



**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

**Université MOHAMED BOUDIAF de M'sila
Faculté de Technologie**

Département de Génie Electrique

Synthèse du cours
Machines électriques

Pour : 3^{eme} année Licence électromécanique

Par:

Dr. HELLALI LALLOUANI

**Maître de Conférences B en Electrotechnique à l'Université MOHAMED BOUDIAF de
M'sila**

2024/2025



المسيلة في : 2025/06/14

رقم: 119 / ق.ه.ك / 2025

شهادة إدارية

بخصوص مطبوعة الدروس الخاصة بالأستاذ

هلاي العلواني

بناءً على محضر اللجنة العلمية لقسم الهندسة الكهربائية تحت رقم: 41/ق.ه.ك/2025 المنعقد بتاريخ 17 فيفري 2025 والمتضمن تعين الخبراء: الأستاذ رحالي هلال أستاذ محاضر-أ- بجامعة المسيلة الأستاذ جريو سليم أستاذ محاضر-أ- بجامعة المسيلة، والأستاذ ريجان مشقوق أستاذ بجامعة بسكرة وذلك لتقييم مطبوعة الأعمال التطبيقية الخاصة بالأستاذ هلاي العلواني أستاذ محاضر "ب" بقسم الهندسة الكهربائية لجامعة المسيلة تحت عنوان: " Machines Electrique "

وبعد إطلاع رئيس اللجنة العلمية ورئيس القسم على التقارير الواردة و التي كانت كلها ايجابية، وعليه فإن اللجنة لا ترى مانعا أن تتخذه سندا في تدريس طلبة السنة الثالثة ليسانس كهروميكانيك ، شعبة كهروميكانيك ، ميدان علوم و تكنولوجيا و أن تعتمد في أي تقييم للمسار العلمي للأستاذ المعني.

رئيس القسم

رئيس اللجنة العلمية



د. دلف البراد



Avant-propos

L'ensemble des chapitres présentés dans ce document ont été effectués au sein du Laboratoire : LGE de Génie Electrique de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila.

Le recueil présenté contient trois parties à savoir :

- Rappel sur le Magnétostatique est Les Circuits Magnétiques*
- Transformateur.*
- Machine électrique à courant continu*
- Machine synchrone*
- Machine asynchrone*

Ce recueil est destiné aux étudiants Licence Electromécanique.

Cette partie sera consacrée à l'étude des circuits magnétiques et les machines électriques à courant continu. Celles-ci sont constituées de circuits électriques (conducteurs) étroitement imbriqués dans un circuit magnétique (fer en général), séparé par un isolant. Nous commencerons par une étude simple des matériaux ferromagnétiques et leur agencement en un circuit magnétique. Nous expliquerons le fonctionnement des diverses machines et en donnerons un modèle élémentaire. Les machines seront, dans l'ordre, machines à courant continu sous forme de moteur ou génératrice, les transformateurs.

Le but de ce recueil est de familiariser l'étudiant avec : Les principes de fonctionnement de la machine électrique.

J'espère que ce recueil sera apprécié par mes collègues et les étudiants et je serais très heureux de recevoir avec reconnaissance leurs remarques, critiques et suggestions.

Dr. H. LALLOUANI

Plan de cours

Sujet : Machines électriques

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : 3^{eme} Année licence Electromécanique

VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)

Crédits : 4

Coefficient : 2

Evaluation : Contrôle continu : 40% ; Examen : 60%.

Objectifs de l'enseignement :

- Connaitre les principes de base de l'électrotechnique.
- Comprendre les fondamentaux des transformateurs et des machines électriques.

Connaissances préalables recommandées :

- Notions d'électricité fondamentale, d'électrostatique et de magnétostatique de base.

Table de matière

Chapitre I

Généralités

I.1 Courant alternatif monophasé	8
I.1.1 Caractérisation d'un signal périodique	8
I.1.2 Représentation d'un signal sinusoïdal	9
I.1.3 Notation complexe des impédances	11
I.1.4 Puissances en régime sinusoïdal	12
I.1.5 Théorème de Boucherot	14
I.2 Courant alternatif triphasé	15
I.2.1 Installations triphasées	16
I.2.2 Couplages des générateurs et des récepteurs	18
I.2.3 Mesure des puissances	20
I.3 Propriétés élémentaires du circuit magnétique	21
I.3.1 Notion sur les grandeurs magnétiques	21
I.3.2 Calcul du circuit magnétique	23
I.3.4 Pertes magnétiques	26

Chapitre II

Transformateurs

II.1 Introduction	29
II.2 Principe de fonctionnement	29
II.3 Transformateur monophasé Idéal	30
II.3.1 Schéma équivalent et diagramme vectoriel	31
II.4 Transformateur monophasé réel	32
II.4.1 Equations de fonctionnement	32

II.4.2 Equations aux tensions	33
II.4.3 Equations aux ampères-tours	33
II.4.4 Schéma équivalent	33
II.4.5 Transformateur monophasé dans l'approximation de Kapp	34
II.4.6 Rendement du transformateur	38
II.5 Transformateurs triphasés	40

Chapitre III

Machines à courant continu

III.1 Introduction	44
III.2 Définition des MCC	44
III.3 Constitution d'une MCC	46
III.4 Principe de fonctionnement	48
III.5 Etude du circuit inducteur	49
III.5.1 Force magnétomotrice	49
III.5.2 Répartition de l'induction magnétique	50
III.5.3 Flux par pôle inducteur	50
III.6 Etude du circuit d'induit	51
III.6.1 Principe de fonctionnement en Moteur – loi de Laplace	51
III.6.2 Principe de fonctionnement en générateur	51
III.6.3 Types d'induit	52
III.6.4 Réaction magnétique d'induit	58
III.7 Les différents types de machines à courant continu	61
III.8 Fonctionnement en Moteur	61
III.8.1 Equation aux tensions d'un Moteur à courant continu	62
III.8.2 Bilan Energétique et Rendement	62
III.8.3 Moteur à excitation séparée	63
III.8.4 Moteur à excitation shunt	65

III.8.5 Moteur à excitation série	65
III.8.6 Moteur à excitation composée	66
III.9 Etude de démarrage d'un moteur à courant continu	67
III.10 Freinage d'un moteur à courant continu	69
III.11 Réglage de vitesse d'un moteur à courant continu	70

Chapitre IV

Machines synchrones

IV.1 Généralités	71
IV.2 Constitution d'une MS	71
IV.3. Modes de fonctionnement	74
IV.3.1 Fonctionnement en générateur	74
IV.3.2 Fonctionnement en moteur	74
IV.4. LA F.E.M à vide dans un alternateur	75
IV.4.1 Essai à vide	75
V.4.2. Etude de la F.E.M à vide	76
IV.5. Alternateur en charge	78
IV.5.1 Etude en charge	78
IV.5.2. Modelé équivalent d'une phase de l'alternateur	79
IV.6 Bilan des puissances	80
IV.6.1 Puissance utile	80
IV.6.2 Bilan des pertes	80

Chapitre V

Machines asynchrones

V.1 Généralités	82
V.2 Constitution d'une MAS	82
V.3 Principe de fonctionnement	83

V.4 Notion de glissement	83
V.5 Plaque signalétique – Couplage	84
V.5 Bilan des puissances	85
V.6 .1 L’essai à vide	86
V.6.2 Fonctionnement en charge	87
V.7. Mise en Equations et Schéma monophasé équivalent	87
V.7.1. Expressions des F.e.m Induites	87
V.7.2. Expressions des tensions	88
V.7.3. Schéma monophasé Equivalent	88
V.7.4 Schéma ramené au primaire	89
V.8. Construction du diagramme circulaire	89
V.9. Caractéristiques mécaniques	90
V.10. Démarrage, Freinage et Réglage de vitesse d’un moteur synchrone	92
V.10.1 Démarrage : Il faut que le couple de démarrage	92
V.10.2 Freinage des moteurs asynchrones	92
V.10.3 Réglage de la vitesse	92

Chapitre I

Généralités

I.1 Courant alternatif monophasé

On appelle régime sinusoïdal (ou régime harmonique) l'état d'un système pour lequel la variation dans le temps des grandeurs le caractérisant est sinusoïdale. Le circuit électrique, dans ce cas, est alimenté par une tension alternative sinusoïdale $V(t)$ et parcouru par un courant alternatif sinusoïdal $i(t)$ [1].

I.1.1 Caractérisation d'un signal périodique

a) Période :

La période, notée T , d'un signal périodique est la plus petite durée au bout de laquelle le signal se reproduit identique à lui-même.

Son unité dans le système d'unité international (S.I.) est la seconde notée s .

b) Fréquence :

La fréquence correspond au nombre de périodes par seconde. Elle est liée à la période par la relation suivante : $f = \frac{1}{T}$ Son unité dans le SI est l'Hertz de symbole Hz.

c) Tension maximale et tension minimale

La tension maximale U_{\max} désigne la valeur la plus élevée prise par $u(t)$ au cours du temps.

La tension minimale U_{\min} désigne la valeur la plus faible prise par $u(t)$ au cours du temps.

L'unité de U_{\max} et de U_{\min} dans le S.I est le volt.

d) Tension instantanée

$$u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

et:

- u valeur instantanée de la tension.
- \hat{U} : valeur maximale de la tension, en volts.
- ω : pulsation de la tension, en radians par secondes.
- ϕ : phase de la tension à l'instant initial, en radians.
- $\omega t + \phi$: phase de la tension à l'instant t , en radians.
- $\omega = 2\pi f$. Avec f : fréquence du signal en Hertz.
- $T = 1/f$ avec T : période du signal en secondes.

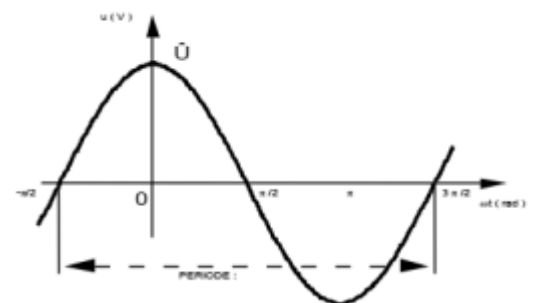


Figure 1.1 : Signal sinusoïdale.

e) Valeur moyenne

La valeur moyenne u_{moy} , d'une grandeur périodique quelconque $u(t)$, se calcule à partir de la relation :

$$u_{moy} = \frac{1}{T} \int_{(T)} u(t) . dt$$

N B : La valeur moyenne d'un signal alternatif sinusoïdal est nulle.

f) Valeur efficace

La valeur efficace u_{eff} , d'une grandeur périodique $u(t)$ se calcule à partir de la relation :

$$u_{eff} = U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(T)} u(t)^2 . dt}$$

La valeur efficace d'une tension, $u(t)$, sinusoïdale et seulement dans ce cas, se déduit de la relation :

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$$

I.1.2 Représentation d'un signal sinusoïdal :

I.1.2.1 Représentation cartésienne :

La représentation cartésienne utilise des fonctions sinusoïdales du temps.

Les deux grandeurs suivantes sont définies ainsi [2]:

- $u(t) = \hat{u} . \cos(\omega t + \phi_u)$
- $v(t) = \hat{v} . \cos(\omega t + \phi_v)$

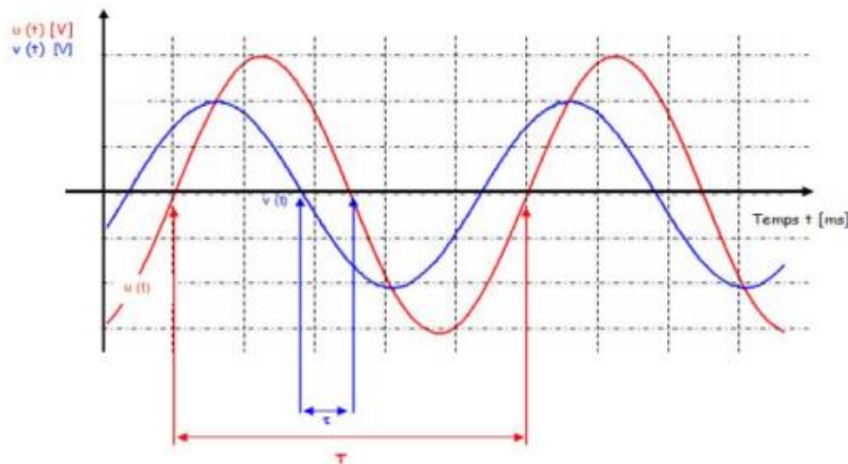


Figure 1.2 : Représentation cartésienne de grandeurs sinusoïdales.

Les deux grandeurs $u(t)$ et $v(t)$ ne coupent pas l'axe des abscisses au même instant. Elles sont décalées dans le temps. Ce décalage horaire noté τ possède toujours la même valeur, les grandeurs $u(t)$ et $v(t)$ n'ont pas la même phase à l'instant initial. Elles sont déphasées.

a. Calcul de l'angle de déphasage

L'angle de déphasage noté ϕ permet de savoir de quel angle sont décalées les deux grandeurs $u(t)$ et $v(t)$, il correspond à la différence entre les phases initiales ϕ_u et ϕ_v ; et se définit ainsi:

$$\phi = \phi_u - \phi_v$$

Φ : L'angle de déphasage entre $u(t)$ et $v(t)$ en radians [rad]

Φ_u : La phase de $u(t)$ à l'instant initial en radians [rad]

Φ_v : La phase de $v(t)$ à l'instant initial en radians [rad]

b. Déphasage courant – tension :

Si les deux grandeurs à étudier sont une tension $u(t)$ et un courant $i(t)$, elles se définissent ainsi :

- $u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t + \phi_u)$
- $i(t) = \hat{i} \cdot \cos(\omega t + \phi_i)$

Si en choisissant la tension u comme origine des phases, c'est-à-dire $\phi_u = 0$

La tension $u(t)$ et le courant $i(t)$ se définissent ainsi :

- $u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t)$
- $i(t) = \hat{i} \cdot \cos(\omega t + \phi_i)$

$\phi_i > 0$: Le courant $i(t)$ est en retard sur la tension $u(t)$.

$\phi_i < 0$: Le courant $i(t)$ est en avance sur la tension $u(t)$.

$\phi_i = 0$: Le courant $i(t)$ et la tension $u(t)$ sont en phase.

I.1.2.2 Représentation de Fresnel (vectorielle) :

Lorsque deux tensions sinusoïdales $u(t)$ et $v(t)$ sont à l'étude, elles peuvent être représentées à l'aide de vecteurs à partir de leurs caractéristiques, ainsi pour :

- $u(t) = \hat{u} \cdot \cos(\omega t)$
- $v(t) = \hat{v} \cdot \cos(\omega t + \phi_v)$

Dans ce cas on a :

- La tension $u(t)$ possède une phase nulle à l'instant initial.
- La tension $v(t)$ est déphasée de l'angle ϕ_v par rapport à $u(t)$.
- Les valeurs efficaces de $u(t)$, $v(t)$ sont égales à U et V en successives

Le vecteur qui caractérise la tension $u(t)$:

- Est porté par l'axe pris comme origine des phases.

- Sa longueur est proportionnelle à U la valeur efficace de $u(t)$

Le vecteur qui caractérise la tension $v(t)$:

- Est décalé d'un angle ϕ_v dans les sens positif par rapport à l'axe origine des phases.
- Sa longueur est proportionnelle à V qui est la valeur efficace de $v(t)$

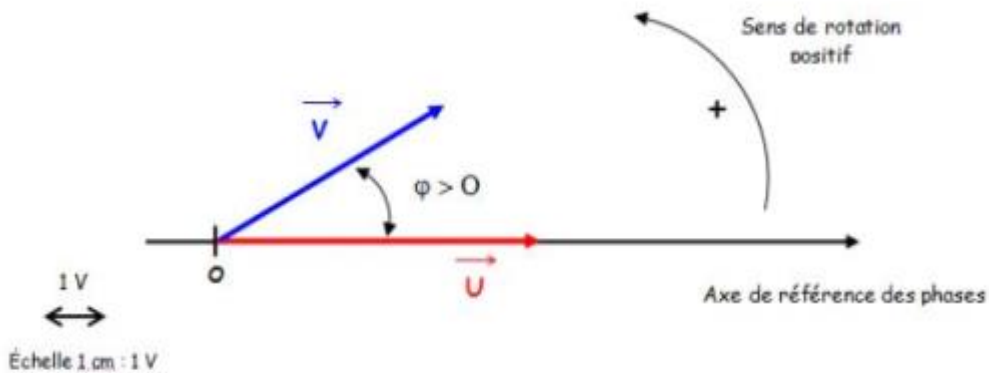


Figure 1.3 : Représentation de Fresnel, $v(t)$ en avance sur $u(t)$

Dans les mêmes conditions que précédemment, mais si l'angle ϕ_u est négatif, la tension $v(t)$ est alors en retard sur $u(t)$ et la représentation devient ainsi :

I.1.3 Notation complexe des impédances

L'impédance complexe Z d'un dipôle en régime permanent sinusoïdal est le quotient de la tension complexe $u(t) = \hat{u}.e^{j\phi_u}$ par le courant complexe $i(t) = \hat{i}.e^{j\phi_i}$

En électrotechnique on trouve, essentiellement, les trois dipôles suivants [5]:



Dipôle résistif



Dipôle inductif



Dipôle capacitif

	Schéma électrique	Modélisation en nombre complexe	Tension	Module et phase	Représentation graphique
Dipôle résistif			$U = R I(t)$	$Z_R = R$ $\varphi_R = 0^\circ$	
Dipôle inductif			$U_L = L \frac{dI(t)}{dt}$	$Z_L = j L \omega$ $\varphi_L = +\frac{\pi}{2}$	
Dipôle capacitif			$U_c = \frac{1}{c} \int I(t) dt$	$Z_c = \frac{1}{j C \omega}$ $= -\frac{j}{C \omega}$ $\varphi_c = -\frac{\pi}{2}$	

REMARQUE

$$Z = |Z| \cdot e^{j\phi} = R + jX$$

- Si $X = 0$ L'impédance est résistive et $\phi = 0$
- Si $R = 0$ L'impédance est purement inductive et $\phi = \frac{\pi}{2}$
- Si $R = 0$ L'impédance est purement capacitive et $\phi = -\frac{\pi}{2}$

I.1.4 Puissances en régime sinusoïdal (instantanée, active, réactive, apparente) :

En physique, une puissance représente une quantité d'énergie par unité de temps. Son unité est le Watt (1W = 1J/s). Le concept de puissance est un outil indispensable en électrotechnique, il

permet souvent d'avoir une vision globale des systèmes et de résoudre facilement certains problèmes par la technique du bilan de puissances [4].

a. Puissance instantanée

La valeur instantanée de la puissance est par définition le produit des valeurs instantanées de la tension et du courant, on obtient :

$$P(t) = U(t) \cdot I(t) \text{ (elle s'exprime en Watts)}$$

A cause du déphasage entre U et I sur le dipôle nous allons identifier plusieurs notions de Puissance

b. Puissance active :

En règle générale, la puissance qui motive les systèmes de conversion d'énergie est la puissance moyenne des systèmes, on l'appelle aussi puissance active. La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée. Notée P, elle s'exprime en Watts (W), elle dépend des valeurs efficaces de U et de I et du déphasage φ entre les deux grandeurs.

$$P = U I \cos\varphi \text{ (Watts)}$$

La puissance active absorbée par un récepteur est toujours positive. La définition théorique de la puissance dite active, fait apparaître directement la notion de facteur de puissance.

c. Puissance réactive

La puissance réactive apparaît lorsque l'installation contient des récepteurs inductifs et des récepteurs capacitifs. Les alimentations des circuits magnétiques des machines électriques (moteurs, transformateurs, ballast tube fluorescent,...) consomment de la puissance réactive.

Les condensateurs quant à eux produisent de la puissance réactive (compensation du réactif). par analogie la puissance réactive Q est donnée par la relation :

$$Q = U I \sin\varphi \text{ (elle s'exprime en voltampère réactif (var))}$$

Le signe de la puissance réactive est fonction de l'angle de déphasage produit par le récepteur considéré :

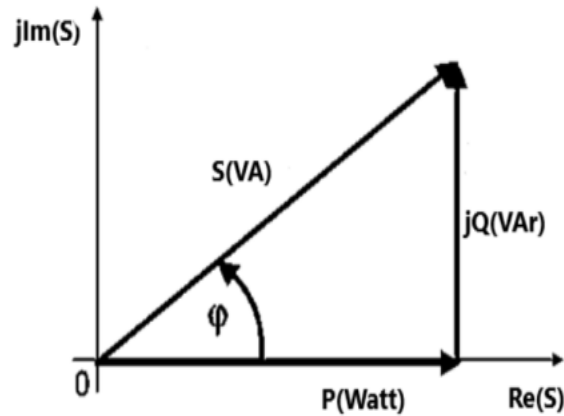
- Pour un récepteur inductif ($\varphi > 0$) la puissance réactive est positif,
- Pour un récepteur capacitif ($\varphi < 0$) la puissance réactive est négatif.

d. Puissance apparente

Cette puissance est souvent appelée «puissance de dimensionnement», elle est la grandeur caractéristique de l'isolation et de la section des conducteurs, c'est-à-dire des dimensions des appareillages. La puissance apparente est une caractéristique de construction des machines électriques. La puissance apparente nominale est alors :

$$S_n = U_n I_n \text{ (Volts Ampères)}$$

On obtient ainsi un triangle rectangle à partir duquel on tire la relation entre P, Q et S

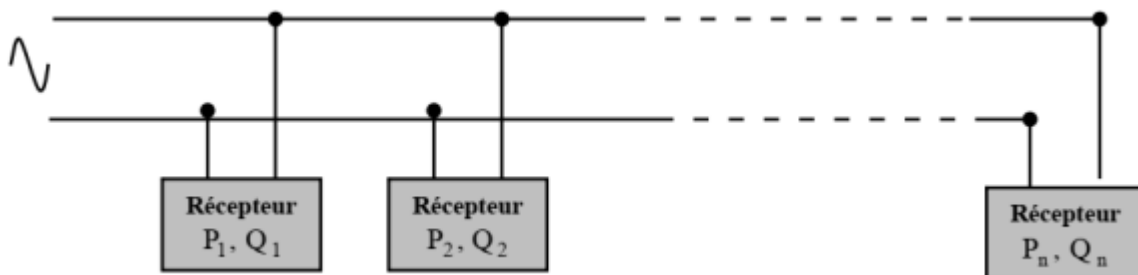


$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Figure 1.4 : Triangle des puissances

I.1.5 Théorème de Boucherot :

Le théorème de Boucherot énonce la conservation des puissances actives et réactives. Dans tout circuit électrique [4]:



La puissance active totale consommée par l'installation est égale à la somme arithmétique des puissances actives consommées par chaque récepteur

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i$$

La puissance réactive totale consommée par l'installation est la somme algébrique des puissances réactives consommées par chaque récepteur.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \sum_{i=1}^n Q_i$$

Par contre les puissances apparentes ne se conservent pas. S n'est pas égale à

$$S_T \neq S_1 + S_2 + \dots + S_n$$

Pour appliquer la méthode de Boucherot à un circuit ou une installation, il faut dresser le bilan des puissances actives et réactives. Ce bilan peut se présenter sous la forme d'un tableau.

Tableau 1 : Bilan de puissance.

Dipôles	Puissance active (w)	Puissance Réactive (Var)
Récepteur 1	P_1	Q_1
Récepteur 2	P_2	Q_2
Récepteur 3	P_3	Q_3
Installation	$P = P_1 + P_2 + P_3$	$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$

I.2 Courant alternatif triphasé

La production d'énergie électrique se fait à partir de différentes sources d'énergies fossiles (charbon, gaz naturel ou pétrole), d'énergie hydraulique, d'énergie solaire, d'énergie éolienne et d'énergie nucléaire.

Un système triphasé est un ensemble de 3 grandeurs (tensions ou courants) sinusoïdales de même fréquence, déphasées les unes par rapport aux autres.

Le système triphasé est équilibré si les tensions (courants) sont déphasées les unes par rapport aux autres de $2\pi/3$ et si elles ont **même valeur efficace** [3].

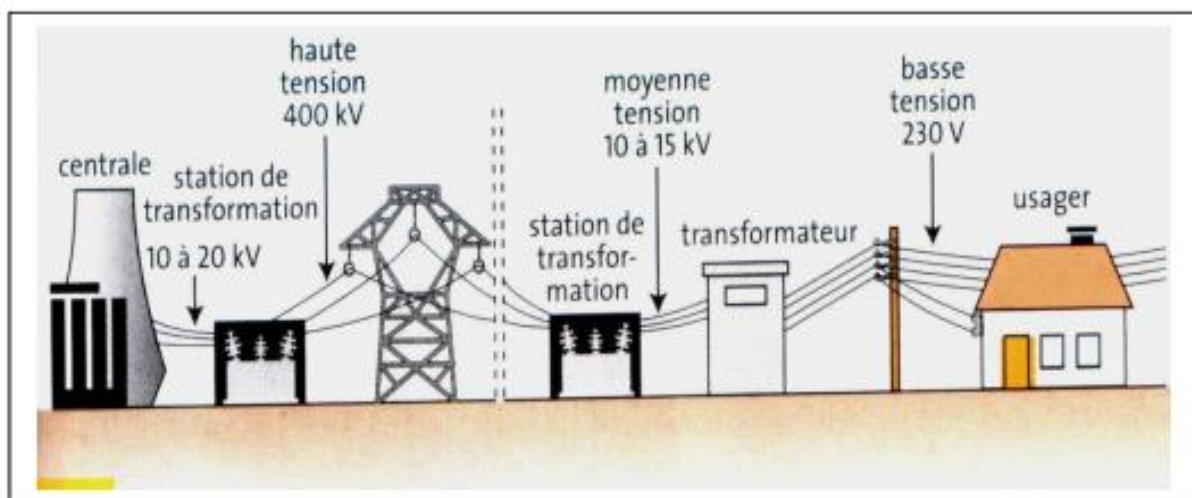


Figure 1.5 : Installation triphasé

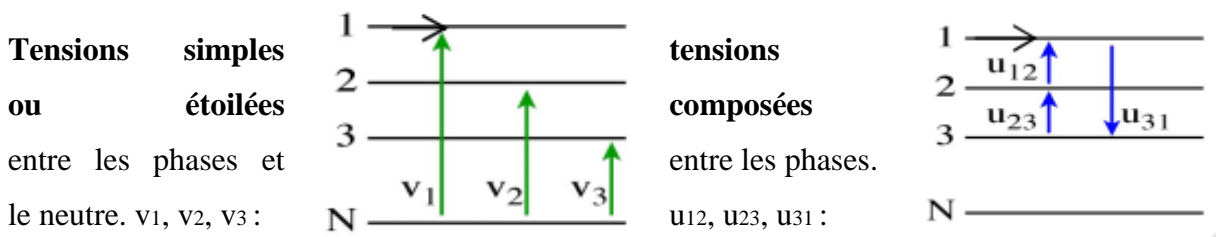
I.2.1 Installations triphasées

Une installation triphasée contient au moins :

- **Réseau triphasé** : C'est une source de 3 tensions formant un système triphasé équilibré de tensions.
- **Un récepteur** : C'est une charge formée de 3 impédances identiques (si le système est équilibré).
- **Des lignes de liaisons.**

La distribution d'énergie se fait à partir de quatre bornes :

Trois bornes de **phase** repérées par 1, 2, 3 ou A, B, C ou R, S, T et Une borne **neutre** N.



Les tensions simples v_1, v_2, v_3 représentent les différences de potentiel entre chaque fil de ligne et le neutre. Elles sont aussi appelée *tension entre phase et neutre*. Leur valeur efficace est notée V .

Les tensions composées u_{12}, u_{23}, u_{31} représentent les différences de potentiel entre deux fils de ligne (phases). Elles sont aussi appelées *tensions entre phases*. Leur valeur efficace est notée U .

Les courants de Lignes : i_1, i_2, i_3

Le 4^{ème} fil, appelé neutre N. Le courant de neutre $i_N = i_1 + i_2 + i_3 = 0$ si le système est équilibré.

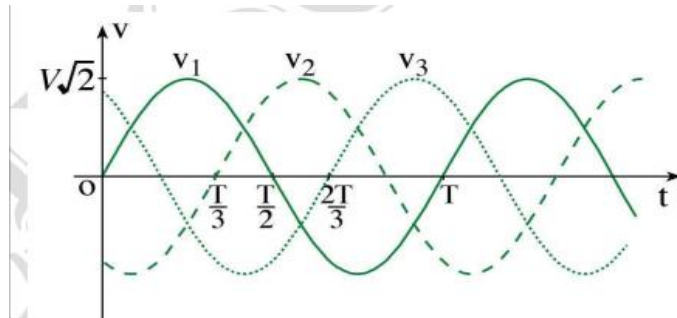
Tensions Simples.

