$ . Pour le fonctionnement considéré, les pertes fer sont de l'ordre de 70W. Le secondaire débite 3 kVA sous une tension de 200 V avec un facteur de puissance égal à 0,8 (récepteur inductif).

1. Calculer la tension au primaire.

2. Calculer le rendement du transformateur.

**Exercice N° 4 Étude d'un transformateur triphasé**

Un transformateur Dy avec neutre au secondaire, possède un rapport de nombres de spires égal à 0,044. La tension primaire est de 5000 volt.

1. Calculer les tensions disponibles au secondaire.

2. Calculer l'intensité du courant primaire dans un fil de ligne et dans un enroulement si le secondaire débite 100 A.

**Exercice N° 5 Transformateur triphasé : modification du couplage du secondaire**

Un transformateur triphasé dont le primaire est en étoile, est alimenté sous une tension de 20000V. Les nombres de spires par noyau sont  $n_1 = 4000$  au primaire et  $n_2 = 76$  au secondaire. La puissance apparente du transformateur est  $S = 140\text{kVA}$ .

1. Calculer les tensions et les courants au secondaire (entre phases et éventuellement entre neutre et phase) pour les couplages suivants :

a) étoile avec neutre ; b) triangle ; c) zig-zag avec neutre.

## Bibliographie

- [Abd97] R. ABDESSEMED et M. KADJOU DJ, « Modélisation des machines électriques », Edition : Presses de l'Université de Batna (Algérie), 1997.
- [Ben95] A. BENOUDJIT, « Introduction aux machines électriques : machine à courant continu », Edition : Presses de l'Université de Batna (Algérie), 1995.
- [Kos69] M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI, « Machines électriques, Tome 1 : Machines à C.C et trabsformateurs », Edition : Mir Moscou (Russie) , 1969.
- [Sai76] B. SAINT-JEAN, « Electrotechnique er machines électriques », Edition : Eyrolles, Paris (France), 1976.
- [Seg94] G. SEGUIER, F. NOTELET, « Electrotechnique industrielle, 2<sup>e</sup> édition », Edition : Technique et Documentation, Paris (France), 1994.