

DIRECTION GÉNÉRALE DES ETUDES TECHNOLOGIQUES  
INSTITUT SUPÉRIEUR DES ETUDES TECHNOLOGIQUES DE NABEUL

# COURS D'ÉLECTROTECHNIQUE

Licence génie électrique niveau 2

Amari Mansour  
Technologue en Génie Électrique

Janvier 2014



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Les circuits magnétiques</b>	<b>1</b>
1.1	Généralités . . . . .	1
1.1.1	Définition du circuit magnétique . . . . .	1
1.1.2	Champs magnétique et induction magnétique . . . . .	1
1.1.3	Force magnétomotrice F.m.m . . . . .	2
1.2	Théorème d'Ampère . . . . .	2
1.2.1	Énoncé de théoreme . . . . .	2
1.3	Réductance d'une portion de circuit magnétique . . . . .	2
1.3.1	Relation d'Hopkinson . . . . .	2
1.3.2	Analogie entre circuits électriques et magnétiques . . . . .	3
1.4	Force de Laplace . . . . .	3
1.5	Loi de Faraday . . . . .	4
<b>2</b>	<b>La Bobine à noyau de fer</b>	<b>5</b>
2.1	Constitution . . . . .	5
2.2	Etude de fonctionnement . . . . .	5
2.2.1	Equations électriques . . . . .	6
2.2.2	Pertes dans le circuit magnétique . . . . .	7
2.2.3	Relation de boucherôt . . . . .	7
2.3	Schéma équivalent et diagramme vectoriel . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Transformateur monophasé</b>	<b>9</b>
3.1	Généralités . . . . .	9
3.1.1	Rôle . . . . .	9
3.1.2	Symbole . . . . .	9
3.1.3	Constitution . . . . .	10
3.1.4	Principe de fonctionnement . . . . .	10

3.2	Etude d'un transformateur parfait . . . . .	10
3.2.1	Hypothèses . . . . .	10
3.2.2	Equations de fonctionnement . . . . .	11
3.2.3	Schéma équivalent et diagramme vectoriel . . . . .	11
3.3	Propriétés du transformateur parfait . . . . .	12
3.3.1	Comportement énergétique . . . . .	12
3.4	Transformateur industriel . . . . .	13
3.4.1	Équations de fonctionnement . . . . .	14
3.4.2	Equations des tensions . . . . .	14
3.4.3	Equations aux ampères tours . . . . .	14
3.4.4	Schéma équivalent . . . . .	15
3.5	Transformateur monophasé dans l'approximation de Kapp . . . . .	15
3.5.1	Hypothèse . . . . .	15
3.5.2	Schéma équivalent . . . . .	15
3.5.3	Détermination des éléments du schéma équivalent . . . . .	16
3.5.4	Chute de tension . . . . .	17
3.5.5	Caractéristique en charge . . . . .	19
3.5.6	Rendement du transformateur . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Le Transformateur Triphasé</b>	<b>21</b>
4.1	Interêt . . . . .	21
4.2	Constitution d'un transformateur triphasé . . . . .	22
4.2.1	Mode de couplage . . . . .	23
4.2.2	Choix de couplage . . . . .	24
4.3	Fonctionnement en régime équilibré . . . . .	25
4.3.1	Indice horaire . . . . .	25
4.3.2	Détermination pratique de l'indice horaire . . . . .	26
4.3.3	Rapport de transformation . . . . .	27
4.3.4	Schéma monophasé équivalent . . . . .	28
4.4	Marche en parallèle des transformateurs triphasés . . . . .	30
4.4.1	But . . . . .	30
4.4.2	Équations électriques . . . . .	31
4.4.3	Mise en parallèle des transformateurs triphasés . . . . .	32

<b>5</b>	<b>Les Machine á courant continu</b>	<b>33</b>
5.1	Généralités . . . . .	33
5.2	Principe . . . . .	33
5.2.1	Production d'une force électromotrice . . . . .	34
5.2.2	Redressement mécanique . . . . .	34
5.3	Constitution d'une machine à courant continu . . . . .	35
5.3.1	L'inducteur . . . . .	36
5.3.2	L'induit . . . . .	36
5.3.3	Le collecteur et les balais . . . . .	36
5.4	Equations générales d'une machine à courant continu . . . . .	37
5.4.1	Voies d'enroulement . . . . .	37
5.4.2	Force électromotrice moyenne dans un brin actif . . . . .	38
5.4.3	Force électromotrice aux bornes de l'induit . . . . .	38
5.5	Expression du couple électromagnétique . . . . .	39
5.6	Etude de l'induit en charge . . . . .	40
5.6.1	Réaction magnétique de l'induit . . . . .	40
5.6.2	Répartition de flux magnétique en charge . . . . .	40
5.6.3	Compensation de la réaction magnétique de l'induit . . . . .	41
5.7	Problème de commutation . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Les génératrice à courant continu</b>	<b>45</b>
6.1	Introduction . . . . .	45
6.2	Caractéristiques usuelles . . . . .	45
6.3	Génératrice à excitation séparée . . . . .	46
6.3.1	Schéma et equations de fonctionnement . . . . .	46
6.3.2	Caractéristique à vide . . . . .	46
6.3.3	Caractéristique en charge . . . . .	48
6.3.4	Caractéristique de réglage . . . . .	48
6.4	Génératrice à excitation shunt . . . . .	49
6.4.1	Problème d'amorçage . . . . .	49
6.4.2	Fonctionnement à vide . . . . .	50
6.4.3	Caractéristique en charge . . . . .	50
6.5	Bilan de puissance d'une génératrice à courant continu . . . . .	51

<b>7</b>	<b>Les moteurs à courant continu</b>	<b>53</b>
7.1	La loi de Laplace . . . . .	53
7.2	Principe de fonctionnement . . . . .	53
7.3	Hypothèse . . . . .	53
7.4	Moteur à excitation indépendante alimenté sous une tension variable . . . . .	54
7.4.1	Démarrage . . . . .	54
7.4.2	Fonctionnement à vide . . . . .	54
7.4.3	Fonctionnement en charge . . . . .	55
7.5	Moteur à excitation shunt alimenté sous une tension constante . . . . .	57
7.5.1	Démarrage . . . . .	57
7.5.2	Caractéristique de la vitesse . . . . .	57
7.5.3	Caractéristique du couple . . . . .	58
7.6	Moteur à excitation série alimenté sous une tension constante . . . . .	59
7.6.1	Constitution . . . . .	59
7.6.2	Caractéristiques électromécaniques . . . . .	59
7.6.3	Caractéristique mécanique . . . . .	61
7.7	Moteur à excitation composée . . . . .	61
7.7.1	Caractéristique de couple . . . . .	62
7.7.2	Caractéristique de la vitesse . . . . .	62
7.7.3	Caractéristique mécanique . . . . .	63
7.8	Comparaison entre moteur série et shunt . . . . .	63
7.9	Bilan de puissance d'un moteur à courant continu . . . . .	64
<b>8</b>	<b>Les Machines synchrones</b>	<b>65</b>
8.1	Introduction . . . . .	65
8.2	Symbole . . . . .	65
8.3	Constitution . . . . .	65
8.4	Alternateur . . . . .	66
8.4.1	Création de forces électromotrices triphasées . . . . .	66
8.4.2	Caractéristique à vide . . . . .	66
8.4.3	Fonctionnement en charge . . . . .	67
8.4.4	Détermination des éléments du schéma équivalent . . . . .	69
8.4.5	Caractéristiques d'un alternateur . . . . .	69
8.4.6	Rendement de l'alternateur . . . . .	70
8.5	Alternateur couplé sur le réseau . . . . .	70

8.6	Moteur synchrone . . . . .	71
8.6.1	Généralités . . . . .	71
<b>9</b>	<b>Les machines asynchrones triphasés</b>	<b>73</b>
9.1	Généralités . . . . .	73
9.1.1	Constitution . . . . .	73
9.1.2	Principe de fonctionnement . . . . .	74
9.1.3	Symbole . . . . .	75
9.2	schéma equivalent monophasé . . . . .	75
9.2.1	Principe . . . . .	75
9.2.2	schéma equivalent ramené au stator . . . . .	75
9.3	Bilan de puissance . . . . .	76
9.4	Caracteristiques mecaniques . . . . .	77
9.4.1	Couples et puissances . . . . .	77
9.4.2	Expression du couple en fonction du glissement . . . . .	78
9.4.3	Tracé des caractéristiques mécaniques . . . . .	78
9.5	Diagramme de cercle . . . . .	78
9.5.1	Hypothèse de KAPP et schéma equivalent . . . . .	79
9.5.2	Traçage du diagramme de cercle . . . . .	79
9.5.3	Traçage de diagramme de cercle . . . . .	81
	<b>Bibliographie</b>	<b>83</b>



# Preface

Ce fascicule est un support de cours d'électrotechnique pour les étudiants des ISET :

- Profil : Génie électrique
- Niveau : 2<sup>eme</sup> Licence.

Il est destiné à accompagner un travail personnel de l'étudiant avec l'aide requise et efficace de l'enseignant.

Le premier chapitre de ce fascicule de cours constitue une étude préliminaire sur les circuits magnétiques

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la bobine à noyau de fer.

Le troisième chapitre traite le transformateur monophasé tel que, constitution, modélisation et chute de tension.

Le quatrième chapitre est consacré au transformateur triphasé et la marche en parallèle des transformateurs.

Le cinquième chapitre constitue une étude préliminaire de la machine à courant continu, principe de fonctionnement, constitution, expression de la f.e.m.

Le sixième chapitre est consacré aux génératrices à courant continu

Le septième chapitre traite les moteurs à courant continu.

Les machines synchrones et asynchrones sont traitées respectivement dans les chapitres huit et neuf.



# Chapitre 1

## Les circuits magnétiques

### 1.1 Généralités

#### 1.1.1 Définition du circuit magnétique

Un circuit magnétique est le volume où se referment toutes les lignes de force d'un champ magnétique. Dans tous les domaines où on aura à utiliser des phénomènes magnétiques (par exemple : machines, appareils de mesure), on sera amené à canaliser les lignes de force dans un circuit bon conducteur du flux magnétique. Ce circuit sera constitué par des matériaux dits ferromagnétiques et en particulier par du fer.

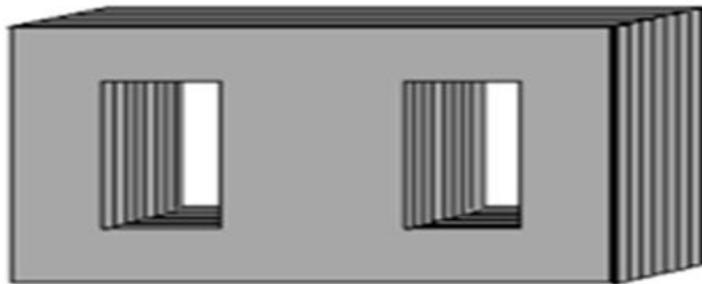


FIGURE 1.1 – circuit magnétique d'un transformateur

On obtient un champ magnétique grâce à des aimants permanents ou bien des circuits électriques parcourus par des courants

#### 1.1.2 Champs magnétique et induction magnétique

Lorsqu'un champ magnétique  $H$  circule dans un matériau ferromagnétique, il se crée, dans le matériau, une induction magnétique  $B$ , dont la variation suit la relation :  $B = \mu * H$  avec

$B$  : induction magnétique en Tesla ,  $H$  : Champ magnétique en (A/m) et  $\mu$  : la perméabilité magnétique du matériau. On définit la perméabilité relative comme suit :  $\mu_r = \mu/\mu_0$  ; avec  $\mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$  : perméabilité de vide

Le tableau suivant donne les perméabilités de quelques matériaux

Matériau	Fer	Acier	Acier au cobalt
Pérméabilité	10000	40000 á 50000	3500

### 1.1.3 Force magnétomotrice F.m.m

La force magnétomotrice est la cause qui engendre le flux magnétique .elle est égale á  $N * I$  , avec  $N$  est le nombre de spires et  $I$  est le courant traversant les spires

## 1.2 Théorème d'Ampère

### 1.2.1 Énoncé de théoreme

La circulation de l'excitation magnétique le long d'une courbe fermée est égale á la somme algébrique des forces magnetomotrices qui traversent toute surface s'appuyant sur le contour.

La somme algébrique des courants est appelé force magnétomotrice  $\int Hdl = N * I$

Détermination de la force magnétomotrice Il faut procéder en deux temps : Orientation du contour : il faut choisir un sens de parcours afin de déterminer la normale á toute surface s'appuyant sur le contour. Somme algébrique : pour la faire, il faut déterminer les courants qui doivent être comptés positifs et ceux qui doivent être comptés négatifs. Les courants dans le sens de la normale seront comptés positifs, les autres négatifs.

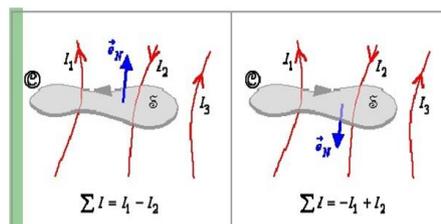


FIGURE 1.2 – Exemples

## 1.3 Réductance d'une portion de circuit magnétique

### 1.3.1 Relation d'Ampère

Pour une portion de circuit de longueur  $l$  et de section droite  $S$ , représenté ci-contre le

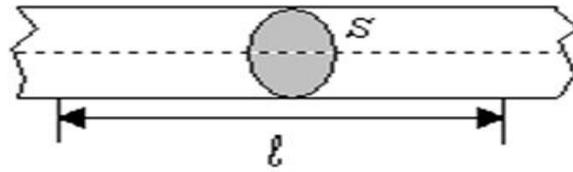


FIGURE 1.3 – portion du circuit

théorème d'Ámpère permet d'écrire  $H * l = F.m.m$  or  $H = B/\mu$  et  $B = \Phi/S\mu$  soit  $H = \Phi/(S*\mu)$  on obtient  $F.m.m = l * \Phi/(S * \mu)$ . Le terme  $l/(S * \mu)$  est appelée reluctance on la note  $\mathfrak{R}$  et elle est exprimée en  $H^{-1}$  d'ou la relation d'Hopkinson  $\mathfrak{R}\Phi = F.m.m$

### 1.3.2 Analogie entre circuits électriques et magnétiques

Circuits Electriques	Circuits magnetiques
Champ électrique E	Champ magnétique H
Tension V	Force magnetomotrice NI
courant I	Flux $\phi$
résistance R	reluctance

## 1.4 Force de Laplace

Un conducteur parcouru par un courant I et plongé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  est soumise á une force  $\vec{F}$  appelée force de Laplace  
sa valeur est le suivant :  $F = B I \sin(\alpha)$

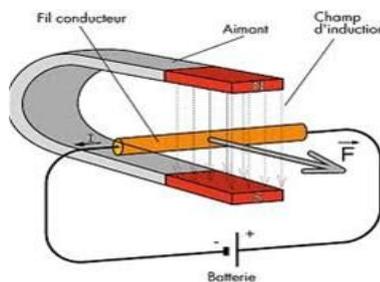


FIGURE 1.4 – Force de Laplace

Le sens de la force F de Laplace est donné par une convention dites règle des trois doigts comme le montre la figure suivante :

sa valeur est le suivant :  $F = B I \sin(\alpha)$

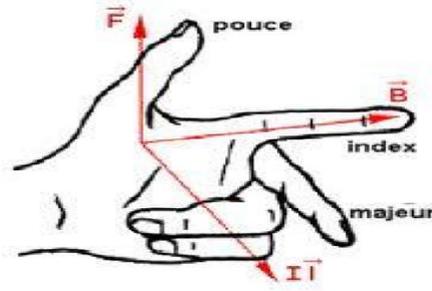


FIGURE 1.5 – sens de la force de Laplace

Ou :

$I$  est l'intensité en Ampère (A) qui traverse la portion de conducteur,

$l$  est la longueur en mètres (m) de la portion de conducteur,

$B$  est la valeur en Tesla (T) du champ magnétique,

$\alpha$  est l'angle entre le courant et le champs magnétique

## 1.5 Loi de Faraday

La loi de Faraday énonce que le force électromotrice induite dans un circuit fermé baigné par un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique pénétrant dans le circuit.  $e(t) = -N * d\Phi/dt$  avec  $N$  désigne le nombre de spires et  $\Phi(t)$  le flux qui traverse les  $N$  spires. Le signe négatif détermine le sens du courant induit dans le circuit. Il est régi par la loi de Lenz qui énonce que le sens du courant induit est tel qu'il s'oppose par ses effets magnétiques à la cause qui a produit le courant.

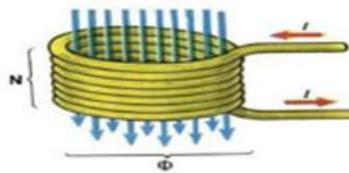


FIGURE 1.6 – Loi de Faraday

# Chapitre 2

## La Bobine à noyau de fer

### 2.1 Constitution

La bobine à noyau de fer est constitué essentiellement :

- D'un circuit magnétique formé d'un empilement de tôles magnétiques minces isolées entre elles par une couche de vernis .
- D'une bobine de  $N$  spires

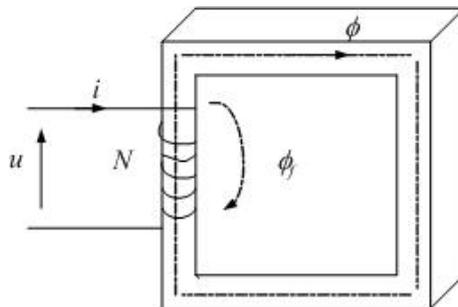


FIGURE 2.1 – Constitution d'une bobine

### 2.2 Etude de fonctionnement

Si on alimente la bobine à noyau de fer par une tension  $u(t) = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$ , on aura une force magnétomotrice suivante  $N\bar{I}$  qui engendre un flux  $\phi_1 = \phi + \phi_f$  avec  $\phi$  : flux circulant

dans le circuit magnétique et  $\phi_f$  : Flux de fuite.

Dans ces conditions l'inductance de fuite ( $l$ ) est donnée par l'équation suivante :

$$l = N\phi_1/i \quad (2.1)$$

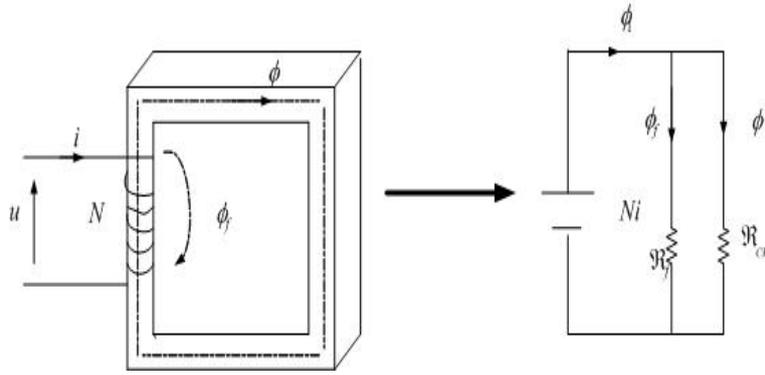


FIGURE 2.2 – Circuit magnétique équivalent

Le circuit magnétique équivalent est le suivant :

Or d'après la loi d'Hopkison appliquée au schéma magnétique équivalent, on aura :

$$Ni = \mathfrak{R}_f \phi_f = N^2 / \mathfrak{R}_f \quad (2.2)$$

avec  $\mathfrak{R}_f$  :Réluctance de fuite et  $\mathfrak{R}_{cm}$  :Réluctance de circuit magnétique

### 2.2.1 Equations électriques

La loi des mailles appliquée au schéma électrique équivalent ci dessous donne :

$$u + e_1 = ri \text{ avec } e_1 = -Nd\phi_1/dt = -Nd\phi/dt - Nd\phi_f/dt$$

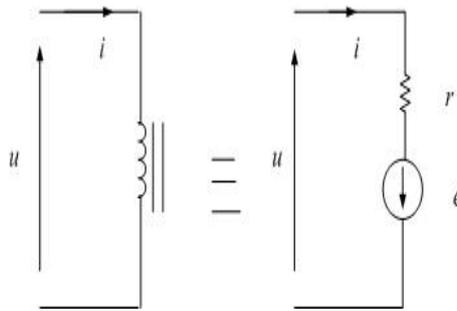


FIGURE 2.3 – Circuit électrique équivalent

Si on regroupe les equations(2-1) et (2-2), on aura

$$u(t) = ri(t) + ldi(t)/dt + Nd\phi(t)/dt \quad (2.3)$$

en écriture complexe

$$\bar{U} = r\bar{I} + jlw\bar{I} + jNw\bar{\phi} \quad (2.4)$$

### 2.2.2 Pertes dans le circuit magnétique

La présence d'un circuit magnétique va entraîner des pertes supplémentaires. On note par  $P_f$  les pertes dans le fer d'un circuit magnétique. Ces pertes vont se traduire par un échauffement du circuit magnétique. Les pertes fer s'écrivent :  $P_f = P_H + P_{cF}$  avec  $P_H$  : pertes par Hystérisis et  $P_{cF}$  : pertes par courant de Foucault .

### 2.2.3 Relation de boucherôt

on a  $u(t) = Nd\phi(t)/dt = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$

L'expression de flux est :

$$\phi(t) = (U\sqrt{2}/N\omega)\sin(\omega t + \varphi - \pi/2) \quad (2.5)$$

Le flux magnétique obtenu est sinusoïdal , il a comme amplitude  $\phi_{max} = U\sqrt{2}/N\omega$  et en retard par rapport à la tension d'un angle de  $\pi/2$  .La valeur efficace de la tension est exprimée comme suit :

$$U = 4.44Nf\phi_{max} = 4.44NfB_{max}S \quad (2.6)$$

avec S est la section de circuit magnétique et  $B_{max}$  est l'induction maximale en Tesla

L'équation(2-5) est appelé formule de boucherôt, elle permet de calculer le nombre de spires

## 2.3 Schéma équivalent et diagramme vectoriel

Le schéma équivalent d'une bobine à noyau de fer est la suivante. traduit le fonctionnement électrique et énergétique de la bobine à noyau de fer .

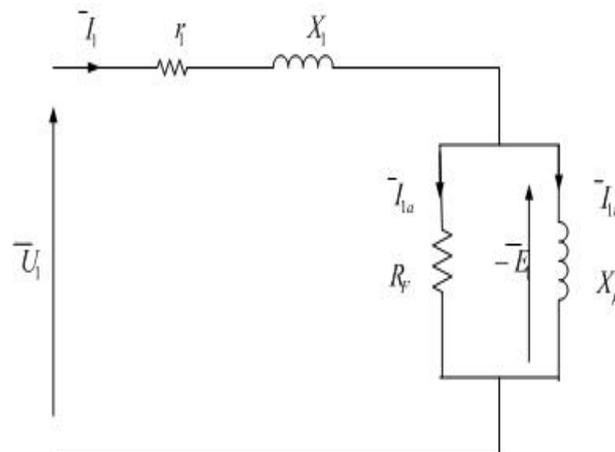


FIGURE 2.4 – Schéma équivalent

ou :  $r_1$  : Résistance de la bobine,  $X_1 = l_1 w$  : Réactance de la bobine,  $X_\mu$  : Réluctance de circuit magnétique et  $R_\mu$  : Résistance fictive traduisant les pertes fer.

$$R_\mu = U_1^2 / P_F \quad (2.7)$$

$$X_\mu = U_1^2 / Q_F \quad (2.8)$$

$P_F$  et  $Q_F$  désignent respectivement la puissance active et réactive absorbée par la bobine

En appliquant la loi des mailles au schéma équivalent. On retrouve l'équation (2-4) Le diagramme vectoriel suivant est une traduction de la relation (2-4) avec  $\bar{E} = -jNw\bar{\phi}$

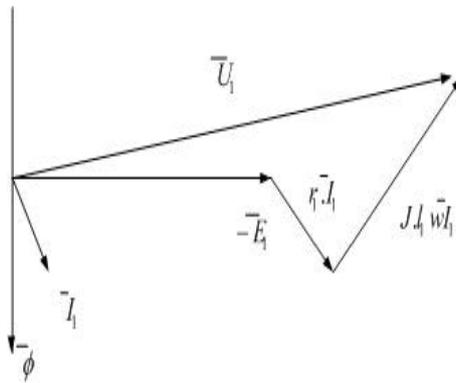


FIGURE 2.5 – Diagramme vectoriel

# Chapitre 3

## Transformateur monophasé

### 3.1 Généralités

#### 3.1.1 Rôle

Le transformateur monophasé est un convertisseur "alternatif-alternatif". Il a pour rôle de modifier les amplitudes des grandeurs alternatives (tensions, courants) en maintenant la fréquence et la forme d'ondes inchangées, en vue d'adopter le récepteur (charge) au réseau électrique. Les transformateurs sont des machines statiques et possèdent un excellent rendement. Leur utilisation est primordiale pour le transport d'énergie électrique. Ils assurent l'élevation de la tension entre les alternateurs (source) et le réseau de transport, puis ils abaissent la tension du réseau pour l'exploiter par les utilisateurs.