Système triphasé équilibré de tension :

$$V_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$V_2(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

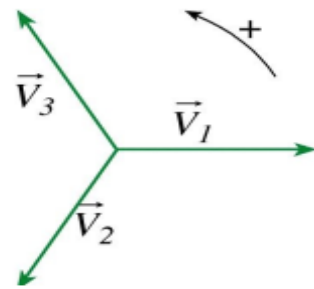
$$V_3(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$



Représentation de Fresnel :

$$V_1(t) = Ve^{j0}; \quad V_2(t) = Ve^{j(-\frac{2\pi}{3})}; \quad V_3(t) = Ve^{j(-\frac{4\pi}{3})}$$

Système Equilibré : $\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = \vec{0}$

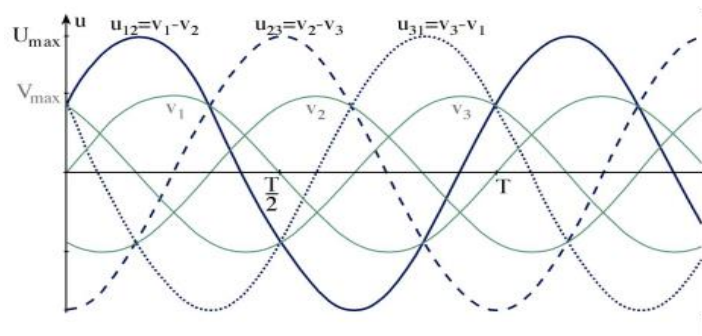


Tensions composées

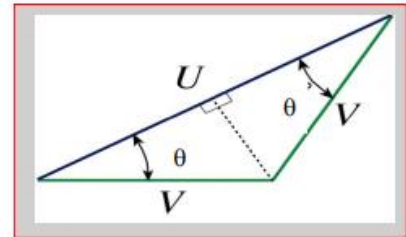
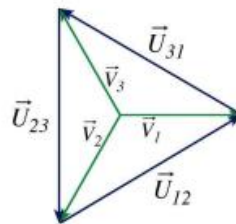
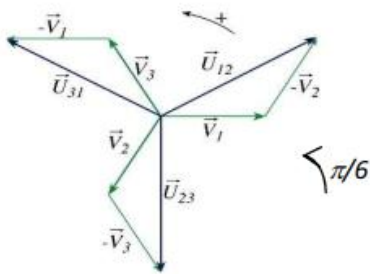
$$V_1 - V_2 = U_{12} \Rightarrow \vec{V}_1 - \vec{V}_2 = \vec{U}_{12}$$

$$V_2 - V_3 = U_{23} \Rightarrow \vec{V}_2 - \vec{V}_3 = \vec{U}_{23}$$

$$V_3 - V_1 = U_{31} \Rightarrow \vec{V}_3 - \vec{V}_1 = \vec{U}_{31}$$



Représentation de Fresnel :



D'après le triangle on a :

$$V_1 - V_2 = V\sqrt{2} \left[\cos 0 + j \sin 0 - \cos\left(\frac{-2\pi}{3}\right) - \sin\left(\frac{-2\pi}{3}\right) \right] = V\sqrt{2} \left[1 + 0 + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right] = V\sqrt{2}\sqrt{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right]$$

$$U_{12} = Ue^{j\frac{\pi}{6}}; \quad U_{23} = Ue^{j(-\frac{\pi}{2})}; \quad U_{31} = Ue^{j(-\frac{7\pi}{6})}$$

$$U_{12}(t) = U\sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$U_{23}(t) = U\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

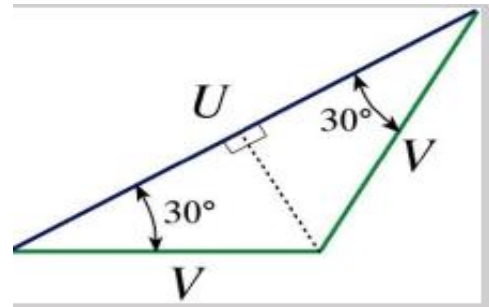
$$U_{31}(t) = U\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

Relation entre V et U

On déduit la relation entre la valeur efficace des tensions simples et celle des tensions composées :

$$U/2 = V \cos(30)$$

Doù : $U = V\sqrt{3}$



I.2.2 Couplages des générateurs et des récepteurs

Les récepteurs triphasés équilibrés sont constitués de trois dipôles identiques, d'impédance Z.

Les courants qui traversent les éléments Z du récepteur sont appelés courants de phase du récepteur et notés J.

Les courants qui passent dans les fils du réseau triphasé sont appelés Courants de Ligne et notés I

A. Couplage étoile : Y

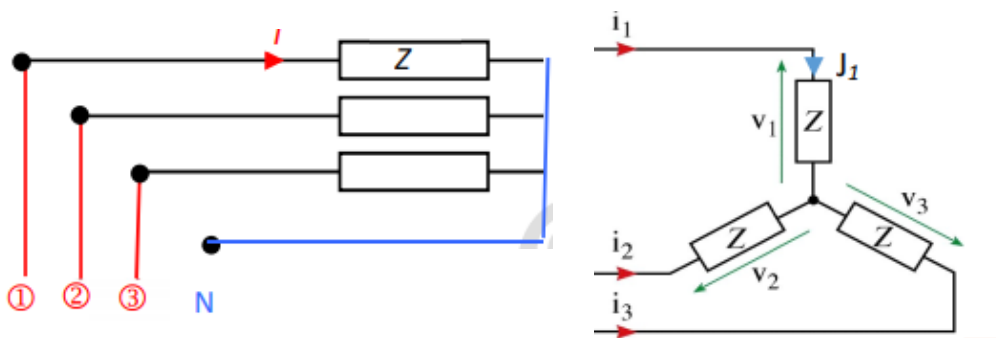


Figure 1.6 : Couplage étoile

Remarque

→ Le courant de phase du récepteur J = au courant de ligne I

→ La tension aux bornes d'un élément Z est la tension simple du réseau V.

Puissances

Pour une phase du récepteur : $P_1 = V.I.\cos \varphi$ avec $\varphi(\vec{I}, \vec{V})$

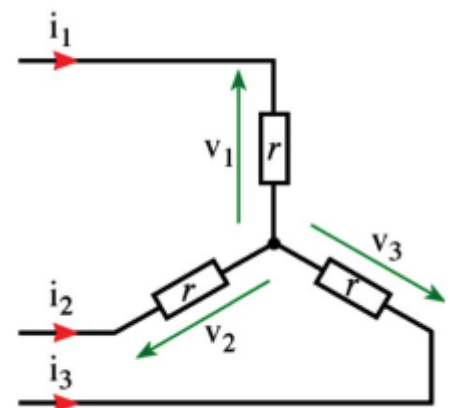
Pour le récepteur complet : $P = 3.V.I.\cos \varphi$

Finalement pour le couplage étoile :

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

$$Q = \sqrt{3}.U.I.\sin \varphi$$

$$S = U.I$$



Facteur de puissance : $K = \cos \varphi$

Pertes par effet Joule

Considérons que la partie résistive du récepteur.

Pour une phase du récepteur : $P_{J1} = r.I^2$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_{J1} = 3r.I^2$

Résistance vue entre deux bornes : $R = 2.r$.

Finalement pour le couplage étoile : $P = \frac{3}{2}.R.I^2$

B. Couplage triangle : $\Delta\Delta$

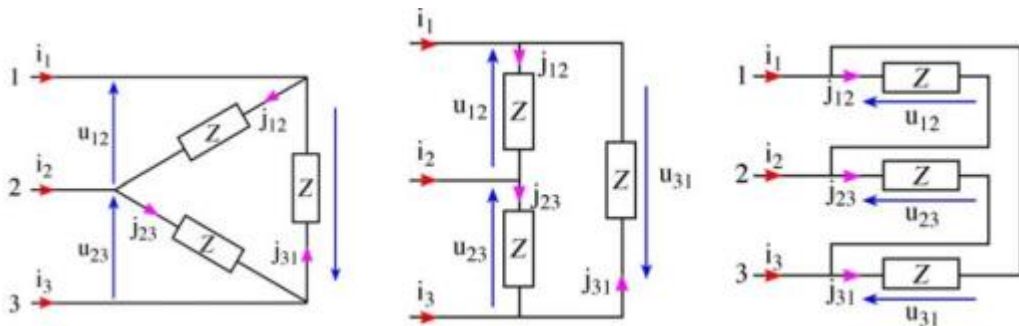


Figure 1.7 : Couplage triangle

Chaque borne de chacun des 3 composants est reliée à une phase du réseau.

La tension aux bornes d'un élément est la tension composée du réseau : U

La loi des nœuds impose : $i_3 = j_{31} - j_{23}$; $i_2 = j_{23} - j_{12}$; $i_1 = j_{12} - j_{31}$;

Par le même calcul que les tensions on trouve $I = \sqrt{3} J$

Remarque

→ Le courant de ligne $I = \sqrt{3} \times$ Le courant de phase du récepteur J

→ La tension aux bornes d'un élément Z est la tension composée U

Puissances

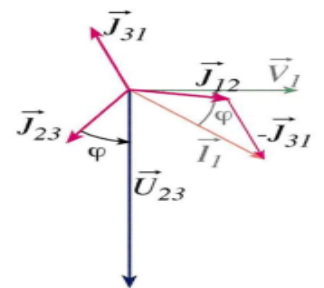
Pour une phase du récepteur : $P_1 = U.J.\cos \varphi$ avec $\varphi(\vec{U}, \vec{J})$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_1 = 3.U.J.\cos \varphi$

Finalement pour le couplage Triangle :

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

$$Q = \sqrt{3}.U.I.\sin \varphi$$



$$S = U.I$$

Facteur de puissance : $K = \cos \varphi$

Pertes par effet Joule

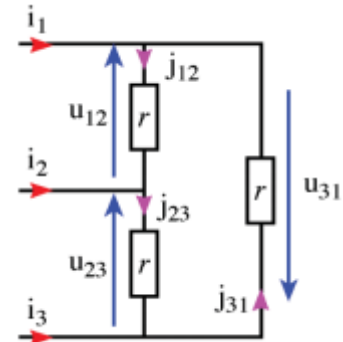
Considérons que la partie résistive du récepteur.

Pour une phase du récepteur : $P_{J1} = r.I^2$

Pour le récepteur complet : $P = 3.P_{J1} = 3r.J^2$

Résistance vue entre deux bornes : $R = \frac{2.r.r}{2.r + r} = \frac{2}{3}r$

Finalement pour le couplage Triangle : $P = \frac{3}{2}.R.I^2$

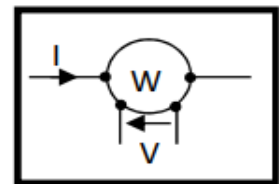


I.2.3 Mesure des puissances

I.2.3.1 Le wattmètre : permet de mesurer la puissance active consommée par un dipôle. Il est constitué de deux circuits, l'un parcouru par le même courant $i(t)$ que le dipôle, l'autre soumis à la même tension $v(t)$ que le dipôle. Il indique $\langle v(t).i(t) \rangle$.

En régime sinusoïdal, il indique $W = V.I.\cos(\vec{V}, \vec{I}) = \vec{V}.\vec{I}$

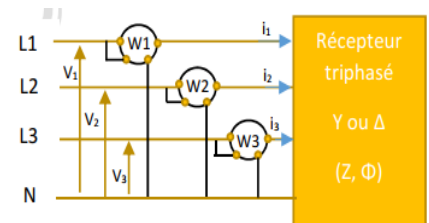
donc : L'indication est **algébrique**.



I.2.3.2 Mesure de puissances actives par trois wattmètres.

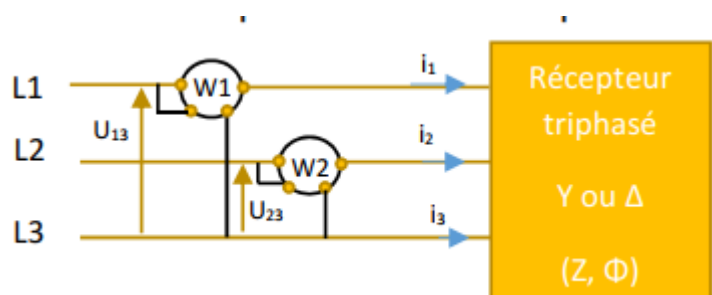
La mesure de la puissance active par trois wattmètres donne :

$$P = \vec{V}_1.\vec{I}_1 + \vec{V}_2.\vec{I}_2 + \vec{V}_3.\vec{I}_3 = W_1 + W_2 + W_3$$



I.2.3.3 Méthode des deux wattmètres pour la mesure de P et Q

Si le neutre n'est pas relié ou si le courant qui le traverse est nul, on utilise que deux wattmètres pour mesurer les puissances.

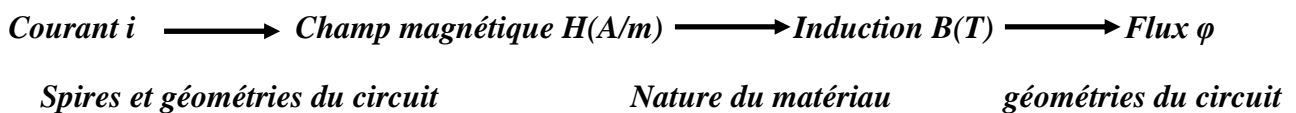


On en déduit que :

$$P = W_1 + W_2 = \sqrt{3}.U.I.\cos \varphi \text{ et } Q = \sqrt{3}.(W_1 - W_2) = \sqrt{3}.U.I.\sin \varphi$$

I.3 Propriétés élémentaires du circuit magnétique.

Les inductances, transformateurs, alternateurs, machines asynchrones, etc., sont basées sur l'utilisation de *circuits magnétiques*, c'est-à-dire de masses de matériaux dits «magnétiques» propres à canaliser une *induction magnétique*. Plus que de l'induction, on parle souvent du «flux» de cette induction. La *figure ci-dessous* présente un résumé des grandeurs mises en jeu dans les circuits magnétiques linéaires [13].



I.3.1 Notion sur les grandeurs magnétiques

I.3.1.1 Lois fondamentales en électromagnétisme

L'ensemble des phénomènes qui interviennent en électrotechnique et dans les machines est basé sur deux lois simples, à savoir [14] :

Loi de Biot et Savard ou le théorème d'Ampère (circuits magnétiques-transformateurs)

L'expression de la force de Laplace, ou Lorentz (machines électriques)

I.3.1.2 Production d'un champ magnétique (loi d'Ampère)

Si on considère un fil parcouru par un courant. Ce courant produit un champ magnétique circulaire.

L'intensité de ce champ est donnée par la loi d'Ampère :

$$\int H \cdot dl = I \text{ Théorème d' Ampère}$$

Afin de créer un champ uniforme, on utilise une bobine pour concentrer les lignes de champs en un même endroit.

A l'intérieur de la bobine, les champs magnétiques *s'additionnent* pour créer un *champ plus intense* et plus uniforme.

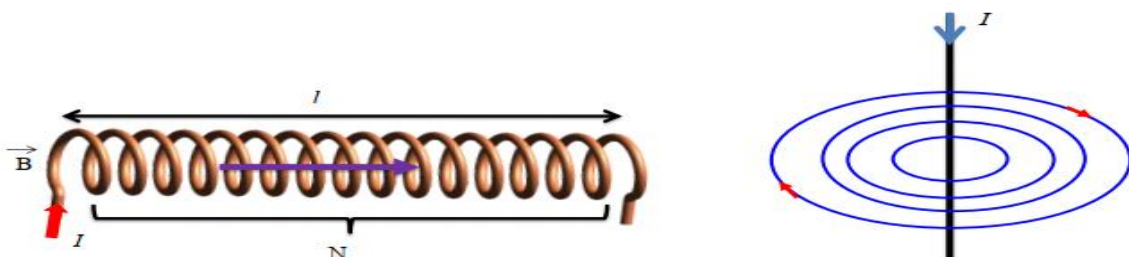


Figure 1.8 Champ magnétique créé par un courant électrique.

I.3.1.3 Induction magnétique En présence de matière, le champ induit dans cette matière une **polarisation magnétique** J (une orientation et une agitation des molécules ou des atomes de la matière) dont les effets s'ajoutent à ceux de H et on est conduit à définir un nouveau vecteur, **l'induction magnétique**.

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

L'induction magnétique B dépend de la source et du point de mesure.

Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$.

Perméabilité relative (par rapport au vide) : μ_r (sans dimension - μ_r peut varier en fonction des paramètres telle que la température).

Perméabilité : $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \text{ (H.m}^{-1}\text{)}$.

La perméabilité est la faculté que possède un matériau à canaliser le champ magnétique, c'est à dire à concentrer les lignes de champ du spectre magnétique ou à augmenter la valeur de l'induction magnétique.

I.3.1.4 Le flux magnétique

Le flux magnétique circulant dans une surface S est l'ensemble des lignes de force qui traversent la surface :

$$\Phi = \int_S B \cdot ds = B \cdot S$$

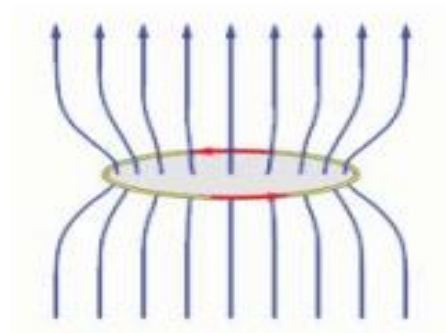
Le flux magnétique est conservé au sein d'un tube de champ. Le même flux qui traverse la surface S_1 traverse la surface S_2

$$\Phi = B_1 \cdot S_1 = B_2 \cdot S_2$$

Cas de bifurcation ou un nœud (où le flux rencontre deux chemins différents)

$$\Phi_{TOTAL} = \Phi_1 + \Phi_2$$

$$B_1 \cdot S_1 = B_2 \cdot S_2 + B_3 \cdot S_3$$



I.3.1.5 Théorème d'Ampère

Le théorème d'Ampère permet de déterminer la *valeur du champ magnétique* grâce à la *donnée des courants électriques*. On prend l'exemple d'une bobine dans laquelle circule un courant I . La bobine crée alors une *force magnétomotrice (fmm)* qui *fait circuler un flux magnétique* dans le milieu.

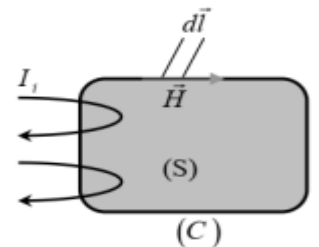
C'est semblable au même phénomène que les circuits électriques : une force électromotrice déplace des électrons qui circulent dans le milieu.

La circulation du vecteur \mathbf{H} le long d'une courbe fermée (C) quelconque est égale à la *somme algébrique des courants* traversant la surface S s'appuyant sur le contour (C).

La simplification du théorème d'ampère donne la relation reliant le champ magnétique au courant exciteur.

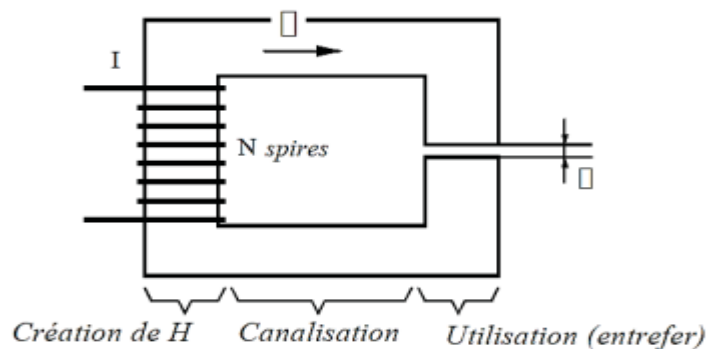
$$FMM = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{i=1}^n N_i I_i$$

I_i : Les courants qui traversent (S). N_i : Nombre de tours du conducteur i .



I.3.2 Calcul du circuit magnétique

Ils sont basés sur l'utilisation de *matériaux ferromagnétiques* avec comme but d'obtenir un champ d'induction B dans une *zone précise (entrefer)*. Pour ce faire, on crée un champ d'excitation H à l'aide de bobinage puis on le *canalise vers la zone d'utilisation (entrefer)*



On retrouve trois éléments :

1. le *bobinage* qui *génère l'excitation* et donc le champ ;
2. la *culasse* qui *dirige le champ H* vers la zone utile. La culasse impose le parcours du champ magnétique de part sa *grande perméabilité* par rapport à l'air. Le matériau qui compose la « culasse » se comporte comme un tube de champ ;

3. l'entrefer où l'on souhaite utiliser le champ. L'entrefer est la zone d'interaction avec l'extérieur

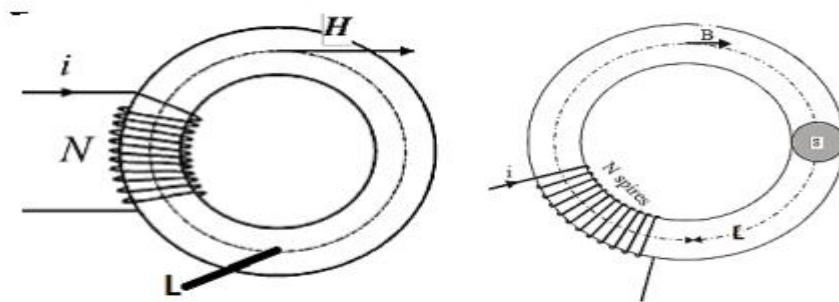
La mise en équation se base sur les trois lois fondamentales

Conservation du Flux – Théorème d'Ampère – Loi des matériaux

I.3.2.1 Cas d'un circuit série homogène relation d'Hopkinson et reluctance :

Le circuit est constitué par le *même matériau* en formant un circuit fermé. Dans ce cas le circuit magnétique se confond avec un tube de champ de *longueur L*.

Tout le flux est canalisé par le circuit. De plus, il a un comportement linéaire en tout point



D'après le théorème d'Ampère

$$FMM = \oint_C H \cdot dl = \sum_{i=1}^n N \cdot I$$

dans notre cas

$$H \cdot L = N \cdot I$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I}{L}$$

L : longueur moyenne des lignes de champ [m]

N : nombre de spires de la bobine

I : courant dans la bobine [A]

H : excitation magnétique [A/m]

Enfin l'expression du flux de cette induction Φ , s'écrit à partir de :

$$\Phi = B \cdot S = \mu \frac{N \cdot I}{l} S = \frac{\mu \cdot S}{l} N \cdot I$$

La formule obtenue s'appelle la relation d'Hopkinson, il est possible d'y faire apparaître une grandeur ne dépendant que des caractéristiques fixes du circuit :

$$\Phi = \mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu S}, \text{ Appelée la reluctance.}$$

En résumé :

$$\Phi \cdot \mathfrak{R} = N \cdot I$$

Remarques importantes

- La réductance équivalente est la somme des différentes réductances $\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_N + \mathfrak{R}_e$.

- L'excitation magnétique est uniforme $H_2 = H_1$.

Les inductions magnétiques sont différentes $B_1 \neq B_2$

Reluctance en série

La reluctance en série se comporte de la même façon que des résistances en série.

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

Reluctance en parallèle

La reluctance en parallèle se comporte de la même façon que des résistances en parallèle.

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_{eq}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2} + \frac{1}{\mathfrak{R}_3} + \dots + \frac{1}{\mathfrak{R}_N}$$

I.3.2.2 Cas d'un circuit série hétérogène (circuit magnétique avec entrefer)

Dans ce cas le circuit magnétique est constitué par le même circuit ci-dessus, sauf que dans ce cas nous avons créé un *vide (entrefer)*. Alors nous avons deux matériaux : un *ferromagnétique (μ) et l'air (μ_0)*

$$H \cdot (L - \delta) + H_0 \cdot \delta = N \cdot I$$

L : longueur moyenne des lignes de champ [m]

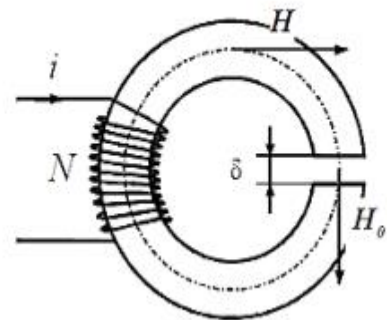
δ : longueur de l'entrefer [m]

N : nombre de spires de la bobine

I : courant dans la bobine [A]

H : excitation magnétique dans la matière [A/m]

H_0 : excitation magnétique dans l'entrefer [A/m]



I.3.2.3 Circuit parallèle (circuit magnétique avec des bifurcations)

Soit le circuit magnétique donné sur figure 1.9. On distingue 03 longueurs, donc trois réluctances.

Le circuit électrique équivalent, par analogie est :

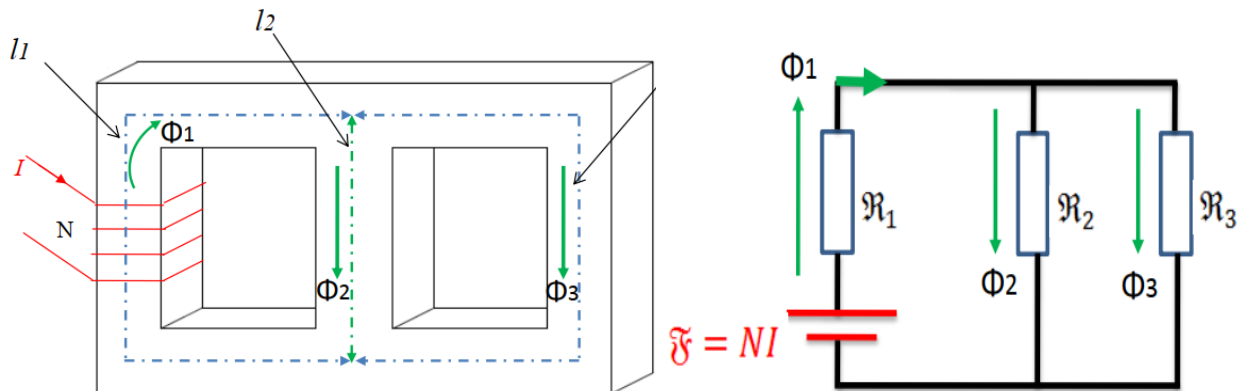


Figure 1.9 Circuit magnétique (rectangulaire) et électrique équivalent.

I.3.3 Quelle analogie peut-on faire entre les circuits magnétiques et électriques ?

Nous pouvons effectuer des analogies entre les circuits électriques et les circuits magnétiques.

L'objectif est de faciliter l'analyse des circuits magnétiques complexes et hétérogènes.

L'analogie nous permet de calculer les différents paramètres magnétiques comme pour un circuit électrique. Le tableau ci-dessus résume les principaux paramètres de cette analogie :

Circuit magnétique	Circuit électrique
Flux de l'induction (Φ)	Courant (I)
Réluctance (\mathfrak{R})	Résistance (R)
Champ magnétique (H)	Champ électrique (E)
Loi d'ampère $NI = \Phi \mathfrak{R}$	Loi d'Ohm $V = RI$
Force magnétomotrice \mathfrak{F} : fmm (At)	Force électromotrice : fem (V)

Tableau 4.1 : Analogies circuits magnétiques / circuits électriques

I.3.4 Pertes magnétiques

Dans le contexte de la conception des dispositifs électromagnétiques, il est devenu nécessaire et important de dimensionner les pertes magnétiques pour espérer une bonne évaluation des performances (notamment le rendement et les échauffements) [14].

Il existe deux grandes sources de pertes dans les matériaux magnétiques traversés par un courant, à savoir :

1- Pertes par courants de Foucault.**2- Pertes par hystérésis.****I.3.4.1 Pertes par courants de Foucault**

La variation du champ magnétique induit dans le noyau crée une densité de courant induit dans le matériau. Ceux-ci sont appelés courants de Foucault. Ces courants induits créent des pertes par effet de Joule RI^2 . Ces pertes sont dissipées sous forme de chaleur. Les pertes par courant de Foucault en (W/m^3) dans un matériau peuvent être exprimées (formule approchée) par :

$$P = \frac{\pi^2}{6\rho} e^2 \cdot B_{max}^2 \cdot f^2$$

ρ : Résistivité du matériau

e : Epaisseur de la tôle

f : Fréquence de variation du champ

Afin de réduire l'échauffement du matériau et de diminuer ces pertes d'énergie, on utilise des tôles minces isolées entre elles de façon à minimiser les boucles de courant dans le matériau.

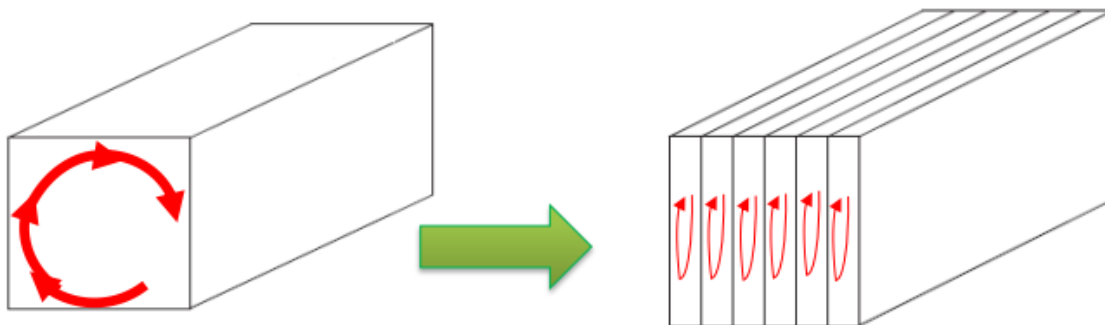


Figure 1.10 Courants de Foucault dans un bloc de matériau massif (gauche), et dans un matériau laminé (droite).

I.3.4.2 Pertes par hystérésis

L'hystérésis est particulièrement évidente lorsqu'une substance ferromagnétique est soumise à un champ magnétique périodique (sinusoïdal). De chaque période, la caractéristique $B(H)$ forme un cycle fermé appelé cycle d'hystérésis qui représente les différents chemins pendant l'aimantation et la désaimantation. La figure 1.11 représente un cycle Tyrique.

L'énergie dissipée pendant une période T est :

$$W = \int_0^T H \cdot dB$$

Le résultat de cette intégrale représente une surface du cycle d'hystérésis.

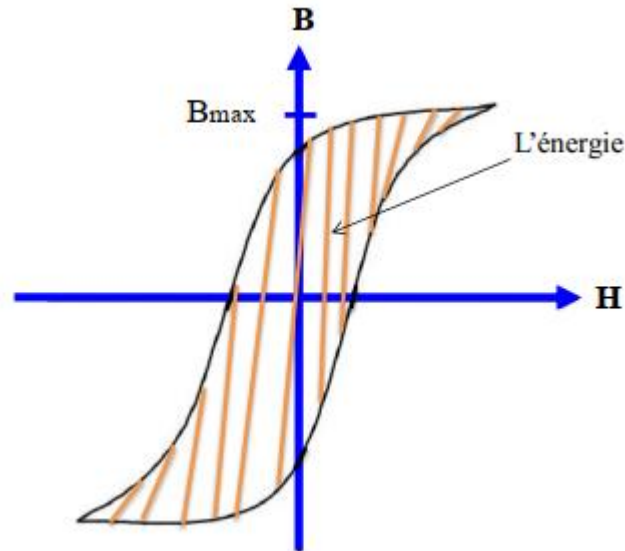


Figure 1.11 La surface d'un cycle d'hystérésis.

Alors l'énergie dissipée dans le noyau de volume V durant une période s'exprime par :

$$W = V \cdot \int_0^T H \cdot dB$$

Enfin les pertes par hystérésis dans le noyau sont :

$$P_H = \frac{dW}{dt} = \frac{W}{T} = W \cdot f$$

Les pertes par hystérésis sont directement proportionnelles à la surface du cycle d'hystérésis et à la fréquence d'alimentation.

Chapitre II

Transformateurs

II.1 Introduction

Le transformateur permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique [5].

Symboles :



Figure 2.1 Symboles du transformateur.

II.2 Principe de fonctionnement

Le transformateur est constitué de *deux enroulements* (ou plus) couplés sur un *noyau magnétique* (un matériau ferromagnétique)

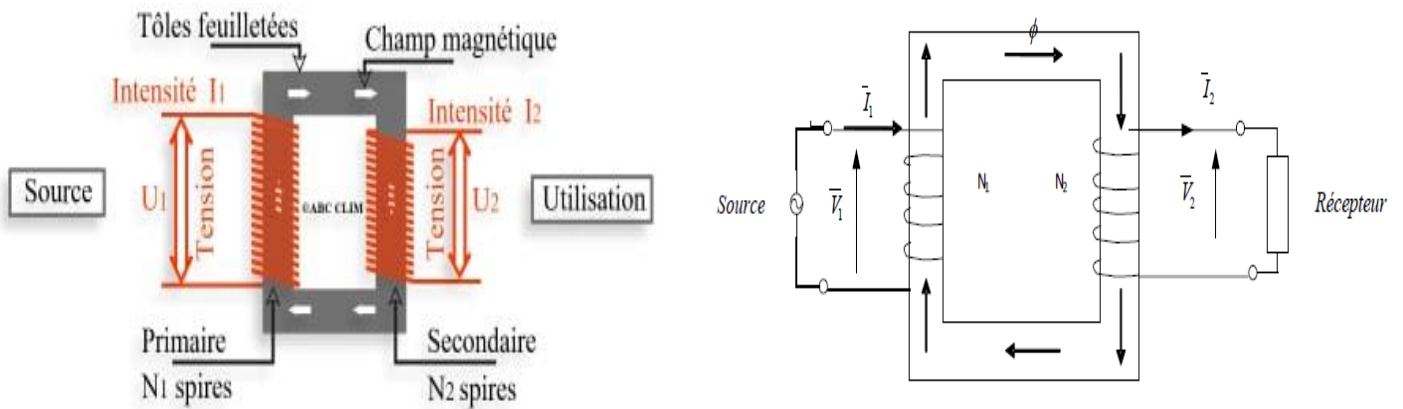


Figure 2.2 Transformateur monophasé.

Le côté de la *source* est appelé *primaire*. Le côté de la *charge* est appelée *secondaire*. Le flux ϕ est le flux mutuel. Il faut remarquer *qu'il n'existe aucune connexion électrique* entre le primaire et le secondaire. Tout le *couplage* entre les deux enroulements est *magnétique*.

Rappel : **LOI DE FARADAY**

Une variation de flux magnétique à travers une spire crée une F.E.M. Inversement une F.E.M. dans une spire crée une variation de flux à travers celle-ci [6].

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Lorsqu'on applique une *tension alternative* à la source, ceci crée un *flux alternatif* dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des *forces électromotrices (fem)* dans les bobines. La *force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours* dans la bobine et au taux de variation du flux.

Selon le *rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire*, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source.

Si $U_1 < U_2$, le transformateur est dit *élévateur de tension* ;

Si $U_1 > U_2$, le transformateur est dit *abaisseur de tension* ;

Si $U_1 = U_2$, le transformateur est un transformateur d'*isolement* ;

II.3 Transformateur monophasé Idéal:

Un transformateur idéal [9] :

- Pas de fuite magnétique, dans ce cas la reluctance du noyau sera nulle (la perméabilité est infinie).*
- Pas de pertes Joule ($r_1=r_2=0$).
- Enroulement sont fuite magnétique.

- **Equations aux tensions**

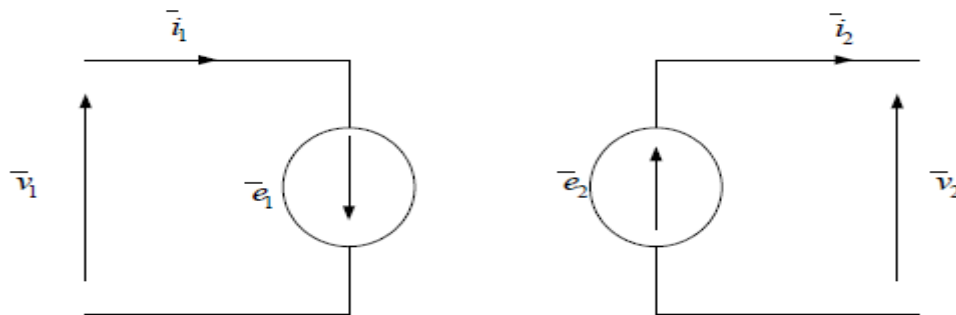


Figure 2.3 Transformateur monophasé Idéal

D'après la loi de mailles appliquée au schéma électrique équivalent on aura :

$$V_1(t) + e_1(t) = 0 \text{ Avec } e_1(t) = -N_1 * \frac{d\Phi}{dt}$$

$$V_2(t) + e_2(t) = 0 \text{ Avec } e_2(t) = -N_2 * \frac{d\Phi}{dt}$$

En écriture complexe on aura :

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = j * N_1 * w * \bar{\Phi} \\ \bar{V}_2 = -j * N_2 * w * \bar{\Phi} \end{cases}$$

En valeurs efficaces $m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1}$

m est appelé rapport de transformation

Selon la valeur qui prend m, on peut distinguer :

m=1: le transformateur est un isolateur

m<1: le transformateur est dit abaisseur

m>1: le transformateur est dit élévateur

• **Equations aux intensités**

D’après la loi d’Hopkinson appliquée au schéma magnétique équivalent, on aura :

$$N_1 * \bar{I}_1 + N_2 * \bar{I}_2 = \mathfrak{R} * \bar{\Phi}$$

Or par hypothèse la reluctance du circuit magnétique est supposée nulle $\mathfrak{R} = 0$

$$N_1 * \bar{I}_1 + N_2 * \bar{I}_2 = 0$$

En valeurs efficaces on aura :

$$m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

II.3.1 Schéma équivalent et diagramme vectoriel

• **Schéma équivalent**

Le schéma équivalent d’un transformateur monophasé parfait est représenté par la figure 2.4

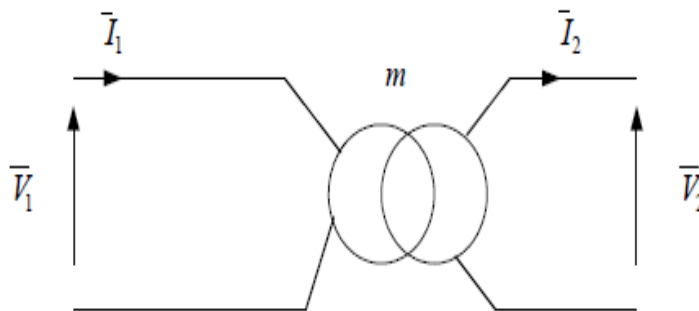


Figure 2.5 Schéma équivalent

• **Diagramme vectoriel**

Ce diagramme vectoriel traduit les équations précédentes

Soit m, V2, I2 et Ø2 données

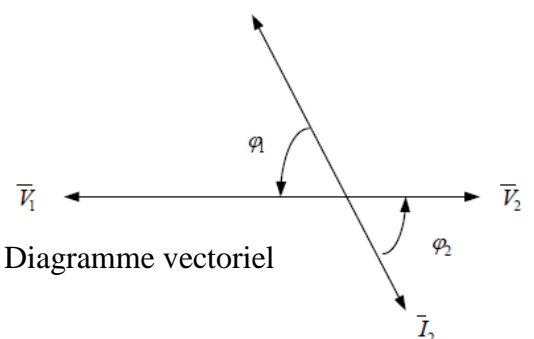


Figure 2.6 Diagramme vectoriel

On aura : $\overline{V_1} = \frac{-\overline{V_2}}{m}$, $\overline{I_1} = m * \overline{I_2}$ et $\varphi_1 = \varphi_2$

II.4 Transformateur monophasé réel :

Pour modéliser le transformateur réel, on doit tenir compte des grandeurs qui ont été négligées au cours d'étude d'un transformateur parfait [9].

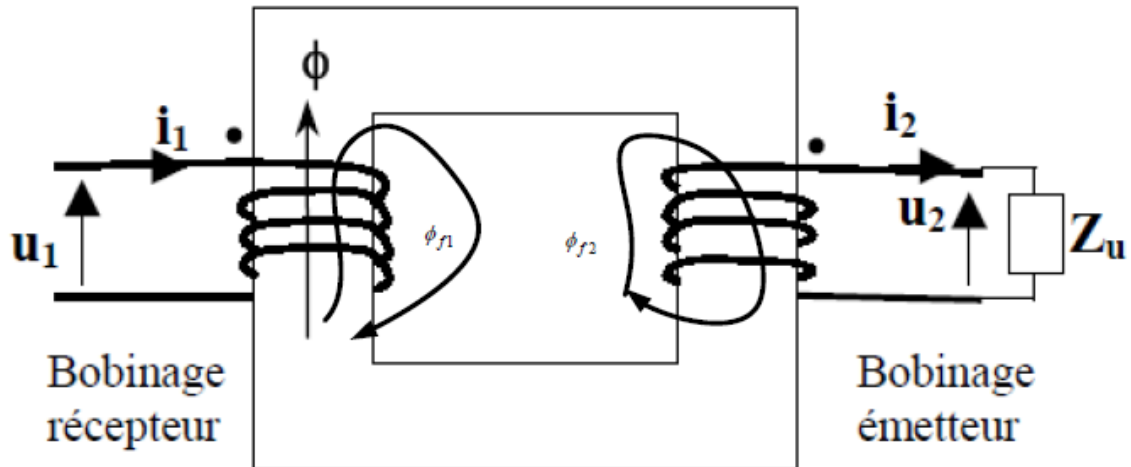


Figure 2.7 Transformateur réel

II.4.1-Equations de fonctionnement

Soit :

$\varphi_1 = \varphi + \varphi_{f1}$: Le flux à travers l'enroulement primaire

$\varphi_2 = \varphi + \varphi_{f2}$: Le flux à travers l'enroulement secondaire

On aura :

$$l_1 = \frac{N_1 * \varphi_{f1}}{I_1} : \text{Inductance de fuites au primaire}$$

$$l_2 = \frac{N_2 * \varphi_{f2}}{I_2} : \text{Inductance de fuites au secondaire}$$

II.4.2 Equations aux 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.

$$e_{l_1}(t) = -N_1 * \frac{d\varphi_1(t)}{dt}$$

$$e_{l_1}(t) = -N_1 * \frac{d(\varphi(t) + \varphi_{f1}(t))}{dt} = -N_1 * \frac{d\varphi(t)}{dt} - N_1 * \frac{d\varphi_{f1}(t)}{dt} = -N_1 * \frac{d\varphi(t)}{dt} - l_1 * \frac{di_1(t)}{dt}$$

Appliquons la loi des mailles au primaire

$$V_1(t) + e_{11}(t) = r_1 * i_1(t) \quad (r_1 : \text{Résistance de l'enroulement primaire})$$

$$V_1(t) = N_1 * \frac{d\varphi(t)}{dt} + l_1 * \frac{di_1(t)}{dt} + r_1 * i_1(t)$$

Et en écriture complexe :

$$\bar{V}_1 = -j * N_1 * w * \bar{\varphi} + j_1 * N_1 * w * \bar{I}_1 + r_1 * \bar{I}_1$$

$$\text{Si on pose } \bar{E}_1 = -j * N_1 * w * \bar{\varphi} \text{ on obtient : } \bar{V}_1 = -\bar{E}_1 + j * N_1 * w * \bar{I}_1 + r_1 * \bar{I}_1$$

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

$$\text{Même chose pour le secondaire : } \bar{E}_2 = \bar{V}_2 + j * N_2 * w * \bar{I}_2 + r_1 * \bar{I}_2$$

II.4.3 Equations aux ampères-tours

- A vide, la force magnétomotrice (f.m.m) est égale à $N_1 * \bar{I}_{10}$, elle crée un flux ϕ dans le Circuit magnétique.
- En charge, la force magnétomotrice (f.m.m) est égale à $N_1 * \bar{I}_1 + N_2 * \bar{I}_2$, elle crée le même Flux ϕ dans le circuit magnétique.

$$\text{Par conséquent, on aura : } N_1 * \bar{I}_1 + N_2 * \bar{I}_2 = N_1 * \bar{I}_{10} \text{ donc } \bar{I}_1 = m_2 * \bar{I}_2 + \bar{I}_{10}$$

II.4.4 Schéma équivalent

Si on désigne respectivement par :

- $r_1(\Omega)$: résistance de l'enroulement primaire
- $r_2(\Omega)$: résistance de l'enroulement secondaire
- $l_1(H)$: Inductance de l'enroulement primaire
- $l_2(H)$: Inductance de l'enroulement secondaire
- $R_f(\Omega)$: résistance de circuit magnétique
- $X_m(\Omega)$: réactance de circuit magnétique

Le schéma équivalent du transformateur réel est représenté par la figure 2.8

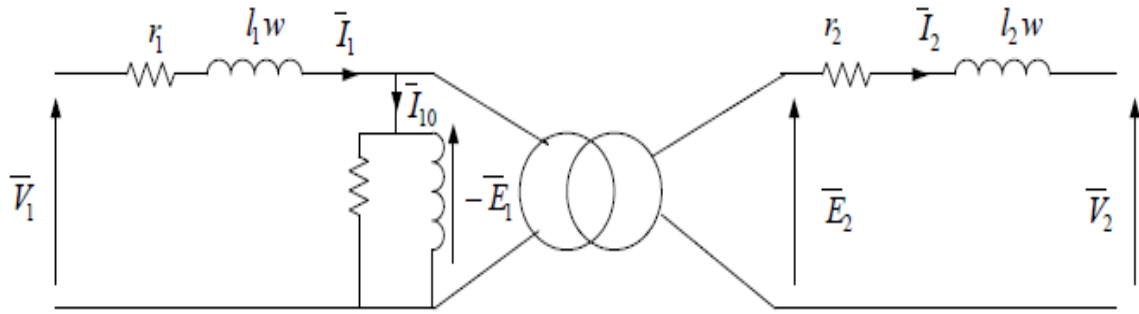


Figure 2.8 Schéma équivalent

II.4.5 Transformateur monophasé dans l'approximation de Kapp

II.4.5.1 Hypothèse

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant I_{10} devant le courant I_1

II.4.5.2 Schéma équivalent

Ne pas tenir compte de I_{10} , revient à débrancher l'impédance magnétisante ($R_f // X_m$), le schéma équivalent devient :

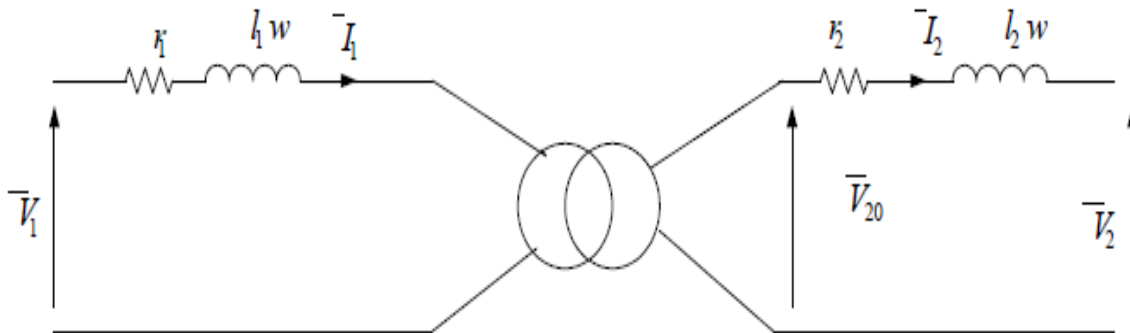


Figure 2.9 Schéma équivalent + hypothèse de Kapp

$X_1 = l_1 * w$: Réactance de fuites au primaire

$X_2 = l_2 * w$: Réactance de fuites au secondaire

✓ Schéma équivalent ramené au secondaire

On peut faire passer l'impédance $\bar{Z}_1 = R_1 + j * l_1 * w$ du primaire au secondaire, il suffit de la multiplier par m^2 . on obtient le schéma suivant :

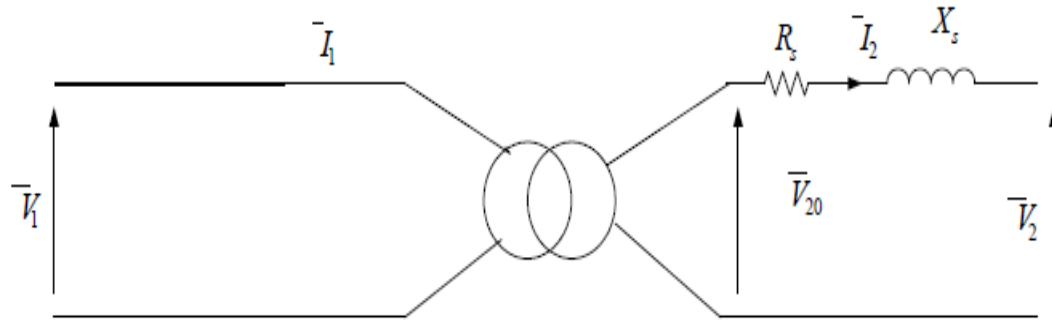


Figure 2.10 Schéma équivalent ramené au secondaire

Avec :

$R_s = r_2 + m^2 * r_1$: La résistance du transformateur ramenée au secondaire

$X_s = X_2 + m^2 * X_1$: La réactance de fuites magnétiques ramenée au secondaire

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

✓ Schéma équivalent ramené au primaire

On peut faire passer l'impédance $\bar{Z}_2 = r_2 + j * l_2 * w$ du secondaire au primaire, il suffit de la diviser par m^2 . on obtient le schéma suivant :

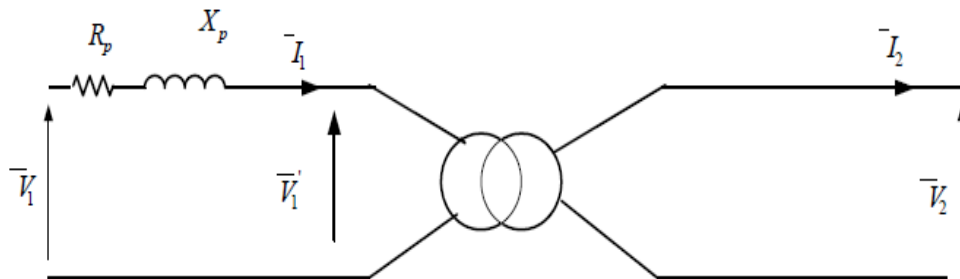


Figure 2.11 Schéma équivalent ramené au primaire

Avec :

$R_p = r_1 + \frac{1}{m^2} * r_2$: La résistance du transformateur ramenée au primaire

$X_p = X_1 + \frac{1}{m^2} * X_2$: La réactance de fuites magnétiques ramenée au primaire

La loi des mailles appliquée au primaire donne : $\bar{V}_1 = \bar{V}'_1 + (R_p + jX_p) * \bar{I}_1$

II.4.5.3 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 absorbés par le primaire comme le montre la figure suivante :

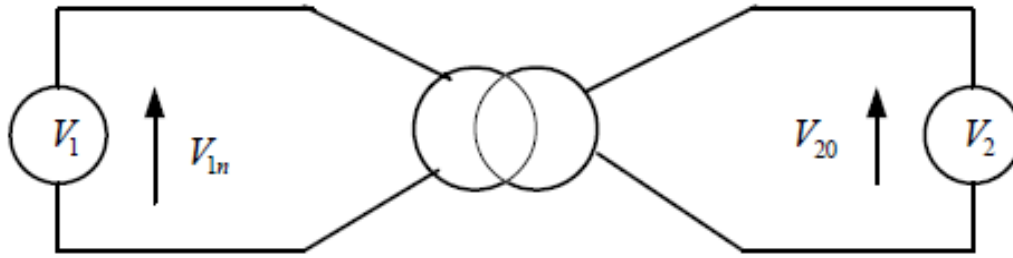


Figure 2.12 Essai à vide

Dans ce cas, on peut déterminer pratiquement :

- Le rapport de transformation $m = \frac{V_{20}}{V_{10}}$
- La résistance de circuit magnétique $R_f = \frac{V_1^2}{P_f} \approx \frac{V_1^2}{P_0}$
- La réactance magnétisante $X_m = \frac{V_1^2}{Q_f} \approx \frac{V_1^2}{Q_0}$

• **Essai en court-circuit sous tension primaire réduite**

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

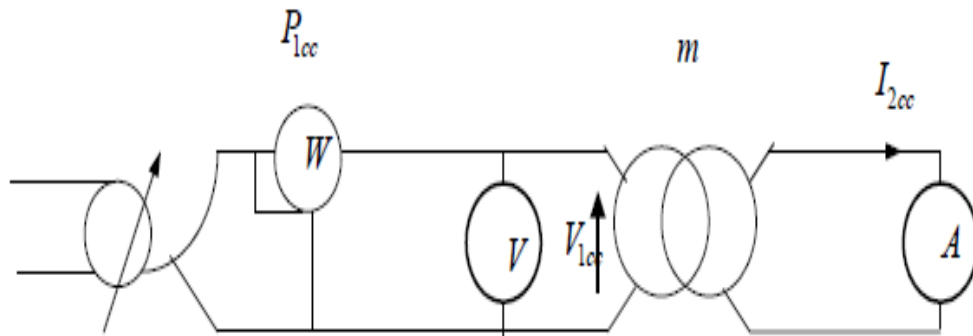


Figure 2.13 Essai en court-circuit

Puisque $V_{1cc} \ll V_{1n} \Rightarrow$ les pertes fer lors de l'essai en court-circuit sont négligeables et par conséquent :

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

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

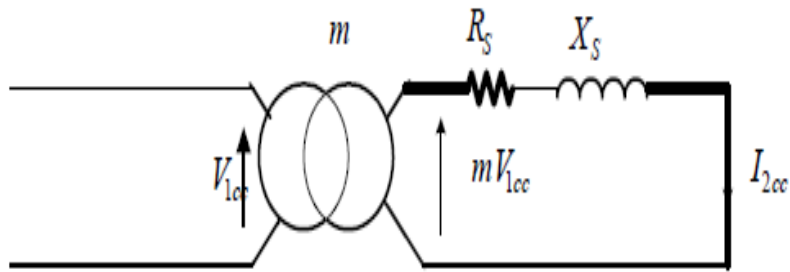


Figure 2.14 schéma équivalent lors l’essai en CC

$$Z_s = m * \frac{V_{1cc}}{I_{2cc}}$$

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

II.4.5.4 Chute de tension

Par définition la chute de tension ΔV_2 est donnée par la différence entre valeurs efficaces de la tension à vide et la tension en charge :

$$\Delta V_2 = V_{2\dot{a}} - V_2$$

- **Remarque**

- ΔV_2 dépend de I_2 et φ_2
- ΔV_2 est une grandeur algébrique elle peut être négative $\Rightarrow V_{20} > V_2$ (surtension)
- Généralement la chute de tension est donnée par sa valeur relative

$$\xi = \frac{\Delta V_2}{V_{2\dot{a}}} * 100$$

- ✓ **Diagramme de Kapp :(solution graphique)**

C’est une application de la relation: $\bar{V}_2 = \bar{V}_{20} - (R_s + jX_s) * \bar{I}_2$ Avec $\bar{V}_{20} = m * V_1$

Les données sont : V_1, m, R_s, X_s, I_2 et φ_2 et on va déterminer V_2

Etapas de construction :

- On choisit une échelle en fonction de V_{20}
- L’axe horizontal étant l’origine des phases, on choisit $dir I_2$ comme origine des phases
- On trace un arc de cercle (o ; V_{20})
- On trace (OA)= $R_s . I_s$
- On trace(AB) \perp (OA) tel que (AB)= $X_s . I_s$
- On trace une droite (Δ) passant par B et faisant un angle φ_2 avec l’horizontale

- V_2 sera donnée par le segment [BC] prise à l'échelle

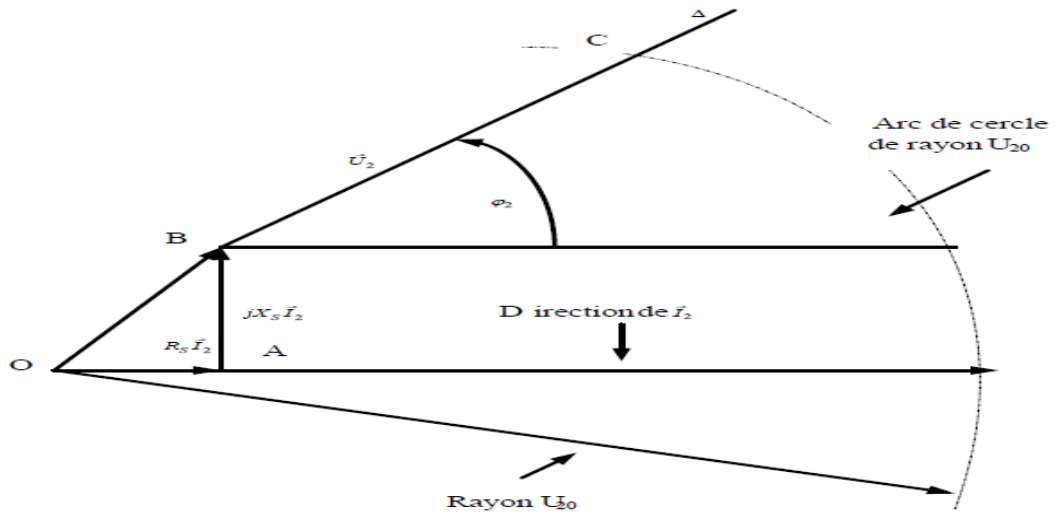


Figure 2.15 Diagramme vectorielle de KAPP

II.4.6 .Rendement du transformateur

- ✓ Bilan des puissances

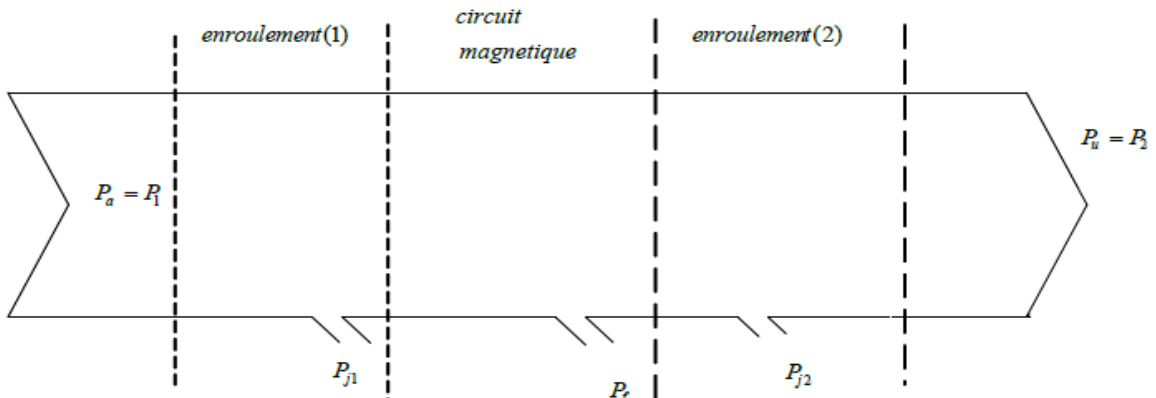


Figure 2.16 Bilan de puissance

Puissance absorbée : $P_a = P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\phi_1)$

$$P_a = P_1 = P_2 + \sum \text{Pertes}$$

Puissance utile : $P_u = P_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\phi_2)$

Pertes par effet joule totales : $P_j = P_{j1} + P_{j2} = R_s \cdot I_2^2 = R_p \cdot I_1^2$

Pertes par effet joule au primaire : $P_{j1} = r_1 \cdot I_1^2$

Pertes par effet joule au secondaire : $P_{j2} = r_2 \cdot I_2^2$

Pertes fer : $P_f = P_0 + r_1 \cdot I_{10}^2 \approx P_0$

✓ Rendement

Le rendement est donné par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \cdot 100 = \frac{P_u}{P_a} \cdot 100$$

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 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum \text{Pertes}} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + R_s \cdot I_2^2 + P_0} \cdot 100$$

L'allure de la courbe de rendement est donnée par la figure 2.17 .C'est une courbe croissante au début, elle passe par un maximum puis elle décroît.

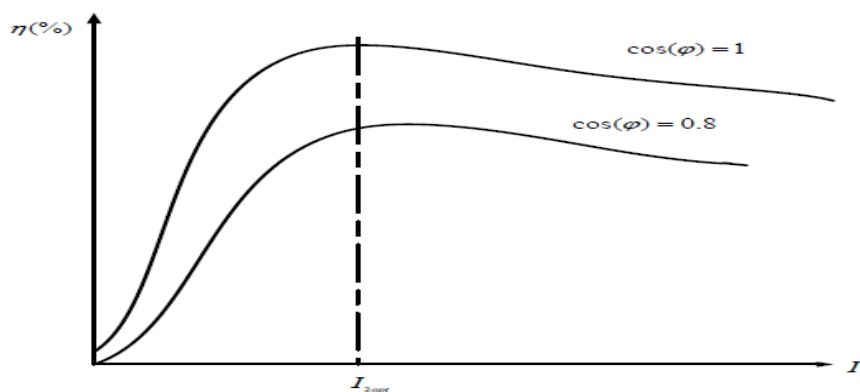


Figure 2.17 Allure de rendement

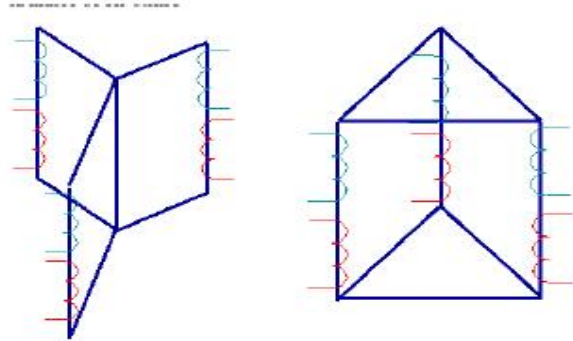
✓ **Remarque :**

- 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 tel que :

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0 \Rightarrow P_j = P_f \Rightarrow I_{2opt} = \sqrt{\frac{P_f}{R_s}}$$

TRANSFORMATEURS TRIPHASES :

Un transformateur triphasé peut être réalisé à partir de 3 transformateurs monophasés (coût de réalisation très important), on préfère généralement faire appel à un transformateur triphasé en un seul bloc [8].