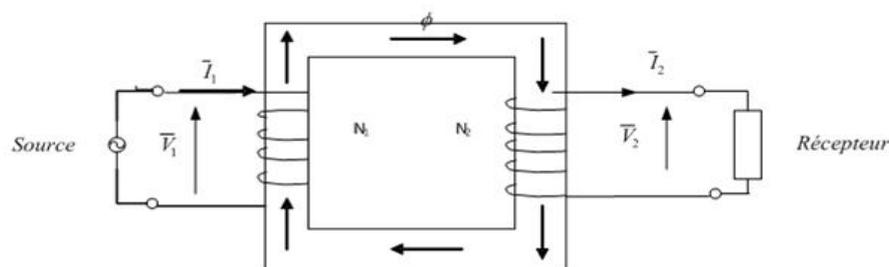


FIGURE 3.1 – Rôle du transformateur

#### 3.1.2 Symbole

Le transformateur monophasé peut être représenté par l'un de deux symboles suivants :

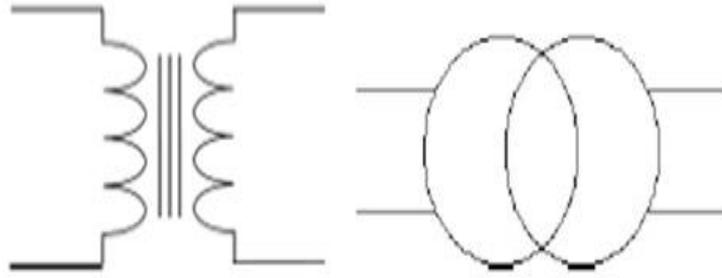


FIGURE 3.2 – Symbole du transformateur

### 3.1.3 Constitution

Le transformateur monophasé est constitué par :

◊ Un circuit magnétique fermé , de grande perméabilité et feuilleté(constitué par des tôles de

0.2 à 0.3mm d'épaisseur).

◊ Un enroulement primaire possédant  $N_1$  spires, relié à la source alternative et se comporte comme un récepteur

◊ Un ou plusieurs enroulements secondaires possédant  $N_2$  spires, il alimente une charge , on lui adopte la convention générateur

Les enroulements primaires et secondaires sont isolés électriquement mais ils sont accouplés magnétiquement

### 3.1.4 Principe de fonctionnement

Son principe de fonctionnement est basé sur la loi d'induction électromagnétique (loi de Lenz).En effet, la tension alternative au primaire va créer un flux magnétique alternatif qui traversant l'enroulement secondaire produira une f.e.m induite(Loi de Faraday).

## 3.2 Etude d'un transformateur parfait

### 3.2.1 Hypothèses

-Pas des pertes joule ( $R_1 = R_2 = 0$ )

-Pas de flux de fuite( $l_1 = l_2$ )

-Le circuit magnétique est parfait( $\mu = \infty$ )

### 3.2.2 Equations de fonctionnement

Le schéma électrique équivalent d'un transformateur monophasé parfait est :

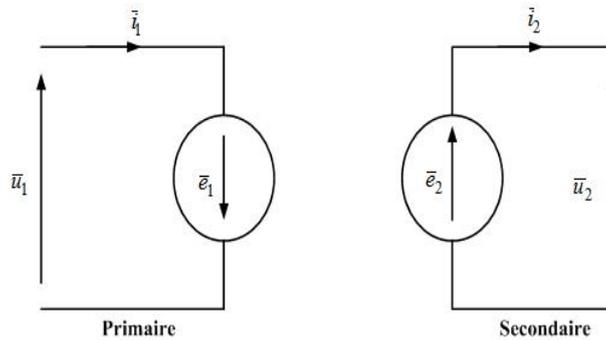


FIGURE 3.3 – circuit électrique équivalent d'un transformateur idéal

avec :

$e_1(t) = -N_1 \cdot d\Phi(t)/dt$  : force électromotrice induite au primaire

$e_2(t) = -N_2 \cdot d\Phi(t)/dt$  : Force électromotrice induite au secondaire

#### a) Equations des tensions

La loi de mailles appliquée au primaire et au secondaire donne :

$$u_1(t) + e_1(t) = 0$$

$$u_2(t) - e_2(t) = 0$$

En écriture complexe on obtient :

$$\bar{U}_1 = j \cdot N_1 \cdot w \cdot \bar{\Phi} \text{ et } \bar{U}_2 = -j \cdot N_2 \cdot w \cdot \bar{\Phi} \Rightarrow \bar{U}_2/\bar{U}_1 = -N_2/N_1 = -m$$

$m$  est le rapport de transformation

Selon la valeur qui prend  $m$ , on peut distinguer :

-Si  $m > 1 \Rightarrow U_2 > U_1$  (Le transformateur est élévateur)

-Si  $m < 1 \Rightarrow U_2 < U_1$  (Le transformateur est abaisseur)

-Si  $m = 1 \Rightarrow U_2 = U_1$  (Le transformateur est utilisé comme un isolateur)

#### b) Equations des courants

D'après la loi d'Hopkinson, on peut écrire l'équation suivante :  $N_1 \cdot \bar{i}_1 + N_2 \cdot \bar{i}_2 = \mathfrak{R}_m \cdot \bar{\Phi}$

or par hypothèse  $\mathfrak{R}_m = 0$  (car  $\mu = 0$ )  $\Rightarrow N_1 \cdot \bar{I}_1 + N_2 \cdot \bar{I}_2 = 0 \Rightarrow \bar{I}_2/\bar{I}_1 = -1/m$

### 3.2.3 Schéma équivalent et diagramme vectoriel

Le schéma électrique équivalent d'un transformateur monophasé idéal est le suivant :

Supposons que le transformateur débite le courant  $\bar{i}_2$  sous la tension  $\bar{u}_2$  dans un récepteur qui présente un déphasage  $\varphi_2$ , on peut représenter le diagramme vectoriel des tensions comme

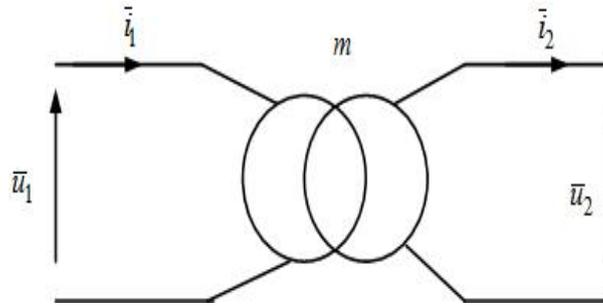


FIGURE 3.4 – Schéma équivalent d'un transformateur idéal

le montre la figure suivante :

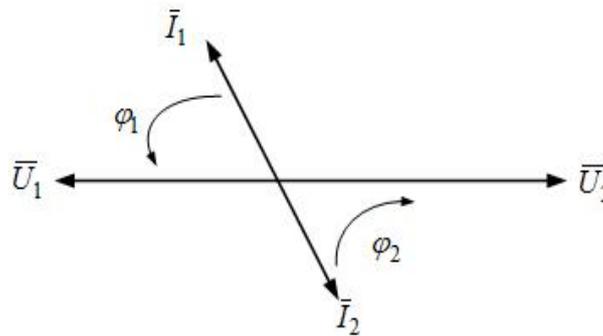


FIGURE 3.5 – Diagramme vectoriel d'un transformateur idéal

### 3.3 Propriétés du transformateur parfait

#### 3.3.1 Comportement énergétique

On a déjà établi que :  $\frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \Rightarrow \bar{S}_1 = \bar{S}_2$

sachant que :

$$\bar{S}_1 = P_1 + jQ_1 \quad (3.1)$$

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad (3.2)$$

#### Conclusion

Les puissances active et réactive absorbées par le primaire seront totalement transmises à la charge connectée au secondaire (pas des pertes). Le rendement d'un transformateur parfait est égal à 1.

#### Transfert d'impédance

Soit (T) un transformateur monophasé parfait de rapport de transformation  $m$ , qui alimente

une impédance  $\bar{Z}$ . L'objectif est de transférer l'impédance  $\bar{Z}$  du secondaire au primaire.

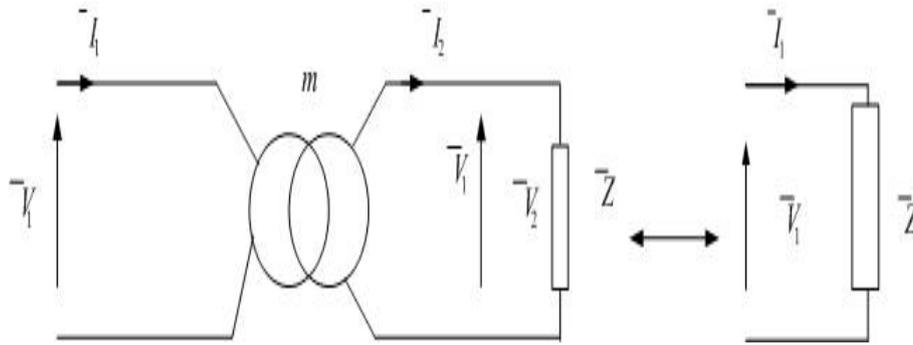


FIGURE 3.6 – Transfert d'impédance

on a  $\bar{V}_2 = \bar{Z}\bar{I}_2 = \bar{Z} - \bar{I}_1/m = -m\bar{V}_1 \Rightarrow \bar{V}_1 = \bar{Z}/m^2\bar{I}_1$

si on pose  $\bar{Z}' = \bar{Z}/m^2$ , on aura  $\bar{V}_1 = \bar{Z}'\bar{I}_1$

Finalement, tout se passe, comme si le réseau primaire (la source) alimentait directement l'impédance  $\bar{Z}'$ , ayant des caractéristiques mieux adaptées à la source.

#### conclusion

le fonctionnement n'est pas modifié si on respecte les règles suivantes :

- Règle 1 : on peut transférer (ou ramener) une impédance, située initialement au secondaire, vers le primaire. En la divisant par  $m^2$ .
- Règle 2 : on peut transférer (ou ramener) une impédance, située initialement au primaire, vers le secondaire. En la multipliant par  $m^2$ .

## 3.4 Transformateur industriel

Pour modéliser le transformateur réel, on doit tenir compte des grandeurs qui ont été négligées au cours d'étude d'un transformateur parfait.

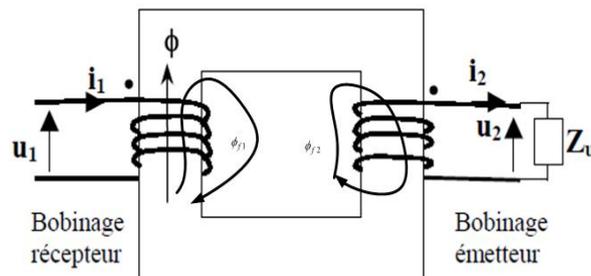


FIGURE 3.7 – Transformateur réel

### 3.4.1 Équations de fonctionnement

Soit :

$\phi_1 = \phi + \phi_{f1}$  : le flux à travers l'enroulement primaire

$\phi_2 = \phi + \phi_{f2}$  : le flux à travers l'enroulement secondaire

On aura :

$l_1 = N_1\phi_{f1}/I_1$  : Inductance de fuites au primaire

$l_2 = N_2\phi_{f2}/I_2$  : Inductance de fuites au secondaire.

### 3.4.2 Equations des tensions

#### Au primaire

on donne ci-contre le schéma électrique équivalent du primaire. Celui se comporte comme un récepteur vis-à-vis à la source.

$$v_1(t) = N_1 d\phi(t)/dt + l_1 di_1(t)/dt + r_1 i_1(t) \quad (3.3)$$

et en écriture complexe :  $\bar{V}_1 = r_1 \bar{I}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1 + j N_1 \omega \bar{\phi}$

Si on pose  $\bar{E}_1 = -j N_1 \omega \bar{\phi} \Rightarrow \bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + r_1 \bar{I}_1 + j l_1 \omega \bar{I}_1$

#### Au secondaire

On donne ci-contre le schéma électrique équivalent du secondaire. Celui se comporte comme un générateur vis-à-vis au récepteur.

$$v_2(t) = N_2 d\phi(t)/dt - l_2 di_2(t)/dt - r_2 i_2(t) \quad (3.4)$$

et en écriture complexe :  $\bar{V}_2 = -r_1 \bar{I}_1 - j l_1 \omega \bar{I}_1 + j N_2 \omega \bar{\phi}$

Si on pose  $\bar{E}_2 = -j N_2 \omega \bar{\phi} \Rightarrow \bar{E}_2 = \bar{V}_2 + r_2 \bar{I}_2 + j l_2 \omega \bar{I}_2$

### 3.4.3 Equations aux ampères tours

- A vide, la force magnétomotrice(f.m.m) est égale à  $N_1 \bar{I}_0$  , elle crée un flux  $\phi$  dans le circuit magnétique.

- En charge, la force magnétomotrice(f.m.m) est egale à  $N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2$  , elle crée le même flux  $\phi$  dans le circuit magnétique.

par conséquent , on aura  $N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_0 \Rightarrow \bar{I}_0 = \bar{I}_1 + m \bar{I}_2$

### 3.4.4 Schéma équivalent

$r_1(\Omega)$  : Résistance de l'enroulement primaire

$l_1(H)$  : Inductance de l'enroulement primaire

$r_2(\Omega)$  : Résistance de l'enroulement secondaire

$R_m(\Omega)$  : Résistance de circuit magnétique

$X_m(\Omega)$  : Réactance de circuit magnétique

$l_2(H)$  : Inductance de l'enroulement secondaire

Le schéma équivalent du transformateur réel est représenté par la figure suivante :

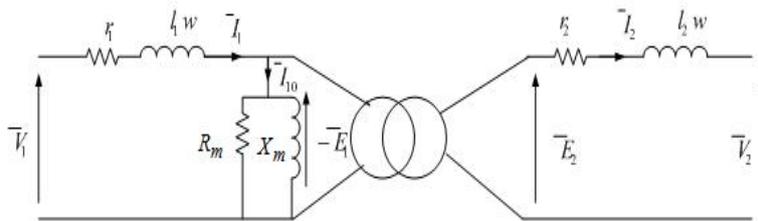


FIGURE 3.8 – Transformateur réel

## 3.5 Transformateur monophasé dans l'approximation de Kapp

### 3.5.1 Hypothèse

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant  $I_0$  devant le courant  $I_{1n}$

### 3.5.2 Schéma équivalent

Ne pas tenir compte de  $I_0$ , revient à débrancher l'impédance magnétisante ( $R_m // jX_m$ ), le schéma équivalent devient :

avec :

$X_1 = l_1 w$  : Réactance des fuites au primaire

$X_2 = l_2 w$  : Réactance des fuites au secondaire

#### Schéma équivalent ramené au secondaire

si on ramène l'impédance  $\bar{Z}_1 = r_1 + j l_1 w$  du primaire au secondaire, on obtient le schéma équivalent ramené au secondaire

$R_s = r_2 + m^2 r_1$  : Résistance ramenée au secondaire

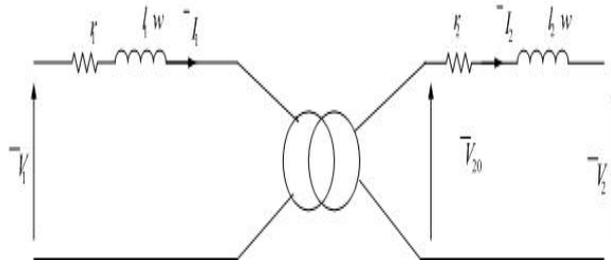


FIGURE 3.9 – Schéma équivalent + hypothèse de Kapp

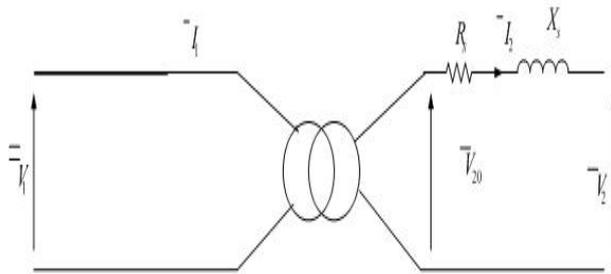


FIGURE 3.10 – Schéma équivalent ramené au secondaire

$X_s = X_2 + m^2 X_2$  : Réactance ramenée au secondaire

La loi des mailles appliquée au secondaire donne :  $\bar{V}_2 = \bar{V}_{20} - \bar{I}_2(R_s + jX_s)$

### 3.5.3 Détermination des éléments du schéma équivalent

On effectue deux essais :

#### Essai à vide

Cet essai consiste à alimenter l'enroulement primaire par sa tension nominale et on mesure la tension à vide au secondaire, le courant et la puissance à vide absorbées par le primaire comme le montre la figure suivante :

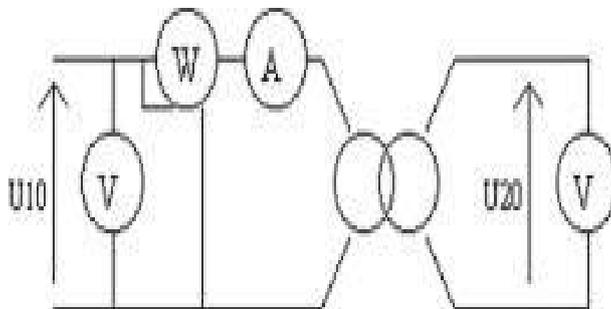


FIGURE 3.11 – Essai à vide

Dans ce cas, on peut déterminer pratiquement :

Le rapport de transformation  $m = \frac{V_{20}}{V_{10}}$

La résistance de circuit magnétique  $R_m = \frac{V_{10}^2}{P_0}$

La réactance de circuit magnétique  $X_m = \frac{V_{10}^2}{Q_0}$

### Essai en court-circuit sous tension primaire réduite

On applique au primaire une tension réduite  $U_{1cc} \ll U_{1n}$  (tension nominale), on augmente progressivement  $U_{1cc}$  depuis 0 jusqu'à avoir  $I_{2cc} = I_{2n}$

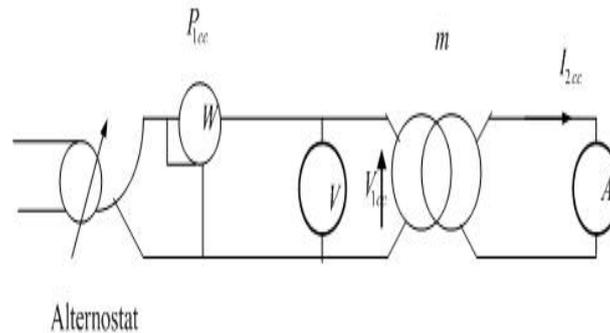


FIGURE 3.12 – Essai en court-circuit

puisque  $U_{1cc} \ll U_{1n} \Rightarrow$  les pertes fer lors de l'essai en court-circuit sont négligeables et par conséquent la résistance ramenée au secondaire est égale à :

$$R_s = P_{1cc} / I_{2cc}^2 \quad (3.5)$$

Le schéma équivalent ramené au secondaire (en court-circuit) est le suivant :

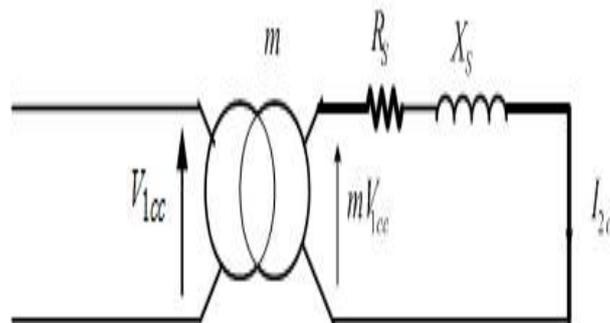


FIGURE 3.13 – schéma équivalent en court-circuit

L'impédance et la réactance ramenées au secondaire sont :

$$Z_s = mV_{1cc} / I_{2cc}$$

$$X_s = \sqrt{(Z_s^2 - R_s^2)} \quad (3.6)$$

### 3.5.4 Chute de tension

Par définition la chute de tension notée  $\Delta V_2$  est la différence entre valeurs efficaces de la

tension à vide et la tension en charge :

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \quad (3.7)$$

Elle dépend du courant  $I_2$  et de déphasage  $\varphi_2$  et peut être négative (surtension  $V_2 > V_{20}$ ).

Généralement la chute de tension est donnée par sa valeur relative :

$$\varepsilon\% = \frac{\Delta V_2}{V_{20}} \cdot 100 \quad (3.8)$$

Pour déterminer la chute de tension  $\Delta V_2$  on peut se servir de l'une des deux méthodes suivantes :

### Diagramme vectoriel

Si on applique la loi des mailles  $\bar{V}_2 = \bar{V}_{20} - \bar{I}_2(R_s \cos(\varphi) + X_s \sin(\varphi))$ , avec  $V_{20} = mV_1$

On suppose que  $m, V_1, R_s, X_s, I_2$  et  $\varphi_2$  sont connues et on va déterminer  $V_2$

Les étapes à suivre pour déterminer  $V_2$  sont les suivantes :

- On choisit une échelle en fonction de  $V_{20}$ .
- L'axe horizontal étant l'origine des phases, on choisit  $\text{dir}(\bar{I}_2)$  comme origine des phases
- On trace un arc de cercle  $(O, V_{20})$
- On trace  $\vec{OA}$  telque  $OA = R_s I_2$
- On trace  $\vec{AB} \perp \vec{OA}$  telque  $AB = X_s I_2$
- On trace une droite  $(\Delta)$  passant par B et faisant un angle  $\varphi_2$  avec l'horizontale
- $V_2$  sera donnée par le segment  $[BC]$  prise à l'échelle.