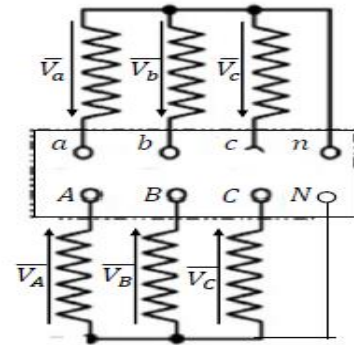


Rapport de transformation :

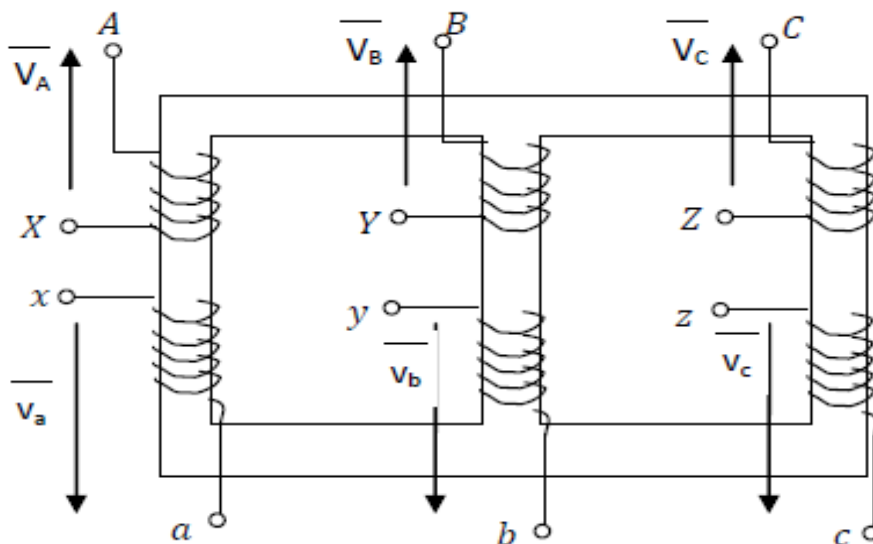
$$m = \frac{U_{abv}}{U_{AB}}$$

Ex : Transformateur étoile – étoile : $Y_n y_n$

$$m = \frac{U_{abv}}{U_{AB}} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{av}}{\sqrt{3} \cdot V_A} = \frac{V_{av}}{V_A} = \frac{n_2}{n_1}$$



Circuit magnétique à 3 colonnes (régime équilibré) :



Le primaire généralement HT, nombre de spires n_1 :

Les bornes A, B, C : les entrées des enroulements

X, Y, Z : les sorties.

Le secondaire généralement BT, nombre de spires n_2 :

Les bornes a, b, c : les entrées des enroulements

x, y, z : les sorties.

Chaque colonne se comporte comme un transformateur monophasé

En régime équilibré

$$|\overline{\Phi}_1| = |\overline{\Phi}_2| = |\overline{\Phi}_3|$$

$(\overline{V}_A \text{ et } \overline{V}_a)$, $(\overline{V}_B \text{ et } \overline{V}_b)$ et $(\overline{V}_C \text{ et } \overline{V}_c)$ Sont en phase

Chaque colonne du transformateur triphasé, se comporte comme un transformateur monophasé. Les enroulements primaires et secondaires enlacent le même flux magnétique au flux de fuites près.

Pour l'étude d'un transformateur équilibré en régime sinusoïdal, on suppose que les enroulements sont identiques respectivement au primaire et au secondaire.

- $r_A=r_B=r_C=r_1$, $r_a=r_b=r_c=r_2$ (résistance par phase primaire et secondaire)

- $l_A=l_B=l_C=l_1$, $l_a=l_b=l_c=l_2$ (inductance de fuites primaire et secondaire par phase)

- $E_A=E_B=E_C=E_1$, $E_a=E_b=E_c=E_2$ (F.E.M par phase primaire et secondaire)

- $I_A=I_B=I_C=I_1$, $I_a=I_b=I_c=I_2$ (courant au primaire et secondaire)

- $V_A=V_B=V_C=V_1$, $V_a=V_b=V_c=V_2$ (Tension par phase primaire et secondaire).

Equations de F.m.m :

a) Cas d'un seul enroulement triphasé secondaire : (Exemple ; Yy et Dd).

$$n_1 \cdot \overline{I}_A - n_2 \cdot \overline{I}_a = n_1 \cdot \overline{I}_{AVr} = \Re \cdot \overline{\Phi}_A$$

b) Cas de deux enroulements triphasés au secondaire :

$$n_1 \cdot \overline{I}_A - n_2 \cdot \overline{I}_a - n_2 \cdot \overline{I}_a = n_1 \cdot \overline{I}_{AVr}$$

$$n_1 \cdot \overline{I}_A - n_2 \cdot \overline{I}_a - n_2 \cdot \overline{I}_a = n_1 \cdot \overline{I}_{AVr}$$

Equations des tensions :

$$\overline{V}_A = r_A \cdot \overline{I}_A + j \cdot l_A \cdot \omega \cdot \overline{I}_a + \overline{E}_A$$

a) **Primaire :**

$$\overline{V}_1 = r_1 \cdot \overline{I}_1 + j \cdot l_1 \cdot \omega \cdot \overline{I}_1 + \overline{E}_1 = (r_1 + j \cdot l_1 \cdot \omega) \cdot \overline{I}_1 + \overline{E}_1$$

$$\begin{aligned}V_A &= V_{1max} \cdot \cos(\omega.t) \\V_B &= V_{1max} \cdot \cos(\omega.t - 2\pi/3) \\V_C &= V_{1max} \cdot \cos(\omega.t - 4\pi/3)\end{aligned}$$

b) Secondaire :

$$\begin{aligned}\overline{V}_a &= -(r_a + j.l_a \cdot \omega) \cdot \overline{I}_a + \overline{E}_a \\ \overline{V}_2 &= -(r_2 + j.l_2 \cdot \omega) \cdot \overline{I}_2 + \overline{E}_2 \\ V_a &= V_{2max} \cdot \cos(\omega.t) \\ V_b &= V_{2max} \cdot \cos(\omega.t - 2\pi/3) \\ V_c &= V_{2max} \cdot \cos(\omega.t - 4\pi/3)\end{aligned}$$

Rmq : pour les autres grandeurs $E_{A,B,C}, I_{A,B,C}, \Phi_{A,B,C}, E_{a,b,c}, I_{a,b,c}$ il suffit d'effectuer des permutations circulaires.

Chute de tension par phase :

$$\overline{V}_2 = \overline{V}_{2v} - \overline{Z}_2 \cdot \overline{I}_2$$

$$\text{Avec } \overline{Z}_2 = R_2 + jX_2$$

$$R_2 = r_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 * r_1 \text{ et } X_2 = \left(l_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 * l_1\right) \cdot \omega$$

$$\Delta V_2 = R_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + R_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

La chute de tension composée :

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} \cdot \Delta V_2$$

N.B : $m = \frac{n_2}{n_1}$ pour les couplages Yy, Zz et Dd, $m = \alpha \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ autre

$$m = \frac{V_{av}}{V_A} = \frac{n_2}{n_1}$$

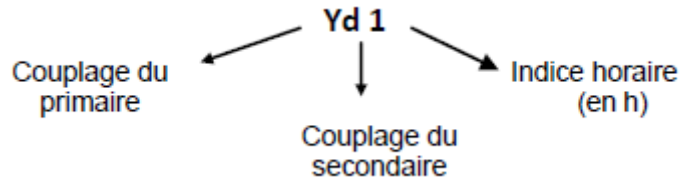
Nom conventionnel et Indice horaire :

L'indice horaire représente le déphasage entre \overline{V}_{av} et \overline{V}_A

L'indice horaire sera souvent exprimé en heures pour plus de commodité puisque ce sera toujours un multiple de $\pi/6 = 1h$.

Pour simplifier la représentation, on donne aux transformateurs triphasés un nom qui résume toutes les caractéristiques.

Exemple :



Le couplage est toujours indiqué par un symbole :

- Y ou y : couplage **étoile** primaire ou secondaire
- D ou d : couplage **triangle** primaire ou secondaire
- Z ou z : couplage **Zig-Zag** primaire ou secondaire

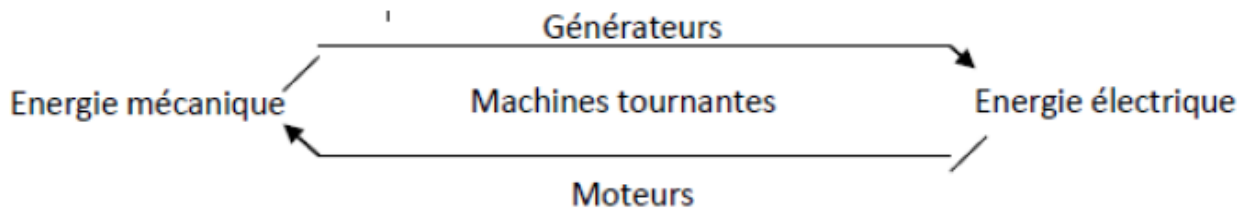
Symbole	V_a/V_A	Montage électrique des phases	Diagramme vectorielle
Yy0	$\frac{n_2}{n_1}$		
Yd1	$\frac{n_2}{\sqrt{3}.n_1}$		
Yz11	$\frac{\sqrt{3}.n_2}{2.n_1}$		
Dy11	$\sqrt{3}. \frac{n_2}{n_1}$		
Dd0	$\frac{n_2}{n_1}$		
Zy1	$\frac{2.n_2}{\sqrt{3}.n_1}$		

Chapitre III

Machines à courant continu

III.1 Introduction

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique (ou inversement) est réalisé avec des machines tournantes.



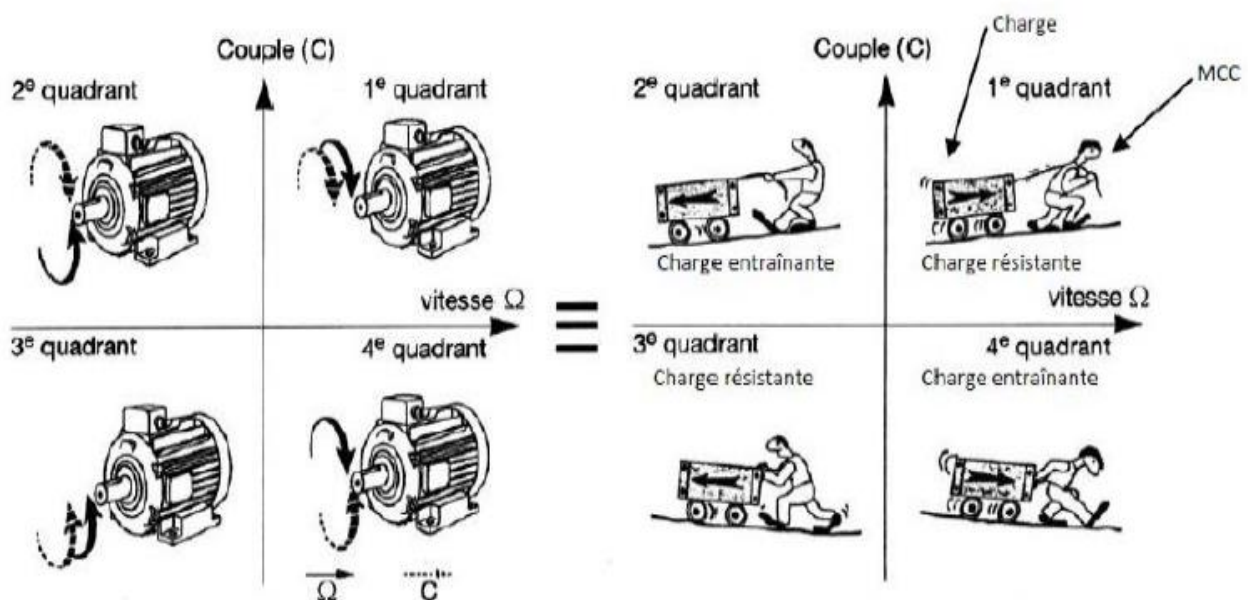
III.2 Définition des MCC : Ce sont des machines tournantes qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement, et dans lesquelles l'énergie électrique apparait sou forme de tension et courant continu [7].

Remarque 1 : comme toutes les machines électriques, les MCC sont réversibles, ce qui signifie que la même machine peut fonctionner indifféremment en moteur et en générateur (Dynamo).

Remarque 2 : La marche en Moteur de la MCC est la plus importante. En effet ;

- Pour la consommation d'énergie en courant continu, en général, on utilise des redresseurs électroniques statiques (à diodes et thyristors) au lieu des générateurs à courant continu.
- Par contre, les moteurs à courant continu sont très utilisés pour les entrainements à vitesse variable puisque la tension U est proportionnelle à la vitesse Ω . La variation de la vitesse est obtenue par la variation de la tension d'alimentation.

On peut représenter les différents modes de fonctionnement de la machine dans le plan Couple (Vitesse), qui de limite donc maintenant 4 quadrants :



- Les quadrants Q_1 et Q_3 correspondent à un fonctionnement moteur : la puissance utile

$P_u = C.\Omega$ est positive, le moteur fournit de l'énergie mécanique à la charge.

- Les quadrants Q_2 et Q_4 correspondent à un fonctionnement en génératrice : la puissance utile

$P_u = C.\Omega$ est négative, le moteur reçoit de l'énergie mécanique de la charge.

III.3 Constitution d'une MCC :

Une MCC est constitué des 4 parties principales [12] :

- **Circuit Inducteur (Stator)** : c'est la partie fixe de la machine, qui sert à créer une succession de pôles Nord et Sud à partir de bobinages inducteurs parcourus par un courant continu.

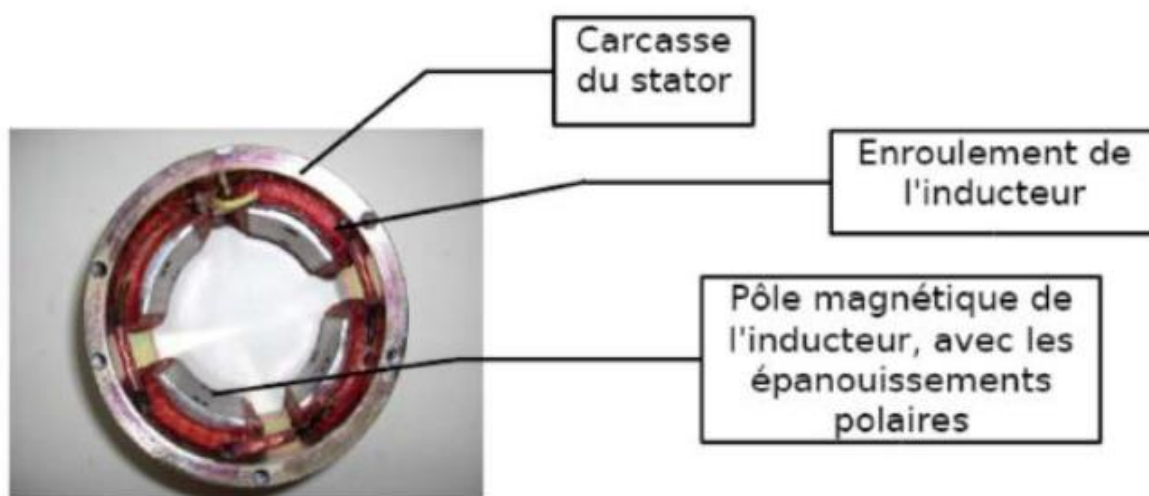


Figure 3.1 Inducteur (Stator) d'une MCC.

- **Circuit d'Induit (Rotor)** : c'est la partie mobile en rotation de la machine, il est constitué de tôles de minces épaisseurs isolées l'une de l'autre pour éviter les courants de Foucault. L'enroulement d'induit (rotorique) est disposé dans les encoches pratiques sur la longueur du cylindre rotorique.



Figure 3.2 Induit (Rotor) d'une MCC.

- **Entrefer** : C'est la partie de vide qui sépare le stator (fixe) du rotor qui est mobile.

- Système Balais-Lames de collecteur :** Le collecteur est un cylindre creux assemblé de lames en cuivre isolées les unes des autres et de l'arbre de la machine, ces lames sont connectées d'une façon bien déterminée aux spires de l'enroulement d'induit. Sur le collecteur, dans de porte-balais, sont maintenus des balais immobiles (fixes) par lesquels l'enroulement d'induit est relié au circuit extérieur. Les balais sont appuyés sur le collecteur par des ressorts.

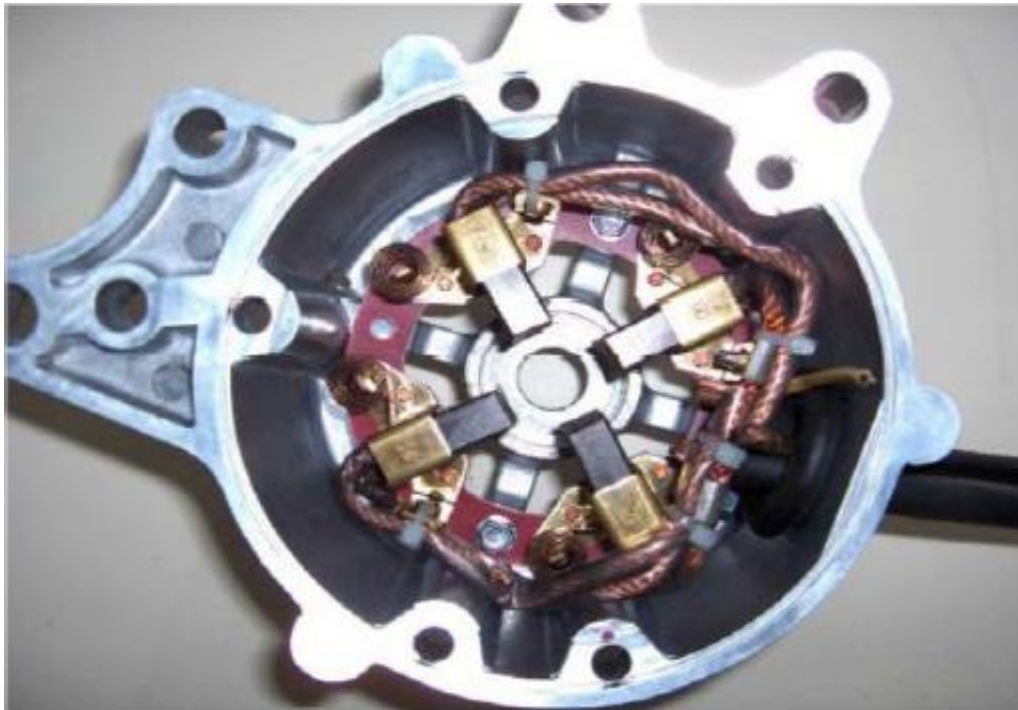


Figure 3.3 Système Balais et porte balais d'une MCC.

- Symbole**

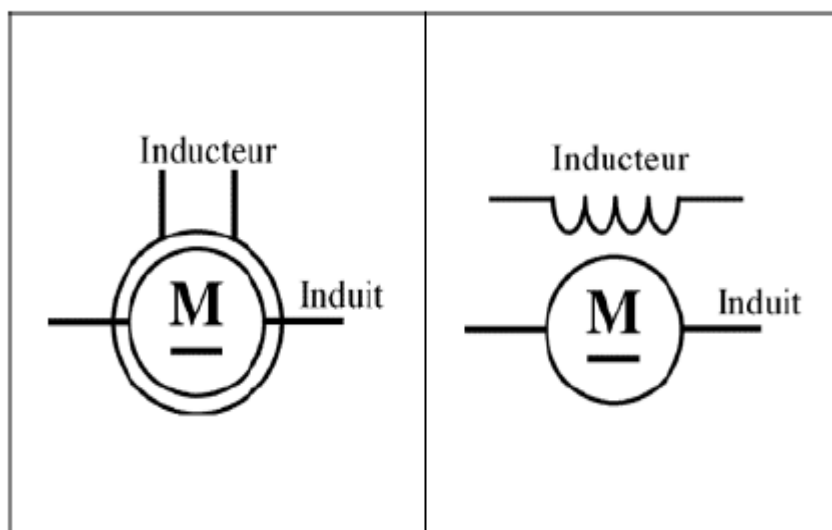


Figure 3.4 Symbole et Constitution d'une MCC.

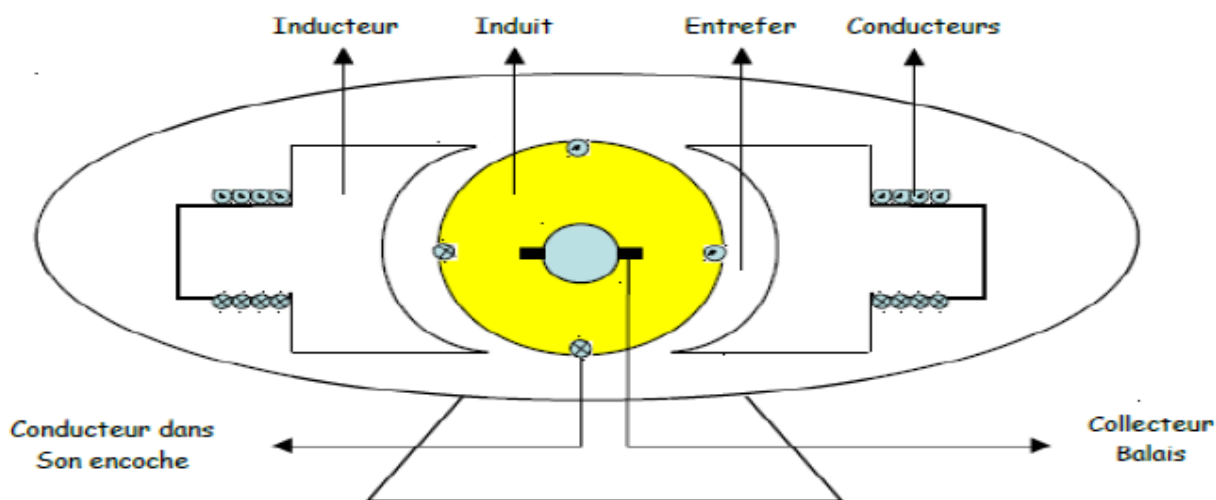


Figure 3.5 Constitution d’une machine à courant continu

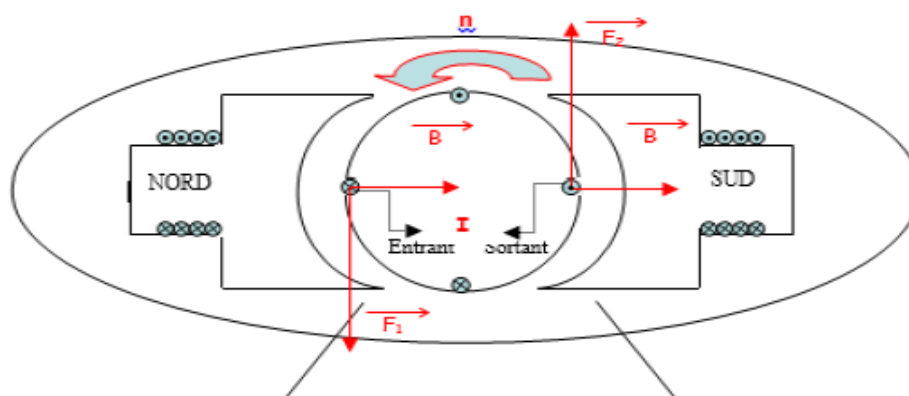
III.4 Principe de fonctionnement

Une machine à courant continu possède un nombre n de conducteurs actifs au niveau de l’induit. Le flux utile sous un pôle créé par l’inducteur est exprimé en webers, et N représente la fréquence de Rotation de l’arbre du rotor, en tours par seconde [14].

Deux cas peuvent se présenter :

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

Ces deux cas peuvent être décrits par le schéma suivant :



Courant + Champ magnétique	→	Force Electromagnétique
Force + Champ magnétique	→	Force Electromotrice

III.5 Etude du circuit inducteur :

Le rôle de l'inducteur est de créer le flux ϕ dans lequel tourne l'induit.

Pas polaire : représente l'écart angulaire entre les axes de deux pôles voisins (un Nord et un Sud)

On note par P : le nombre de paires de pôles inducteurs. $\tau_p = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot P} = \frac{\pi}{P}$

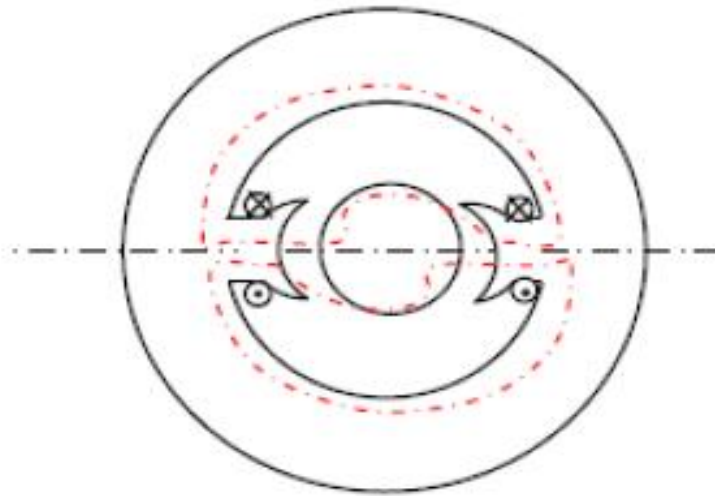


Figure 3.6 Machine bipolaire ($P=1$).

- Le champ magnétique (lignes d'induction) produit par l'inducteur parcourt la culasse statorique, les épanouissements polaires, l'entrefer, la denture rotorique et le rotor.
- Le rotor tourne dans le flux inducteur, tous les points sont soumis à une induction alternative de fréquence ($P \cdot n$), tel que, n : vitesse de rotations en tr/mn.
- Le flux dans le stator est supérieur au flux ϕ traversant l'entrefer et qui arrive à l'induit car il y'a un flux de fuites.

- On appelle coefficient d'Hopkinton : $\nu = \frac{\phi_u}{\phi_i}$

- Le flux total produit par l'inducteur parcourt la culasse statorique, les épanouissements polaires, l'entrefer, la denture rotorique et le rotor.
- flux traversant l'entrefer et qui arrive à l'induit

III.5.1 Force magnétomotrice :

Soit : e : l'épaisseur de l'entrefer.

J : courant dans le bobinage inducteur.

N_s : Nombre de spires du circuit inducteur.

En appliquant le théorème d'Ampère : $N_s \cdot J = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} + \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$

- Si le circuit magnétique (culasse statoriques, les noyaux, les épanouissements polaires, les dents et l'anneau de l'induit) est supposé constitué de matériaux ayant une perméabilité magnétique μ très grande devant celle du vide μ_0 .

- Pratiquement, on aura donc, la force magnétomotrice suivante : $N_s \cdot J = H_e = 2.e \cdot \frac{H_e(\theta)}{\mu_0}$

L'induction magnétique B est produite par un courant continu ou par un aimant permanent, donc elle est indépendante du temps ; c'est une fonction de la position angulaire. $\theta[B_e(\theta)]$

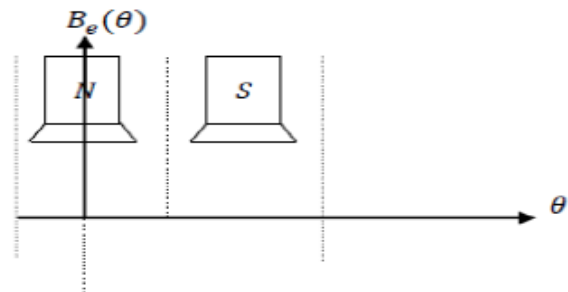
Remarque :

- La culasse statoriques, les noyaux et les épanouissements polaires sont parcourus par le flux total ϕ_u .
- L'entrefer, les dents et l'anneau de l'induit ϕ_u .

III.5.2 Répartition de l'induction magnétique :

L'induction magnétique est pratiquement constante sous les pôles inducteurs, elle diminue sous les épanouissements polaires 'cornes pour s'annuler à machine à plusieurs paires de pôles).

$$\theta = \frac{\pi}{2} \text{ avec } \theta = \frac{\pi}{2.P}$$



Ligne neutre : c'est un axe suivant lequel,

L'induction magnétique dans l'entrefer est nulle et change de signe.

Remarque :

- La fluctuation dans la forme de $B_e(\theta)$ sous les pôles est due à la présence de l'encoche (denture de l'induit).
- La machine à courant continu est une machine dite à pôles saillants car l'épaisseur de l'entrefer n'est pas constante.
- En négligeant les fluctuations de $B_e(\theta)$, et dans le cas d'une machine hétéro polaire $P > 1$.

$$B_e(\theta) = B(\theta) = B_{max} \cos(P.\theta)$$

III.5.3 Flux par pôle inducteur :

La valeur moyenne de flux utile (ϕ) par pôle inducteur, dans le cas d'une machine ayant $2P$ pôles inducteurs, s'obtient en utilisant :

$$\phi = \iint \overline{B(\theta)} \cdot d\vec{S}$$

Soit R : rayon d'alésage (diamètre intérieur d'un cylindre) statorique.