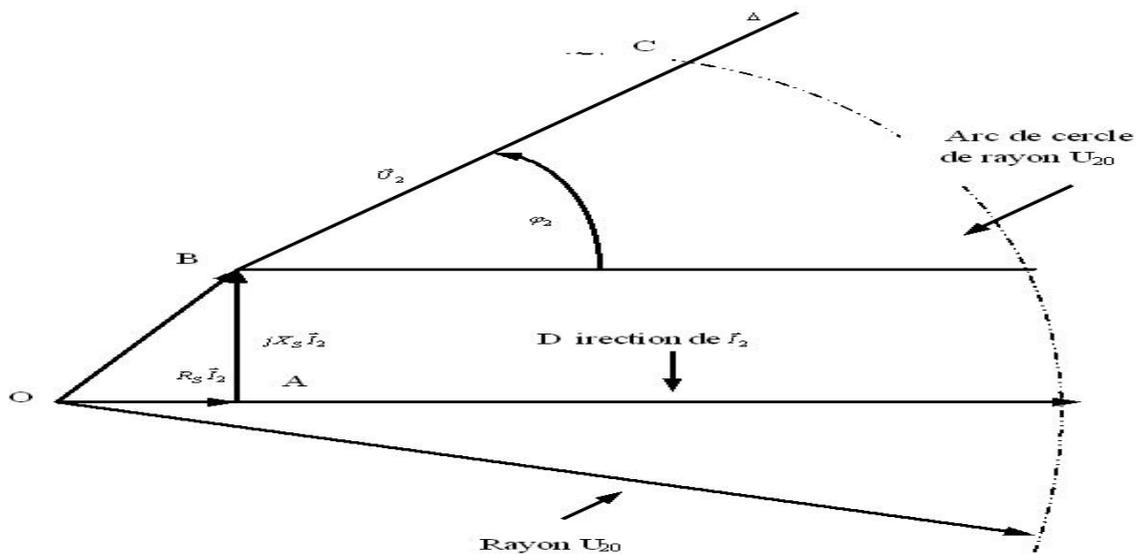


FIGURE 3.14 – Diagramme vectoriel de KAPP

**Solution algébrique**

Pour déterminer la chute de tension on peut se servir de la relation suivante :

$$\Delta V_2 = I_2(R_s \cdot \cos(\varphi_2) + X_s \cdot \sin(\varphi_2)) \tag{3.9}$$

**3.5.5 Caractéristique en charge**

Ce sont les courbes donnant la variation de la tension en charge en fonction du courant

$$V_2 = f(I_2) \text{ à } \varphi_2 = ct \text{ et } V_1 = V_{1n}$$

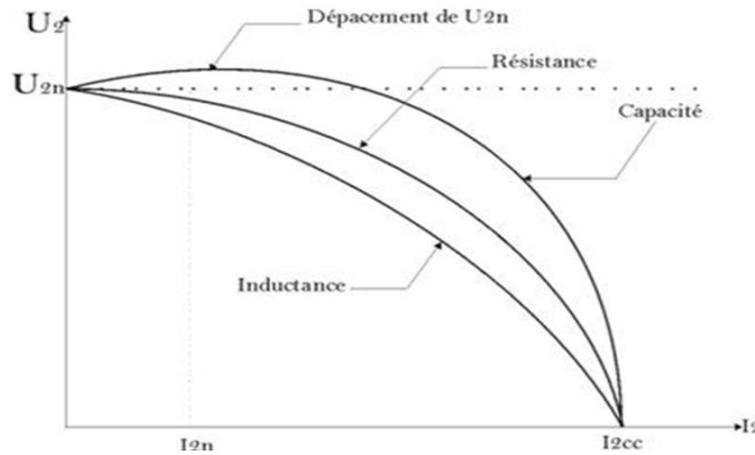


FIGURE 3.15 – Allure de la tension en charge

**3.5.6 Rendement du transformateur**

**Bilan de puissance**

Le bilan de puissance d'un transformateur monophasé est le suivant :

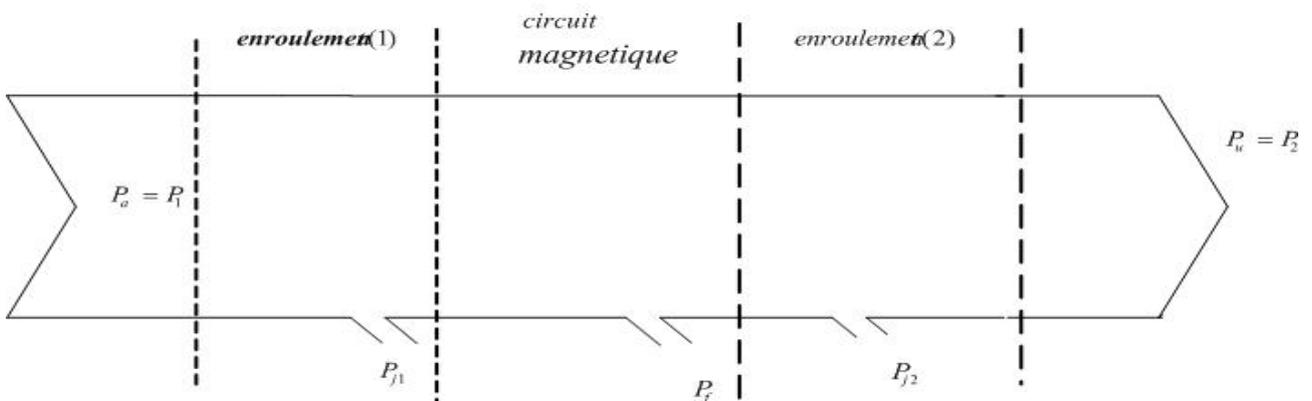


FIGURE 3.16 – Bilan de puissance

La puissance absorbée par le primaire est  $P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_1) = P_2 + \Sigma pertes$

La puissance utile est  $P_2 = U_2 I_2 \cos(\varphi_2) = P_1 - \Sigma \text{pertes}$

Les pertes par effet joule totales sont  $P_j = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_p I_1^2 = R_s I_2^2$

Les pertes fer sont :  $p_{fer} \approx P_0$

### Rendement

L'expression du rendement d'un transformateur monophasé est la suivante :

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

Il peut être déterminé pratiquement à l'aide des deux wattmètres pour les faibles puissances, cependant, pour les grandes puissances on utilise généralement la méthode des pertes séparées

basée sur l'estimation des pertes. La relation utilisée est la suivante :

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{U_2 I_2 \cos(\varphi_2)}{U_2 I_2 \cos(\varphi_2) + \Sigma \text{pertes}} 100\%$$

L'allure de la courbe de rendement en fonction du courant au secondaire est donnée par la figure suivante :

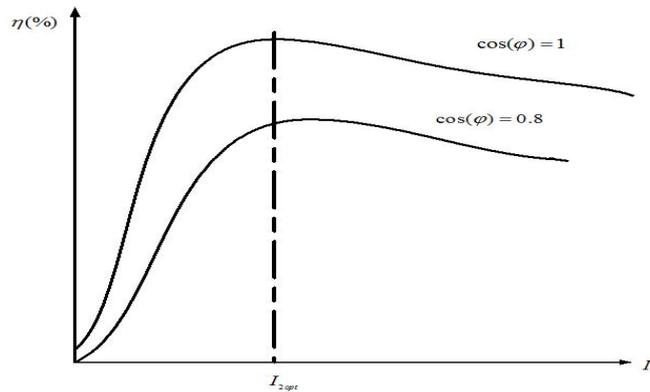


FIGURE 3.17 – Allure de rendement

C'est une courbe croissante au début, elle passe par un maximum puis elle décroît.

### Remarque

- Le transformateur statique aura toujours un rendement meilleur que celui d'une machine tournante à cause des pertes mécaniques.
- Le rendement nominal d'un transformateur est généralement supérieur à 90%.
- Le meilleur rendement est obtenu avec une charge résistive.
- Le rendement maximal est obtenu par un courant optimal  $I_{2opt}$  tel que :  $I_{2opt} = \frac{\sqrt{P_0}}{R_s}$

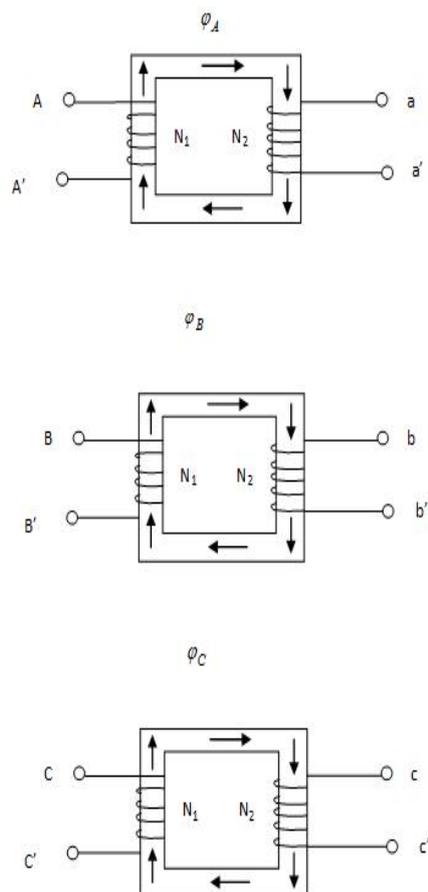
# Chapitre 4

## Le Transformateur Triphasé

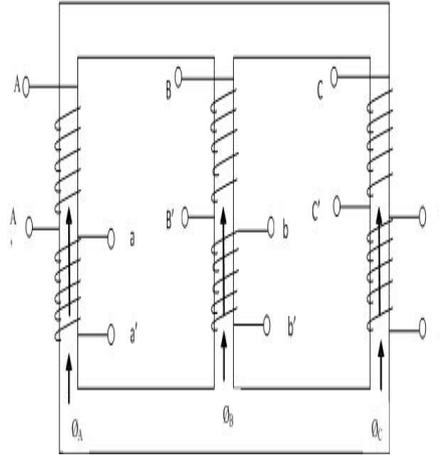
### 4.1 Interêt

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

- Soit 3 transformateurs monophasés identiques



- Soit un seul transformateur triphasé ( la solution la plus économique)



Remarque :

On convient de repérer les bornes comme suit :

- Enroulements primaires par des lettres majuscules(A.B.C)
- Enroulements secondaires par des lettres minuscules (a.b.c)

Les bornes désignées par le même lettre sont dites Homologues

## 4.2 Constitution d'un transformateur triphasé

Le circuit magnétique est formé de trois noyaux fermés par 2 culasses .Il est fabriqué en tôles Magnétiques feuilletées .chaque noyau porte :

- Un enroulement primaire
- Un ou plusieurs enroulements secondaires

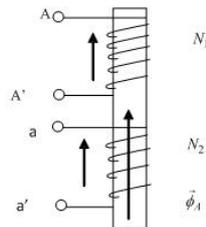


FIGURE 4.1 – Disposition des enroulements autour du noyau

Remarque :

L'enroulement primaire (à  $N_1$  spires) et l'enroulement secondaire (à  $N_2$  spires) étant bobinés dans le même sens et traversés par le même flux  $\Rightarrow$  les tensions  $\vec{V}_A$  et  $\vec{v}_a$  sont en phase.

### 4.2.1 Mode de couplage

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

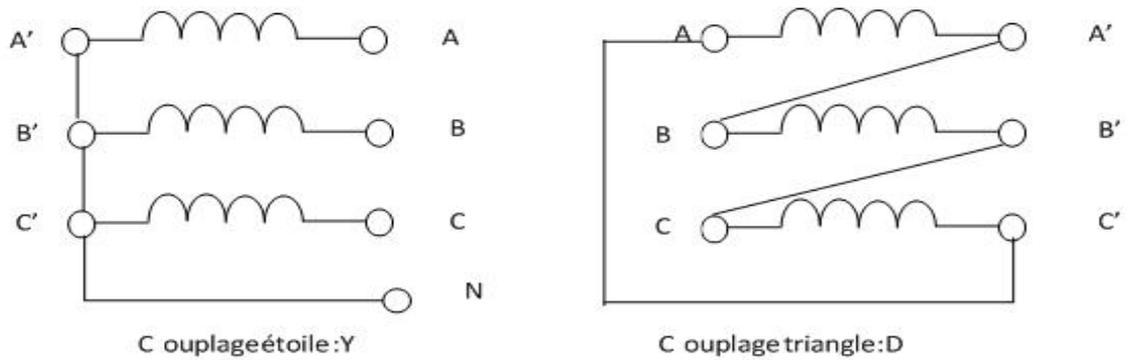


FIGURE 4.2 – Couplage des enroulements au primaire

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

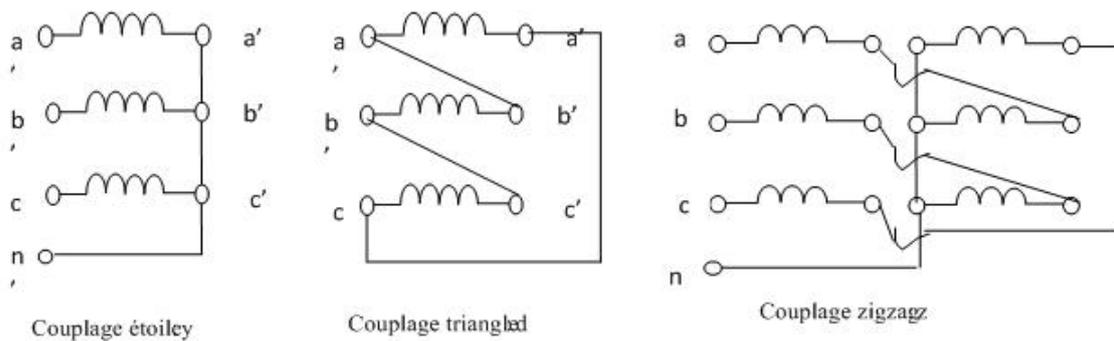


FIGURE 4.3 – Couplage des enroulements au secondaire

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

Y-y : étoile étoile

Y-d : étoile-triangle

Y-z : étoile-zigzag

D-y : triangle- étoile

D-d : triangle -triangle

D-z : triangle-zigzag

On donne ci dessous les représentations symboliques des couplages normalisés

Chacune des schémas de la figure suivante est une représentation conventionnelle qui

suppose que les deux enroulements d'un même noyau sont rabattus de part et d'autre de la plaque à bornes. Compte tenu de la remarque précédente on pourrait dire :

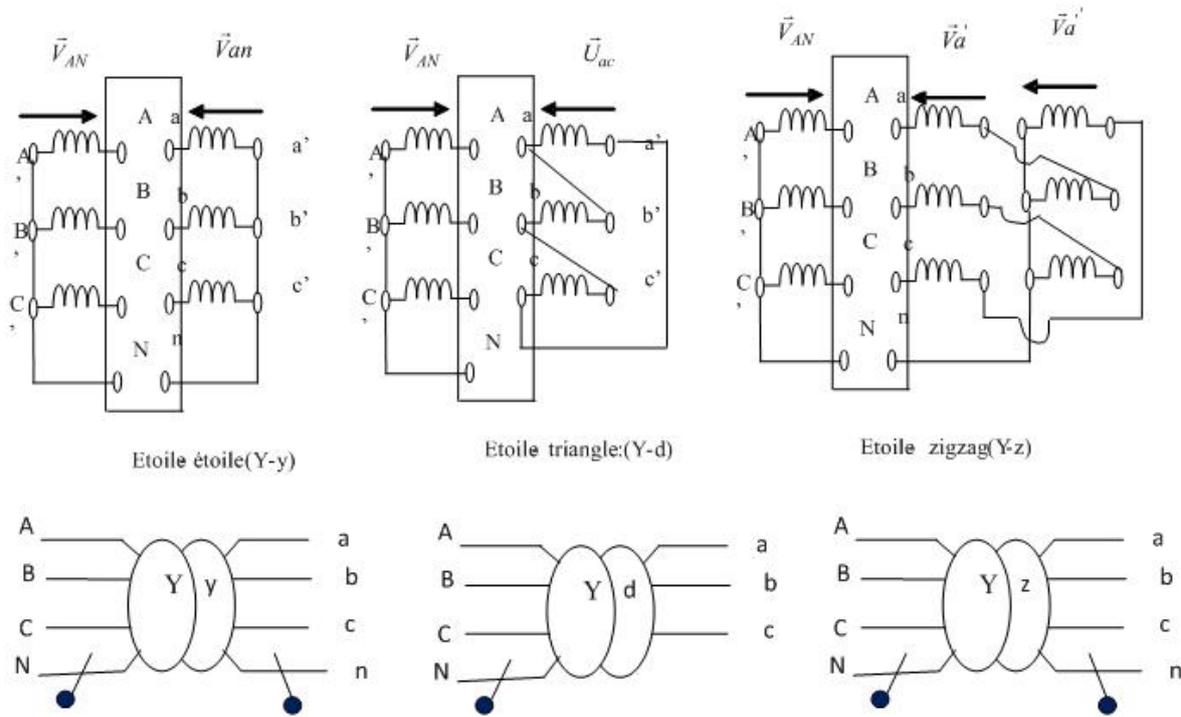


FIGURE 4.4 – Représentation symbolique

- Dans le couplage Y-d :  $\vec{V}_A$  et  $\vec{U}_{ac}$  sont en phase
- Dans le couplage Y-z :  $\vec{V}_A$  ,  $\vec{v}_a'$  et  $\vec{v}_a''$  sont en phase

## 4.2.2 Choix de couplage

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- La charge nécessite la présence du neutre ( par exemple réseau BT de la steg).Le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag.
- Le fonctionnement est déséquilibré (courant de déséquilibre dans le neutre  $I_n$  est supérieur à 0.1 le courant nominal), le secondaire doit être couplé en zigzag.
- Coté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser).
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle.

## 4.3 Fonctionnement en régime équilibré

### 4.3.1 Indice horaire

#### Définition

L'indice horaire ( $I_h$ ) est un nombre entier compris entre 0 et 11 qui traduit le déphasage  $\theta$  entre deux tensions primaire et secondaire homologues.

$$I_h = \frac{\theta}{\pi/6} \quad (4.1)$$

$$\theta = (\vec{V}_A, \vec{v}_a) = (\vec{V}_B, \vec{v}_b) = (\vec{V}_C, \vec{v}_c) \quad (4.2)$$

#### Remarque

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

$$\theta = (U_{AB}, u_{ab}) = (U_{BC}, u_{bc}) = (U_{CA}, u_{ca}) \quad (4.3)$$

On peut déterminer  $\theta$  :

- Soit à partir du schéma des connections
- Soit pratiquement par des essais

#### Détermination de l'indice horaire à partir du schéma

On dispose du schéma des connections internes d'un transformateur et il est question de déterminer son indice horaire.

#### Couplage Y-y

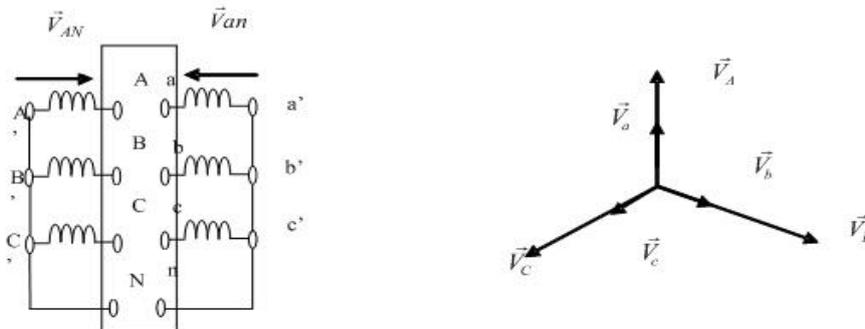


Figure 3.7: Détermination de l'indice horaire (Yy0)

FIGURE 4.5 – Détermination de l'indice horaire du couplage :Y-y

D'après le schéma on peut voir que  $\vec{V}_A$  et  $\vec{v}_a$  sont en phase, car, portés par le même noyau. Ils sont orientés dans le même sens  $\Rightarrow \theta = 0 \Rightarrow I_h = 0$ .

### Remarque

Une permutation directe des liaisons aux bornes primaires ou aux secondaires (enroulement 2 sera lié à a, enroulement 3 à b et enroulement 1 à c) fait passer l'indice horaire à 4 (augmente l'indice de +4).

2 permutations directes ou un inverse fait passer l'indice à 8 (augmente l'indice de +8).

## 4.3.2 Détermination pratique de l'indice horaire

### Méthode oscilloscopique

Cela revient à mesurer le déphasage  $\theta$  entre deux tensions homologues à l'aide d'un oscilloscope et en déduire l'indice horaire

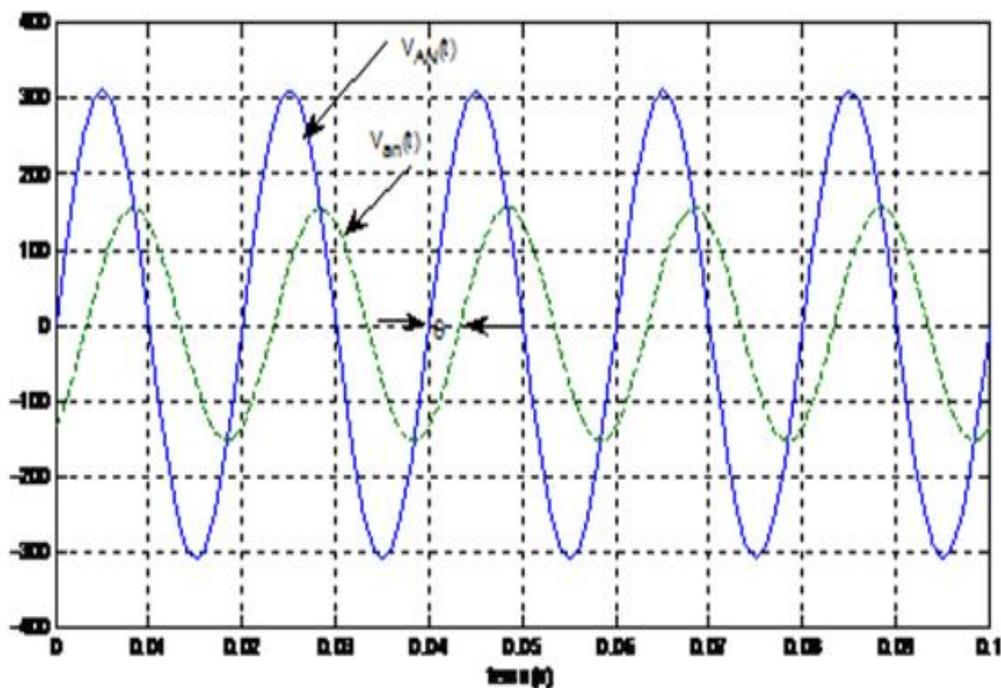


FIGURE 4.6 – Détermination de l'indice horaire avec oscilloscope

### Méthode des électriciens

La méthode des électriciens est la plus simple car elle nécessite juste l'utilisation d'un voltmètre.

On relie entre elles deux bornes homologues (par exemple A et a)

On mesure les tensions composées au primaire  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$

On mesure les tensions mixtes entre les bornes HT et BT  $U_{Ab}, U_{Bb}, U_{Cb}, U_{Ac}, U_{Bc}$  et  $U_{Cc}$

Ces mesures permettent de construire le diagramme vectoriel et déduire le déphasage  $\theta$

On choisit une échelle

On construit le triangle des tensions primaires(ABC)

Le potentiel A est celui de a, donc on construit a confondu avec A

Pour avoir le point b, il suffit de tracer les 3 les arcs de cercles de rayon  $U_{Ab}, U_{Bb}$  et  $U_{Cb}$  et des centres respectivement A,B et C

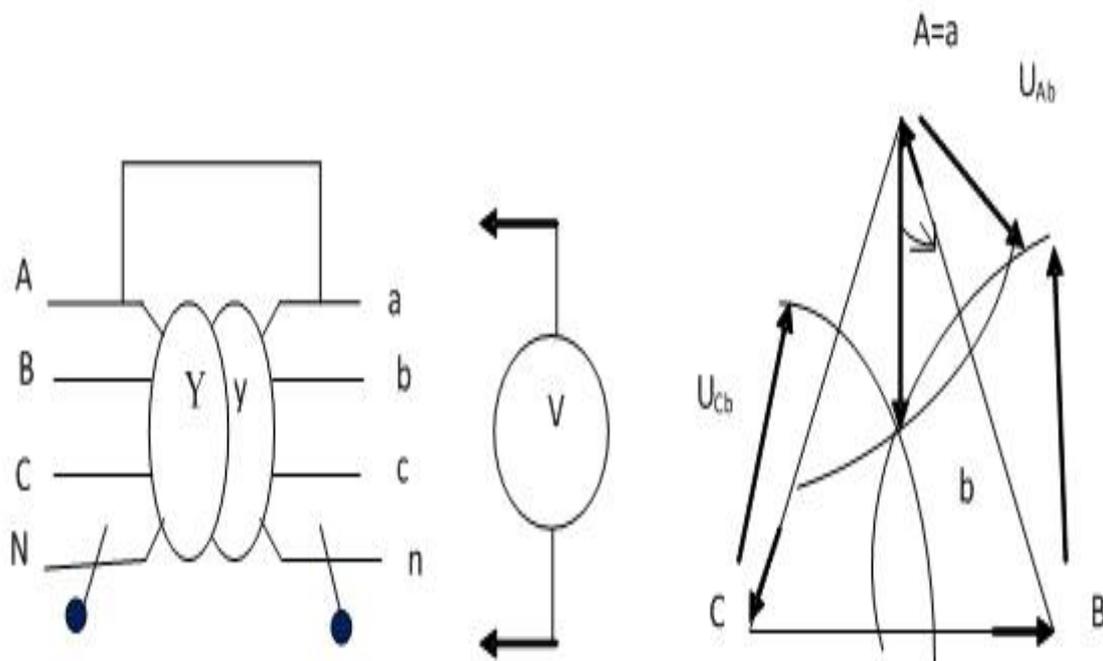


FIGURE 4.7 – Méthode des electriciens

### 4.3.3 Rapport de transformation

#### Définition

Par définition, le rapport de transformation à vide  $m$  est donné par :

$$m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} \quad (4.4)$$

Le rapport de transformation triphasé dépend de  $N_1$  et  $N_2$  les nombres de spires au primaire et au secondaire et du couplage

## Exemples

### Couplage Y-y

Le rapport de transformation est :

$$m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_{an}}{V_{AN}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (4.5)$$

### Couplage Y-d

Le rapport de transformation est :

$$m = \frac{U_{ab}}{U_{AB}} = \frac{V_{an}}{\sqrt{3}V_{AN}} = \frac{N_2}{\sqrt{3}N_1} \quad (4.6)$$

## 4.3.4 Schéma monophasé équivalent

Le fonctionnement étant équilibré, l'étude d'un transformateur triphasé peut être ramenée à l'étude d'un transformateur monophasé équivalent par la méthode de Kapp.

### Méthode du transformateur colonne

★ Marche à suivre

- On ramène les données à une colonne (tension par colonne, courant par colonne et puissances par colonne) tout en tenant compte des couplages.
- On résout le problème au niveau d'une colonne
- On exprime les résultats finaux en fonction des grandeurs des lignes

### Remarque

Cette méthode est inapplicable lorsqu'on ignore le couplage. Elle est délicate si le couplage du secondaire est en zigzag.

★ Schéma équivalent par colonne vu au secondaire

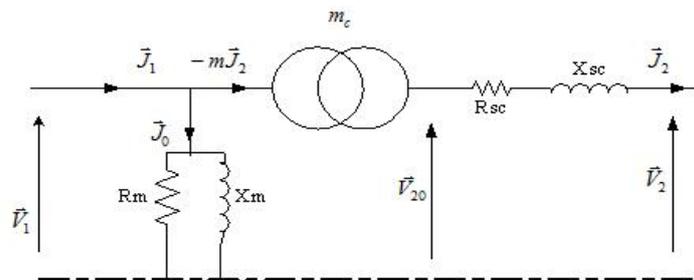


FIGURE 4.8 – schéma équivalent par colonne

Les éléments du schéma équivalent sont donnés par :

$$m = \frac{V_{20}}{V_{10}} \quad (4.7)$$

$$R_m = \frac{3V_{10}^2}{P_0} \quad (4.8)$$

$$X_m = \frac{3V_{10}^2}{Q_0} \quad (4.9)$$

$$R_s = \frac{P_{cc}}{3J_{2cc}^2} \quad (4.10)$$

$$Z_s = \frac{mV_{1cc}}{J_{2cc}} \quad (4.11)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \quad (4.12)$$

La chute de tension peut être déterminée de la même manière qu'avec un transformateur monophasé.

### Méthode des dipôles équivalents de Thévenin

Cette méthode est applicable même si l'on ignore le couplage. Dans ce cas, on considère les données par phase ( tension étoilée, courant de ligne et puissance et pertes par phase).chaque phase sera remplacé par son dipôle de Thévenin équivalent.

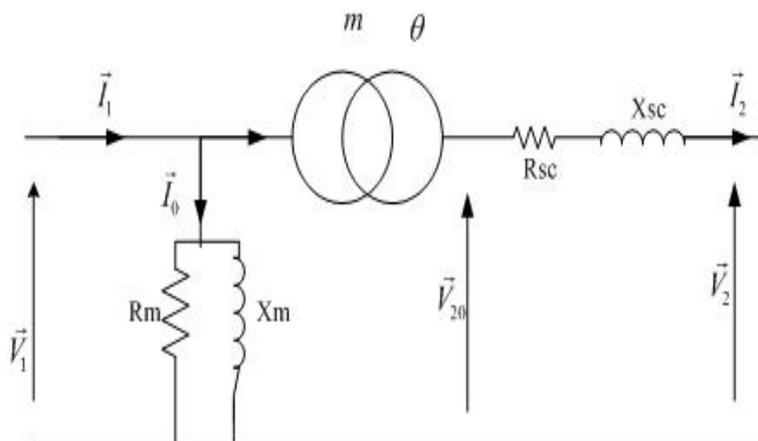


FIGURE 4.9 – Dipôle de Thévenin équivalent

Les éléments du schéma sont donnés par :

$$m = \frac{V_{20}}{V_{10}} \quad (4.13)$$

$$R_m = \frac{3V_{10}^2}{P_0} \quad (4.14)$$

$$X_m = \frac{3V_{10}^2}{Q_0} \quad (4.15)$$

$$R_s = \frac{P_{cc}}{3I_{2cc}^2} \quad (4.16)$$

$$Z_s = \frac{mV_{1cc}}{I_{2cc}} \quad (4.17)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \quad (4.18)$$

On détermine graphiquement ou par calcul la chute de tension  $\Delta V$ .

### Equations et diagramme

La loi des mailles appliquée au secondaire donne :

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_{20} - \bar{Z}_s \bar{I}_2 \quad (4.19)$$

$$\bar{V}_{20} = m \bar{V}_1 e^{-j\theta} \quad (4.20)$$

Quant aux courants on aura, d'après la loi des noeuds

$$\bar{I}_1 = m \bar{I}_2 e^{j\theta} + \bar{I}_{10} \quad (4.21)$$

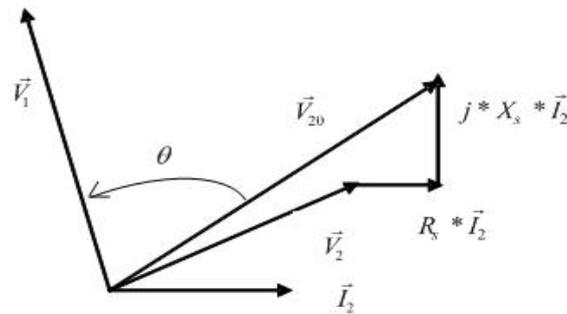


FIGURE 4.10 – Diagramme vectoriel

## 4.4 Marche en parallèle des transformateurs triphasés

### 4.4.1 But

Répondre à une demande croissante en énergie électrique la figure suivante est un exemple, généralement  $T_1$  et  $T_2$  sont de même ordre de puissance pour garantir un bon rendement de

l'ensemble.

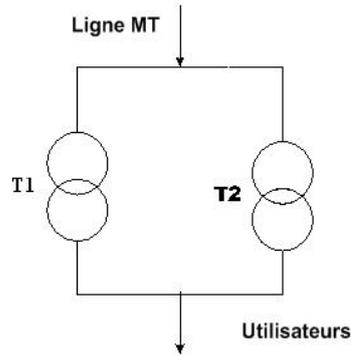


FIGURE 4.11 – Branchement en parallèle

#### 4.4.2 Équations électriques

Soient deux transformateurs  $T_1$  et  $T_2$  de même ordre de puissance et dont les caractéristiques sont :

$$\triangle T_1 : R_{s1}, X_{s1}, m, \theta \text{ et } \bar{Z}_{\mu 1}$$

$$\triangle T_2 : R_{s2}, X_{s2}, m, \theta \text{ et } \bar{Z}_{\mu 2}$$

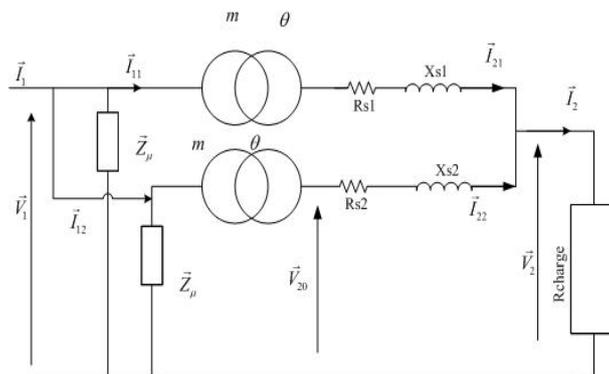


FIGURE 4.12 – schéma équivalent de deux transformateurs en parallèle

Appliquons la loi des mailles aux secondaires

$$\bar{V}_2 = m\bar{V}_1 e^{-j\theta} - \bar{Z}_{s1} \bar{I}_{21} \quad (4.22)$$

$$\bar{V}_2 = m\bar{V}_1 e^{-j\theta} - \bar{Z}_{s2} \bar{I}_{22} \quad (4.23)$$

$$\bar{Z}_{s1} \bar{I}_{21} = \bar{Z}_{s2} \bar{I}_{22} \quad (4.24)$$

Si l'on désigne par :

$$\varphi_{1cc} = \arg(\bar{Z}_{s1}) \quad (4.25)$$

$$\varphi_{2cc} = \arg(\bar{Z}_{s2}) \quad (4.26)$$

$$\psi = \varphi_{1cc} - \varphi_{2cc} \quad (4.27)$$

Le courant  $\bar{I}_{21}$  est déphasé de  $\psi$  sur  $\bar{I}_{22}$

Si on pose  $K = \frac{Z_{s1}}{Z_{s2}}$ , on aura  $\bar{I}_{22} = K\bar{I}_{21}e^{j\psi}$

Le courant global dans la charge est :

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{21} + \bar{I}_{22} = \bar{I}_{21}(1 + Ke^{j\psi}) \quad (4.28)$$

Le transformateur ayant  $Z_s$  la plus faible débite le courant le plus fort.

Les deux transformateurs en parallèle peuvent être remplacés par le schéma d'un transformateur équivalent ayant :

Même rapport de transformation  $m$  et même déphasage  $\theta$

Impédance équivalente ramenée au secondaire  $\bar{Z}_s = \bar{Z}_{s1} // \bar{Z}_{s2}$

### 4.4.3 Mise en parallèle des transformateurs triphasés

Les conditions nécessaires pour brancher deux transformateurs triphasés en parallèle, ce qu'ils aient :

- Même tension primaire.
- Même rapport de transformation.
- Même indice horaire ou même groupe d'indice horaires.

Groupe	Indice	Coupage
I	0-4-8	Y-y D-d D-z
II	1-5-9	Y-y D-d D-z
III	2-6-10	D-y Y-z Y-d
iV	3-7-11	D-y Y-z Y-d

# Chapitre 5

## Les Machine á courant continu

### 5.1 Généralités

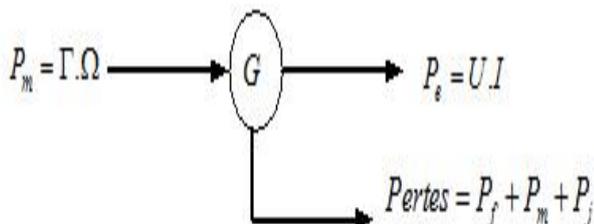
Les dynamos à courant continu ont été les premiers convertisseurs électromécaniques utilisés. Leur usage est en régression très nette surtout en générateur. Les moteurs à courant continu restent très utilisés dans plusieurs domaines telque : automobile(ventilation, leves électriques), les sous marins et dans l'électromenager.

### 5.2 Principe

Les machines à courant continu sont des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement est basé sur les lois de l'induction(Lenz et Faraday) électomagnétique. Par conséquent, elles sont réversibles et elles peuvent fonctionner soit en :

#### -Génératrice

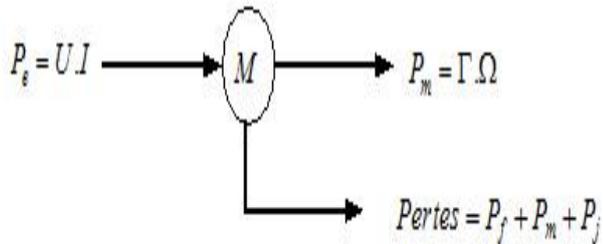
Elle transforme la puissance mécanique en puissance électrique



avec  $P_m$  :pertes mécaniques, $P_f$  :pertes fer et  $P_j$  :pertes joule

#### -Moteur

Il convertit la puissance électrique en puissance mécanique



### 5.2.1 Production d'une force électromotrice

si on fait tourner un conducteur (A,B) autour d'un axe ( $X, X'$ ) à une vitesse angulaire  $\Omega$  et si on exerce un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ . On obtient aux bornes de ce disque une force électromotrice induite :

$$e_1(t) = B.V.l.\sin(\Omega.t) \quad (5.1)$$

avec :

- $B$  : Induction magnétique en Tesla
- $V = R.\Omega$  : Vitesse de déplacement linéaire en m/s et  $R$  : Rayon du disque
- $l$  : Longuer du conducteur en m

On constate que  $e_1(t)$  est alternative, elle change son sens chaque fois que le conducteur passe par l'axe ( $X, X'$ ) appelé aussi le ligne de neutre. Une spire est constituée par l'association de deux conducteurs (A,B) et ( $A', B'$ ). La force électromotrice aux bornes de la spire

est  $e(t) = e_1(t) + e_2(t)$

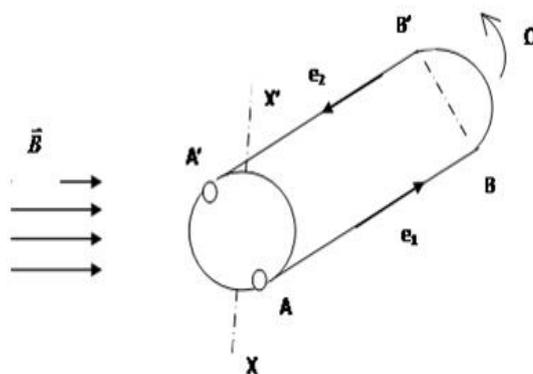


FIGURE 5.1 – Production d'une fem

### 5.2.2 Redressement mécanique

La spire est reliée aux lames tournants qui frottent sur deux balais fixes diamétralement opposés. Pendant la rotation de la spire, le balais bas est relié à ( $A'$ ) (polarité +) et le balai haut

à (A)(polarité-). Une fois ( $A'$ ) franchit la ligne neutre, sa lame entre en contact avec le balai haut en même temps que sa polarité s'inverse. En définitif les balais gardent leurs polarités en bas (+) et en haut(-) et à la sortie la tension sera redressée. Par analogie, les lames de collecteur sont les diodes dans les montages redresseurs.

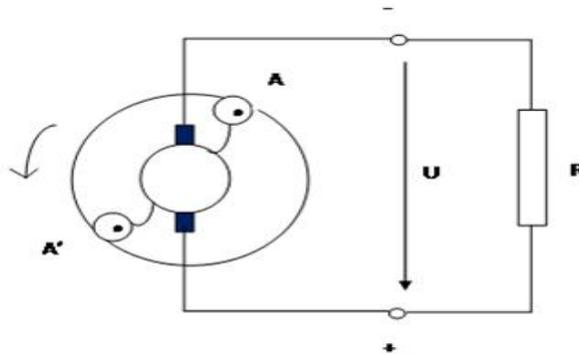


FIGURE 5.2 – Redressement mécanique

Pour augmenter la f.e.m, on augmente le nombre de conducteurs actifs, et par une disposition régulière des conducteurs sur la périphérie de l'induit on diminue l'ondulation de la tension entre balais

### 5.3 Constitution d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu est composée de quatre parties principales

- L'inducteur
- L'induit
- Le collecteur
- Les balais également appelés charbons

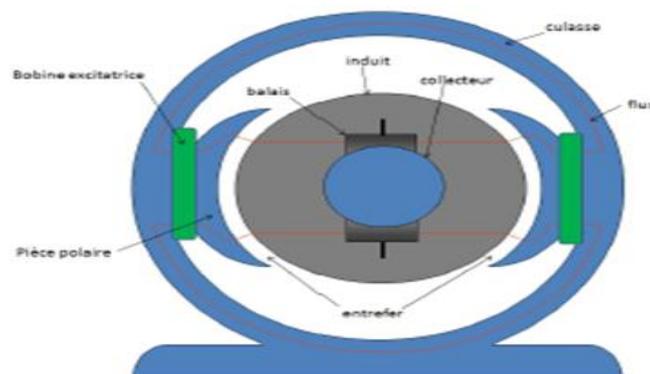


FIGURE 5.3 – Constitution d'une machine à courant continu

### 5.3.1 L'inducteur

Le bobinage inducteur, traversé par le courant inducteur  $I_e$ , produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électro-aimant qui engendre la force magnétomotrice (f.m.m) nécessaire à la production du flux. Il comporte  $2P$  pôles qui sont formés des tôles en acier doux feuillonnées. Des bobines inductrices sont enroulées sur les pôles, produisent les ampères tours qui magnétisent les pôles (et par la suite la machine); elles sont identiques et disposées de sorte que lorsqu'elles sont parcourues par le courant d'excitation elles donnent des pôles alternés : Nord-Sud-Nord-Sud

### 5.3.2 L'induit

L'induit est composé est d'un ensemble de bobines identiques uniformément réparties autour d'un noyau cylindrique. Il tourne entre les pôles de l'inducteur. Le noyau est formé d'un assemblage des tôles en fer doux. Les tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à loger les conducteurs de l'induit.



FIGURE 5.4 – Encôche

### 5.3.3 Le collecteur et les balais

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur.

Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Les balais (aussi appelés charbon) sont en carbone (on choisit souvent du graphite). D'une part, ce matériau possède une bonne conductivité d'autre part, le frottement du couple cuivre/carbone est faible et ainsi, le collecteur ne s'use pas prématurément.



FIGURE 5.5 – Collecteur

## 5.4 Equations générales d'une machine à courant continu

### 5.4.1 Voies d'enroulement

les balais divise l'induit en  $2a$  voies d'enroulement, chaque voie d'enroulement comporte donc  $N/2a$  conducteurs actifs ( $N$  : nombre total de conducteurs d'induit). Les voies d'enroulement sont à considérer comme deux générateurs identiques montés en parallèle (même f.e.m et même courant =  $(I/2a)$  avec  $I$  désigne le courant débité (absorbé) par l'induit.

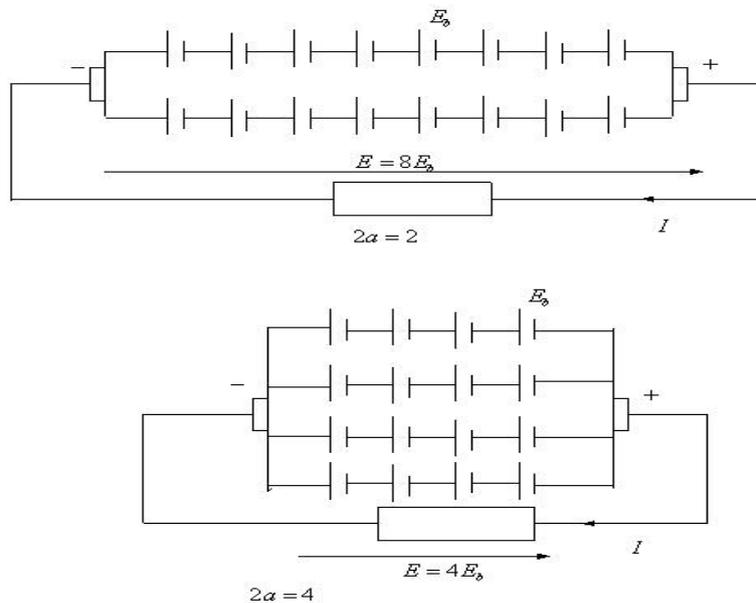


FIGURE 5.6 – Voies d'enroulement

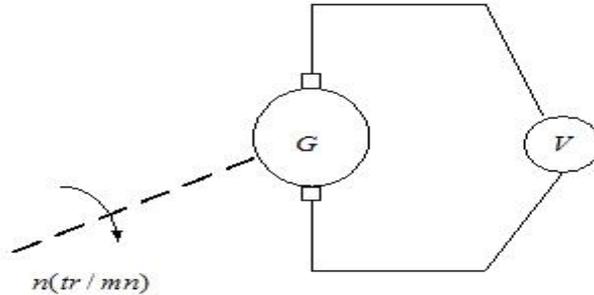
on conclut que :

- Pour augmenter le courant débité par une génératrice, on doit augmenter le nombre de voies d'enroulement
- Pour avoir la f.e.m, la plus grande. On minimise le nombre de voies d'enroulements (on prend  $2a = 2$  et on augmente le nombre de conducteurs actifs).

### 5.4.2 Force électromotrice moyenne dans un brin actif

Pour commencer, rappelons que la f.e.m à vide peut être mesurée à l'aide d'un voltmètre branché aux bornes de la génératrice à vide comme le montre la figure suivante :

$E_0$  : La force électromotrice à vide peut être exprimée en fonction des paramètres de la machine



Supposons qu'un conducteur actif se déplace à une vitesse angulaire  $\Omega$ , d'un pas polaire (angle qui sépare deux pôles successives) qui est  $\alpha_p = \pi/P$  avec  $P$  désigne le nombre de paires de pôles, il va donc couper un flux  $\Delta\phi = \phi$  pendant un temps  $\Delta t = \alpha_p/\Omega = \pi/(P.\Omega)$

D'après la loi de Faraday, la f.e.m moyenne dans ce conducteur sera donnée par :

$$e_b = \Delta\phi/\Delta t = \phi.P.\Omega/\pi \quad (5.2)$$

### 5.4.3 Force électromotrice aux bornes de l'induit

Comme déjà vu, les conducteurs de l'induit sont repartis sur  $2a$  voies d'enroulement identiques. Chaque voie comporte  $N/2a$  conducteurs actifs, par conséquent la f.e.m à la sortie de la génératrice sera celle produite par voie d'enroulement qui est égale à

$$E_0 = N.e_b/2a = N.P.\phi.\Omega/2a.\pi \quad (5.3)$$

Généralement la vitesse de l'induit est exprimée en tr/mn, donc  $\Omega = 2\pi.n/60$  d'ou

$$E = (P.N/a).\Phi.n/60 \quad (5.4)$$

avec :

- $N$  : Nombre de spires de l'induit
- $P$  : Nombre de paires de pôles
- $a$  : Nombre de paires des voies d'enroulement
- $\Phi$  : Flux engendré par pôle
- $n$  : Vitesse de rotation de l'induit en tr/mn

Le nombre de spires, le paire de pôles et les voies d'enroulement sont fixés par le constructeur. De point de vue utilisateur la f.e.m dépend uniquement de deux variables qui sont le flux et la vitesse de rotation c'est pourquoi  $E_0 = K_e \cdot \Phi_0 \cdot n_0$  avec  $K_e = P \cdot N / 60a$

Généralement la vitesse de rotation est constante  $\Rightarrow E_0 = K \cdot \phi_0$ . La variation de la force électromotrice à vide se fait à travers le courant d'excitation comme le montre la figure suivante :

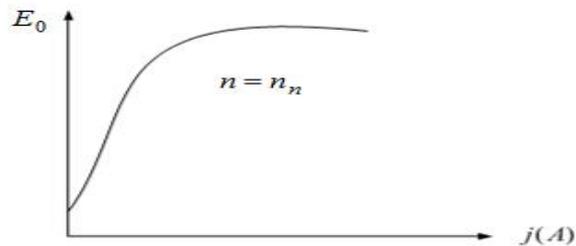


FIGURE 5.7 – Allure de la force électromotrice

## 5.5 Expression du couple électromagnétique

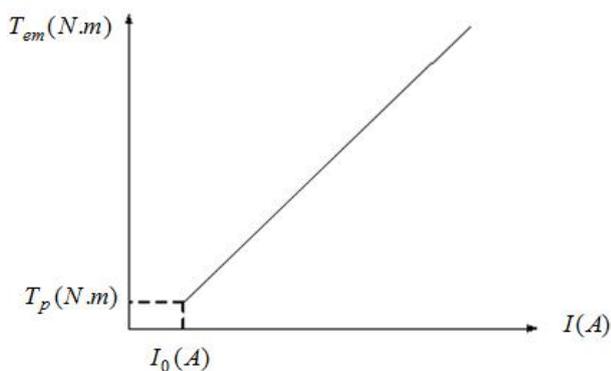
Lorsque un courant  $I$  circule dans l'induit, il apparaît un couple électromagnétique  $C_{em}$  créé par les forces de Laplace qui s'exercent sur les conducteurs de l'induit. Le couple électromagnétique noté  $T_{em}$  est égale à  $P_{em}/\Omega$ , avec  $P_{em} = E_{ch} \cdot I$

Finalement

$$C_{em} = E_{ch} \cdot I / \Omega = K_e \cdot \phi_{ch} \cdot n \cdot I / \Omega = K_e \cdot \phi_{ch} \cdot I / 2\pi = K_m \cdot \phi_{ch} \cdot I \quad (5.5)$$

avec  $K_m = K_e / 2\pi$

si l'excitation est constante le couple électromagnétique est proportionnel au courant absorbé



## 5.6 Etude de l'induit en charge

### 5.6.1 Réaction magnétique de l'induit

On rappelle que l'induit tournant est le siège d'une :

- Force électromotrice, le cas d'une génératrice
- Force contre électromotrice , le cas d'un moteur

Dans les deux cas ,chaque conducteur actif de l'induit sera traversé par un courant  $I/2a$ .

Ces courants créent un flux magnétique d'induit dit de réaction magnétique de l'induit(R.M.I) qui d'après(LENZ) s'oppose au flux à vide. On aura ainsi  $E_{ch} < E_0$  (malgré l'excitation est maintenue constante). $\epsilon(I) = E_0 - E_{ch}$  est appelé la chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit.