Lu : longueur utile de la machine suivant son axe de rotation.

$$\phi = \iint \vec{B}(\theta) \cdot d\vec{S} = R.l_u \int_{-\frac{\pi}{2P}}^{\frac{\pi}{2P}} B_{max} \cos(P\theta) d\theta$$

$$\phi = R.l_u \cdot \frac{B_{max}}{P} \sin(P\theta)$$

$$\phi = 2 \cdot \frac{R.l_u}{P} B_{max}$$

III.6 Etude du circuit d'induit :

On appelle généralement induit, le bobinage situé sur le rotor, ce bobinage est constitué de conducteurs parallèles à l'axe de rotation de la machine et qui sont régulièrement logés dans des encoches rotoriques. Les connexions frontales de ces conducteurs d'induit permettent de former un enroulement fermé sur lui-même et relié à intervalles réguliers aux lames de collecteur [10].

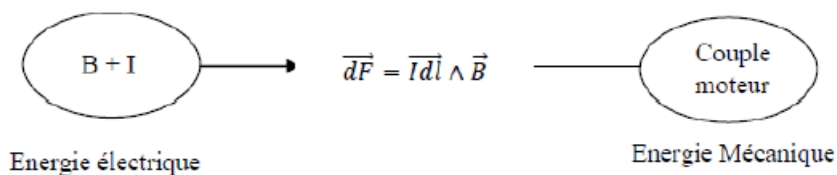
III.6.1 Principe de fonctionnement en Moteur – loi de Laplace :

Le fonctionnement en moteur de la MCC est basé sur le principe de la force de Laplace. En effet, un conducteur de longueur l parcouru par un courant I est plongé dans un champ magnétique d'induction, sera soumis à une force de Laplace tel que : $\vec{dF} = \vec{I} \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$

$$\vec{F} = \int_{(I)} \vec{I} \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B} = I \int_{(I)} d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

$$\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B} \Rightarrow F = B.L.I \cdot \sin \theta$$

Pour $B \perp L$ la force est maximale $F = B.L.I$



Rmq : Dans le cas où B ou I est nul ; cette force est évidemment nulle.

III.6.2 Principe de fonctionnement en générateur :

C'est la loi de Lenz-faraday qui est utilisé. En effet, un conducteur rectiligne de longueur placé dans un champ magnétique d'induction \vec{B} est se déplaçant à une vitesse \vec{v} à l'intérieur de celui-ci, induit un champ électrique \vec{E} tel que : $\vec{E} = \vec{B} \wedge \vec{v}$

La force électromotrice induite e est :

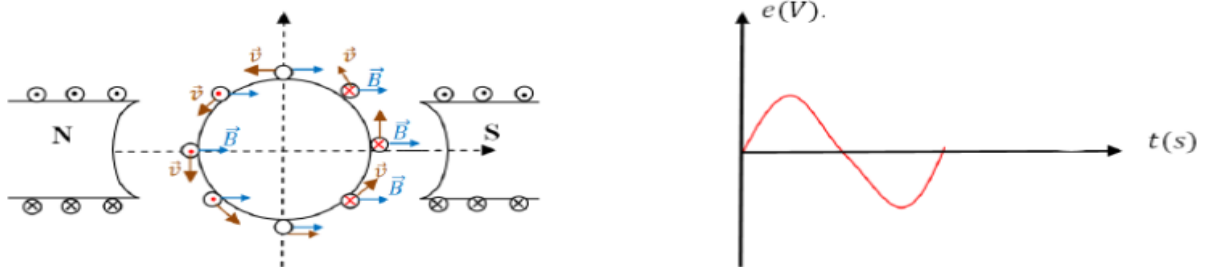
$$e = \int_{l_1}^{l_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{l_1}^{l_2} (\vec{B} \wedge \vec{v}) \cdot d\vec{l}$$

$$e = B.L.v.\sin\alpha$$

Si $(\vec{L} \perp \vec{v})$; $\alpha = \frac{\pi}{2}$ donc $e = B.L.v$



III.6.3 Cas d'un conducteur rectiligne animé d'un mouvement circulaire uniforme :



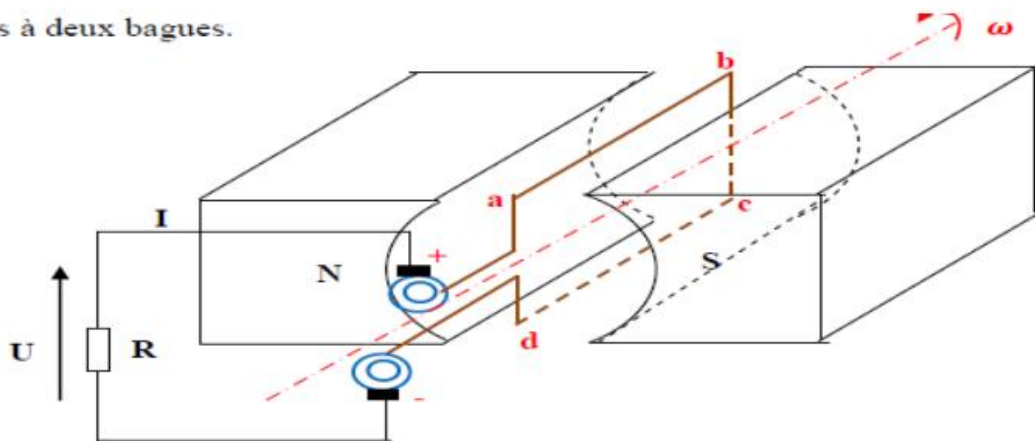
Rmq :

- La f.e.m produite a une forme alternative sinusoïdale à cause du mouvement circulaire.
- Après un demi-tour ($\alpha=\pi$), le sens du courant est inversé.
- La force électromotrice s'oppose à la cause qui lui donne naissance.

a) F.E.M alternative (à l'intérieur de la machine) :

Considérons une spire mobile en rotation à l'intérieur d'un champ d'induction uniforme B , cette spire présente deux brins actifs ab et cd de même longueur l « longueur active », ses extrémités sont soudées à deux bagues.

...soudées à deux bagues.



- Sous les pôles Nord (N) et sud (S), on a respectivement :

$$\begin{cases} e_{ab} = B_n \cdot l \cdot v \\ e_{cd} = -B_n \cdot l \cdot v \end{cases}$$

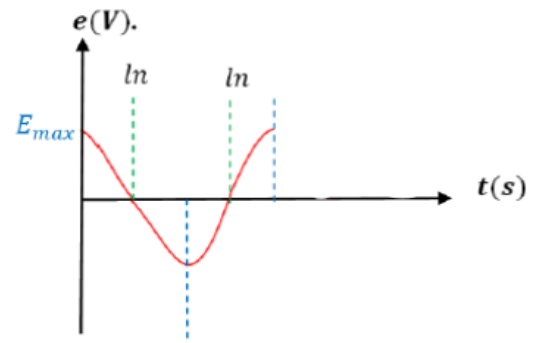
- Pour $\theta = P \cdot \omega \cdot t$ ($P=1$ pour notre exemple), on a :

$$\begin{cases} e_{ab} = B_{max} \cdot l \cdot v \cdot \cos \theta \\ e_{cd} = -B_{max} \cdot l \cdot v \cdot \cos \theta \end{cases}$$

On pose :

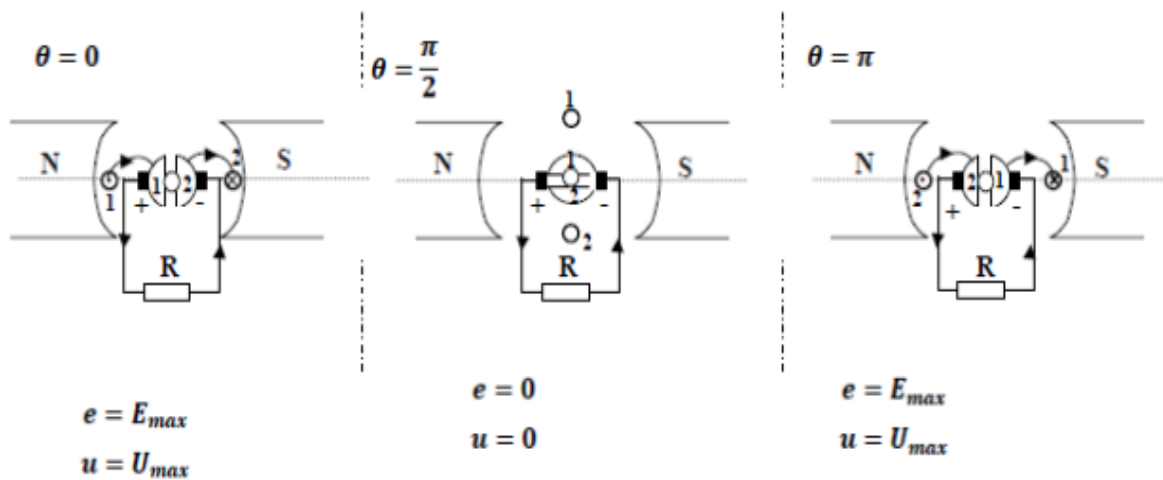
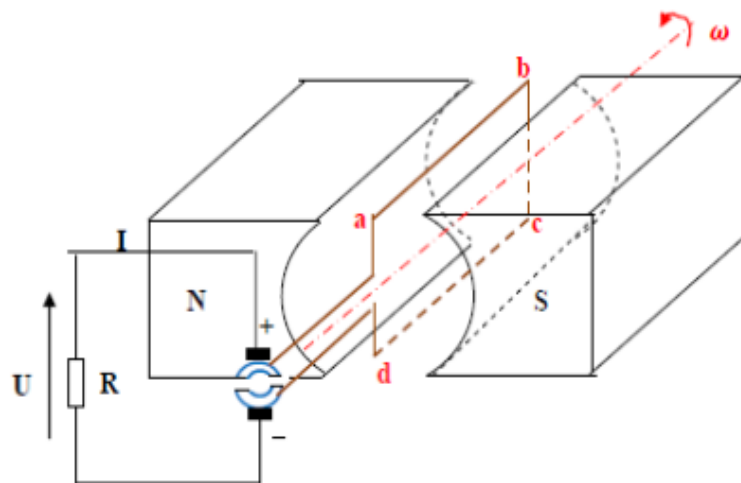
$$E_{max} = B_{max} \cdot l \cdot v$$

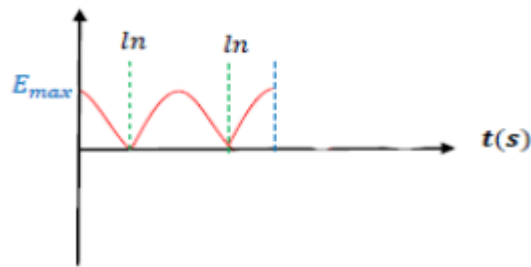
$$e = E_{max} \cos(\omega t)$$



b) Obtention d'une f.e.m unidirectionnelle :

Pour obtenir une f.e.m unidirectionnelle, on remplace les deux bagues, par demi-bagues en cuivre isolées entre elles et sur lesquelles frottent deux balais en charbon.



**Rmq 1 :**

Les deux demi-bagues ou lames (I et II) sur lesquelles sont soudées les extrémités des deux brins actifs ab noté 1 et cd noté 2, changent de balais (fixes) aux passages par la ligne neutre (axe interpolaire), on obtient un signal redressé dont l'ondulation varie entre 0 et U_{max} (O et U_{max} , O et I_{max} dans la résistance R).

Rmq2 :

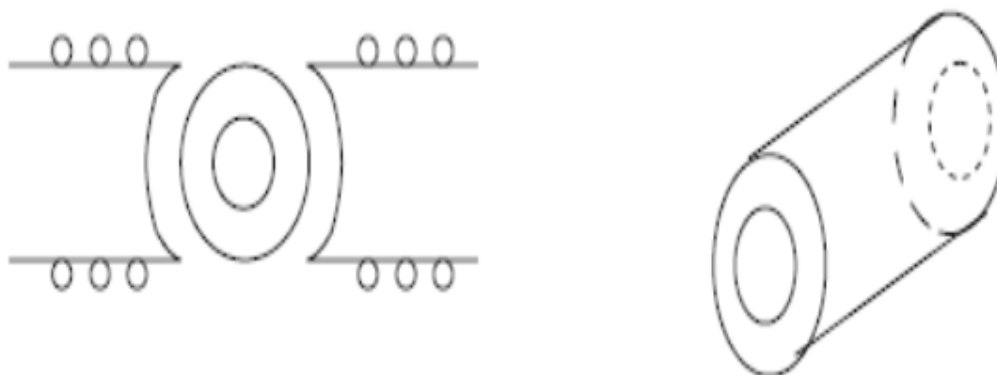
On dit que les balais sont calés sur la ligne neutre, mais en réalité, ils sont disposés sur l'axe des pôles, et ce sont les conducteurs qui aboutissent aux lames de collecteur en contact avec les balais qui sont disposés sur la ligne neutre.

c) Production d'une f.e.m pratiquement continue :

Pour obtenir un signal proche d'un signal continu, il faut augmenter le nombre de conducteurs actifs et par conséquent le nombre d'encoches pour les logés et nombre de lames au collecteur.

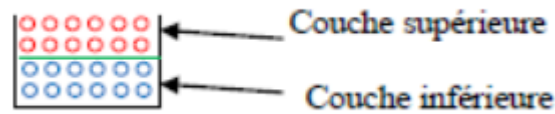
III.6.4 Types d'induit :**III.6.4.1 Dynamo en Gramme**

Au début de la construction des MCC, le bobinage d'induit est formé d'une suite de spires qui sont bobinées autour d'un cylindre réalisé par un empilage de tôles. Cette forme est dite en anneaux.

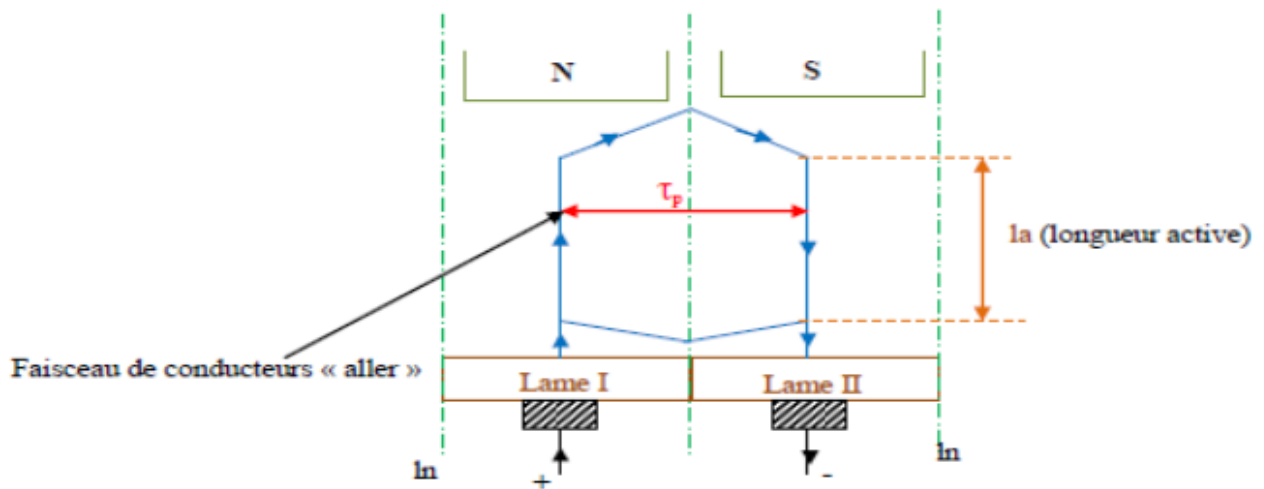


Dans ce type de bobinage, environ 40% seulement de bobinage joue un rôle dans la conversion d'énergie.

III.6.4.2 MCC à induit en Tambour : Actuellement, on utilise des enroulements dits en « Tambour » mis au point par l'ingénieur allemand « Siemens ». Dans ce cas on met en série les conducteurs placés sur la périphérie du Tambour (Rotor ou induit) dont tous les conducteurs sont utilisés, d'où l'avantage. Cet enroulement à deux couches ; Chaque encoche de l'induit comporte deux couches de conducteurs actifs.



Représentation sous forme panoramique (développée) de l'enroulement d'induit :

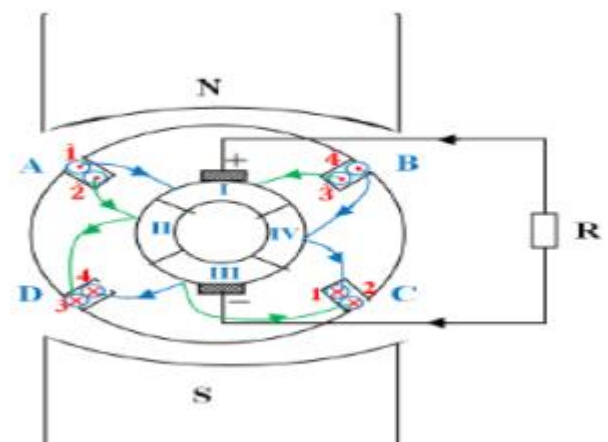


- Un faisceau comporte n brins actifs
- La f.e.m totale est la somme des f.e.m de chaque brin.
- Pour avoir une f.e.m plus importante, il faut augmenter le nombre de brins actifs.

Exemple : F.E.M continue

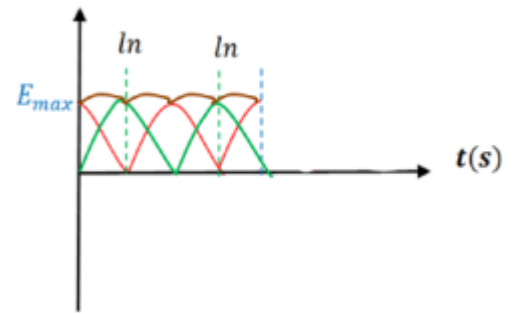
Soit un induit avec un enroulement en tambour qui comporte 4 encoches (K=4,A,B,C,D)

P=1, K=4



N.B : K nombres des encoches = nombres des lames au collecteur.

A l'instant initial : les encoches A et C sur la ligne neutre



Rmq :

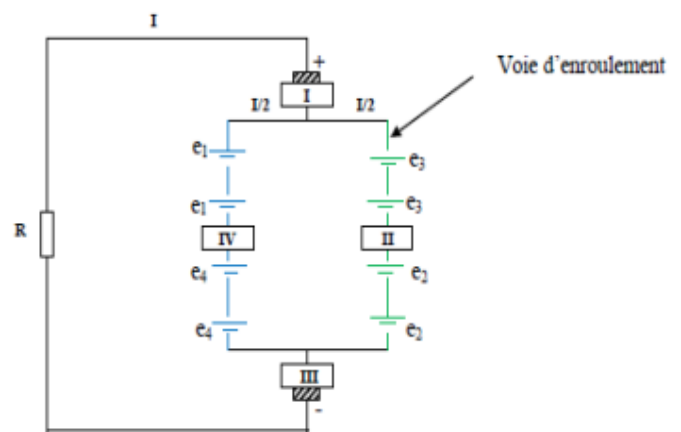
Une comparaison du signal obtenu par rapport au signal précédent (2 encoches, 2 brins) montre que lorsque on augmente le nombre d'encoches c-à-d le nombre de lames au collecteur, on augmente le nombre d'ondulations de la tension (du courant) mais en réduisant les amplitudes de ces tensions.

III.6.4.3 F.E.M d'induit d'une MCC :

F.E.M d'une voie d'enroulement :

On prend toujours l'exemple précédent : $P=1$ $K=4$ A un instant donné, on constate que les lames I et III sont en contact avec les balais respectifs (+) et (-) dans le sens générateur, tandis que les lames (IV) et (II) servent à la mise en série des f.e.m des conducteurs concernés.

- Chaque conducteur— e_c
 - La ligne des balais coupe l'enroulement d'induit en 2 voies d'enroulements identiques comprenant chacun 4 f.e.m correspondantes aux 4 conducteurs en série.
 - Nous avons deux groupements en parallèle de deux séries de $(N_c/2)$ f.e.m
- : Nombre total de brins actifs de longueur l.



F.E. M d'induit :

On prend le cas général d'une machine ayant pôles, voies d'enroulements en parallèle.

a: Nombre de paires de voies.

N_c : Nombre de conducteurs d'induit.

l: Longueur active.

Chaque voie d'enroulement comporte $(N_c/2a)$ conducteurs en série.

La F.E.M totale d'induit :

$$E = e_1 + e_2 + \dots + e_i + \dots = \sum_{i \in I}^{N_c/2a} e_i$$

Soit

$$E = \sum_{i \in I}^{N_c/2a} B_i \cdot l \cdot v$$

$$\sum_{i \in I}^{N_c/2a} B_i \cdot = B_{moy} \cdot \frac{N_c}{2.a} \text{ donc } E = B_{moy} \cdot \frac{N_c}{2.a} \cdot l \cdot v$$

Sachant que :

$$v = R \cdot \omega = r \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

v : Vitesse périphérique des conducteurs.

R : Rayon du rotor.

n : Vitesse de rotation (tr/s).

$$\tau_p' = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot P} = \frac{\pi \cdot R}{P}$$

$$v = 2 \cdot \pi \cdot \tau_p' \cdot n$$

On obtient : $E = B_{moy} \cdot 2 \cdot P \cdot \tau_p' \cdot n \cdot \frac{N_c}{2.a}$

Où : $\phi_v = B_{moy} \cdot \tau_p' \cdot l$ (flux utile par pôle inducteur).

$$E = K \cdot n \cdot \phi_v \text{ (Valeur moyenne de la F.E.M redressée)}$$

$$K = \frac{P}{a} N_c \cdot \text{(Constante pour une machine donnée)}$$

Rmq :

Cette expression est celle de la f.e.m à vide (présence uniquement du flux inducteur, qui est dit « flux à vide ») quand le courant d'induit est nul.

Cette f.e.m est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'induit (n), mais elle n'est pas proportionnelle au flux inducteur (courant inducteur, courant d'excitation) à cause du phénomène du à la situation des matériaux magnétiques.

III.6.4.4 Couple magnétique :

a) *En utilisant la force de laplace :*

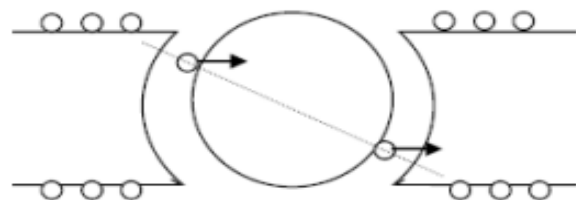
$$\vec{F} = \frac{I_e}{2.a} \vec{l} \cdot \vec{B}$$

$$T_{ec} = F_l \cdot R = F \cdot OH = F \cdot R \cdot \cos \theta$$

$$T_{ec} = \frac{I_e}{2.a} \cdot l \cdot B \cdot R \cdot \cos \theta \text{ Couple de chaque conducteur}$$

Le couple magnétique total

$$T_{em} = N_c T_{ec} = N_c \cdot \frac{I_e}{2.a} \cdot l \cdot B \cdot R \cdot \cos \theta$$



$$T_{em} = N_c T_{ec} = N_c \cdot \frac{I_e}{2a} \cdot l \cdot B_n \cdot R$$

$$\phi = l \cdot B_n \cdot \tau_p = \frac{l \cdot B \cdot R \cdot \pi}{P}$$

$$T_{em} = \frac{P N_c}{a 2 \pi} \phi_{ch} \cdot I_a (J/rd)$$

b) En utilisant la conservation d'énergie :

$$P_e = E \cdot I_a$$

$$P_m = T_C \cdot \omega$$

$$P_e = P_m \Rightarrow T_C \cdot \omega = E \cdot I_a$$

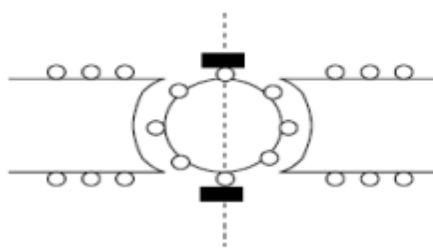
$$T_e = \frac{P N_c}{a 2 \pi} \phi_{ch} \cdot I_a$$

III.6.4.5 Réaction magnétique d'induit :

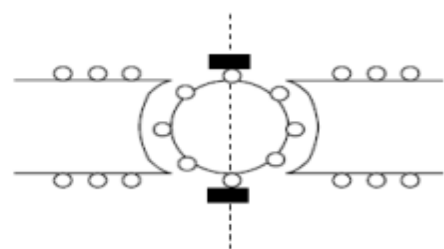
Nous avons considéré jusqu'à maintenant que le flux traversant la machine était du uniquement au circuit inducteur (« Flux par pôle » créé par le circuit du champ). Ceci n'est exact que lorsqu'il ne circule aucun courant I_a dans l'induit.

En effet, dès qu'il circule un courant dans l'induit c-à-d (pour une dynamo lorsqu'elle débite sur une charge et un moteur lorsqu'il entraine une charge mécanique), ce courant induit crée lui aussi un flux ; le flux résultant qui traverse la machine est alors constitué par la somme des deux flux.

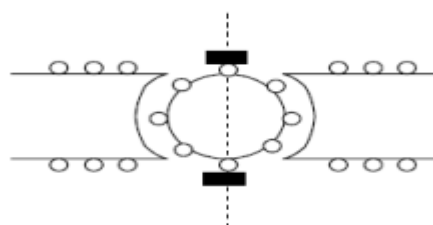
Définition : On appelle réaction magnétique d'induit l'action défavorable que les courants d'induit exercent sur le champ magnétique principal de la machine.



a) Champ magnétique principal ($I = 0, I_E = 0$)



b) Champ d'induit seul ($I = 0, I_E = 0$)



c) Champ résultant ($I = 0, I_E = 0$)

Soit : $n-n'$ ligne neutre théorique

$E-E'$ ligne neutre magnétique.

- Si $I=0$; se confond avec $E-E'$.

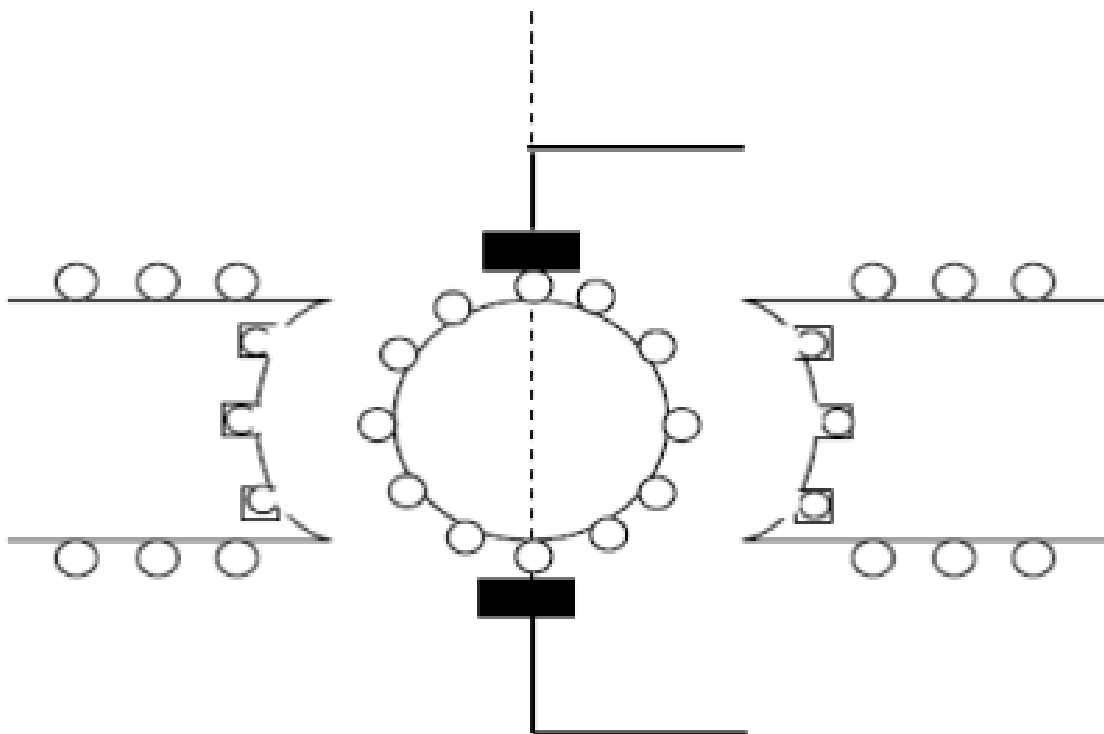
- Si $I \neq 0$; à cause de la réaction magnétique, $E-E'$ se trouve décalé par rapport à la ligne théorique $n-n'$ et les balais se trouvent à l'extérieur de la ligne neutre.

Pour collecter la f.e.m maximale en charge $I \neq 0$, il faudrait décaler la ligne des balais d'un angle α (dans la sens de la rotation pour un générateur et dans le sens inverse pour un moteur).

- Si on ne décale pas les balais, la f.e.m en charge E_c sera un peu plus faible que la f.e.m à vide E_v . La différence s'appelle la « chute de tension due à la réaction magnétique d'induit ».

Solution technique adoptée pour réduire les effets de la réaction magnétique d'induit :

Dans les MCC récentes, le décalage n'est pas utilisé. La solution généralement proposée pour réduire les effets de la réaction magnétique d'induit consiste à utiliser un enroulement fixe, dit de compensation ; cet enroulement est disposé à l'intérieur d'encoches pratiquées au niveau des pièces polaires et parcouru par le courant de l'induit de sorte à produire un champ magnétique égal et de sens opposé à celui produit par la réaction magnétique d'induit transversale.



III.6.4.6 Equations de la tension aux bornes de l'induit :

A vide $I=0$, courant d'excitation $J \Rightarrow \phi_v$

Soit U : tension disponible aux bornes de la machine.

$$E_v = U = k.n.\phi_v \text{ [V] avec}$$

En charge : $\phi_v(J); \phi_{ch}(I, J)$

$$\phi_v > \phi_{ch}$$

$$E_v - E_{ch} = k.n.(\phi_v - \phi_{ch}) = \xi(I)$$

$\xi(I)$ Chute de tension due à la réaction magnétique d'induit.

a) Génératrice :

$I/2.a$: Courant dans une voie

R_a : Résistance totale d'induit (résistance totale + résistance des contacts lames-balais).