Les modèles équivalents de l'induit lors d'un fonctionnement générateur ou moteur sont donnés par les schémas suivants ;

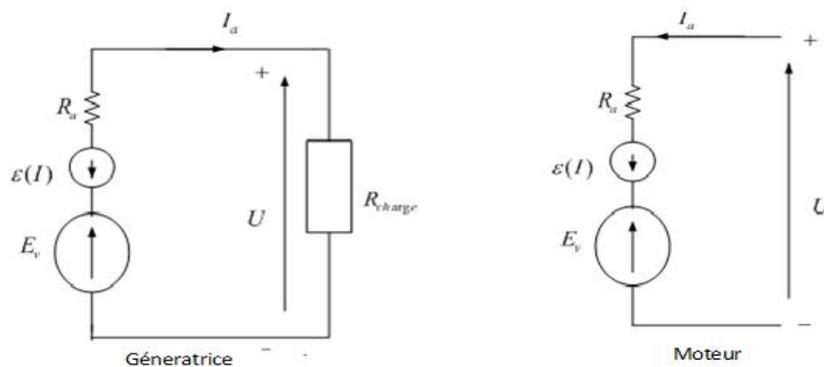


FIGURE 5.8 – Schéma équivalent

avec  $I_a$  : courant d'induit ;  $R_a(\Omega)$  : Résistance de l'induit et  $E_v = E_0$  : fem à vide

Par conséquent, en charge, les lois des mailles appliquées à l'induit donne :

$$U = E_v - \epsilon(I_a) + R_a \cdot I_a \text{ le cas d'un moteur}$$

$$U = E_v - \epsilon(I_a) - R_a \cdot I_a \text{ le cas d'une génératrice}$$

### 5.6.2 Répartition de flux magnétique en charge

La réaction magnétique de l'induit distorde les lignes de champ de telle sorte que la ligne neutre magnétique sera décalée :

- Dans le sens de rotation pour une génératrice
- Dans le sens contraire pour un moteur

Ce décalage est d'autant plus important que la charge est plus intense. Il en résulte que

les balais placés sur l'axe interpolaire ne collectent plus une f.e.m maximale car une partie des conducteurs auront de f.e.m opposées au reste de conducteurs.

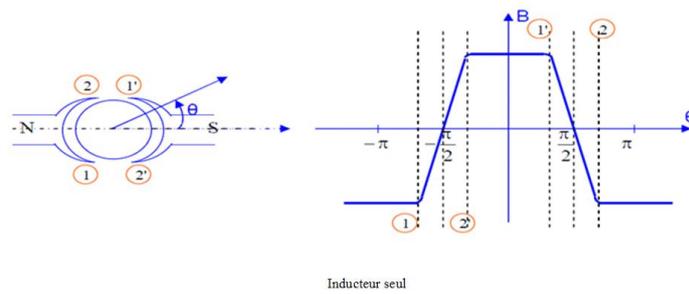


FIGURE 5.9 – Champ créé par l'inducteur

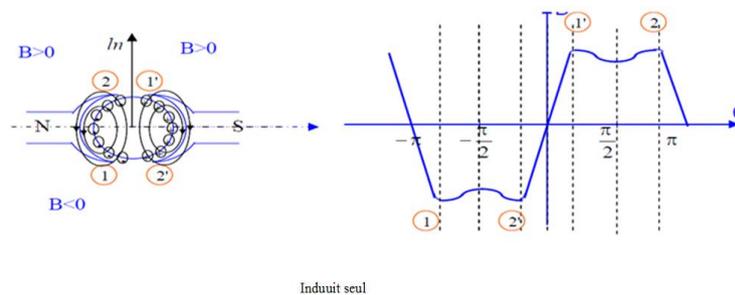


FIGURE 5.10 – Champ créé par l'induit

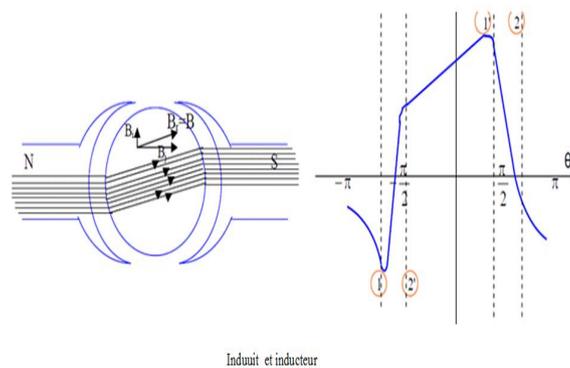


FIGURE 5.11 – Champ Résultant

### 5.6.3 Compensation de la réaction magnétique de l'induit

Pour remédier aux problèmes causés par la R.M.I :

- En génératrice , la diminution du flux provoque une chute de tension
- En moteur, la diminution du flux peut entraîner l'emballement de vitesse.

On peut :



placés sur les lignes neutres théoriques (axes interpolaires), ayant des noyaux de faible largeur, leurs enroulements sont traversés par le courant induit et produisant des pôles ayant le même nom que le pôle principal suivant dans le sens de rotation. Ces pôles engendrent dans la section en commutation une f.e.m de renversement croissante avec la charge et qui s'oppose à la f.e.m d'auto-induction et aide le courant à s'inverser sans arcs.

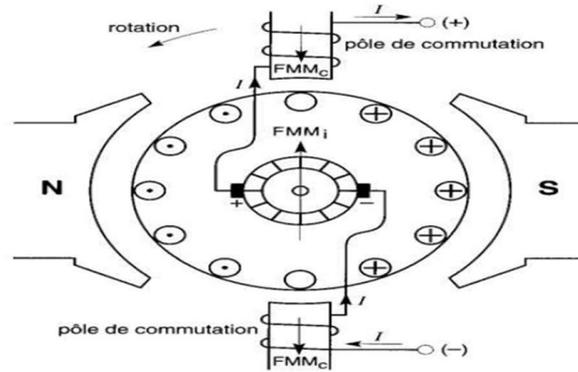


FIGURE 5.14 – Pôles de commutation



# Chapitre 6

## Les génératrice à courant continu

### 6.1 Introduction

Les machines à courant continu sont essentiellement destinés pour fonctionner en moteur ; le génératrice en tant que machine a été totalement remplacée par des dispositifs électroniques statiques réalisant la conversion alternatif-continu (Redresseurs). Cependant il est intéressant de connaître le fonctionnement générateur et ceci, au moins, pour deux raisons :

- Pour maîtriser le fonctionnement moteur, il est intéressant d'assimiler le fonctionnement générateur.

- Lors de son fonctionnement, le moteur accouplé à sa charge mécanique, peut parfois fonctionner en génératrice, afin de freiner cette charge. Par exemple, en traction électrique et

dans le cas d'un métro en descente, la vitesse va se maintenir raisonnable grâce au freinage par récupération.

Pour que le f.e.m existe, il faut deux conditions :

- La machine doit être entraînée à une vitesse de rotation  $n$  (par exemple à l'aide d'un moteur auxiliaire)

- L'existence d'un champ magnétisant, donc l'inducteur doit être alimenté par une tension continue (sauf les cas des aimants permanents).

Il existe 4 modes d'alimentation de l'inducteur (on dit aussi excitation) : excitation séparée, excitation shunt, excitation série et excitation composée (compound).

### 6.2 Caractéristiques usuelles

Les variables de fonctionnement d'une génératrice sont :

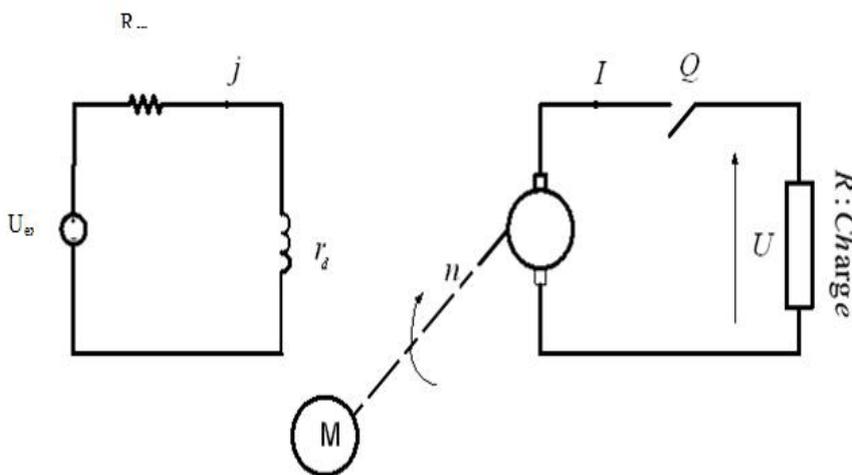
- La vitesse de rotation  $n$
- Le courant d'excitation ( $I_e$  ou  $j$ )
- La tension aux bornes de l'induit  $U$
- Le courant d'induit  $I$
- La tension d'alimentation de l'inducteur  $U_{ex}$

Il en résulte , les caractéristiques usuelles suivantes :

- Caractéristiques á vide (ou interne) :  $E_0 = f(I_e) = f(j)$  à une vitesse de rotation fixe
- Caractéristique en charge (externe)  $U=f(I)$  à  $n=cte$  et  $j$  constant
- Caractéristiques de réglage  $I = f(j)$  'a  $U=cte$  et  $n=cte$

## 6.3 Génératrice à excitation séparée

### 6.3.1 Schéma et equations de fonctionnement



avec  $U_{ex}$  :Tension d'excitation ; $R_{ex}$  :Rhéostat d'excitation ; $r_d$  :Résistance de l'enroulement de l'inducteur et  $R_a$  :Résistance de l'induit.

Le courant d'excitation est  $j = U_{ex}/r_d + R_{ex}$

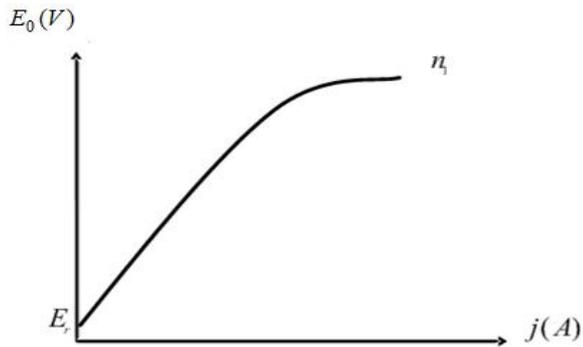
La tension aux bornes de l'induit est  $U = E_0 - \varepsilon(I) - R_a.I$  avec  $\varepsilon(I)$  :Chute de tension dûe à la réaction magnétique de l'induit.

### 6.3.2 Caractéristique à vide

La caractéristique à vide (interne) est  $E_0 = f(j)$  à une vitesse de rotation constante.

L'interrupteur Q est ouvert (la charge est isolée), on maintient la vitesse de rotation à sa valeur nominale , à l'aide de rhéostat d'excitation on varie le courant d'excitation  $j$  et on mesure

la tension aux bornes de l'induit.



-Pour  $j = 0 \Rightarrow E_0 = E_r$  : f.e.m rémanente .On constate que  $E_r \ll U_n$  (Tension nominale)

-Pour les faibles valeurs de  $j$  le circuit magnétique n'est pas saturé, le flux  $\phi$  est proportionnel à  $j$  donc  $E_0 = f(j)$  est une droite.

-Pour des valeurs d'excitations importantes, le circuit magnétique va se saturer et l'accroissement de la f.e.m sera moins vite que précédemment.  $E_0 = f(j)$  présente donc une coude de saturation.

- à la saturation, même si on augmente l'excitation la f.e.m à vide  $E_0 = \text{constante}$

### Remarques

-Pour minimiser les pertes joule inducteur et obtenir une f.e.m considérable, on doit travailler dans la zone de coude de saturation

-Si on connaît la caractéristique à vide d'une génératrice à une vitesse de rotation  $n_1$ , pour déterminer la caractéristique à vide à une vitesse de rotation  $n_2$ , il suffit de multiplier toutes les ordonnées par le rapport  $n_2/n_1$

$$E_2 = E_1 \cdot n_2/n_1$$

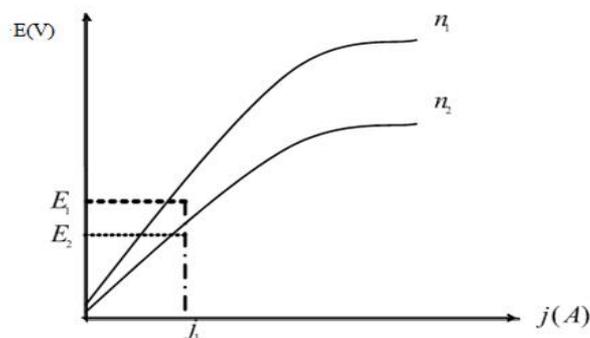


FIGURE 6.1 – Caractéristique à vide

### 6.3.3 Caractéristique en charge

c'est la courbe  $U = f(I)$  à  $j$  et  $n$  constantes. On fait varier le courant à l'aide de la charge  $R$  et on relève la tension aux bornes de l'induit tout en maintenant la vitesse et l'excitation constante. On obtient l'allure suivante :

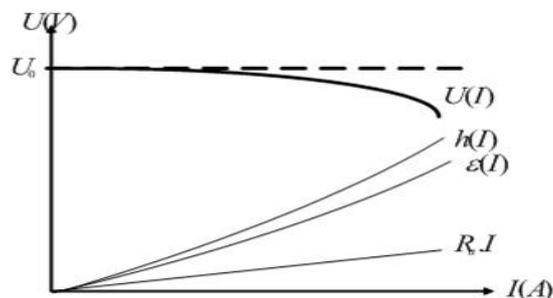


FIGURE 6.2 – Caractéristique en charge

Pour un régime de fonctionnement en charge (pour  $I$  donné), la chute de tension due à la réaction magnétique de l'induit est donnée par  $\varepsilon(I) = E_0 - E_{ch}$ .

La loi des mailles appliquée à l'induit nous donne  $U = E_0 - (\varepsilon(I) + R_a \cdot I) = E_0 - h(I)$

avec  $h(I) = \varepsilon(I) + R_a \cdot I$  : chute de tension totale de l'induit.

Lorsque le courant  $I$  croît, la tension  $U$  diminue, donc la courbe  $U = f(I)$  est décroissante et s'incurve de plus en plus à cause de  $\varepsilon(I)$

### 6.3.4 Caractéristique de réglage

c'est la courbe  $I = f(j)$  à  $U = cte$  et  $n = cte$ . On peut obtenir directement par l'expérience, les différentes valeurs de l'excitation permettant pour les différents courants d'induit, afin de maintenir la tension constante. L'allure est donnée ci-dessous.

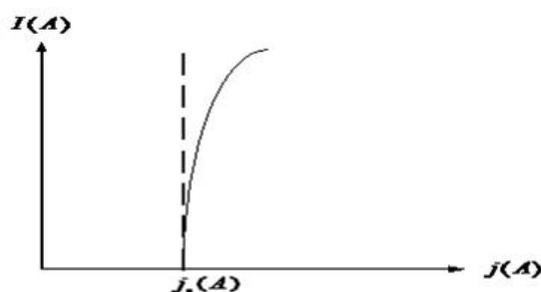


FIGURE 6.3 – Caractéristique de réglage

Le courant  $j_0$  correspond au fonctionnement à vide. Lorsque  $I$  augmente, la tension  $U$  diminue

il faut augmenter le courant  $j$  (diminuer le rhéostat d'excitation) pour compenser la chute de tension totale de l'induit.

## 6.4 Génératrice à excitation shunt

Dans ce cas l'alimentation de l'inducteur se fait à travers la tension fournie par l'induit (la génératrice est autoexcitée)

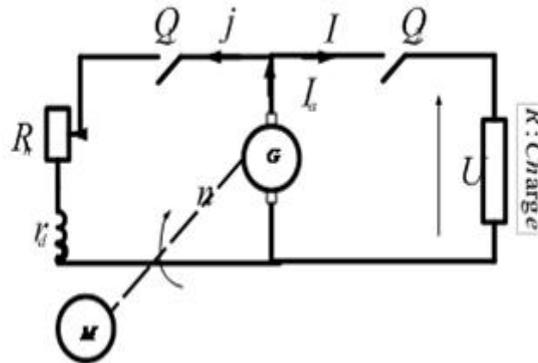


FIGURE 6.4 – Génératrice shunt

La loi des mailles appliquées au :

- Circuit Inducteur donne  $j = U / (R_h + r_d)$
- Circuit induit donne  $U = E_0 - \varepsilon(I) - R_a \cdot I$

### 6.4.1 Problème d'amorçage

La génératrice est entraînée à sa vitesse nominale et excitée par son excitation nominale elle est dit amorcée si elle délivre une tension de l'ordre de sa tension nominale. Ce problème on le résout à vide.

La génératrice est entraînée à sa vitesse de rotation nominale, l'interrupteur  $Q_1$  est ouvert  $\Rightarrow j = 0 \Rightarrow U = E_r \ll U_n$  (Tension nominale). Lorsque on ferme  $Q_1$ , deux situations se présentent :

- Soit  $U$  augmente donc  $j \nearrow \Rightarrow E_0 \nearrow \Rightarrow$  la génératrice s'amorçe
- Soit  $U \searrow$  donc  $j \searrow \Rightarrow E_0 \searrow \Rightarrow$  ne s'amorçe pas

Pour résoudre le problème d'amorçage, il faut choisir l'une de deux solutions suivantes :

- \*Changer le sens du rotation du moteur d'entraînement
- \*Permuter les deux bornes de l'inducteur

### 6.4.2 Fonctionnement à vide

Tout d'abord on précise que  $E_0 = f(j)$  ne dépend ni du mode d'excitation, ni du mode de fonctionnement, car elle représente la courbe d'aimantation du circuit magnétique. Il est toujours recommandé de la relever en génératrice à excitation séparée.

L'inducteur et l'induit sont connectés en parallèle, la tension à vide est  $U_0 = E_0 = (R_h + r_a) \cdot j_0$

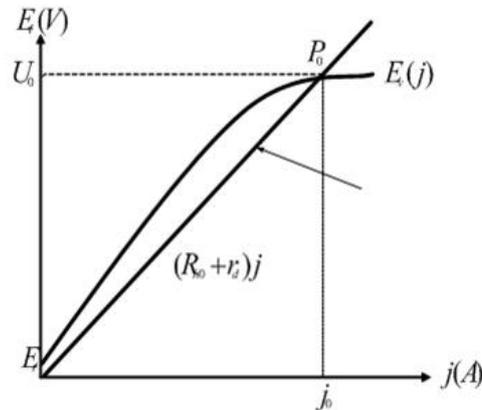


FIGURE 6.5 – Point de fonctionnement d'une génératrice shunt

### 6.4.3 Caractéristique en charge

c'est la courbe  $U = f(I)$  à  $j$  et  $n$  constantes. Chaque fois qu'on varie la charge, la tension  $U$  diminue ce qui a pour effet de diminuer le courant d'excitation. C'est pourquoi on diminue le rhéostat d'excitation afin de fixer le courant  $j$

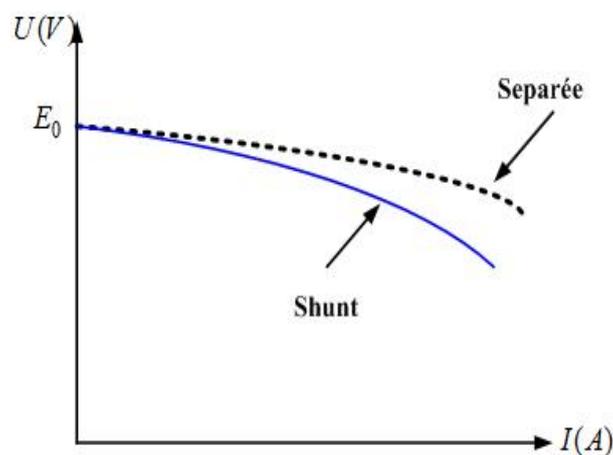


FIGURE 6.6 – Caractéristique en charge

$U = f(I)_{shunt}$  est plus tombante que  $U = f(I)_{sep}$  car contrairement à l'excitation séparée car  $j$  n'est plus constant.

## 6.5 Bilan de puissance d'une génératrice à courant continu

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

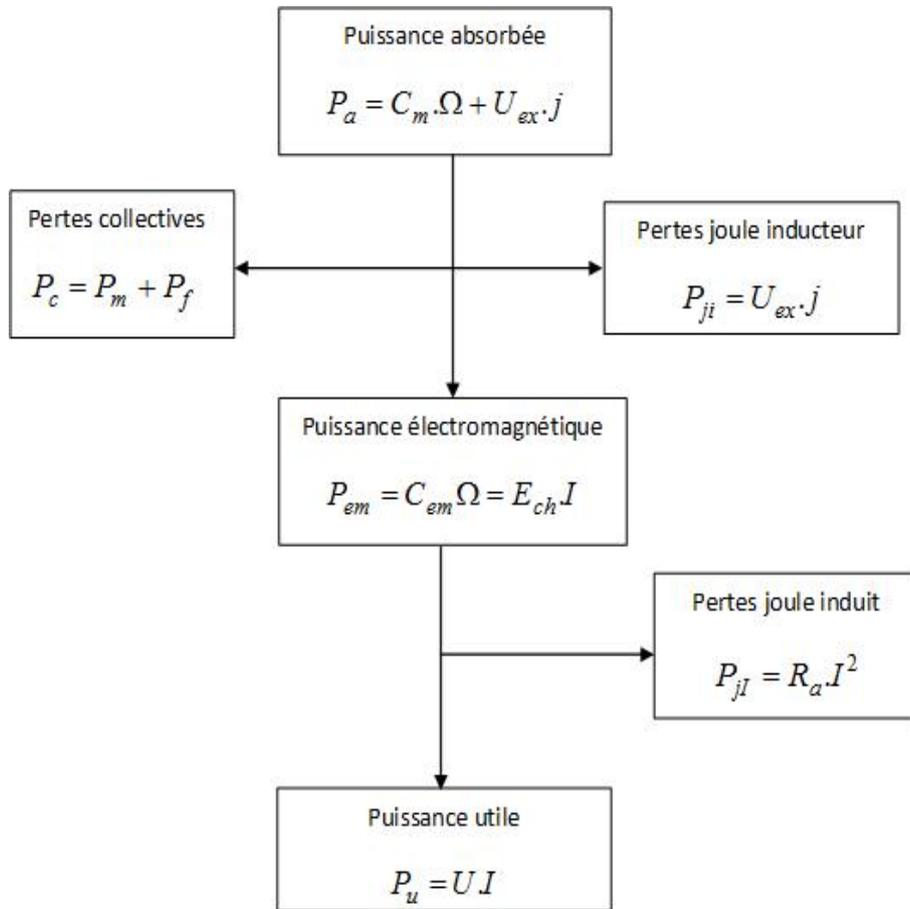


FIGURE 6.7 – bilan de puissance



# Chapitre 7

## Les moteurs à courant continu

L'utilisation en moteur de la machine à courant continu est très répandue surtout pour le fonctionnement à vitesse réglable, pour les asservissements et en traction électrique.

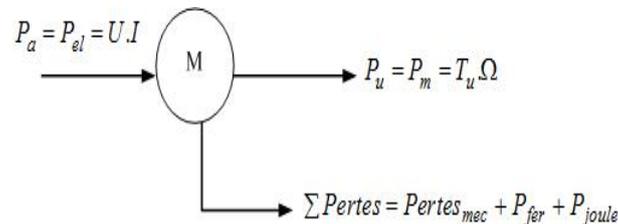
### 7.1 La loi de Laplace

#### Énoncé

Un conducteur parcouru par un courant  $I$  et plongé dans un champ magnétique  $\vec{B}$  subit une force mécanique  $\vec{F}$  appelée une force de Laplace. **Utilité** on peut faire bouger des circuits électriques avec des champs magnétique

### 7.2 Principe de fonctionnement

On alimente l'inducteur par une tension d'excitation  $U_{ex}$  et on alimente l'induit par une tension  $U$ , ce dernier se met en rotation .Il convertit l'énergie électrique en mécanique.



### 7.3 Hypothèse

Pour simplifier l'étude théorique, nous allons supposer que notre moteur est parfaitement compensé, par conséquent la réaction magnétique de l'induit sera négligée ( $\varepsilon(I) = 0$ ). Il en découle que  $E = E_0 = K_e \cdot n \cdot \phi$ . Le modèle équivalent de l'induit devient :

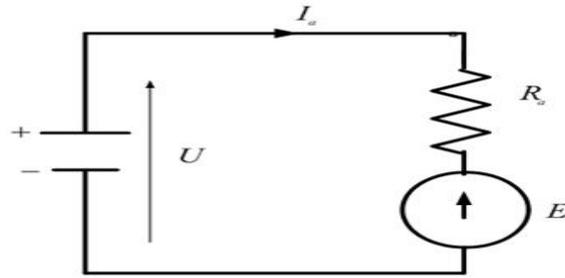
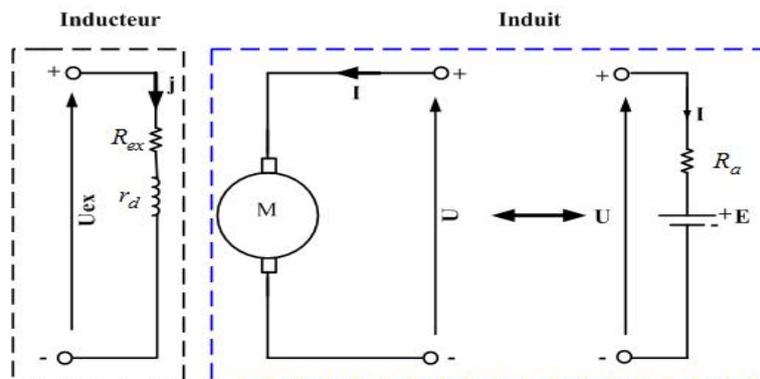


FIGURE 7.1 – Schéma équivalent de l'induit

## 7.4 Moteur à excitation indépendante alimenté sous une tension variable

L'inducteur est alimenté par une tension indépendante à celle de l'induit



### 7.4.1 Démarrage

Au démarrage  $\Omega_d = 0 \Rightarrow E_d = 0$ , le courant de démarrage est  $I_d = U/R_a \gg I_n$ , pour diminuer ce courant, il faut démarrer le moteur à tension réduite (ceci est possible car la tension d'alimentation est variable)  $\Rightarrow I_d = U_d/R_a$  avec  $U_d$  : la tension de démarrage.

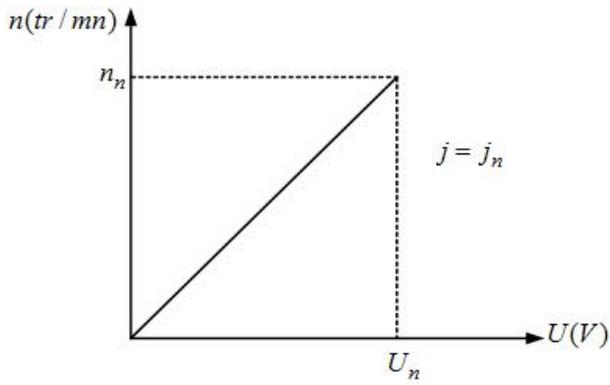
Si la tension  $U$  est constante, il faut insérer un rhéostat de démarrage  $R_{HD}$  en série avec l'induit (elle est maximale à l'instant de démarrage, elle est nulle lorsque le moteur atteint sa vitesse de rotation nominale). Le courant de démarrage est  $I_d = U/(R_a + R_{HD})$ .

### 7.4.2 Fonctionnement à vide

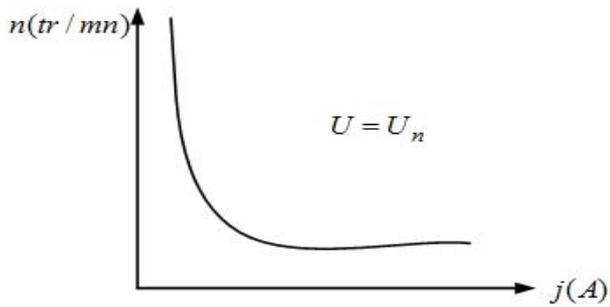
Le moteur n'entraîne aucune charge mécanique. Le courant absorbé à vide est  $I_0$

$E_0 = U - R_a \cdot I_0 = K_e \cdot \phi_0 \cdot n_0 \Rightarrow n_0 = (U - R_a \cdot I_0)/(K_e \cdot \phi_0) \approx U/K_e \cdot \phi_0$ . La variation de la vitesse se fait soit :

-Par variation de la tension d'alimentation  $U$



-Par variation de courant d'excitation  $j$



### 7.4.3 Fonctionnement en charge

Dans ce cas, la tension d'alimentation de l'induit et le courant d'excitation sont réglés à leurs valeurs nominaux

#### Caractéristique de la vitesse

La loi des mailles à l'induit donne  $U = E_0 + R_a \cdot I$  donc

$$n = (U - R_a \cdot I) / K_e \cdot \phi_0 = (U / K_e \cdot \phi_0) \cdot (1 - R_a \cdot I / U) = n_0 \cdot (1 - R_a \cdot I / U) \quad (7.1)$$

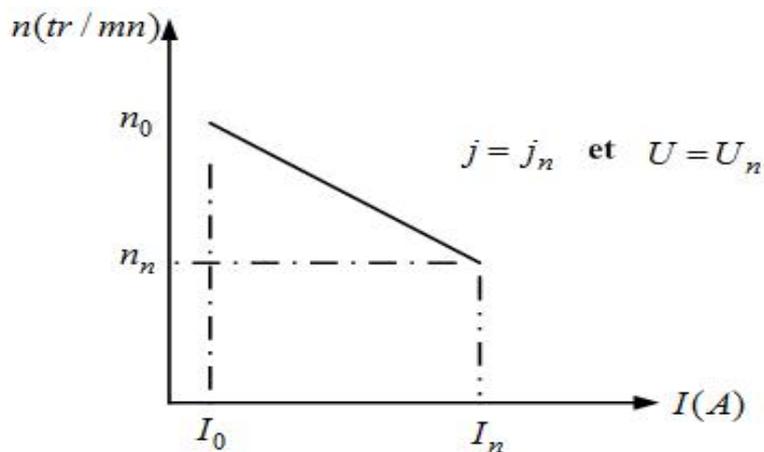


FIGURE 7.2 – Allure de la vitesse

**Caractéristique du couple** L'excitation est constante, Le couple électromagnétique est proportionnel au courant induit  $T_{em} = K_m \cdot I$ , avec  $K_m = K_e / 2\pi \cdot \phi$

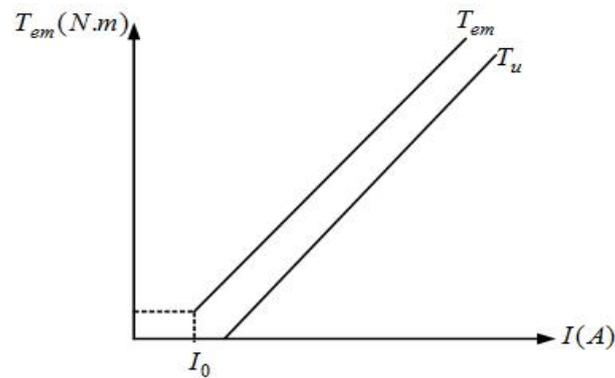


FIGURE 7.3 – Allure du couple

### Caractéristique mécanique

Cette caractéristique représente la variation de couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation  $n$  et  $U$  donnés.

Le couple est donné par la relation  $C_{em} = K_m \cdot I$

Le schéma électrique de l'induit permet d'écrire la relation :

$$I = (U - E) / R_a = (U - K_e \cdot \phi \cdot n) / R_a$$

cette relation conduit à :

$$C_{em} = K_m \cdot (U - K_e \cdot \phi \cdot n) / R_a = -(K_e \cdot \phi)^2 / (R_a \cdot 2\pi) \cdot n + K_e \cdot U / R_a$$

La caractéristique mécanique est donc une droite de pente fortement négative compte tenu de la faible valeur de la résistance de l'induit

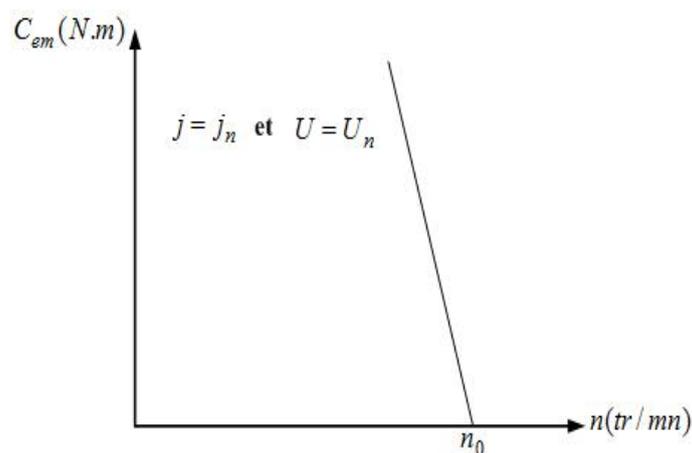


FIGURE 7.4 – Caractéristique mécanique

### Conclusion

Le moteur à excitation séparée est bien adaptée à une commande :

- En vitesse par action sur la tension d'induit qui est pratiquement proportionnelle à la vitesse de rotation à courant d'excitation constant
- En couple par action sur le courant d'induit

## 7.5 Moteur à excitation shunt alimenté sous une tension constante

### 7.5.1 Démarrage

L'induit et l'inducteur sont montés en parallèle. La tension d'alimentation est constante, au démarrage l'appel de courant est énorme. On risque alors d'endommager le collecteur et de brûler l'induit, il faut donc prendre des précautions pour limiter le courant de démarrage à une valeur raisonnable de l'ordre de 1.5 à 2 fois le courant nominal. Pour réduire le courant au démarrage, il suffit de monter en série avec l'induit un rhéostat de démarrage. Cette résistance introduite est progressivement diminuée à mesure que le moteur accélère et finalement éliminée de circuit dès que le moteur atteint sa vitesse en régime permanent. Pour assurer un couple de démarrage suffisant, il faut que le flux soit grand c'est à dire l'inducteur est connecté directement à la tension d'alimentation.

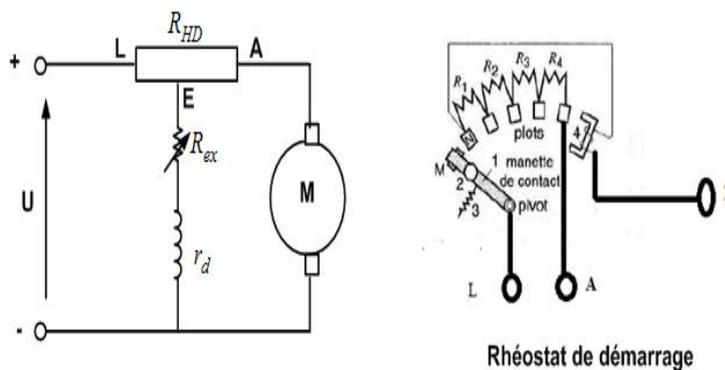


FIGURE 7.5 – Moteur Shunt

Le courant de démarrage est  $I_d = U / (R_a + R_{HD})$

Le couple de démarrage est  $C_d = (K_e / 2\pi) \cdot \Phi \cdot I_d$

### 7.5.2 Caractéristique de la vitesse

C'est la caractéristique qui décrit la variation de la vitesse de rotation en fonction du courant absorbé par l'induit en fixant la tension d'alimentation et le courant d'excitation à leurs valeurs nominaux.

l'expression de la vitesse de rotation est la suivante :

$$n = E/(K_e \cdot \Phi) = (U - R_a \cdot I)/(K_e \cdot \Phi) = n_0 \cdot (1 - R_a \cdot (I - I_0)/U) \quad (7.2)$$

avec  $n_0 = U/(K_e \cdot \Phi)$  est la vitesse de rotation à vide et  $I_0$  est le courant absorbé à vide.

Pour maintenir le flux constant, il faut augmenter le courant d'excitation  $j$  lorsque  $I$  augmente, ce qui a comme effet la diminution du rendement du moteur (à cause de l'augmentation des pertes par effet joule inducteur).

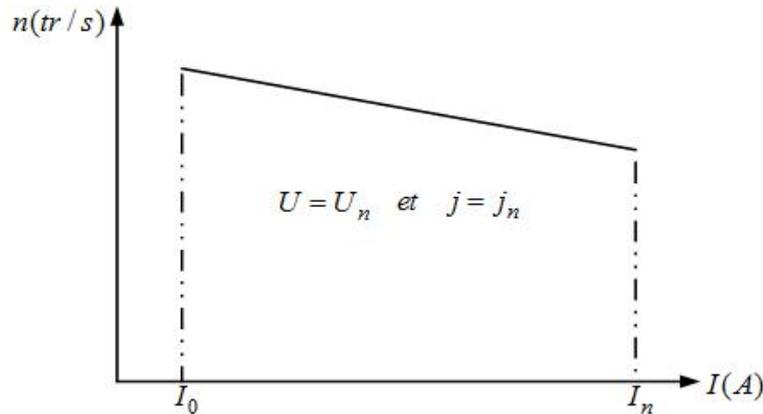


FIGURE 7.6 – Caractéristique de la vitesse

### 7.5.3 Caractéristique du couple

Si on maintient le flux constant, le couple électromagnétique est proportionnel au courant induit.

$$C_{em} = E \cdot I / \Omega = (K_e / 2\pi) \cdot \Phi \cdot I = K_m \cdot I \text{ avec } K_m = K_e \cdot \Phi / 2\pi \text{ est la constante du couple.}$$

D'après le bilan de puissance d'un moteur à courant continu  $P_{em} = P_u + P_c$

$$C_u = C_{em} - C_p \text{ avec } C_p = P_c / \Omega \text{ désigne le couple de pertes.}$$

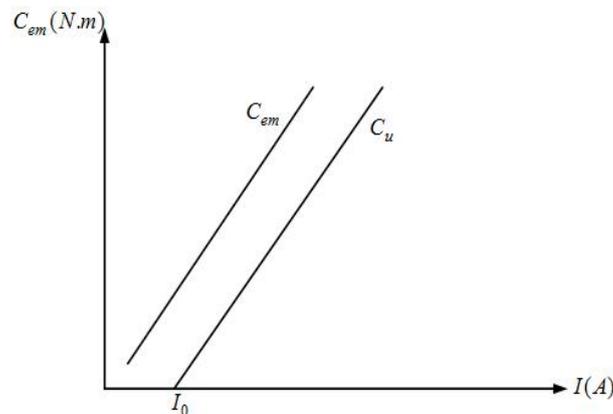


FIGURE 7.7 – Caractéristique du couple

## 7.6 Moteur à excitation série alimenté sous une tension constante

Dans ce cas le courant  $I$  joue le rôle de courant inducteur et de courant induit.

### 7.6.1 Constitution

Pour minimiser les pertes joule de l'inducteur, celui-ci devra présenter une résistance  $R_s$  la plus faible possible. Le courant inducteur est élevé, un nombre de spires réduit est suffisant pour produire une force magnétomotrice considérable (flux magnétique). Il sera de section importante et de faible longueur, sa résistance est faible, elle est de même ordre de grandeur que celle de l'induit.

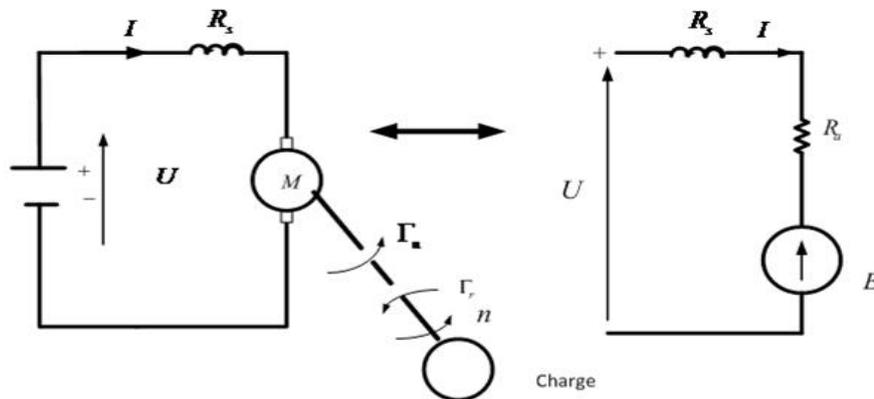


FIGURE 7.8 – Moteur série

La tension d'alimentation est constante, pour réduire le courant de démarrage  $I_d$ , il faut insérer un rhéostat de démarrage  $R_{HD} = U/I_d - (R_a + R_s)$  avec  $R_a$  et  $R_s$  désignent respectivement la résistance de l'induit et celle de l'inducteur

### 7.6.2 Caractéristiques électromécaniques

#### Caractéristique de la vitesse à $U = \text{cte}$

On distingue deux zones de fonctionnement :

Pour les faibles valeurs du courant  $I$ , le circuit magnétique n'est pas saturé  $\Rightarrow \phi = \alpha \cdot I$

donc  $E = K_e \cdot \alpha \cdot I \cdot n$

- Pour les fortes valeurs du courant  $I$ , le circuit magnétique est saturé, le flux inducteur est

$\phi = \phi_{sat}$

la vitesse de rotation est  $n = E / (K_e \cdot \alpha \cdot I) = U / (K_e \cdot \alpha \cdot I) - (R_a + R_s) / (K_e \cdot \alpha)$ . On constate que si  $I \rightarrow 0$  (Le moteur fonctionne à vide), le moteur s'emballe ( $n \rightarrow \infty$ ).

Donc on ne doit jamais demarrer un moteur série à vide.

La variation de la vitesse en fonction de courant est hyperbolique (si le circuit magnétique n'est pas saturé)

Si le circuit magnétique est saturé, la vitesse de rotation est  $n = U/K_e \cdot \phi_{sat} - R_a \cdot I / K_e \cdot \phi_{sat}$  (c'est une variation linéaire décroissante)

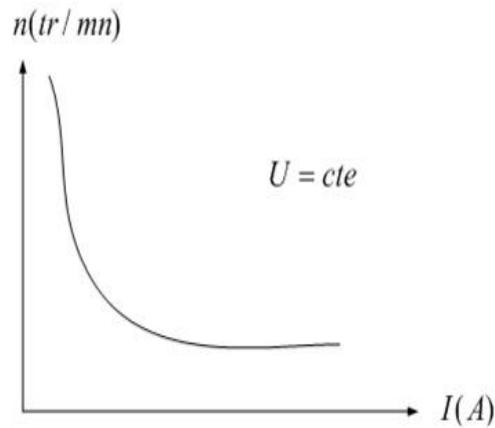


FIGURE 7.9 – Caractéristique de la vitesse

### Caractéristique de couple

On sait que le couple électromagnétique est  $C_{em} = K_e \cdot \Phi \cdot I / 2\pi$

-Si le circuit magnétique est saturé  $C_{em} = (K_e \cdot \alpha / 2\pi)^2 \cdot I$ , c'est une variation parabolique en fonction du courant induit

-Dans le cas de saturation  $C_{em} = (K_e / 2\pi) \cdot \Phi_{sat} \cdot I$ , c'est une variation linéaire en fonction de courant  $I$

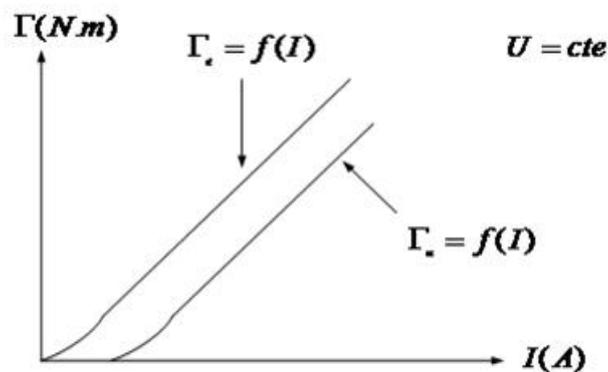


FIGURE 7.10 – Caractéristique du couple

### 7.6.3 Caractéristique mécanique

Cette caractéristique est obtenue par élimination de  $I$  à partir des expressions de  $C_{em}$  et  $n$

Le courant est  $E = U - R_t.I \approx U = K_e.\Phi.n \Rightarrow n = U/K_e.\Phi$

Si le circuit magnétique n'est pas saturé, le flux est  $\Phi = \alpha.I \Rightarrow n = U/K_e.\alpha.I$

donc  $I = U/K_e.n.\alpha$

Le couple électromagnétique est  $C_{em} = K_m.\alpha.I^2 = (U^2/(K_e.2\pi.\alpha))/n^2$ ; Il varie en raison inverse du carré de la vitesse.

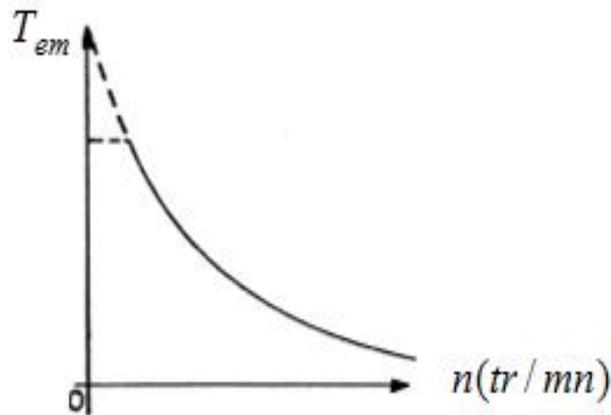


FIGURE 7.11 – Caractéristique mécanique

## 7.7 Moteur à excitation composée

Le moteur à excitation séparée ne s'emballe à vide mais il appelle un fort courant si le couple est considérable; le moteur série s'emballe à vide, mais réduit les appels de courant puisque  $I \sim \sqrt{T_{em}}$ . Pour cela, on utilise un moteur à excitation composée pour combiner les avantages de moteur série et séparée. Le moteur à excitation composée possède deux inducteurs :

- L'un comportant  $N_e$  spires, parcouru par le courant  $j$
- L'autre comportant  $N_s$  spires, parcouru par le courant  $I$

La force magnétomotrice totale est  $N_e.j' = N_e.j \pm N_s.I$ , le signe dépend de sens des enroulements :

- Montage additif, la f.m.m totale est  $N_e.j' = N_e.j + N_s.I$
- Montage soustractif, la f.m.m totale est  $N_e.j' = N_e.j - N_s.I$

avec  $j'$  est le courant fictif qui circule dans l'enroulement parallèle et produit le même flux magnétique. Il est égal à  $j' = j \pm \alpha.I$   $\alpha = N_s/N_e$  est le rapport d'équivalence.

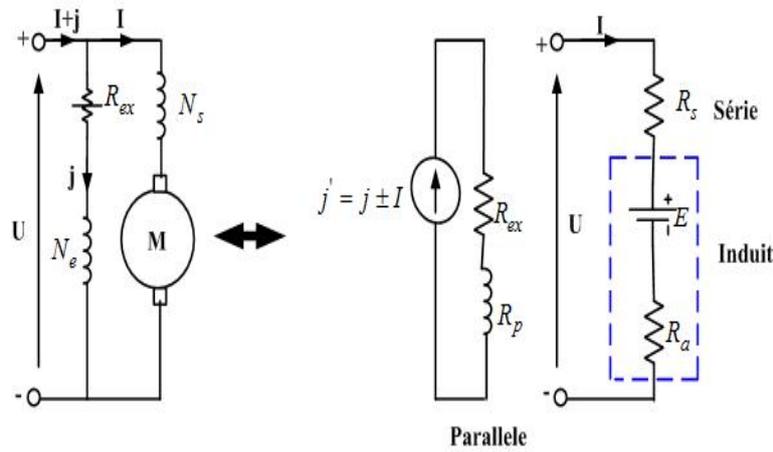


FIGURE 7.12 – Moteur à excitation composée

### 7.7.1 Caractéristique de couple

Le couple électromagnétique est  $C_{em} = (K_e/2\pi) \cdot \Phi(j') \cdot I$

Dans le cas de montage additif, le flux  $\Phi(j') > \Phi(j) \Rightarrow$  donc le couple électromagnétique est supérieur à celui d'un moteur à excitation séparée.