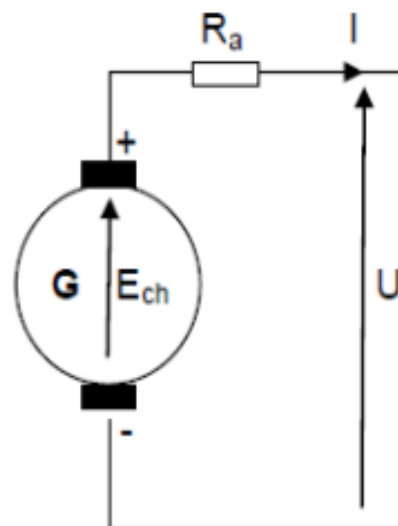
$$E_{ch} = U + R_a.I$$

$$U = E_v - R_a.I - \xi(I)$$

Si on considère que :

R_a : Résistance totale d'induit

$$U = E_v - R_a.I - \Delta U_b - \xi(I)$$



b) Moteur :

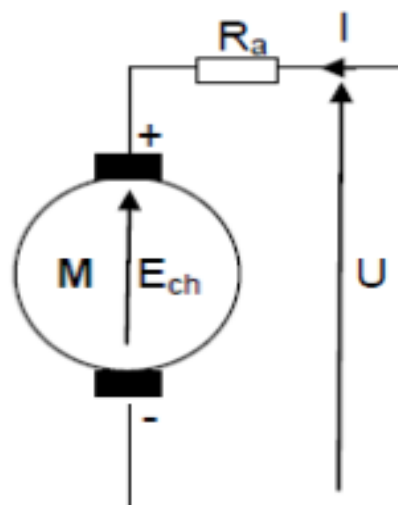
R_a : Résistance totale d'induit (résistance totale + résistance des contacts lames-balais).

$$U = E_v + R_a.I - \xi(I)$$

Si on considère que :

R_a : Résistance totale d'induit

$$U = E_v + R_a.I - \Delta U_b - \xi(I)$$



III.7 Les différents types de machines a courant continu

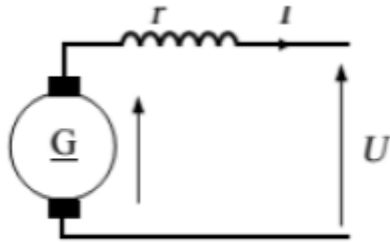


Figure 3.7 Génératrice a excitation en série

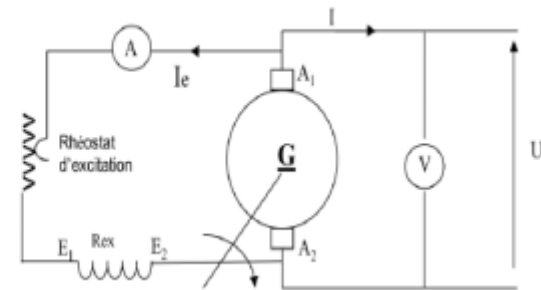


Figure 3.8 Génératrice a excitation shunt (excitation en dérivation)

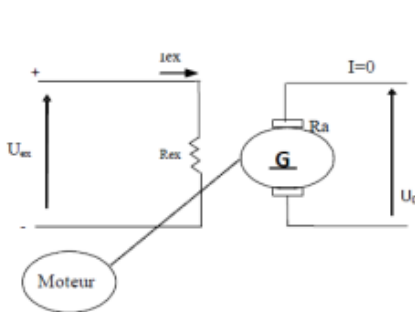


Figure 3.9 Génératrice a excitation indépendante

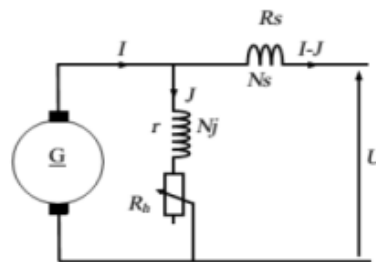


Figure 3.10 Génératrice compound (excitation composée) : Montage courte dérivation

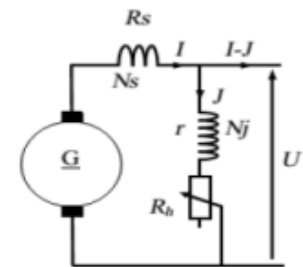


Figure 3.11 Génératrice compound (excitation composée) : Montage longue dérivation

III.8 Fonctionnement en Moteur

III.8.1 Equation aux tensions d'un Moteur à courant continu

Les conducteurs de l'induit du moteur en rotation coupent le flux inducteur et sont le siège d'une f.c.e.m E' . La f.c.e.m est proportionnelle :

- au nombre N de conducteurs actifs de l'induit
- à la fréquence de rotation n de l'induit
- au flux ϕ dans l'entrefer

$$E' = N.n.\phi$$

$$U = E' + R_a.I_a$$

Fréquence de rotation

Elle s'obtient à partir de l'expression de la force contre-électromotrice, soit :

$$n = \frac{U - R_a.I_a}{N.\phi}$$

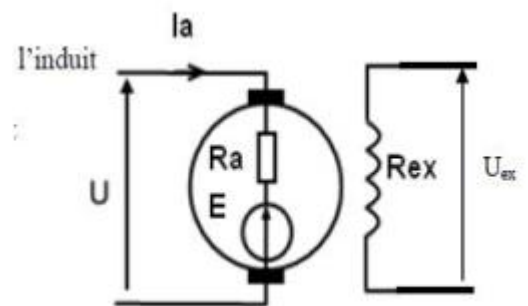


Figure 3.12 Schéma équivalent d'un moteur CC

III.8.2 Bilan Energétique et Rendement

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique. Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance électrique à la puissance mécanique. Le bilan, peut être résumé à l'aide schéma suivant :

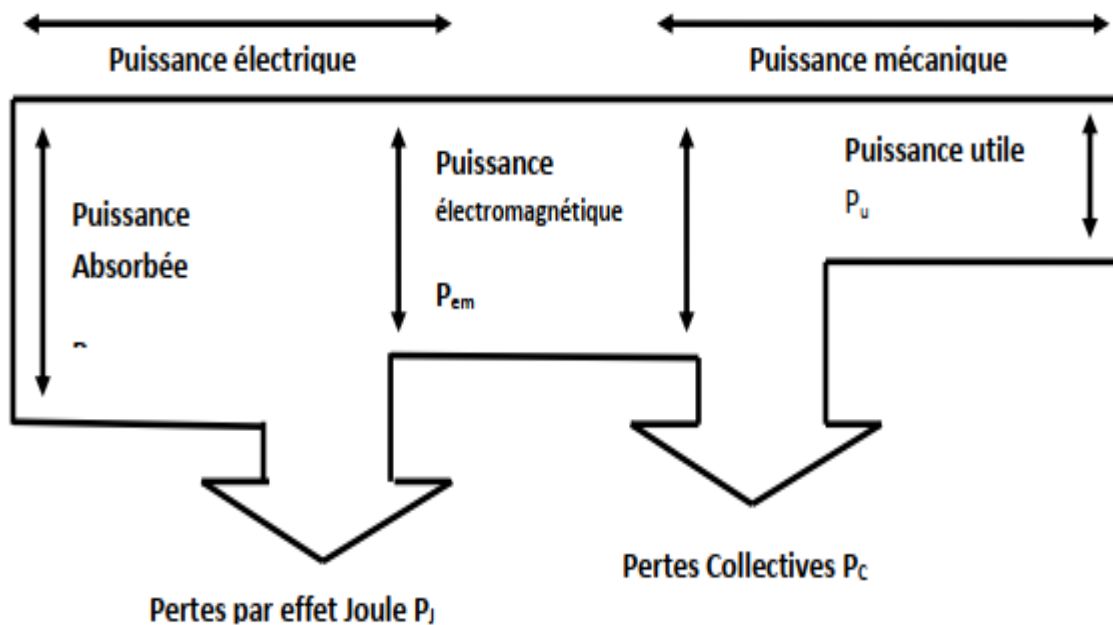


Figure 3.13 Bilan de puissance d'un moteur

Toutes les puissances mises en jeu dans ce bilan peuvent être calculées à partir des relations qui suivent. Le moteur reçoit une puissance P_a , produit de la tension, appliquée sur les bornes de l'induit et de l'intensité du courant qui le traverse.

$$P_a = U \cdot I \text{ (électrique)}$$

P_a : La puissance absorbée en watts [W]

U : La tension aux bornes de l'induit en volts [V]

I : L'intensité du courant [A]

$$C_u = C_e - C_p \text{ (mécanique)}$$

C_u Le moment du couple utile [Nm]

C_e Le moment du couple électromagnétique en [Nm]

C_p Le moment du couple de pertes en [Nm]

$$C_u = C_{em} - \frac{P_c}{\Omega}$$

$$P_{jex} = R_{ex} \cdot I_{ex}^2 = U_{ex} \cdot I_{ex} = \frac{U_{ex}^2}{R_{ex}}$$

P_{jex} Les pertes joule dans l'inducteur en [W]

R_{ex} La résistance de l'inducteur en ohms [Ω]

U_{ex} La tension aux bornes de l'inducteur en volts [V]

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

$$P_{ja} = R_a \cdot I_a^2 \quad \text{(Electrique)}$$

P_{ja} Les pertes par effet Joule dans l'induit en watts [W]

R_a La résistance de l'induit en ohms [Ω]

I_a^2 L'intensité du courant dans l'induit en ampères² [A^2]

$$P_{em} = E_{ch} \cdot I_a = C_{em} \cdot \Omega \quad \text{Electrique- Mécanique}$$

P_{em} : La puissance électromagnétique en watts [W]

E_{ch} : La f.c.e.m du moteur en charge [V]

I : L'intensité du courant en [A]

P_{em} : La puissance électromagnétique en watts [W]

C_{em} : Le moment du couple électromagnétique en [Nm]

Ω : La vitesse angulaire en radians par seconde [rad.s⁻¹]

P_c Les pertes collectives en watts [W]

C_p Le moment du couple de pertes en [Nm]

$$P_c = C_p \cdot \Omega \quad \text{Mécanique}$$

Ω La vitesse angulaire en [rad.s⁻¹]

P_u La puissance utile en watts [W]

C_u Le moment du couple mécanique en [Nm]

$$P_u = C_u \cdot \Omega \quad \text{Mécanique}$$

Ω La vitesse angulaire en [rad.s⁻¹]

$$P_{em} = P_a - P_j$$

$$P_u = P_{em} - P_c$$

$$P_u = P_a - P_j - P_c$$

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

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

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

Le rendement est donc :

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

Rendement du moteur [sans unités]

Dans le cas d'un moteur séparé la puissance absorbe est :

$$P_{a1} = U \cdot I_a + U_{ex} \cdot I_{ex} [W]$$

III.8.3 Moteur à excitation séparée

On dispose d'un moteur à courant continu dont l'excitation est indépendante comme le montre la figure suivante où l'induit et l'inducteur sont alimentés séparément par deux sources de tensions différentes.

$$U = E' + R_a \cdot I_a$$

$$E' = k \cdot \phi \cdot \Omega$$

$$C_{em} = k \cdot \phi \cdot I$$

- **Caractéristique en charge $\Omega(I)$**

A partir des équations précédentes on obtient l'expression de la vitesse de rotation en fonction de I :

$$\Omega = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k \cdot \phi}$$

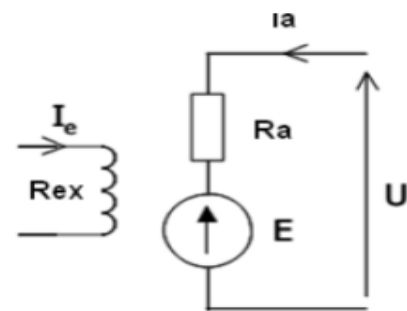


Figure 3.14 Moteur à excitation séparée

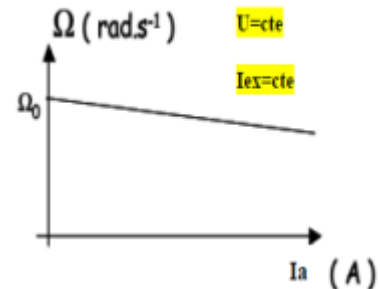


Figure 3.15 Caractéristique de la vitesse

- **Caractéristique en charge U(I).**

La caractéristique naturelle est définie par sa vitesse constante n et son courant d'excitation constant I_{ex}.

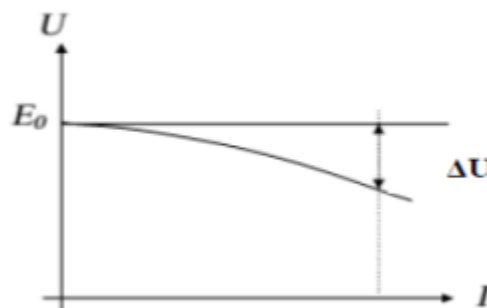


Figure 3.16 Caractéristique en charge

- • Caractéristique en charge $C(I_a)$

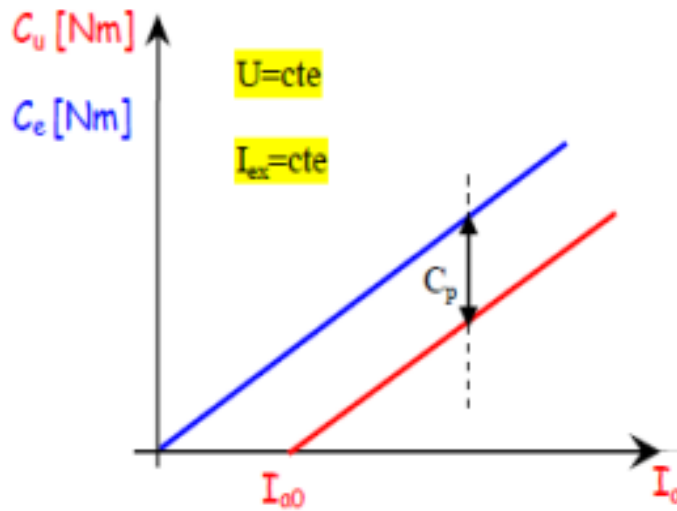


Figure 3.17 Caractéristique du couple

Point de fonctionnement

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

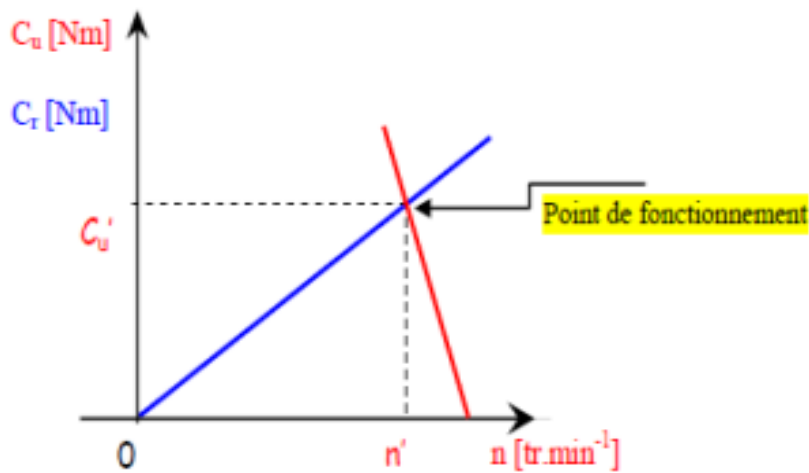
$$C_u = C_r$$

C_u Le moment du couple utile en [Nm]

C_r Le moment du couple résistant en [Nm]

Le point de fonctionnement donne graphiquement

n' , la fréquence de rotation du moteur ainsi que C_u' le moment du moment du couple utile.



III.8.4 Moteur à excitation shunt

L'induit et l'inducteur sont alimentés par la même tension.

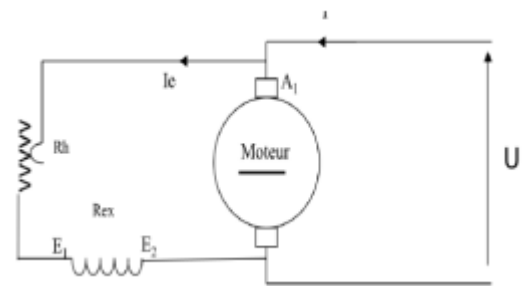
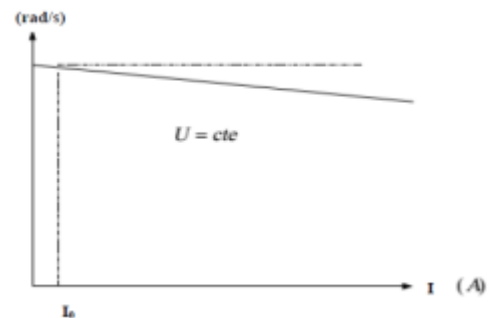


Figure 3.18 Moteur à excitation shunt

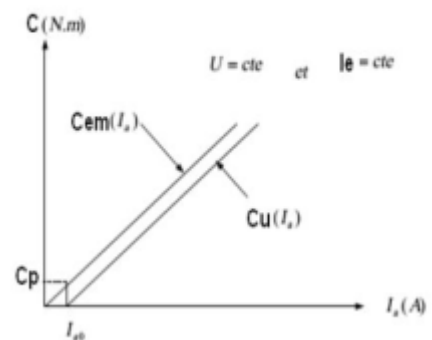
- **Caractéristique en charge $\Omega(I)$**

Le moteur shunt et autorégulateur de vitesse $\Omega(I)$ est obtenue en chargeant le moteur sous tension d'alimentation constante et en notant les vitesses correspondant aux différents courants absorbés.



- **Caractéristique de couple $C_e=f(I)$:**

En tenant compte de l'expression du couple électromagnétique $C_{em}=K.\phi.I$, le graphe $C_e=f(I)$ est sensiblement une droite passant par l'origine. D'autre part le couple utile est un peu plus faible que le couple électromagnétique la courbe $C_u=f(I)$ sera un peu au-dessous de la précédente.



III.8.5 Moteur à excitation série

Les bobinages d'inducteur et d'induit d'un moteur à excitation série sont reliés en série ($I_e=I=I_a$).

$$R_{tot} = r + R_a$$

$$U = E' + R_{tot} \cdot I_a$$

$$E' = k \cdot \phi \cdot \Omega$$

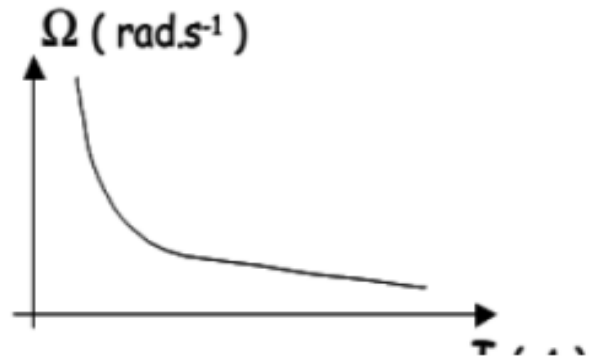
$$C_{em} = k \cdot \phi \cdot I$$



Figure 3.19 Moteur à excitation série

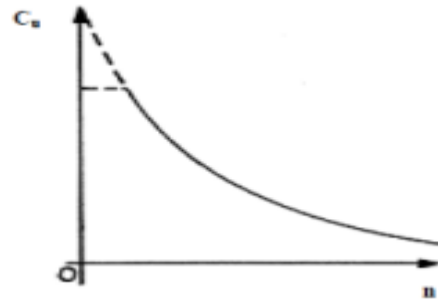
- **Caractéristique de vitesse $\Omega(I)$**

Le moteur série s'emballe à vide on remarquera qu'à vide le courant absorbé I_0 étant très faible, la vitesse est très grande.



- **Caractéristique mécanique $C_u(n)$**

Le moteur est autorégulateur de puissance, la puissance du moteur reste sensiblement constante.



III.8.6 Moteur à excitation composée

Le moteur à excitation séparée ne s'emballe pas à vide et répercute sur le courant I tout accroissement de couple ; le moteur série s'emballe. Pour présenter les avantages, on utilise un moteur comportant sur les pôles deux inducteurs :

- l'un dérivé, comportant N_e spires, branché en parallèle et parcouru par le courant I_e ;
- l'autre série, comportant N_s spires, branché en série, parcouru par le courant I La force magnétomotrice est donc $N_e \cdot I_e \pm N_s \cdot I$, le signe dépendant des sens relatifs des enroulements : (+) montage additif (-) montage soustractif.

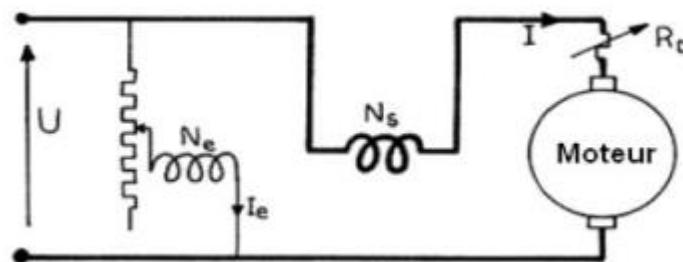


Figure 3.20 Moteur à excitation Composée

- **Caractéristique Mécaniques**

Les caractéristiques du moteur composé sont évidemment intermédiaires entre celles du moteur shunt et celle du moteur série.

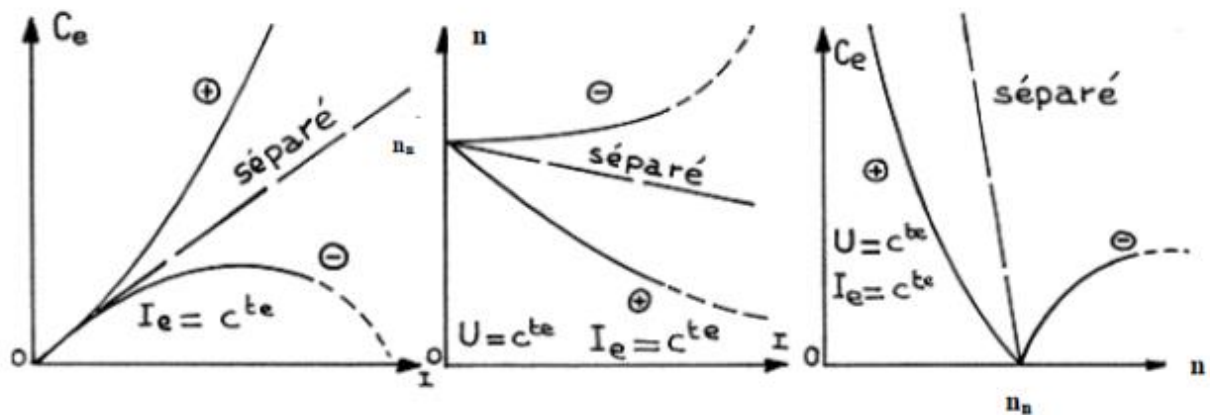


Figure 3.21 Caractéristique mécanique d'un moteur à excitation composée

III.9 Etude de démarrage d'un moteur à courant continu

On ne peut brancher directement à la source d'alimentation que des moteurs de faible puissance. Pour les moteurs puissants, le courant au démarrage peut atteindre des valeurs très élevées de l'ordre de (10

à 100 fois) fois le courant nominal du moteur, $I_a = U_d / R_a$.en shunt et $I_a = U_d / (R_a + R_s)$.en série, ce

qui entraînerait [18] :

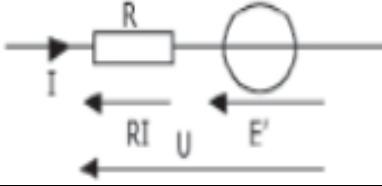
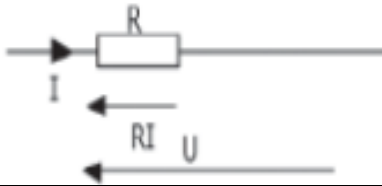


- un échauffement instantané de l'induit très élevé ;
- une chute de tension inadmissible sur le réseau d'alimentation ;
- un couple de démarrage lui aussi très supérieur au couple nominal et risquant de rompre l'accouplement.

On a trois possibilités pratique pour réduire ce courant.

- Si on dispose d'une tension continue réglable : démarrer sous tension réduite et la faire croître ensuite progressivement.
- Utilise un rhéostat de démarrage : c.à.d. insérer en série dans le circuit d'induit des résistances qui serait ensuite court-circuit manuellement lorsque le moteur prendre la vitesse. La résistance de l'induit étant très faible, le courant est donc très important. Pour limiter ce courant à une valeur raisonnable (**1, 2 à deux fois** le courant nominal), on va brancher en série avec l'induit **une résistance additionnelle**.

Cette résistance est appelée résistance de démarrage R_D . Après un certain temps de démarrage, le moteur a atteint une vitesse suffisante et donc une f.c.é.m. E' suffisante pour nous retrouver dans le cas d de la figure suivante. Le courant a considérablement diminué puisque E' n'est plus nulle, **on peut donc éliminer R_D** pour terminer le démarrage et nous retrouver dans le cas a.

Principe du démarrage par élimination de résistance :

		Expression du courant	Schéma équivalents
a)	Fonctionnement normal	$I = \frac{U - E'}{R}$	
b)	Début du démarrage direct	$I_D = \frac{U_D}{(R + R_D)}$	
c)	Début du démarrage avec résistance	$I_D = \frac{U_D}{(R + R_D)}$	
d)	Fin du démarrage avec résistance	$I = \frac{U - E'}{(R + R_D)}$	

Dans la pratique, RD sera constituée de plusieurs résistances en série que nous éliminerons progressivement les unes après les autres au fur et à mesure que le courant diminue. C'est cette élimination qui peut se faire manuellement ou de façon automatique et qui constitue "**le démarrage par élimination de résistance**". **Mais attention ! Il ne faut en aucun cas que cette résistance n'affecte le courant inducteur, car une diminution de ce courant conduirait à un emballement du moteur.**

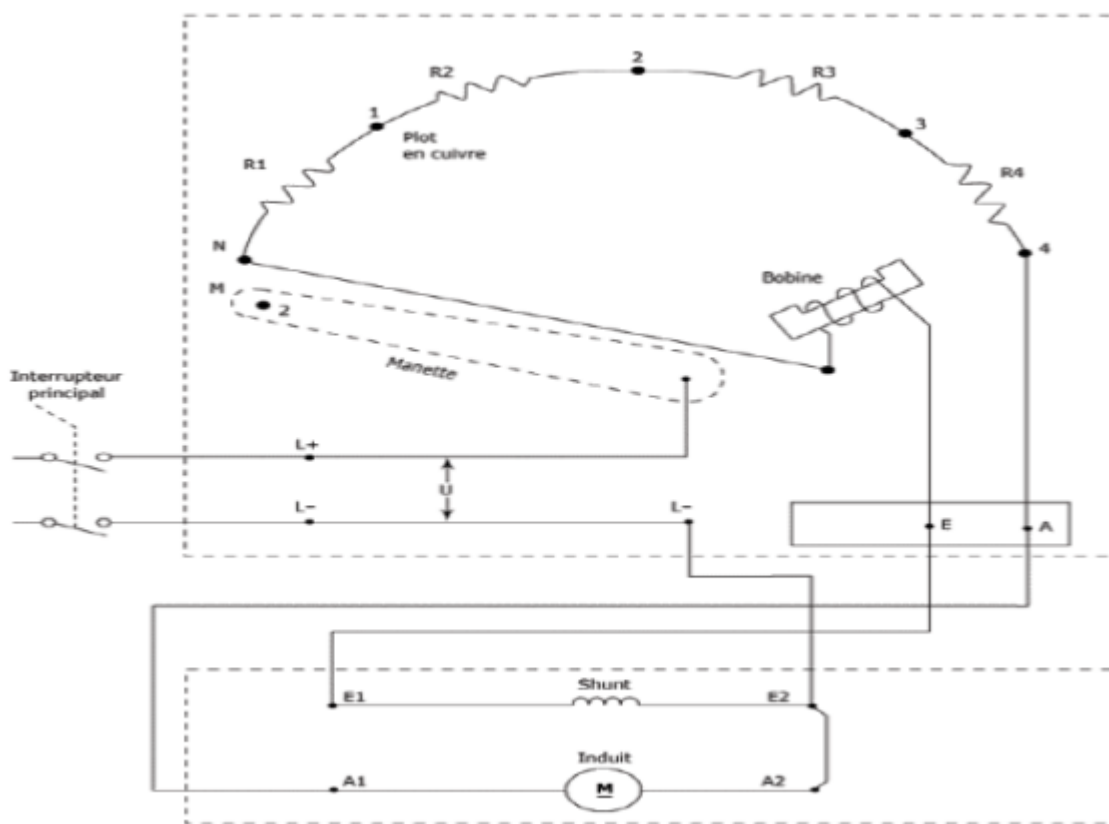
• **Démarrage manuel :** Le principe du démarreur manuel est simple. Il permet d'insérer la série de résistances dans le circuit de l'induit au démarrage. Le courant induit est donc diminué.