Si le montage est soustractif, le couple électromagnétique est inférieur à l'excitation séparée

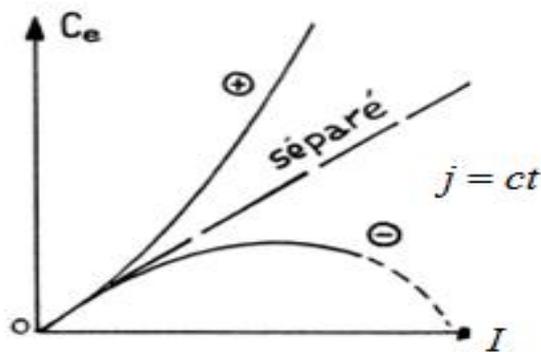


FIGURE 7.13 – Caractéristique du couple

### 7.7.2 Caractéristique de la vitesse

La vitesse de rotation est  $n = (U - R_t \cdot I) / K_e \cdot \Phi(j')$  avec  $R_t = R_a + R_s$ . Elle est inversement proportionnelle au flux  $\Phi(j')$ .

-Si le flux est additif, la vitesse diminue (elle est plus faible que celle d'un moteur séparée)

-Si le flux est soustractif, le flux  $\Phi(j')$  diminue lorsque  $I$  augmente. La vitesse de rotation augmente.

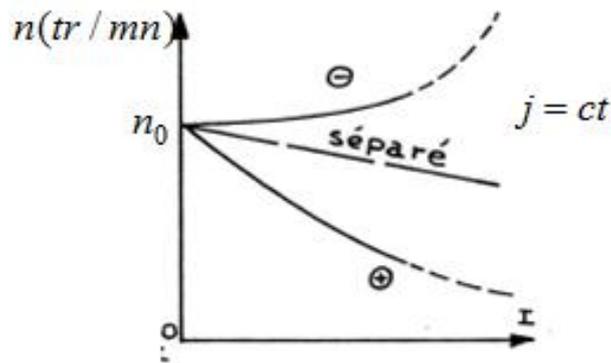


FIGURE 7.14 – Caractéristique de la vitesse

### 7.7.3 Caractéristique mécanique

Elle est obtenue en éliminant le courant  $I$  de deux courbes précédentes

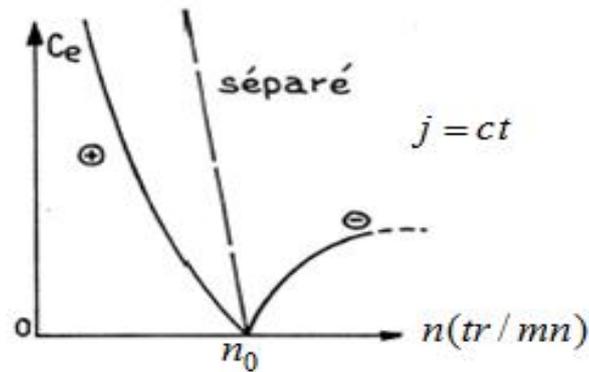


FIGURE 7.15 – Caractéristique mécanique

## 7.8 Comparaison entre moteur série et shunt

- Le moteur série supporte bien les surcharges que le moteur shunt. En effet, pour un même accroissement de couple, l'appel de courant qu'il provoque est moindre que dans un moteur shunt.
- Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation; contrairement au moteur shunt (son excitation dépend de la tension d'alimentation). c'est un avantage en traction ou, en bout de ligne un moteur peut être alimenté à tension assez faible (à cause de la forte chute en ligne). Le moteur série permet de monter une cote, tandis que le moteur shunt absorbant un courant excessif peut être détruisant
- L'emballement du moteur série à vide est un inconvénient sérieux qui limite son emploi.
- Le moteur série est surtout utilisé en traction électrique ou l'on apprécie sa robustesse (enroulement inducteur gros fil ne risque pas la rupture) et surtout son autorégulation

de puissance qui lui permet de ralentir en cote et de monter sans échauffement exagéré. On l'emploie également dans les entraînements des appareils pour lesquels le couple résistant croît rapidement avec la vitesse (ventilateurs, compresseurs pompes centrifuges).

- Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse, il convient dans les entraînements des machines dont la vitesse doit rester sensiblement constante. On l'emploie également dans les entraînements des appareils de levage ou la charge peut être supprimée brusquement et ou avec moteur série, il y'a risque d'emballement

## 7.9 Bilan de puissance d'un moteur à courant continu

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

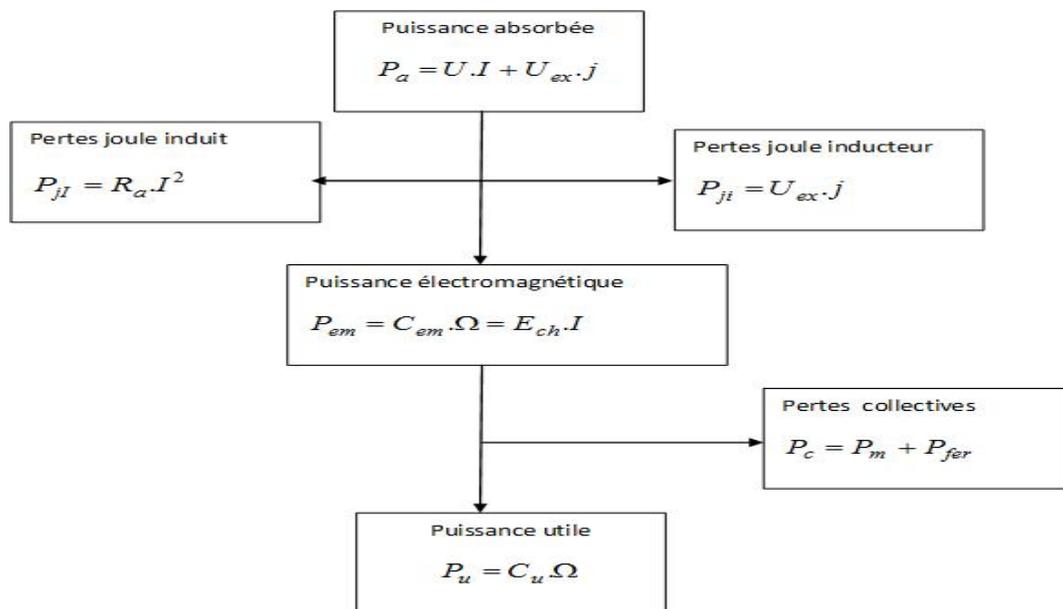


FIGURE 7.16 – Bilan de puissance d'un moteur à courant continu

# Chapitre 8

## Les Machines synchrones

### 8.1 Introduction

La machine synchrone est le plus souvent utilisée en générateur ,on l'appelle alternateur.On l'utilise dans les centrales électriques, dans les voitures et dans les groupes electrogenes.Comme toutes les machines électriques tournantes, la machine synchrone est réversible et peut également fonctionner en moteur synchrone.

### 8.2 Symbole

Les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice (alternateur) sont les suivants :

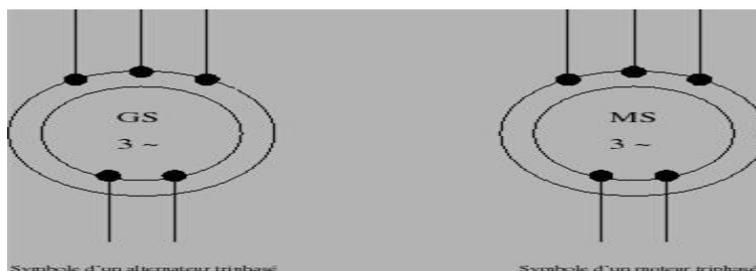


FIGURE 8.1 – Symbole d'une machine synchrone

### 8.3 Constitution

Une machine synchrone est constituée par :

-Un stator fixe, Il est constitué par trois enroulements identiques décalés l'un par rapport à l'autre d'un angle égal à  $2\pi/3$ .

-Rotor, il est constitué par un bobinage parcouru par un courant continu (courant d'excitation), c'est lui qui va créer des pôles magnétiques (Nord et Sud). Il est parfois remplacé par des aimants permanents surtout pour les petites et moyennes puissances.

## 8.4 Alternateur

### 8.4.1 Création de forces électromotrices triphasées

La conversion électromécanique s'opère par interaction entre un champ magnétique inducteur et des conducteurs, aux bornes desquels apparaît une force électromotrice induite. En effet, si l'on place une bobine de  $N$  spires dans un flux variable, elle est le siège d'une force électromotrice  $e(t) = -N.d\phi(t)/dt$ . Si le bobinage du stator est triphasé, on obtient trois forces électromotrices induites déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle  $2\pi/3$ , si le flux magnétique est sinusoïdal, la force électromotrice l'est aussi. Elle a comme valeur efficace :

$$E = K_b \cdot N \cdot f \cdot \phi \quad (8.1)$$

avec :  $K_b$  : facteur de bobinage,  $N$  : Nombre des conducteurs par phase,  $f$  : Fréquence en Hz,  $\phi$  : Flux utile par pôle

### 8.4.2 Caractéristique à vide

On entraîne le rotor à l'aide d'un moteur d'entraînement à sa vitesse de synchronisme et on l'alimente par une tension continue. On mesure le courant d'excitation  $I_e$  et la force électromotrice à vide  $E_0$

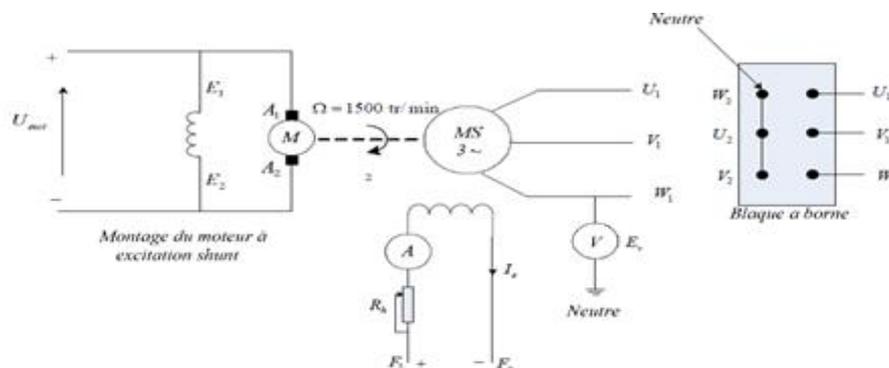


FIGURE 8.2 – Essai à vide

### 8.4.3 Fonctionnement en charge

#### Réaction magnétique d'induit

Le rotor tourne à une vitesse angulaire  $\Omega_s$ ; il crée un champ tournant  $\vec{B}_v$  et donc un système de f.é.m triphasés induites au stator.

La f.é.m induite dans l'enroulement 1 est  $e_1(t) = E_0 \cdot \sin(\omega t)$

En charge, le stator branché sur une charge triphasée équilibrée, est parcouru par trois courants équilibrés. Le courant circulant dans la phase 1 est  $i_1(t) = I_{max} \cdot \sin(\omega t - \psi)$

Les courants statoriques créent aussi un champ tournant  $B_I(t) = (3/2) \cdot K I_{max} \cdot \sin(\omega t - \psi)$ .

Ce dernier engendre avec  $\vec{B}_v$  un champ magnétique résultant.

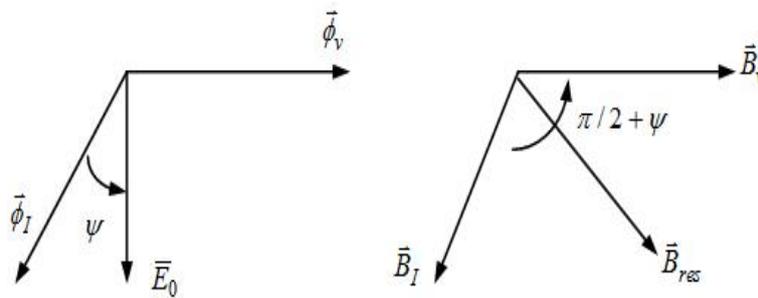


FIGURE 8.3 – Champ magnétique résultant

selon la valeur de  $\psi$  le champ résultant prend des directions remarquables.

-Si  $\psi = 0$ ; les deux champs sont perpendiculaires, l'alternateur est en réaction transversale

-si  $\psi = \pi/2$ ; les deux champs sont en opposition, l'alternateur est en réaction longitudinale démagnétisante

-Si  $\psi = -\pi/2$ , les deux champs sont de même sens, l'alternateur est en réaction longitudinale magnétisante

#### Modèle de l'alternateur non saturé

Le flux total à travers l'enroulement 1 est la somme :

-du flux à vide (créé par le courant inducteur :  $N \cdot \phi_{v1} = M_{sr} \cdot \cos(\omega t) \cdot I_e$  avec  $M_{sr}$  est

l'inductance mutuelle stator rotor

-Du flux créé par les courants statoriques :

$N \cdot \phi_I = L_s \cdot i_1(t) + M_s \cdot i_2(t) + M \cdot i_3(t) = (L_s - M) \cdot i_1(t)$  avec  $M$  est l'inductance mutuelle stator-stator

$L_s - M = \ell$  est l'inductance cyclique (dite de Behn-Eschenburg),  $X_s = \ell \cdot \omega$  : Réactance synchrone

Le flux résultant dans l'enroulement 1 est  $N.\phi_{res}(t) = \ell.i_1(t) + N.\phi_{v1}(t)$

Ce flux résultant est à l'origine de la force électromotrice induite  $e_1(t)$  telle que

$$e_1(t) = -N.d\phi_{res}(t)/dt$$

si on prend en compte les résistances des bobinages statoriques  $R_s$ , la tension  $v_1(t)$  aux bornes de

l'enroulement 1 s'écrit :

$$v_1(t) = e_1(t) - R_s.i_1(t), \text{ or } e_1(t) = -N.d\phi_{res}(t)/dt = e_0(t) - \ell.di_1(t)/dt$$

$$\text{donc } v_1(t) = -R_s.i_1(t) - \ell.di_1(t)/dt + e_0(t)$$

Les trois enroulements sont identiques, donc ils possèdent la même schéma équivalent monophasé représenté par la figure suivante :

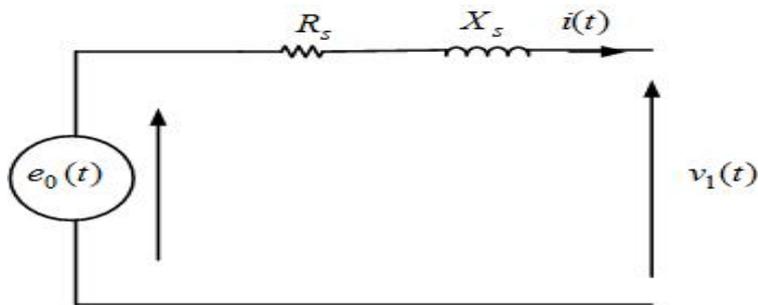


FIGURE 8.4 – Schéma équivalent monophasé

En régime sinusoïdal, la loi des mailles peut s'écrire en grandeurs complexes

$$\bar{V} = -R_s.\bar{I} - j.X_s.\bar{I} + \bar{E}_0$$

Le diagramme vectoriel est le suivant :

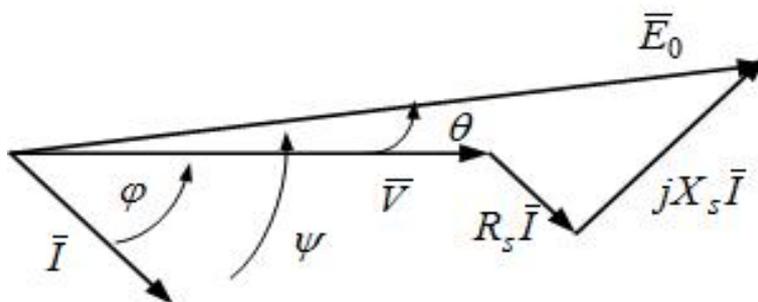


FIGURE 8.5 – Diagramme vectoriel

avec :  $\varphi = \widehat{\bar{V}, \bar{I}}$  : déphasage entre la tension  $\bar{V}$  et le courant  $\bar{I}$

$\psi = \widehat{\bar{E}_0, \bar{I}}$  : déphasage entre la f.é.m  $\bar{E}_0$  et le courant  $\bar{I}$

$\theta = \widehat{\bar{E}_0, \bar{V}}$  : déphasage entre la f.é.m  $\bar{E}_0$  et la tension  $\bar{V}$

### 8.4.4 Détermination des éléments du schéma équivalent

Pour déterminer les éléments du schéma équivalent, il faut trois essais :

- Essai à courant continu, on détermine la résistance  $R_s$  par la méthode volt-ampèremétrique
- Essai à vide  $E_0 = f(I_e)$ , l'alternateur étant entraîné à sa vitesse de rotation nominale
- Essai en court-circuit, réalisé à la vitesse de rotation nominale, sous excitation réduite

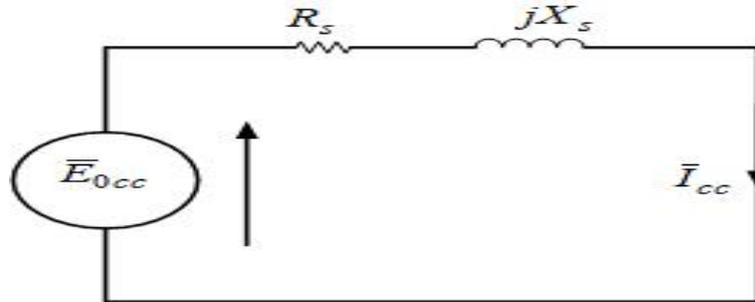


FIGURE 8.6 – Schéma équivalent en court-circuit

on écrit la loi des mailles à partir du schéma précédent :

$$\bar{E}_{0cc} = \bar{I}_{cc} \cdot (R_s + jX_s) \quad (8.2)$$

Donc la réactance synchrone est  $X_s = \sqrt{(E_{0cc}/I_{cc})^2 - R_s^2}$

Remarque : si on néglige  $R_s$  et à courant d'excitation constant, le courant de court-circuit est indépendant de la vitesse :  $I_{cc} \approx E_0/\ell \cdot w = K \cdot N \cdot \phi_0 \cdot f/\ell \cdot 2\pi \cdot f = cte$

### 8.4.5 Caractéristiques d'un alternateur

elles lient entre elles les grandeurs électriques de la machine :  $V, I$  et  $I_e$

a) Caractéristiques externes  $V = f(I)$  à  $I_e = cte$

Le but est de tracer l'allure de la tension  $V$  en fonction de courant  $I$  à  $I_e$  et  $\varphi$  fixés

Les données sont  $I_e, \cos(\varphi)$  et  $n_s$ , on connaît aussi la caractéristique interne  $E_0 = f(I_e)$

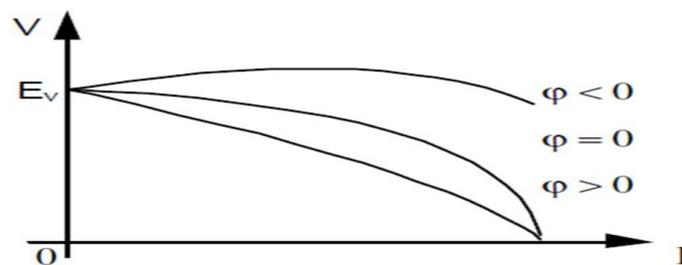


FIGURE 8.7 – caractéristique en charge

b) Caractéristique de réglage  $I_e = f(I)$  à  $V = cte$

On la trace généralement pour  $V = V_n$

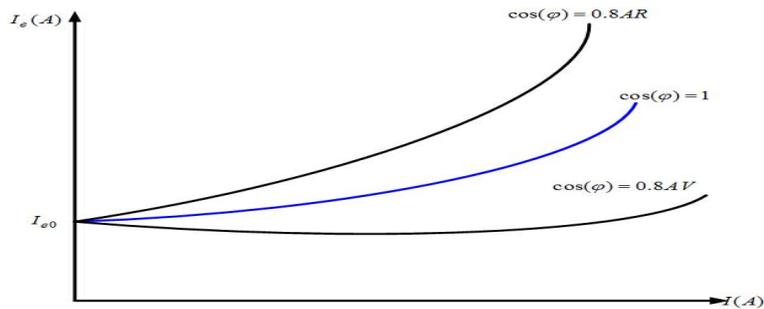


FIGURE 8.8 – Caractéristique de réglage

### 8.4.6 Rendement de l'alternateur

a) Définition

Le rendement est le rapport de la puissance utile  $P_u$  fournie au circuit d'utilisation et la puissance absorbée  $P_a$  :  $\eta = P_u/P_a$

avec :  $P_a$  est la puissance mécanique absorbée + la puissance nécessaire à l'excitation

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

On distingue deux méthodes pour déterminer ce rendement

#### \*Méthode directe

Cette méthode a l'avantage de donner la vraie valeur de rendement, mais elle nécessite l'essai en charge et la mesure de la puissance mécanique.

#### \*Méthode indirecte

Cette méthode donne un rendement approché, mais elle est la plus utilisée car elle permet d'obtenir le rendement à pleine charge. Elle consiste à mesurer toutes les pertes et calculer le rendement selon la formule suivante :  $\eta = P_u/(P_u + \Sigma(\text{pertes}))$

avec  $\Sigma(\text{pertes}) = P_{mec} + P_{jr} + P_{fer} + P_{js}$ , avec :

$P_{mec}$  : Pertes mécaniques,  $P_{jr}$  : Pertes joule au rotor,  $P_{js}$  : Pertes joule au stator et

$P_{fer}$  : pertes fer

## 8.5 Alternateur couplé sur le réseau

a) Couplage sur le réseau

pour qu'on puisse coupler l'alternateur sur le réseau électrique, il faut tout d'abord vérifier que les tensions ont :

-même fréquence

- même amplitude
- même ordre des phases

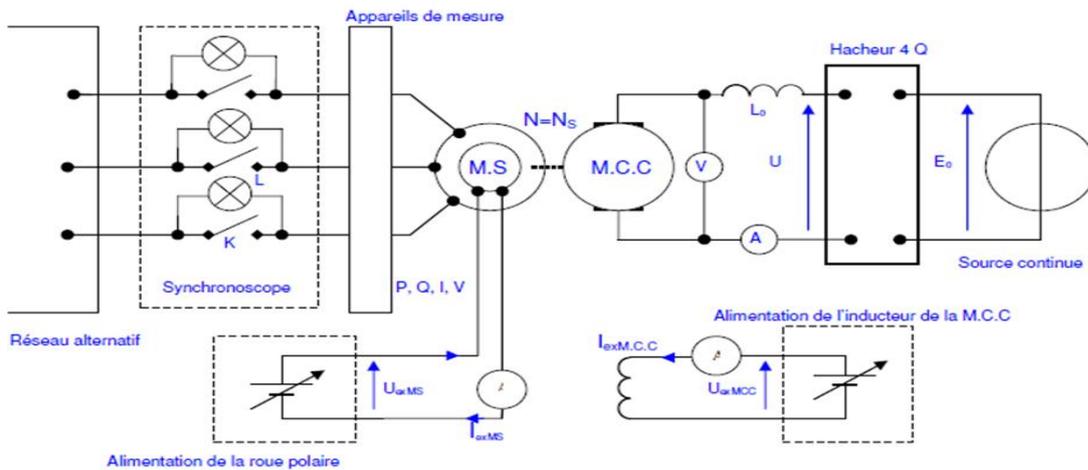


FIGURE 8.9 – Couplage 'un alternateur au réseau

Les trois lampes doivent s'allumer et s'éteindre en même sinon corriger l'ordre des phases les cycles allumage /extinction doivent etre

-

## 8.6 Moteur synchrone

### 8.6.1 Généralités

Si on alimente les enroulements statoriques par un systeme triphasé des tensions de pulsation  $w_s$  et Si on alimente le rotor par une tension contnu, ce dernier se met en rotation à une vitesse de synchronisme  $n_s = 60.f/P$ .

a)Schéma equivalent monophasé

Généralent la résistance  $R_s$  est négligable devant  $X_s$ , le schéma equivalent monophasé est le suivant :

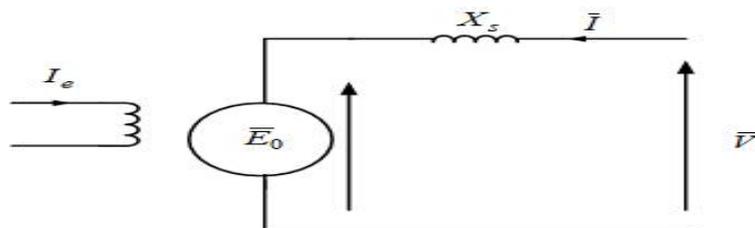


FIGURE 8.10 – Schéma équivalent monophasé

Du modèle equivalent on déduit la loi des mailles suivante :  $\vec{V} = \vec{E}_0 + j.X_s.\vec{I}$

Le diagramme vectoriel correspondant est :

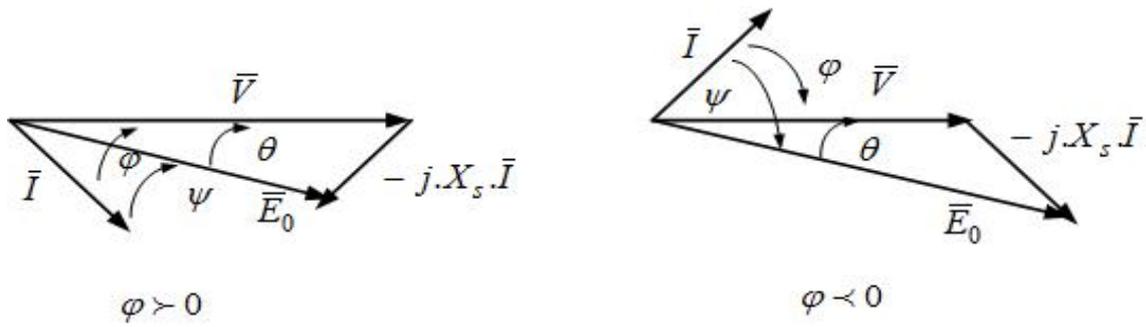


FIGURE 8.11 – Diagramme vectoriel

Remarque l'angle interne  $\theta$  est orienté de  $\bar{E}_0$  vers  $\bar{V}$  ; il est positif dans le cas d'un moteur il est négatif le cas d'un alternateur

# Chapitre 9

## Les machines asynchrones triphasés

### 9.1 Généralités

#### 9.1.1 Constitution

Une machine asynchrone triphasé est constitué par deux parties :

-Un stator fixe , composé par trois enroulements (bobines) régulièrement réparties et possédant  $2P$  pôles. Ils peuvent être couplés en étoile ou en triangle selon la règle suivante :

-Si la tension supportée par chaque enroulement est égale à la tension simple du réseau, le stator

doit être couplé en étoile

-Si la tension supportée par chaque enroulement est égale à la tension composée du réseau, le stator doit être couplé en triangle

Les enroulements sont logés dans des encoches d'une armature cylindrique constituée d'un matériau ferromagnétique feuilleté afin de limiter les pertes par courant de Foucault



FIGURE 9.1 – Vue du stator d'un moteur asynchrone

-Un rotor en mouvement, il n'est relié à aucune alimentation électrique. Il se présente sous deux formes :

\*Rotor à cage dont l'enroulements est constitué par des barres conductrices logées dans des encôches uniformément réparties sur la périphérie .Elles sont court-circuitées par deux anneaux situés aux deux extrémités du cylindre rotorique

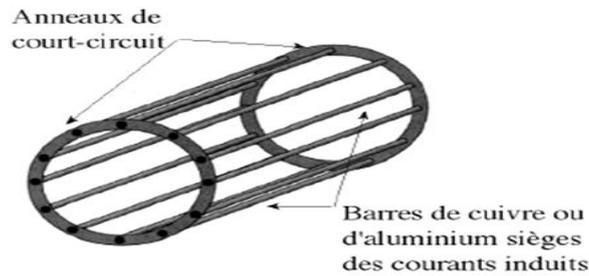


FIGURE 9.2 – Rotor à cage

\*Rotor bobiné, il est muni d'un enroulement triphasé, composé des bobines .L'enroulement généralement coupléen étoile et connecté à trois bagues conductrices isolées les unes des autres sur lesquelles frottent des balais en graphite.