Progressivement, on met manuellement hors-circuit ces résistances. Ainsi, **le courant augmente et la vitesse du moteur atteint sa valeur nominale.**

• **Construction :** Le démarreur manuel est composé des éléments suivants :

- **une série de résistances raccordées sur des plots en cuivre ;**
- **une manette avec contact électrique se déplaçant sur les plots ;**
- **une bobine de maintien de la manette.**

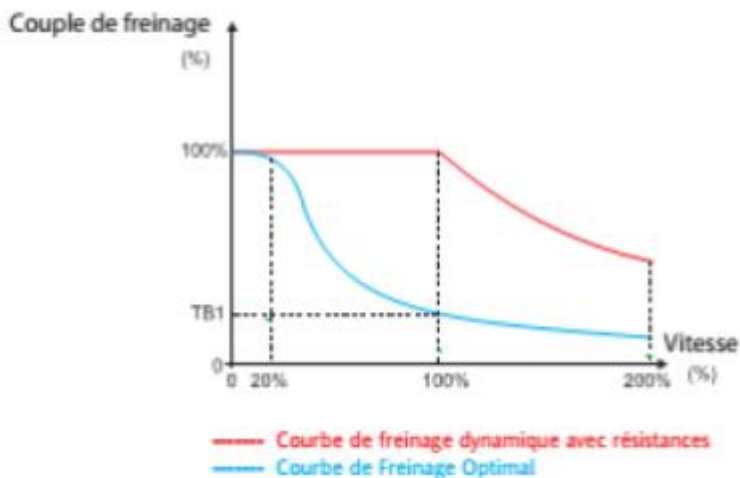
La figure suivante montre le schéma d'un démarreur raccordé à un moteur à courant continu à excitation shunt. Schéma de branchement d'un rhéostat de démarrage :



III.10 Freinage d'un moteur à courant continu

Si on coupe l'alimentation de l'induit, d'un moteur alimenté par une tension U_n et tournant à une vitesse Ω_0 , le moteur ne s'arrête pas instantanément. Il décélère mais il continue à tourner sous l'effet de l'énergie cinétique emmagasinée dans la partie tournante du système d'entraînement figure 2. Pour assurer un arrêt rapide, on doit appliquer un couple de freinage électromagnétique dont le principe consiste à faire circuler dans l'induit un courant de sens approprié [18].

- Freinage dynamique.
- Freinage par inversion.



III.10. 1 Freinage dynamique :

Le principe de freinage dynamique consiste à brancher une résistance R_f aux bornes de l'induit lors de l'arrêt (figure2). Le branchement de cette résistance aux bornes de l'induit assure la circulation d'un courant d'induit dans le sens inverse. Il en résulte un couple de freinage. $I_a = \frac{U - E'}{R}$, $E' = k.\phi.\Omega$

III.10. 2 Freinage par inversion : on peut arrêter un moteur encore plus rapidement en utilisant le freinage par inversion, cette méthode consiste à inversion brutalement le sens du courant dans l'induit en interversion les bornes de la source.

En marche normale (moteur), le courant I_a absorbée par l'induit vaut : $I_a = \frac{U - E_c}{R_a}$

I est 50 fois supérieur à I_n , dangereux même pour les protections, on le limite par R , dans ce cas il faut ouvrir immédiatement l'interrupteur si non le moteur tourne dans l'autre sens, car même pour

$E=0$, il reste le courant $I_a = \frac{E_s}{R_a}$

III.11 Réglage de vitesse d'un moteur à courant continu

On considère un moteur shunt : $n = \frac{U - R_a I_a}{k.\phi}$

Force contre électromotrice $E = k.\phi.n$

Pour un courant I_a donné, c.à.d. pour certain charge n dépend de U , R_a et Φ

a. **Action sur R_a :** si on augmente la résistance du circuit induit au moyen d'un rhéostat on diminue la vitesse, cette méthode et théoriquement possible, n'est pas très bonne à cause des pertes par effet joule.

b. **Action sur Φ :** si on a un rhéostat dans le circuit de champ, une augmentation de R_{ex} se traduit à une U_a constant par une diminution du courant d'excitation I_{ex} et donc aussi du flux. Donc par augmentation de la vitesse, cette méthode ne permet pas d'obtenir des variations de la vitesse dans une large gamme.

c. **Action sur U_a :** si on diminue la tension d'alimentation le courant d'excitation I_{ex} diminue, donc aussi Φ , et la vitesse peut diminuer ou augmenter selon la valeur de Φ .

Chapitre IV

Machines synchrones

IV.1 Introduction

La machine synchrone, appelée ALTERNATEUR si elle fonctionne en génératrice, fournit un courant alternatif. En fonctionnement MOTEUR sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit [12].

Symboles :

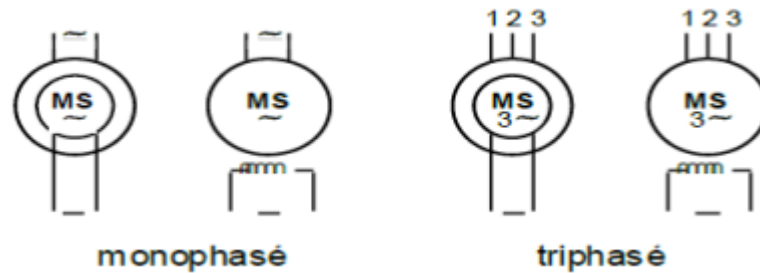


Figure 4.1 Symboles du MS.

IV.2 Constitution d'une MS :

Elles sont constituées essentiellement de deux parties : une partie fixe (le stator) et une partie tournante (le rotor) [15].

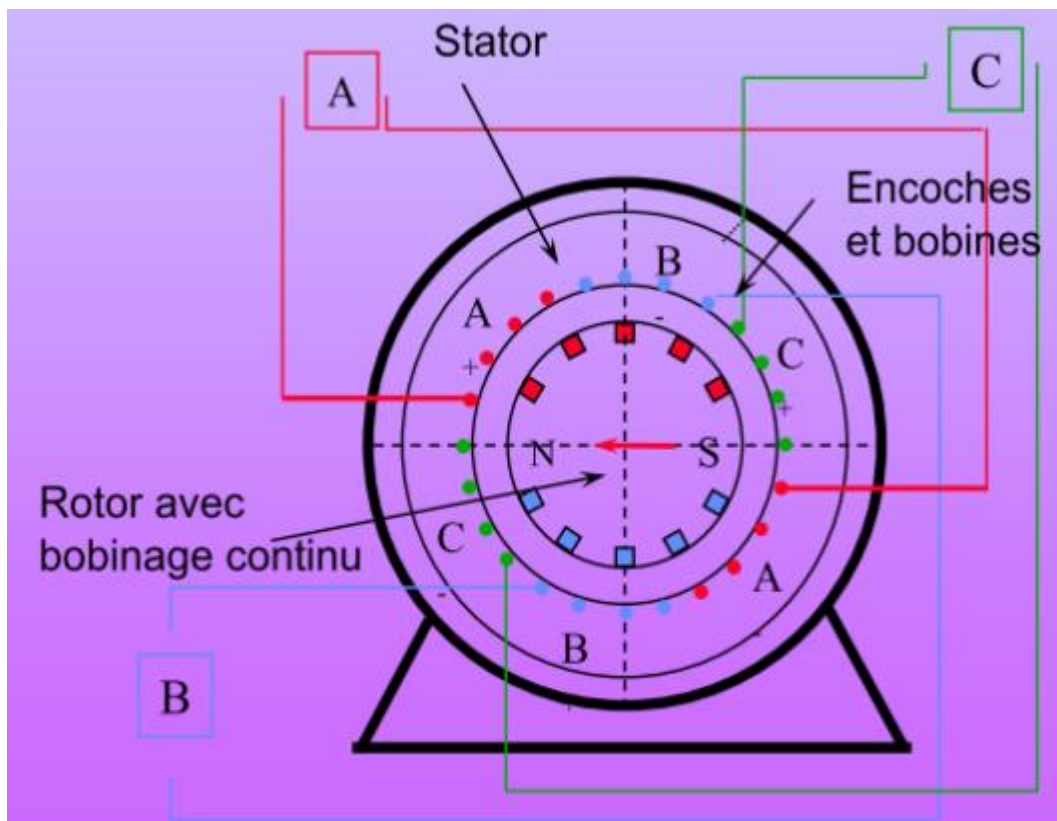


Figure 4.2 Machine synchrone

1) **Le stator** : c'est l'induit, alésage cylindrique qui porte un enroulement triphasé ou monophasé $2p$ pôles.

a) *Stator monophasé*

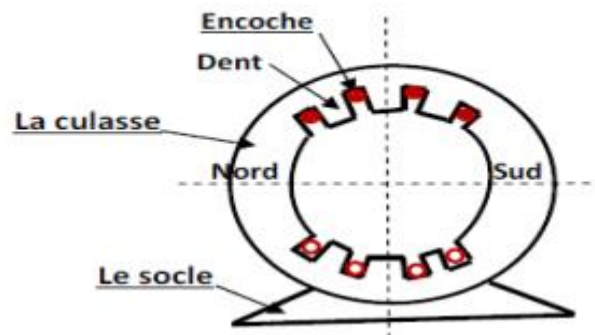


Figure 4.3 Stator monophasé $2p=2$

b) *Stator triphasé*

Stator triphasé bipolaire : il est constitué de trois bobines identiques (AX, BY, CZ) dont les axes sont décalés de $2\pi/3$ électrique, figure 4.3.

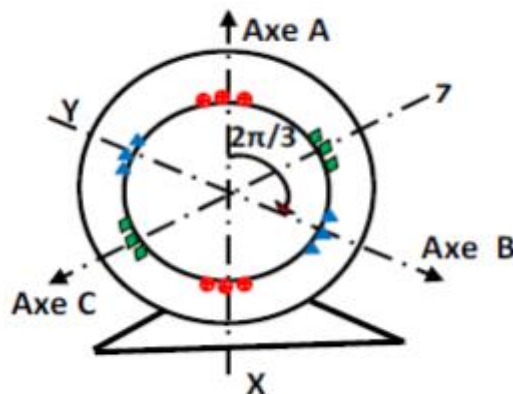


Figure 4.4 Stator triphasé bipolaire $2p=2$

2) **Le rotor** : c'est l'inducteur, il existe deux types de rotor, le rotor à pôles lisses et le rotor à pôles saillants (roue polaire).

-Le rotor des machines synchrones est alimenté avec du courant continu à l'aide d'un système (bagues, balais).

-Le rotor et le stator doivent avoir le même nombre de pôles ($2p$)

a) **Rotor à pôles saillants** : Sur les figures 10 et 11 est représenté respectivement un rotor à pôles saillants bipolaire et quadripolaire, pour $2p=6$ on aura 6 pôles etc....

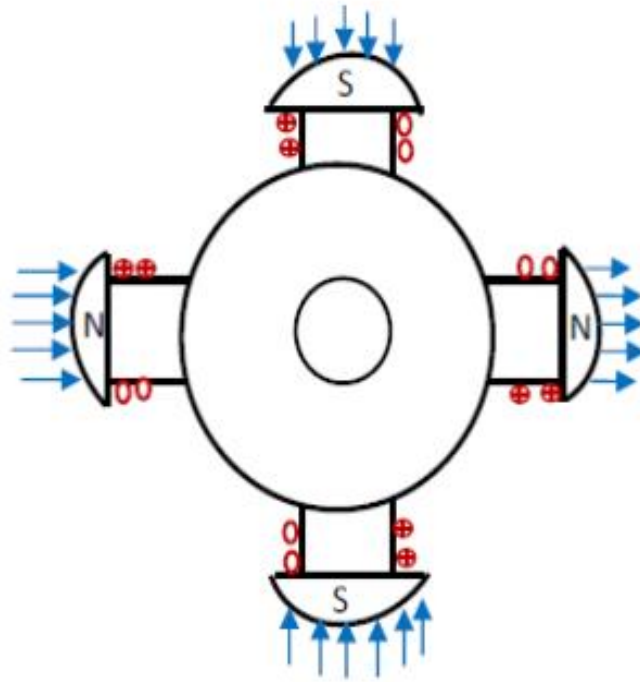


Figure 4.5 Rotor à pôles saillants $2p=2$

a) Rotor à pôles lisses

Le rotor à pôles lisses est identique du point de vue construction à celui des MCC, c'est un cylindre encoché sur sa périphérie. Dans ces encoches on loge un enroulement qu'on alimente (à l'aide d'un système bagues-balais) avec du courant continu, de telle sorte qu'on obtient le même nombre de pôles $2p$ que le stator.

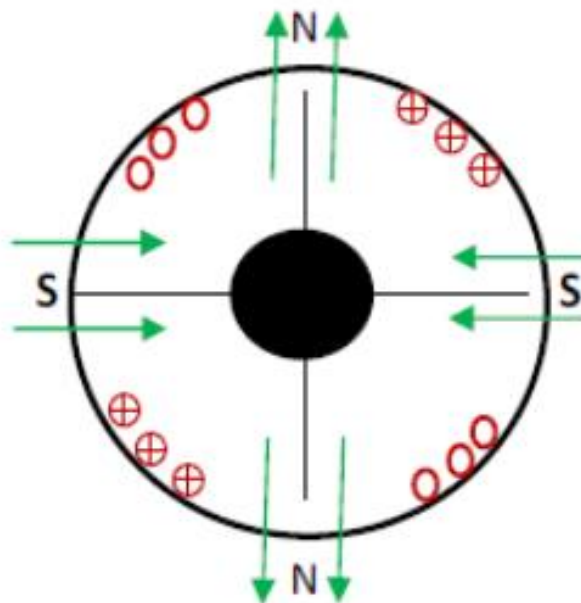


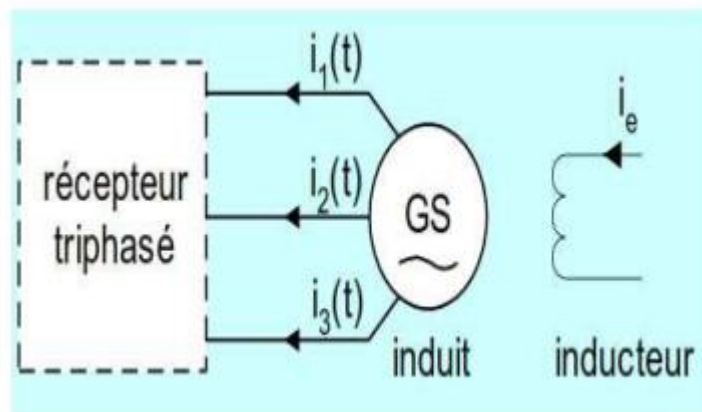
Figure 4.6 Rotor à pôles lisses $2p=2$

IV.3. Modes de fonctionnement

La machine synchrone est réversible [14], [17].

IV.3.1 Fonctionnement en générateur : On fait tourner le rotor (électro-aimant) à la vitesse de synchronisme qui est déterminée par le nombre de pôles de la machine et la fréquence, puis on récupère les FEM induites dans les bobines du stator (induit). C'est le mode de fonctionnement le plus utilisé et dans ce cas elles sont appelées **Alternateurs**.

Le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de f.é.m. alternative de pulsation $\omega = p.\Omega$.



IV.3.2 Fonctionnement en moteur : Dans ce cas on alimente le rotor et le stator. Ce mode de fonctionnement est assez rarement utilisé (uniquement pour les systèmes à vitesse constante). Elles sont aussi utilisées comme compensateur synchrone, pour relever le facteur de puissance de certaine installation (surexcitée capacitif, sous excitée inductif).

Le champ tournant du stator « accroche » le champ lié au rotor à la vitesse $\Omega_s = \omega/p$.

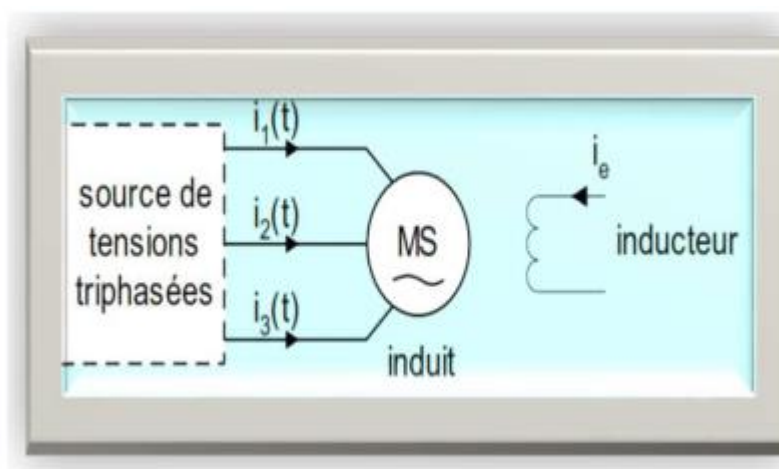


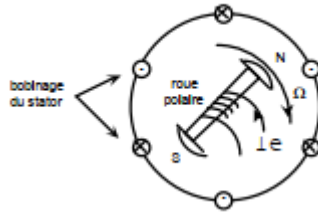
Figure 4.7 Inducteur (Stator) d'une MCC.

IV.4. LA F.E.M à vide dans un alternateur :

IV.4.1 Essai à vide :

a - Présentation :

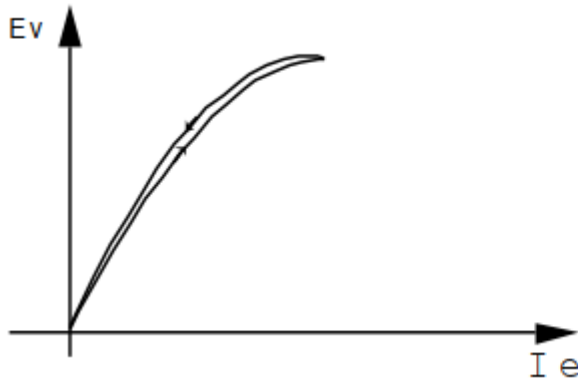
Le stator n'est traversé par aucun courant. Le champ tournant est issu de la roue polaire (traversée par un courant d'excitation I_e), entraîné par un système auxiliaire.



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

b - Caractéristique à vide :

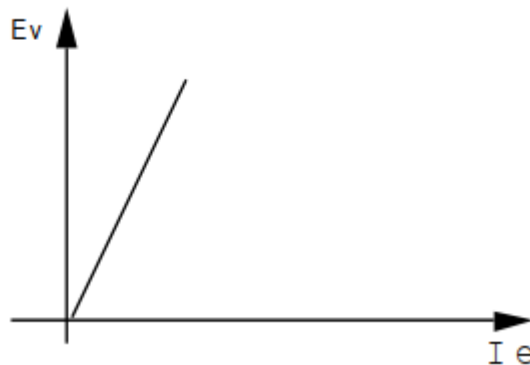
I_e varie par valeurs croissantes puis décroissantes, nous relevons E_v , tension à vide aux bornes d'une phase.



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

c - Idéalisisation de la caractéristique à vide :

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



IV.4.2. Etude de la F.E.M à vide :

a - Valeur théorique :

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

$$\phi(t) = \phi_{max} \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$$

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

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

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

$$E_v = -\frac{N}{\sqrt{2}} \omega \cdot f \cdot \phi_{max}$$

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

b - Valeur réelle :

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

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

$$E_v = K \cdot N \cdot f \cdot \phi_{max}$$

Avec :

E_v F.e.m induite dans un enroulement en volts

f Fréquence des f.e.m induites en hertz

ϕ_{max} Flux utile maximal sous un pôle en webers

N Nombre de conducteurs par phase.

K Coefficient de Kapp constant pour un alternateur donné tel que :

$$K = 2,22 \cdot KD \cdot KF \text{ avec :}$$

KD facteur de distribution voisin de 0,7

KF facteur de forme voisin de 1,05

***En triphasé :**

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

IV.5. Alternateur en charge :**IV.5.1 Etude en charge :****a - Présentation :**

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

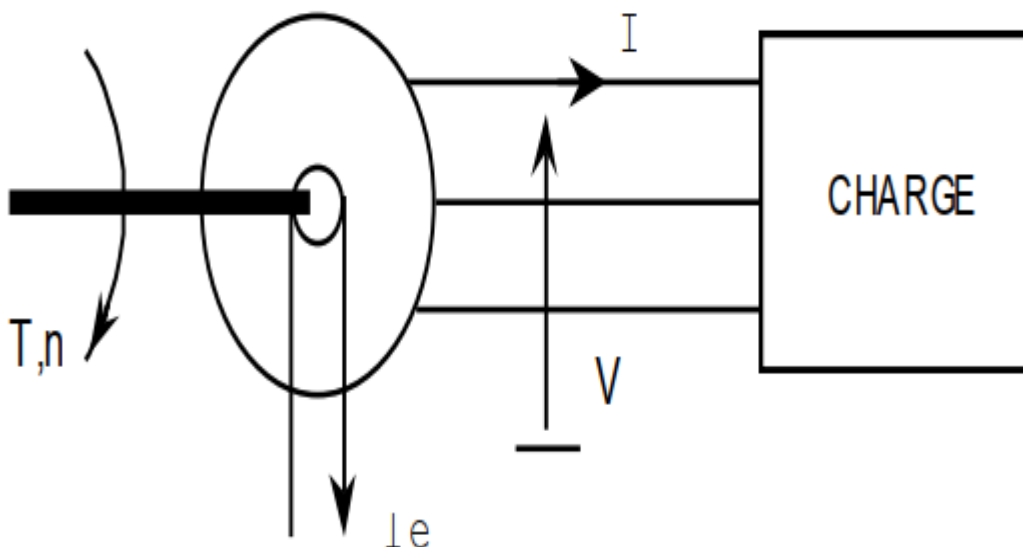
V Tension entre phase et neutre en volts

I Courant dans un fil de phase en ampères

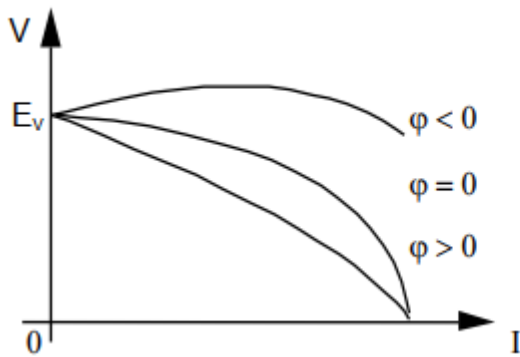
n Fréquence de rotation de l'alternateur en tr/s

I_e Courant d'excitation en ampères

φ Déphasage entre v et i .

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

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



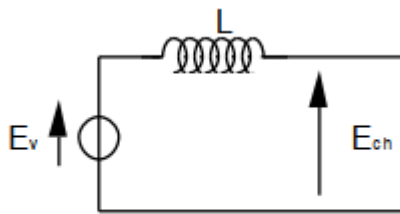
Nous remarquons l'effet démagnétisant (qui contraint d'augmenter I_e) d'une charge inductive et l'effet magnétisant d'une charge capacitive.

IV.5.2. Modelé équivalent d'une phase de l'alternateur :

a - Représentation du modèle :

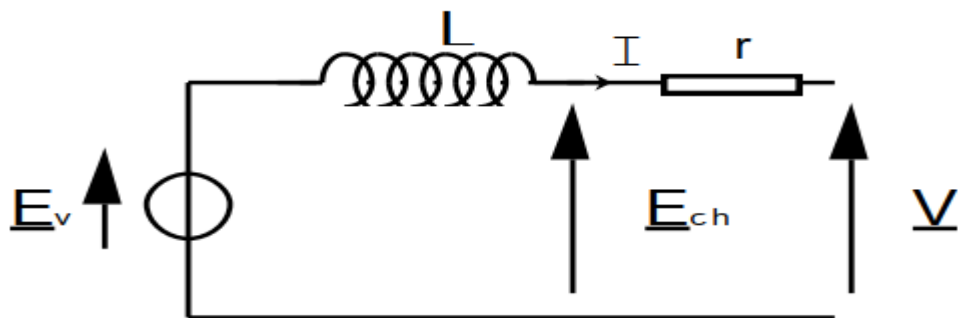
Les hypothèses simplificatrices suivantes seront respectées dans toute la suite de notre étude :

- Charge équilibrée - Régime permanent - Rotor à pôles lisses - Machine non saturée –



$X_s = L_s \omega$: appelée réactance synchrone.

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



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

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

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

Soit : $Z = \sqrt{r^2 + (L\omega)^2}$: la réactance synchrone.

b - Diagramme de BEHN - ESCHENBOURG :

La loi des mailles s'écrit :

$$v = e_v - u_L - r.i$$

Donc :

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

Connaissant :

ϕ Déphasage courant tension, angle imposé par la charge.

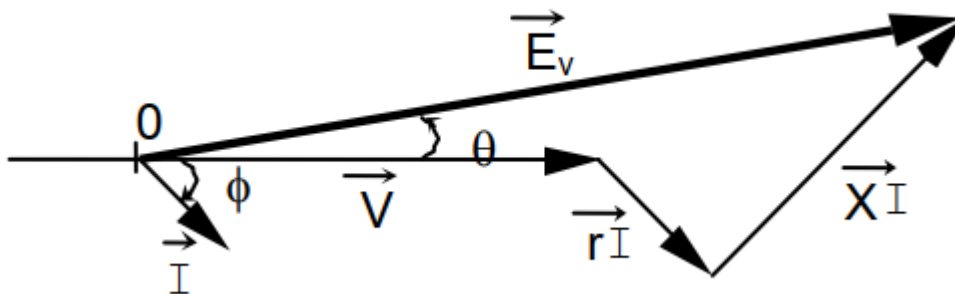
$X = L.\omega$ Réactance synchrone

I Intensité du courant dans la charge

V Tension simple

Nous pouvons calculer E_v :

- On trace V .
- Connaissant ϕ , on trace I , puis rI , colinéaire à I .
- On trace XI .
- On en déduit E_v .
- On peut mesurer θ , angle de décalage interne, (V ; E_v).



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

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

C - Détermination des éléments du modèle :

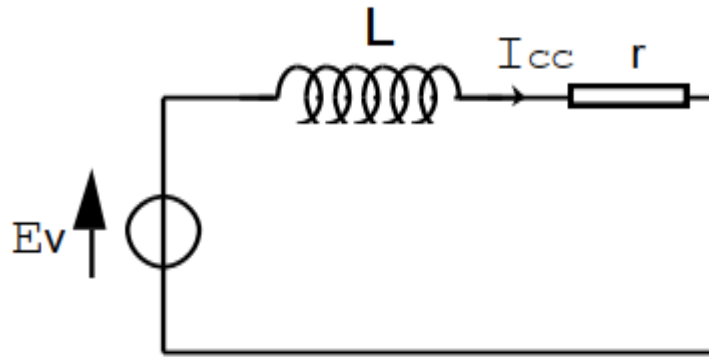
La détermination du modèle de l'alternateur non saturé se fait en trois étapes :

- **Tracé de la caractéristique à vide** :

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

- Relevé de la caractéristique en court-circuit :

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



$$\underline{E}_v = (r + jL\omega) \cdot \underline{I}_{cc} = \underline{Z} \cdot \underline{I}_{cc}$$

$$E_v = (R + j \cdot L \cdot \omega) \cdot I_{cc} = Z \cdot I_{cc}$$

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

- Calcul de l'impédance synchrone :

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

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

IV.6 Bilan des puissances :

IV.6.1 Puissance utile :

U : Tension entre deux bornes de phases.

I : Intensité du courant de ligne.

$\cos\varphi$ Facteur de puissance imposé par la charge.

En monophasé : $P_u = U \cdot I \cdot \cos\varphi$

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

IV.6.2 Bilan des pertes :

- La puissance reçue :

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

$$P_M = T_M \cdot \omega$$

- Les pertes collectives :

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

- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :

U_e : Tension aux bornes de l'inducteur.

I_e : Intensité du courant d'excitation.

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

- Les pertes par effet Joule dans l'induit :

- En monophasé :

r : Résistance de l'enroulement induit.

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

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

- En triphasé :

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

I : Intensité efficace du courant de ligne.

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

Rendement

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

Chapitre V
Machines Asynchrones

V.1 Généralités :

Elles sont ainsi appelées parce que le rotor ne tourne pas à la vitesse de synchronisme. Elles sont généralement utilisées en moteur asynchrone triphasé (MAS), même si elles sont parfaitement réversibles, elles sont aussi très utilisées en moteur monophasé dans les appareils électroménager [11].

Symbole :

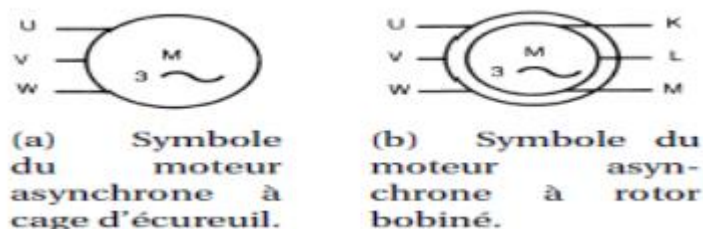


Figure 5.1 Symboles du MAS.

V.2 Constitution d'une MAS :

La machine asynchrone est constituée d'un (stator, rotor, entrefer) [17].

1) **Le stator** : c'est un cylindre creux encoché à l'intérieur et dans lequel il y a un enroulement généralement triphasé (stator identique à celui de la machine synchrone)

2) **Le rotor** : En fonctionnement normale le rotor des machines asynchrones est en court-circuit. Il existe deux types de rotor, le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil.

a) **Le rotor bobine** : C'est un cylindre encoché à l'extérieur et contenant un bobinage triphasé, accessible grâce à un système de trois (bague+ balais) qui sont reliés à trois bornes sur la plaque à bornes. Ces trois bornes permettent d'insérer éventuellement un rhéostat de démarrage.

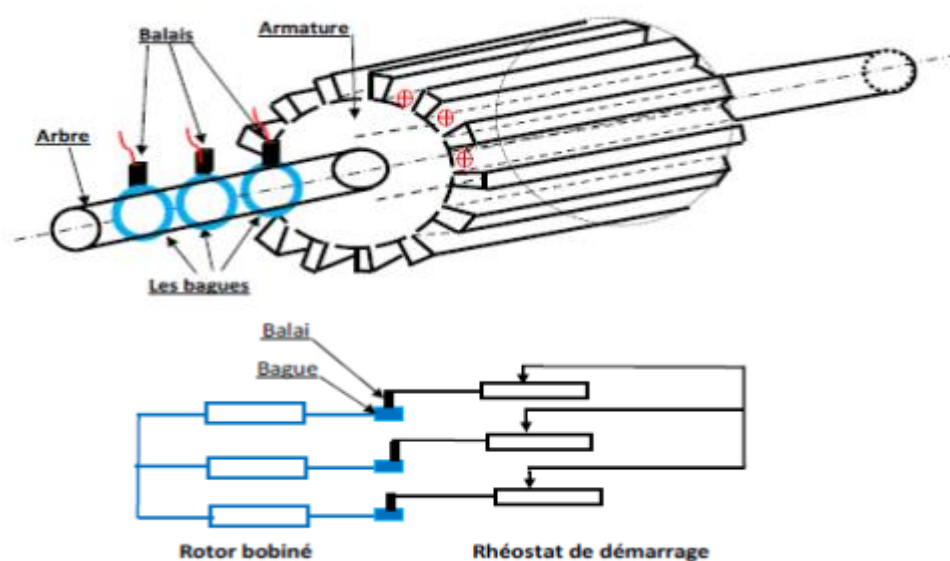


Figure 5.1 Schéma de principe d'un rotor bobiné avec rhéostat de démarrage

b) Rotor a cage d'écureuil : Dans ce genre de rotor l'enroulement est constitué de barres de cuivre nues soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court circuitent.

Ces rotors ne sont pas accessibles, il n'ya pas de bornes au rotor.



Figure 5.2 Schéma d'un rotor à cage

V.3 Principe de fonctionnement [14]

A. Alimentation triphasée de l'enroulement statorique → Création d'un champ tournant à la vitesse de

$$\text{synchronisme } \Omega = \frac{\omega_s}{P} \text{ (rd/s)} ; \Omega = \frac{60.f}{P} \text{ (tr/mn)}$$

B. Le champ tournant induit des F.e.m dans l'enroulement rotorique (F.e.m dans l'enroulement rotorique) (F.e.m induites), comme le bobinage rotorique est en court-circuit donc il va être le siège d'un courant induit d'où l'appellation de la machine d'induction).

Résultat 1 l'interaction de ce courant avec le champ tournant engendre des forces Mouvement du rotor.

C. La force (couple) va entrainer le rotor dans le sens du champ tournant du stator. Ce couple tend du fait de la loi de Lenz à réduire la cause qui a donné naissance aux courants induits c.à.d la rotation relative du champ magnétique par rapport au rotor/

Résultat 2 Le rotor tourne alors à une vitesse $\Omega_s > \Omega$ d'où l'appellation "Machine Asynchrone"

V.4 Notion de glissement

Le rotor tourne à la vitesse n plus petite que la vitesse de synchronisme n_s . On dit que le rotor « glisse » par rapport au champ tournant. Ce **glissement** g va dépendre de la charge [15].

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

n_s : fréquence synchrone de rotation du champ tournant en tr/s

n : fréquence de rotation du rotor (tr/s).

Ω_s : Vitesse synchrone de rotation du champ tournant en rad/s

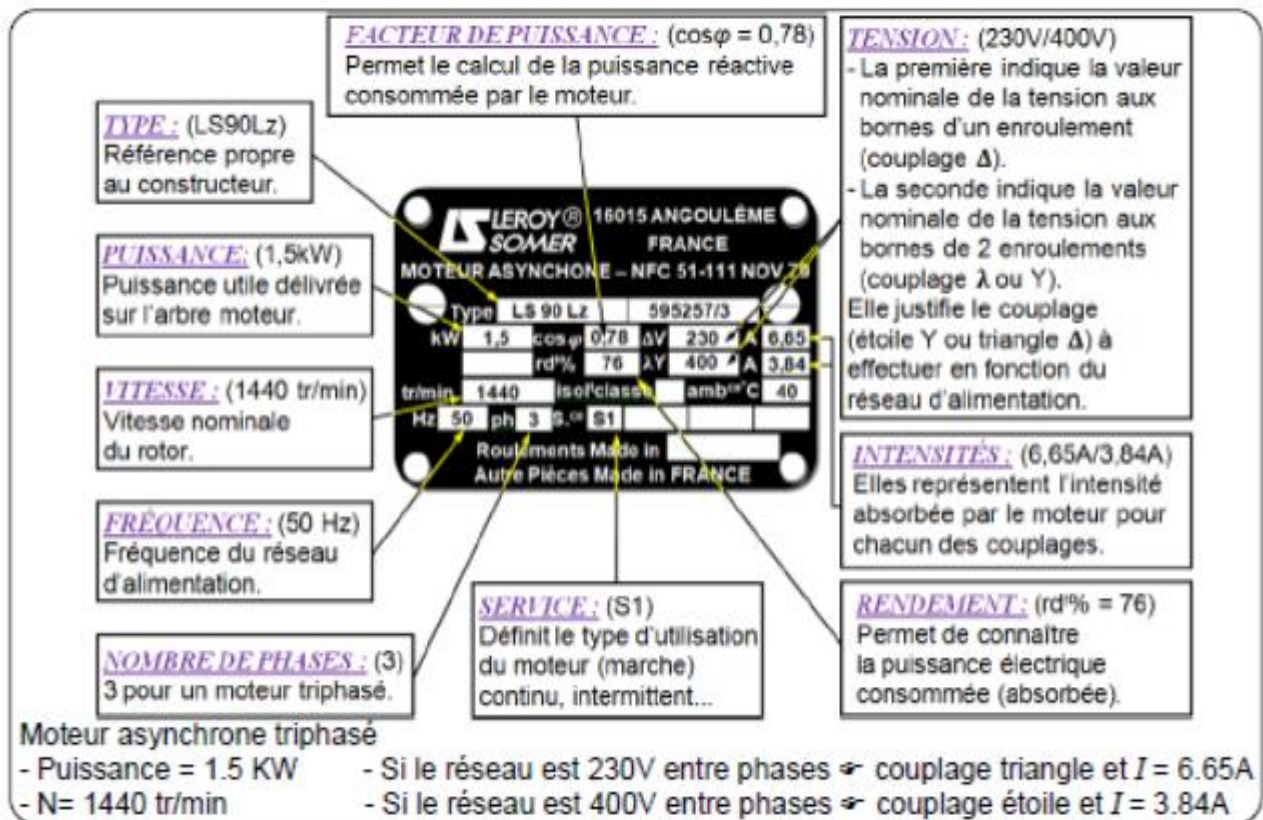
Ω : Vitesse de rotation du rotor (tr/s).

Remarque : En réalité le glissement 'g' est faible pour un fonctionnement en charge nominale.

V.5 Plaque signalétique – Couplage :

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone (moteur électrique) est la carte d'identité du moteur délivrée et certifiée par le constructeur. Le moteur asynchrone d'induction possède un fort couple de démarrage, mais il a l'inconvénient d'absorber de 4 à 8 fois son intensité nominale. Pour réduire cet appel de courant on dispose de différents procédés de démarrage.

Elle contient donc les caractéristiques nominales électriques du moteur (voir ci-dessous).



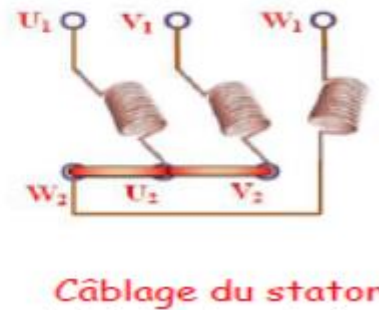
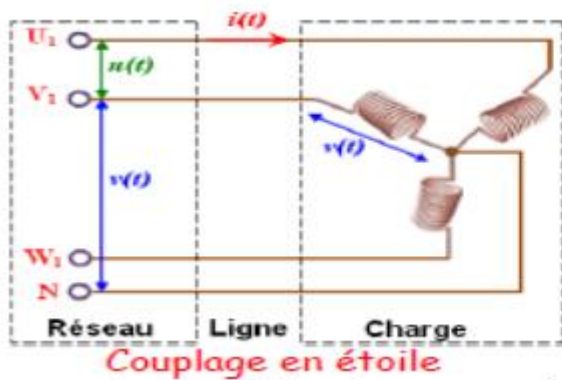
Le **couplage** d'un moteur asynchrone peut être **triangle**, **étoile**, ou impossible selon la tension réseau et la tension nominale du moteur.

En **couplage triangle**, chaque enroulement du moteur asynchrone voit directement la tension appliquée.

En **couplage étoile**, chaque enroulement voit une tension réduite (divisée 3).

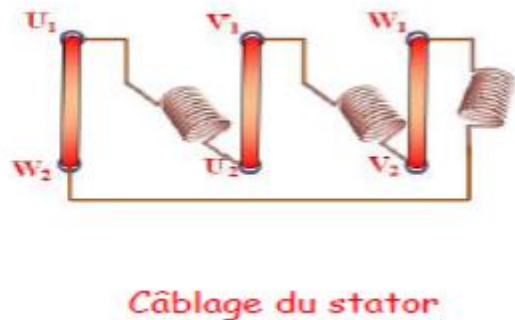
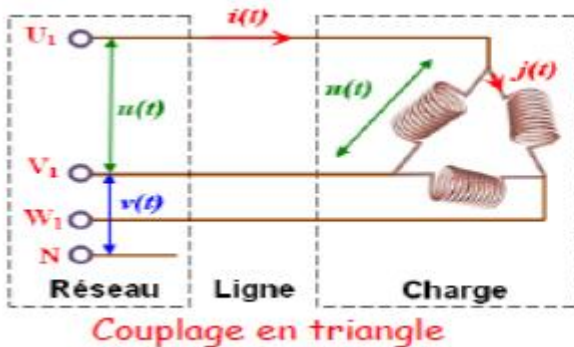
a- Le couplage en étoile :

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



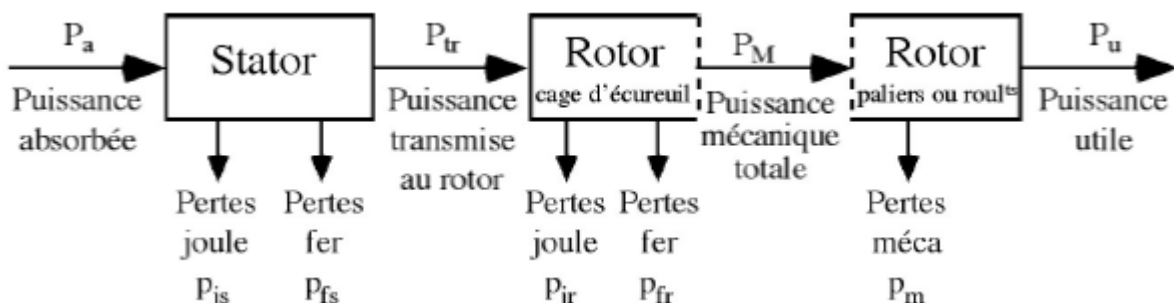
b- Le couplage en triangle :

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



V.6 Bilan des puissances

Le bilan de puissance décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique. Le bilan est résumé comme suit :



Stator

Puissance électrique absorbée

$$P_a = P_s = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi_s = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi_s$$

Les pertes par effet Joule au stator

$$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$$

Les pertes par effet Joule entre les bornes

$$P_{js} = \frac{3}{2} \cdot R_b \cdot I_s^2$$

La puissance transmise et la puissance électromagnétique

$$P_{tr} = P_{elm} = P_a - P_{js} - P_{js}$$

U_s : tension entre deux bornes du moteur

I_s : courant statorique

R_s : résistance des enroulements statoriques

R_b : Résistance entre bornes

Rotor

Puissance transmise au rotor : $P_{tr} = C_{em} \cdot \Omega_s$

Pertes joules au rotor : $P_{jr} = g \cdot P_{tr}$ alors $P_{em} = 3 \cdot \frac{R_r}{g} \cdot I_r^2$

Puissance mécanique totale P_M : $P_M = (1 - g) \cdot P_{tr}$

Pertes collectives P_c : $P_c = P_M + P_{tr}$

Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{(1 - g) \cdot P_{tr} + P_M}{P_a}$$

Les Couples

Couple électromagnétique : Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse

Ω_s : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse Ω . L'action de l'ensemble des forces

électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant C_{em} : $C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s}$

Couple mécanique : il est dû à l'interaction stator rotor : $C_{em} = \frac{P_M}{\Omega_s} = C_M$

V.6 .1 L'essai à vide :

Le fonctionnement à vide du moteur indique qu'il n'entraîne aucune charge sur son arbre. L'indice (°)

Caractérise cet essai.

La fréquence de rotation du rotor est notée $n_s = n_0$

Le couple utile à vide : $C_{u0} = 0$

Le glissement à vide : $g=0$

Le bilan de puissance à vide : $P_0 = P_{mec} + P_{js0} + P_{fs}$

V.6.2 Fonctionnement en charge

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor. En régime permanent, Le couple moteur sera égal au couple résistant : $C_u = C_r$

Les principales caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé sont :

Le couple nominal C_n (N.m)

La vitesse de rotation n (tr/mn)

L'intensité absorbée I (A)

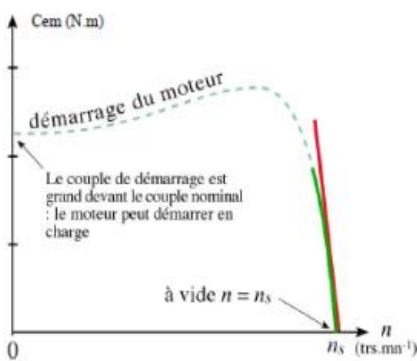


Figure 5.3 Caractéristique Mécanique $C_{em}=f(n)$

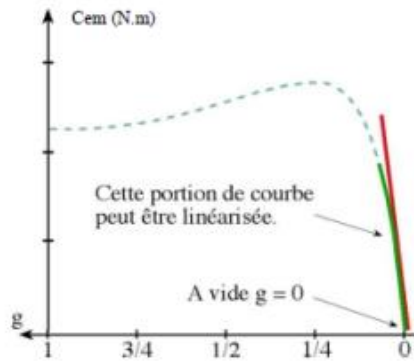


Figure 5.4 Caractéristique Mécanique $C_{em}=f(g)$

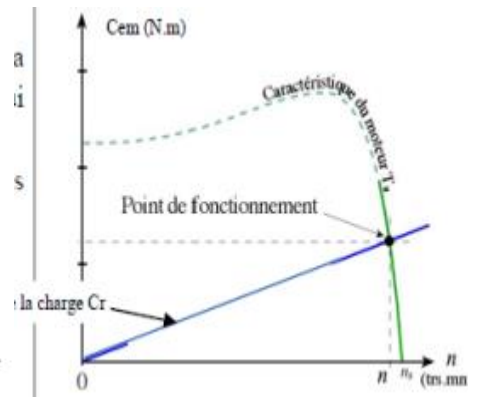


Figure 5.5 Point de fonctionnement d'une MAS

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

Le point de fonctionnement (C_{em} ; n) permet de calculer très facilement le glissement et la puissance utile dans ce cas.

V.7 Mise en Equations et Schéma monophasé équivalent

V.7.1 Expressions des F.e.m Induites

$$E_s = K_1 \cdot N_1 \cdot f_s \cdot \phi \text{ STATOR}$$

$$E_r = K_2 \cdot N_2 \cdot f_r \cdot \phi \text{ ROTOR}$$

f_r et f_s Les fréquences des courants statoriques et rotoriques avec $f_r = g f_s$

K_1 et K_2 Les coefficients de kapp d'un enroulement primaire (stator) et secondaire (rotor).

N_1 et N_2 Les nombres des conducteurs dans le stator et dans le rotor.

ϕ flux dans un pôle.

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{K_2 \cdot N_2 \cdot f_r \cdot \phi}{K_1 \cdot N_1 \cdot f_s \cdot \phi} = m \cdot g \quad \text{Avec} \quad \frac{K_2 \cdot N_2}{K_1 \cdot N_1} = m$$

m est équivalent à un rapport de transformation donc c'est un rapport transformation de la MAS à L'arrêt (rotor ouvert)

V.7.2 Expressions des tensions

Stator :

$$V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d\phi_s}{dt} \quad \text{avec} \quad \phi_s = L_s \cdot I_s + M \cdot I_r \quad \text{avec} \quad \phi_1 = M \cdot I_r$$

$$V_s = R_s \cdot I_s + \frac{d(L_s \cdot I_s + \phi_1)}{dt}$$

$$V_s = R_s \cdot I_s + j\omega_s \phi_1 + j\omega_s L_s \cdot I_s$$

Rotor : en court-circuit

$$V_r = 0 = R_r \cdot I_r + \frac{d\phi_r}{dt} \quad \text{avec} \quad \phi_r = L_r \cdot I_r + M \cdot I_s \quad \text{avec} \quad \phi_2 = M \cdot I_s$$

$$0 = R_r \cdot I_r + \frac{d(L_r \cdot I_r + \phi_2)}{dt}$$

$$0 = R_r \cdot I_r + j\omega_r \phi_2 + j\omega_r L_r \cdot I_r$$

V.7.3 Schéma monophasé Equivalent

On a : $V_s = R_s \cdot I_s + j\omega_s \phi_1 + j\omega_s L_s \cdot I_s$ et $0 = R_r \cdot I_r + j\omega_r \phi_2 + j\omega_r L_r \cdot I_r$

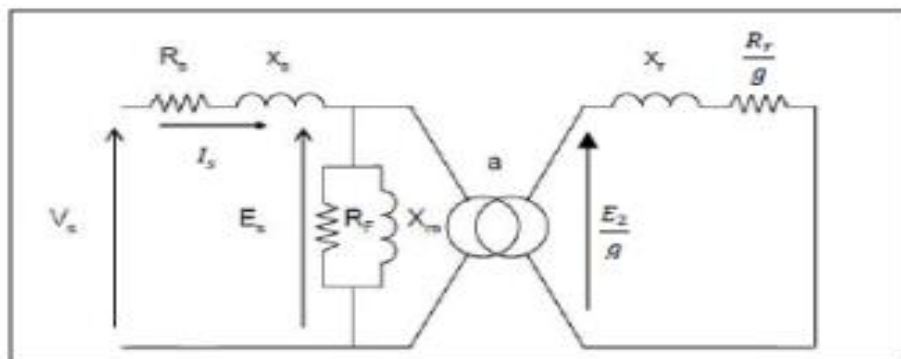
On note : $X_s = \omega_s L_s$ et $E_1 = j\omega_s \phi_1$ et $X_r = \omega_r L_r$ et $E_2 = j\omega_r \phi_2$

On note : $E_1 = m \cdot E_2$

Le schéma équivalent d'une phase de la machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur

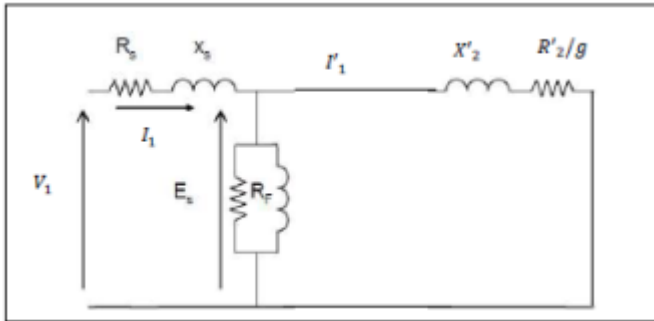
mais en court-circuit. On peut modifier ce transformateur par $0 = \frac{R_r}{g} \cdot I_r + jX_r \cdot I_r + \frac{E_2}{g}$.

On obtient le schéma Equivalent suivant



On peut pose $I_s = I_1$ et $I_r = I_2$ et $V_s = V_1$

Le schéma ramené au primaire (stator) est donné par



Les paramètres ramenés sont :

$$X'_2 = \frac{X_r}{m^2} \text{ et } R'_2 = \frac{R_r}{m^2} \text{ et } I_1 = I'_1 + I_{10}$$

V.8 Construction du diagramme circulaire

La construction du diagramme se détermine à partir des essais suivants :

1) **Essai à vide** : On alimente le moteur sous sa tension nominale V_1 et on relève le courant I_{10} et la puissance $P_{10} = 3V_1 I_{10} \cos\phi_{10}$. On place le point A de coordonnées $(I_{10}, \cos\phi_{10})$. Pour plus de précision on peut faire l'**essai à glissement nul ($g=0$)** : cet essai est obtenu en alimentant le moteur sous sa tension nominale et en faisant tourner le rotor (par un moteur auxiliaire) à la vitesse synchrone. On relève alors le point A' de glissement ($g=0$)

2) **Essai à rotor bloqué** : Cet essai doit se faire à tension réduite pour éviter des courants excessifs. On alimente le moteur sous une tension réduite en gardant le rotor bloqué ($g=1$) et on relève V_{1cc} , I_{1cc} et $P_{1cc} = 3V_{1cc} I_{1cc} \cos\phi_{1cc}$ et on détermine $\cos\phi_{1cc} = P_{1cc} / (3V_{1cc} I_{1cc})$. Pour plus de précision on peut déterminer le courant de court-circuit à tension nominale en faisant le rapport suivant : $I_d = (V_{1N} / V_{1cc}) I_{1cc}$

3) **Essai en charge glissement quelconque (g)** : En fonctionnement normale le glissement est assez faible ($g=0.1$). On relève le point M(I_1, ϕ_1)

Tracé simplifié du diagramme du cercle :

- 1-On prend une échelle pour les courants 1 cm = x Ampères.
- 2-On place le point A (I_{10}, ϕ_{10}) tel que OA = I_{10} ,
- 3-On trace Ax' // OX,
- 4- On place le point M (I_1, ϕ_1) avec $I_1 = I_{10} + I'_1$
- 5-On trace la perpendiculaire à AM, elle coupe OX' en B
- 6- On trace le cercle de diamètre AB, AMB étant rectangle

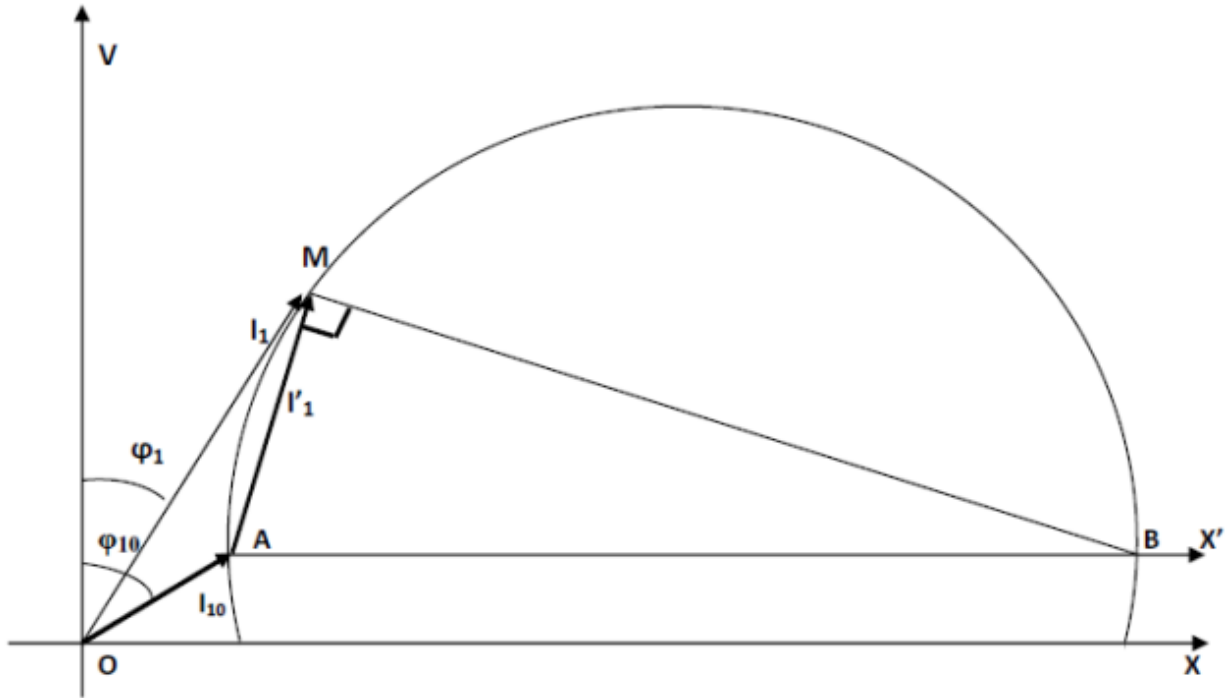


Figure 5.6 Diagramme du cercle

V.9 Caractéristiques mécaniques

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

Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em}}{\omega_s} \text{ or } P_{jr} = g \cdot P_{em} \text{ donc le couple est } C_{em} = p \frac{P_{jr}}{g \cdot \omega_s}$$

$$\text{Donc } C_{em} = p \frac{3}{g \cdot \omega_s} R_r \cdot I_r^2$$

$$\text{Pour le transformateur on a : } I_2 = \frac{I'_1}{m} \text{ alors } C_{em} = p \frac{3}{g \cdot \omega_s} R_r \cdot \frac{I_1'^2}{m^2}$$

En négligeant la chute de tension dans l'enroulement statorique, on a :

$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + (X'_2)^2}} \text{ alors } C_{em} = p \frac{3 \cdot R_2}{g \cdot \omega_s \cdot m^2} \frac{V_1^2}{\left(\frac{R'_2}{g}\right)^2 + (X'_2)^2}$$

$$\text{Et } R'_2 = \frac{R_2}{m^2}, X'_2 = \frac{X_2}{m^2} \text{ alors } C_{em} = p \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot m^2}{\omega_s} \frac{\frac{R_2}{g}}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (X_2)^2}$$

Finalement $C_{em} = k \frac{\frac{R_2}{g}}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + (X_2)^2}$ avec $k = p \frac{3.V_1^2.m^2}{\omega_s}$ a V_1 constant

D'après la relation, on voit que le couple est en fonction de g donc de n. La caractéristique mécanique Sera $C_{em} = f(g)$ ou $C_{em} = f(n)$

Au démarrage : $n=0$ et $g=1$ donc $C_D = k \frac{R_2}{(R_2)^2 + (X_2)^2}$

Le couple maximal est donné par $\frac{dC_{em}}{dg} = 0$ ce qui donne le glissement critique $g_{max} = \frac{R_2}{X_2}$

Donc le couple maximum est $C_D = k \frac{1}{2.X_2} = p \frac{3.V_1^2.}{2.\omega_s.X_2}$

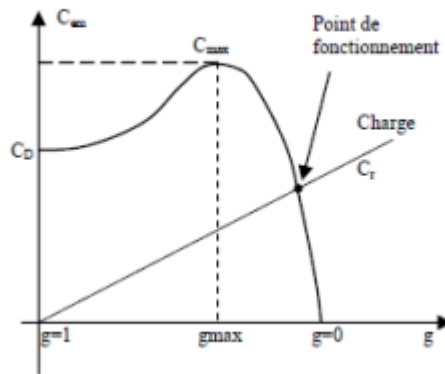


Figure 5.7 Caractéristique mécanique $C_{em} = f(g)$

V.10. Démarrage, Freinage et Réglage de vitesse d'un moteur synchrone.

V.10.1 Démarrage : Il faut que le couple de démarrage C_D soit le plus grand que possible.

$$C_D = C_{em(g=1)} = p \frac{3.V_1^2.m^2}{\omega_s} \frac{R_2}{(R_2)^2 + (X_2)^2}$$

Pour faire augmenter C_D . Il faut l'approcher au C_{max} or pour avoir :

$$C_{max} \text{ on a } g_{max} = \frac{R_2}{X_2}$$

Et pour C_D on a $g=1$ alors il faut avoir $R_2 = X_2$ c.à.d faire augmenter R_2 donc on rajoute des résistances en série au rotor lors du démarrage $R_{tot} = R_2 + R_{th}$ alors $1 = \frac{R_2 + R_{th}}{X_2}$

V.10.2 Freinage des moteurs asynchrones

a) Inversion du sens de rotation (ou par courant-courant) Lorsqu'on intervertit deux fils de l'alimentation, le champ tourne en sens inverse du rotor : le moteur fonctionne comme un frein; il absorbe l'énergie cinétique des parties tournantes qui est dissipée en chaleur dans le rotor. On peut limiter l'intensité en insérant des résistances en série.

b) Courant continu En injectant du courant continu dans deux phases du stator, on provoque l'arrêt rapide du moteur. On utilise à cet effet un transformateur abaisseur et un pont de diodes pour limiter le courant à environ $1,3 I_n$.

c) Electro-freins Un électro-aimant triphasé ou monophasé assure le freinage

d) Freinage hyper synchrone. Ce type de freinage s'applique aux moteurs à bagues servant au levage. Le moteur fonctionne comme une génératrice asynchrone.

V.10.3 Réglage de la vitesse :

Le réglage de la vitesse de rotation du moteur peut donc être obtenu par :

a) Action sur le nombre de paires de pôles : on peut par construction et à l'aide d'un commutateur passer de $p=1$ à $p=2$. Deux vitesses sont ainsi disponibles.

b) Action sur la fréquence de la tension d'alimentation statorique par des onduleurs de courant, de tension, M.L.I, contrôle vectoriel de flux, cyclo convertisseurs)

c) Action sur le glissement

- action sur la tension d'alimentation statorique (autotransformateur, gradateur)

- Rhéostat de glissement au rotor.

References

1. J.P Perez. Electromagnétisme Fondements et Applications, 3eme Edition, 1997.
2. A. Fouillé. Electrotechnique à l'Usage des Ingénieurs, 10e édition, Dunod, 1980.
3. C. François. Génie électrique, Ellipses, 2004
4. L. Lasne. Electrotechnique, Dunod, 2008
5. J. Edminister. Théorie et applications des circuits électriques, McGraw Hill, 1972
6. D. Hong. Circuits et mesures électriques, Dunod, 2009
7. M. Kostenko. Machines Electriques - Tome 1, Tome 2, Editions MIR, Moscou, 1979.
8. M. Jufer Electromécanique, Presses polytechniques et universitaires romandes-Lausanne, 2004.
9. A. Fitzgerald. Electric Machinery, McGraw-Hill Higher Education, 2003.
10. J. Lesenne. Introduction à l'électrotechnique approfondie. Technique et Documentation, 1981.
11. P. Maye. Moteurs électriques industriels, Dunod, 2005.
12. S. Nassar. Circuits électriques, Maxi Schaum.
13. Theodore Wildi. Electrotechniques, de Boeck, 2005
14. Entraînement électrique, J.Fandino., Volume 1, ISBN: 2-7462-1305-2, 2006
15. Machines électriques; Francis Milsant, Ellipses, 1992
16. M.Kostenko et L.Piotrovski. Machine électrique: machine à courant alternatif, Tome II, édition Mir 1979.
17. M.Kostenko et L.Piotrovski. Machine électrique: machine à courant continu, Tome I, édition Mir 1979.
18. Francis Milsant. Cours d'électrotechnique: Machine à courant continu, Tome II, Eyrolles, Paris 1981.