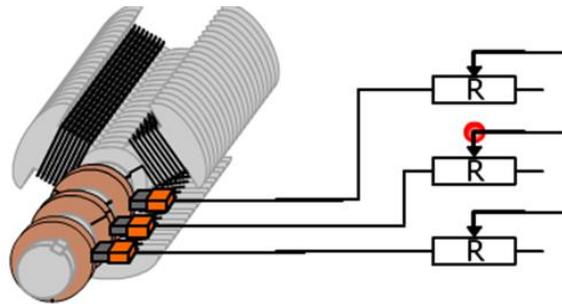


FIGURE 9.3 – Rotor bobiné

### 9.1.2 Principe de fonctionnement

Si on alimente les 3 enroulements statoriques par un système triphasé des tensions, on obtient un champ magnétique tournant à une vitesse angulaire  $\Omega_s = \omega_s/P$ .Le champ tournant engendre le rotor à une vitesse angulaire  $\Omega(rd/s)$ .Dans ce cas on dit que le rotor glisse par rapport au champ tourant et on définit le glissement comme suit

$$g = (n_s - n)/n_s = (\Omega_s - \Omega)/\Omega_s \quad (9.1)$$

au synchronisme  $\Omega = \Omega_s \Rightarrow g = 0$

à l'arrêt  $g = 1$

pour une génératrice  $g < 0$

### 9.1.3 Symbole

Deux symboles sont utilisés suivant que le moteur est à cage ou à rotor bobiné

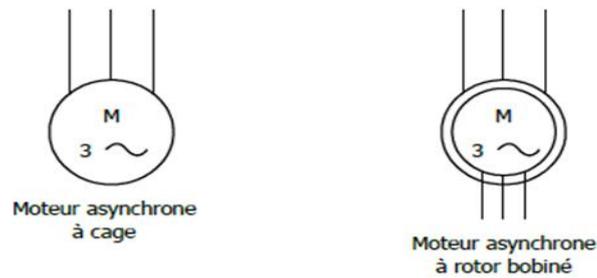


FIGURE 9.4 – Symbole d'un moteur asynchrone

## 9.2 schéma équivalent monophasé

### 9.2.1 Principe

On dispose d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné dont ces enroulements sont connectés à un rhéostat  $R_h$

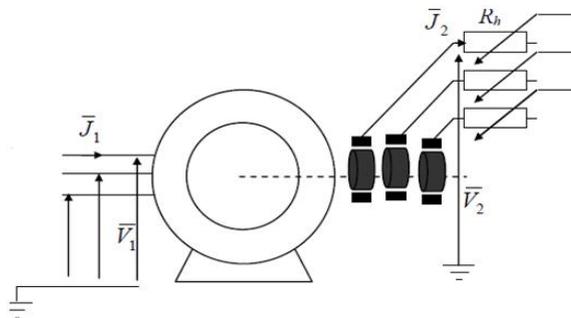


FIGURE 9.5 – Moteur asynchrone

Le schéma équivalent monophasé est le suivant :

La fréquence des courants rotoriques est  $f_r = g.f_s$ , pour cela la force électromotrice générée au rotor est  $\bar{E}_2 = -m.\bar{E}_1$ , elle a comme amplitude  $g.E_2$  et fréquence  $g.f_s$ . Le courant ramené au stator

$$\text{est } \bar{J}'_2 = -m.\bar{J}_2$$

### 9.2.2 schéma équivalent ramené au stator

D'après le schéma équivalent monophasé précédent on a :

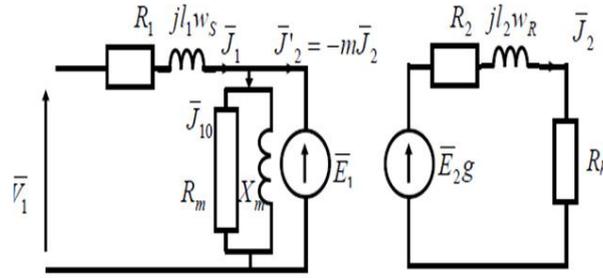


FIGURE 9.6 – Schéma équivalent monophasé

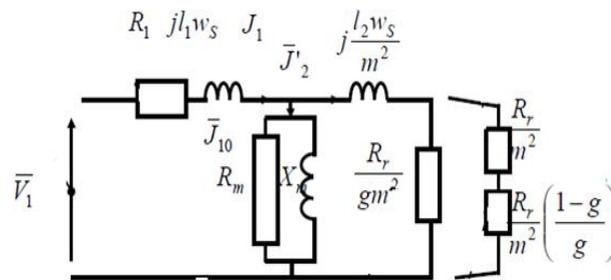
$$g \cdot \bar{E}_2 = \bar{J}_2 \cdot (R_h + R_2 + j l_2 \cdot w_R) = -m \cdot g \bar{E}_1 \Rightarrow \bar{E}_1 = -\bar{J}_2 \cdot (R_h + R_2 + j l_2 \cdot w_R) / (m \cdot g)$$

$$\text{or } \bar{J}_2 = -\bar{J}'_2 / m \Rightarrow \bar{E}_1 = \bar{J}'_2 \cdot (R_h + R_2 + j l_2 \cdot w_R) / (g \cdot m^2)$$

si on remplace  $w_R$  par  $g \cdot w_s$ , l'expression de  $\bar{E}_1$  devient la suivante

$$:\bar{E}_1 = \bar{J}'_2 \cdot ((R_h + R_2) / (g \cdot m^2) + (l_2 \cdot w_s) / m^2)$$

si on pose  $R_r = R_h + R_2$ , le terme  $R_r / g \cdot m^2$  est égale à  $(R_r / m^2) (1 + (1 - g) / g)$ . Le schéma équivalent ramené au stator est comme suit :



avec :  $-R_1$  : Résistance d'un enroulement statorique

$-l_1$  : Inductance d'un enroulement statorique

$-R_2$  : Résistance d'un enroulement rotorique

$-l_2$  : Inductance d'un enroulement rotorique

$-R_m$  : Résistance du circuit magnétique

$-X_m$  : Réactance du circuit magnétique

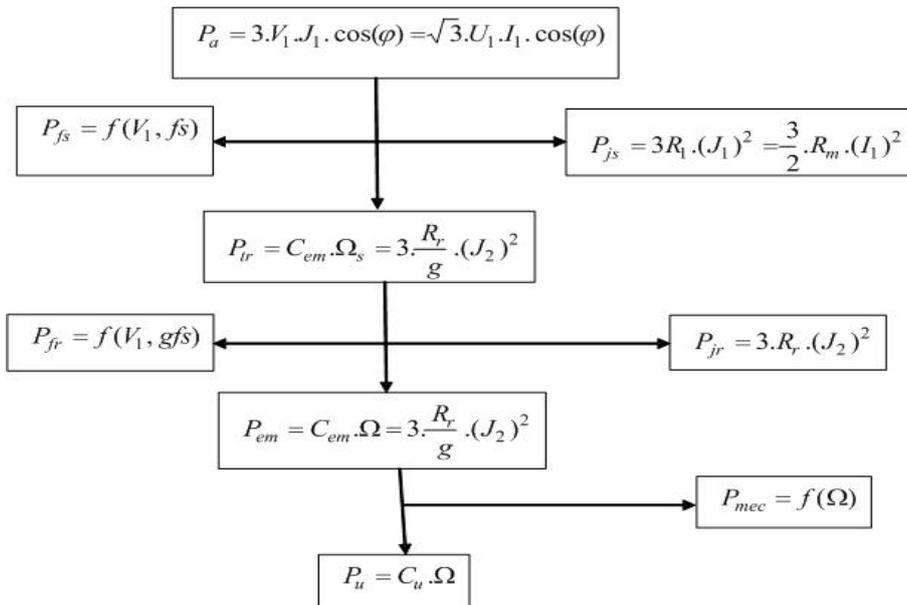
### 9.3 Bilan de puissance

d'après le schéma équivalent ramené au stator, le bilan de puissance d'un moteur asynchrone est représenté comme suit :

avec :

$P_a$  : Puissance active absorbée par le stator

$-P_{js}$  : Pertes joule au stator



$-P_{fs}$  : Pertes fer au stator

$P_{tr}$  : Puissance transmise du stator au rotor

$P_{jr}$  : Pertes joule au rotor

$P_{fr}$  : Pertes fer au rotor

$P_{em}$  : Puissance électromagnétique

$P_{mec}$  : Pertes mécaniques

$P_u$  : Puissance utile

$C_{em}$  : Couple électromagnétique

$C_u$  : Couple utile

$\Omega_s$  : Vitesse angulaire de synchronisme

$\Omega$  : Vitesse angulaire du rotor

## 9.4 Caractéristiques mécaniques

La machine asynchrone est un convertisseur électromécanique d'énergie, pour analyser les différentes expressions des couple on exprime la conversion de puissance électrique en puissance mécanique

### 9.4.1 Couples et puissances

a) Couple électromagnétique

Il est parfois appelé synchrone  $C_{em} = P_{rt}/\Omega_s = P_{em}/\Omega$

b) Couple utile

si on tient compte des pertes mécaniques, le couple utile esté  $C_u = P_u/\Omega$

### 9.4.2 Expression du couple en fonction du glissement

à partir du schéma équivalent monophasé, on a la puissance transmise du stator au rotor

$$\text{est } P_{tr} = C_{em} \cdot \Omega$$

Cette puissance est intégralement dissipée dans la résistance  $R_g$ , elle est égale à

$$3(R/g) \cdot J_2^2$$

si on identifie les deux expressions, on aura

$$C_{em} = (3 \cdot P \cdot V_1^2 / w_s) \cdot (R/g) / ((R/g)^2 + X^2) \quad (9.2)$$

### 9.4.3 Tracé des caractéristiques mécaniques

On cherche à tracer le couple en fonction du glissement. L'expression précédente du couple peut être mise sous la forme suivante :

$$C_{em} = 3 \cdot P \cdot (V_1 / w_s)^2 \cdot 1 / ((R/g \cdot w_s) + X^2 \cdot g \cdot w_s / R)$$

Le couple électromagnétique est maximal si et seulement si  $g = g_c = R/X$ . Dans ce cas

$$C_{emmax} = (3 \cdot P) \cdot (V_1 / w_s)^2 / (2 \cdot l) \text{ avec } l = X / w_s \text{ est l'inductance totale ramenée au stator.}$$

L'allure du couple en fonction de la vitesse de rotation est représentée par la figure suivante :

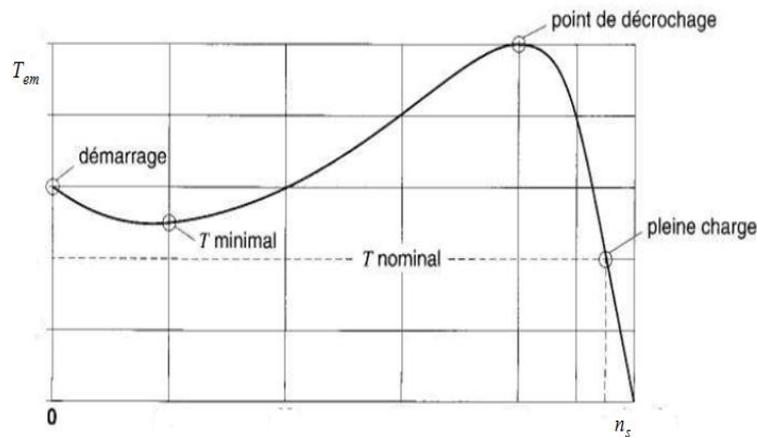


FIGURE 9.7 – Allure de couple

## 9.5 Diagramme de cercle

Le diagramme du cercle est une construction géométrique qui permet d'obtenir la vitesse de rotation et les puissances graphiquement. On le construit à partir du schéma équivalent simplifié

### 9.5.1 Hypothèse de KAPP et schéma équivalent

Dans ce cas , on néglige toutes les pertes , sauf les pertes joule rotoriques.

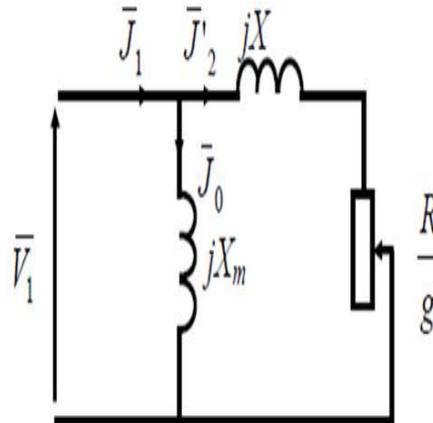


FIGURE 9.8 – Schéma équivalent simplifié

avec :  $-X = X_1 + X_2/m^2$  :Réactance totale ramenée au stator.

$-R = (R_h + R_2)/m^2$  :Résistance totale du rotor ramené au stator.

$-X_m$  :Résistance du circuit magnétique.é

### 9.5.2 Traçage du diagramme de cercle

Le schéma équivalent du stator permet d'écrire :

$$-\bar{J}_1 = \bar{J}_0 + \bar{J}_2$$

$$-\bar{J}_0 = \bar{V}_1/j.X_m = V_1. \exp(-j\pi/2)/X_m$$

$$-\bar{J}_2 = \bar{V}_1/(R/g + j.X) = V_1. \exp(-j\varphi_2)/\sqrt{(X^2 + (R/g)^2)} \text{ avec } \varphi_2 = \arctan(g.X/R)$$

$$\text{si } g = 0 \Rightarrow \bar{J}_2 = 0$$

$$\text{si } g = \infty \Rightarrow \bar{J}_2 = V_1.e^{-j\pi/2}/X \Rightarrow J_2 = V_1/X$$

on choisit un repère  $(O',x,y)$  telque  $O'$  est le milieu de  $M_{(g=0)}$  et  $M_{(g=\infty)}$  comme le montre la figure suivante :

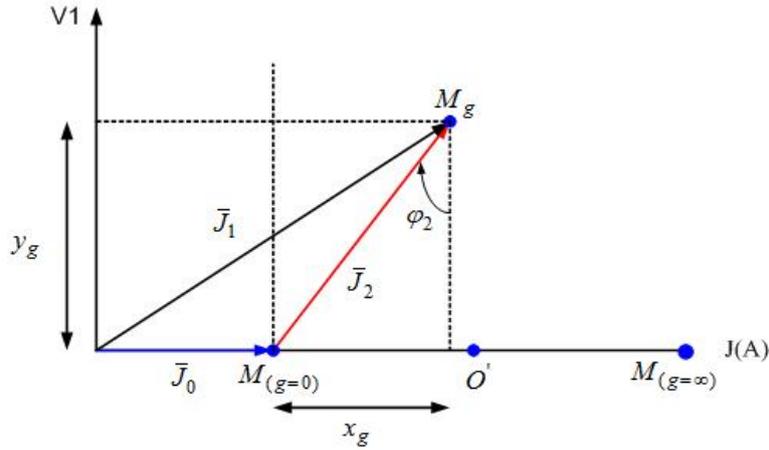
Les coordonnées des trois points  $M_{(g=0)}$ ,  $M_{(g=\infty)}$  et  $M_g$  sont les suivants :

$$M_{(g=0)} = \begin{pmatrix} -V_1/2X \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{(g=\infty)} = \begin{pmatrix} V_1/2X \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$M_g = \begin{pmatrix} x_g = -V_1/2X + J'_2 \cdot \sin(\varphi_2) \\ y_g = J'_2 \cdot \cos(\varphi_2) \end{pmatrix}$$

On demontre que le trajectoire de point  $M_g$  decrit un cercle



d'après le diagramme vectoriel précédent on a :

$$-J'_2 = V_1 / (\sqrt{(R/g)^2 + X^2})$$

$$-\sin(\varphi_2) = X / \sqrt{(R/g)^2 + X^2}$$

$$-\cos(\varphi_2) = (R/g) / \sqrt{(R/g)^2 + X^2}$$

L'abscisse de point  $M_g$  est  $x_g = -V_1/2 \cdot X + V_1 \cdot X / ((R/g)^2 + X^2)$

L'ordonnée de point  $M_g$  est  $y_g = R/g / ((R/g)^2 + X^2)$

$(x_g)^2 + (y_g)^2 = (V_1/2X)^2$  C'est l'équation d'un cercle de centre  $O'$  et de rayon  $V_1/(2X)$

La construction de diagramme de cercle se fait comme suit :

-On place le point  $M_{g=0}$ , pour cela, on effectue un essai à vide au synchronisme et on mesure  $J_0$

-Placement de point  $M_{g=1}$ , On effectue un essai à rotor calé ( $g = 1$ ) sous tension réduite ( $V_{1c} < V_{1n}$ ), on mesure la puissance  $P_{1c}$  et le courant  $J_{1c}$ . on pose  $k = V_{1n}/V_{1c}$ , le courant  $J_1 = k * J_{1c}$  et  $\cos(\varphi_1) = P_{1c}/3 \cdot V_{1c} \cdot J_{1c} = P_1/3 \cdot V_{1n} \cdot J_1$

-Détermination de centre  $O'$ , on construit la médiatrice de  $M_{g=0}M_{g=1}$ , l'intersection de la perpendiculaire à la direction de  $V_1$  passant par  $M_{g=0}$  et la médiatrice donne le point  $O'$

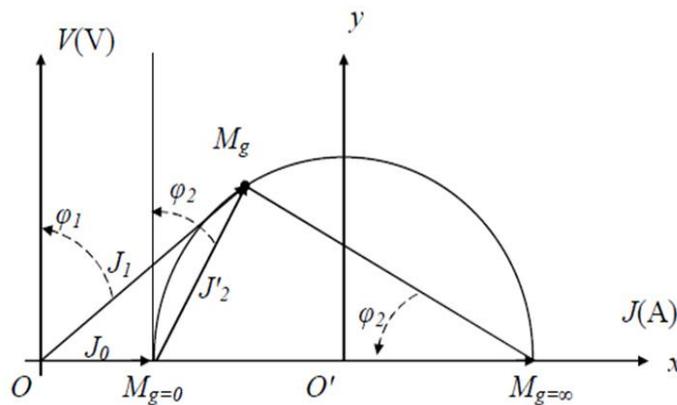
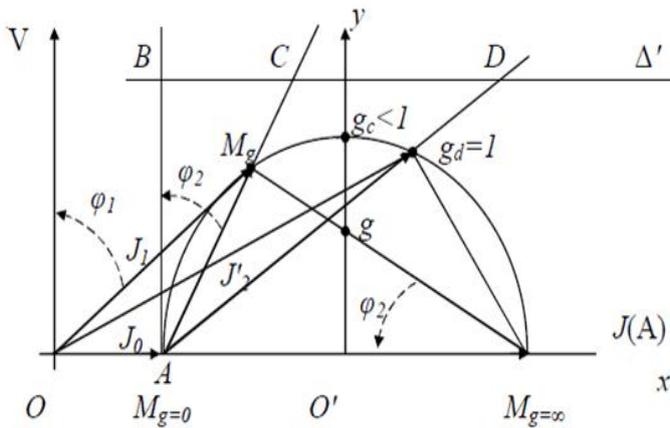


FIGURE 9.9 – Diagramme de cercle

### 9.5.3 Traçage de diagramme de cercle

a) Lecture de glissement

L'objectif est déterminer le glissement pour plusieurs points de fonctionnement en exploitant le diagramme de cercle. On trace une droite parallèle à la tension  $V$  et passant par  $O'$ , elle couple la droite  $M_g M_{g=\infty}$  en un point  $g$ .



$\tan(\varphi_2) = (O'g)/O'M_{g=\infty} = X.g/R \Rightarrow g = (O'g) = g.V_1/2R$ , la distance  $(O'g) = \beta.g$  est proportionnelle au glissement. Donc on peut appliquer la règle de trois  $g = g_c(O'g)/(O'g_c)$

b) Lecture des couples

La puissance absorbée par le stator est  $P_a = 3.V_1.J_1.\cos(\varphi_1)$ , elle est donc représentée par la longueur  $(IM_g)$  au coefficient  $3V_1$  près

Le couple électromagnétique  $C_{em} = 3.V_1.J_1.\cos(\varphi_1)/\Omega_s \Rightarrow C_{em} = \alpha.(IM_g)$  avec  $\alpha = 3.V_1/\Omega_s$

$C_{em} = C_{max}.(O'g)/(O'g_c)$  et le couple de démarrage  $C_d = C_{emmax}.(O'g_d)/(O'g_c)$



# Bibliographie

- [1] Luc Lasne, Exercices et problèmes d'électrotechnique : Notions de base, réseaux et machines électriques, Dunod, 2011
- [2] D. Bareille, J.P. Daunis, Électrotechnique : Transformateurs et machines tournantes, Dunod, 2006
- [3] M. Marty, D. Dixneuf, D.G. Gilabert, Principes d'électrotechnique, Dunod, 2011
- [4] D.F. Warne, Génie électrotechnique, Dunod, 2013
- [5] B. Francois, Machines à courant continu, document publié sur internet sur le site <http://l2ep.univ-lille1.fr/pagesperso/francois>
- [6] J.L. Dalmaso, Cours d'électrotechnique : Machines tournantes à courant alternatif, BELIN, 1985