

LES MACHINES A COURANT CONTINU

(Partie - 01)

EQUATIONS GENERALES - ENROULEMENTS

En utilisant le phénomène d'induction électromagnétique, les machines à courant continu transforment l'énergie électrique reçue sous forme de courant continu en énergie mécanique de rotation ou inversement.

En effet, de par leur conception ces machines sont dites du type réversible car le transfert d'énergie est bidirectionnel, comme indiqué sur la Fig. (4.1). Elles sont aussi connues sous le nom de "convertisseurs électromécaniques".

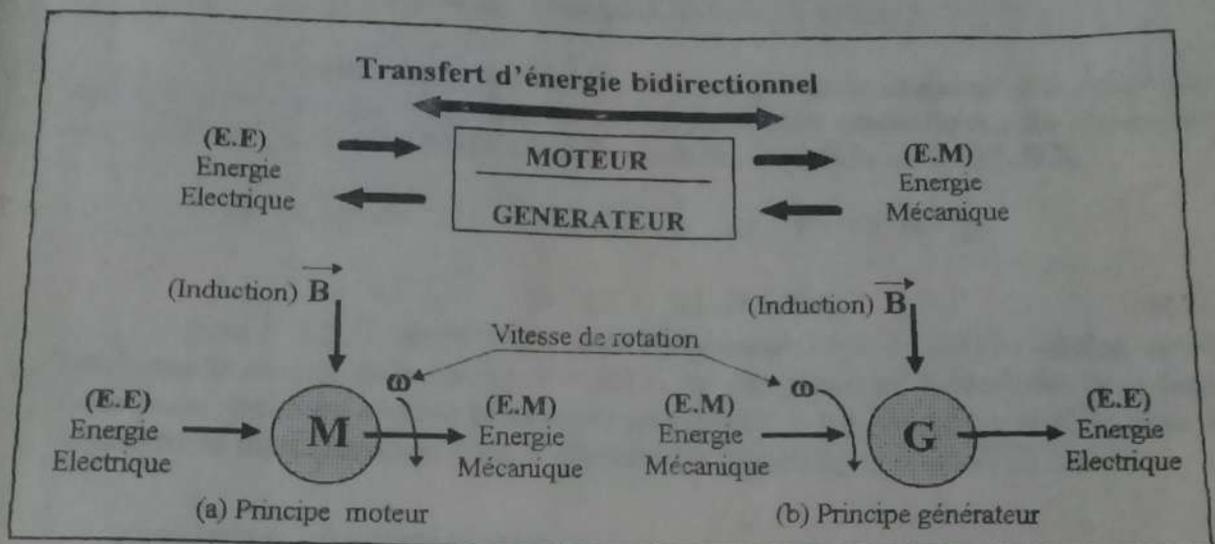


Fig. (4.1) Principe de réversibilité des M.C.C

Dans ce chapitre, il sera rappelé en premier lieu, les lois fondamentales régissant le fonctionnement des machines électriques.

Le principe de fonctionnement des machines à courant continu (M.C.C), ainsi que les puissances mises en jeu seront présentés dans une deuxième partie.

Un bref aperçu sur le bobinage de ces machines (i.e. les enroulements) feront l'objet de la dernière partie.

4.1.1 Loi de LAPLACE

Cas d'un conducteur rectiligne parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique uniforme d'induction «B».

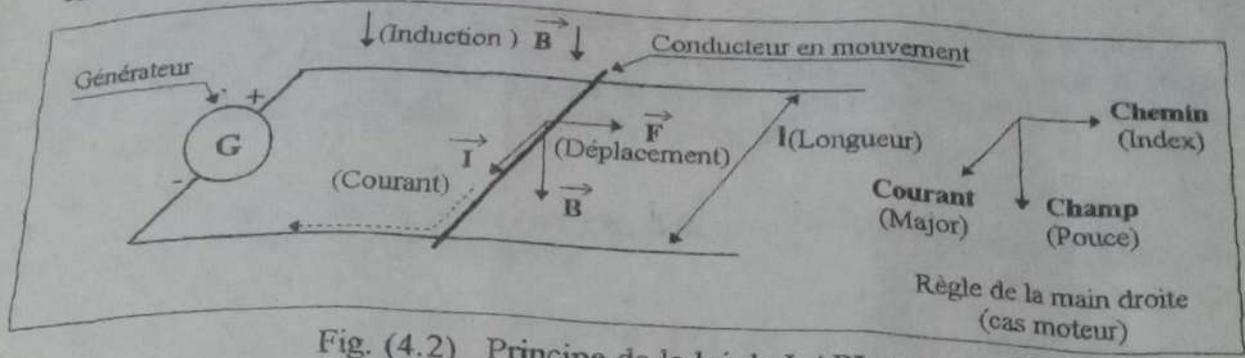


Fig. (4.2) Principe de la loi de LAPLACE

La force qui s'exerce sur un élément de circuit de longueur «L», parcouru par un courant «I» et plongé dans un champ d'induction magnétique «B» est donnée par la relation (3.3, (§:3.1)), qui est définie comme étant la loi de LAPLACE:

$$\vec{dF} = I \vec{dl} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = \int_L I \vec{dl} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = I \int_L \vec{dl} \wedge \vec{B}$$

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

Pour $L \perp B \Rightarrow \sin 90^\circ = 1$, alors l'expression (4.1) devient la relation simple (4.1)

qui donne le module de la force : $F = B.I.L$ et en appliquant la règle des trois doigts de la main droite on obtient le sens de cette force «F» indiquant ainsi le sens de déplacement du conducteur, c'est le principe du "cas moteur", Fig. (4.2).

4.1.2 Loi de LENZ

4.1.2.1 Cas d'un conducteur rectiligne animé d'un mouvement rectiligne uniforme, Fig.(4.3), illustrant le principe de la loi de LENZ.

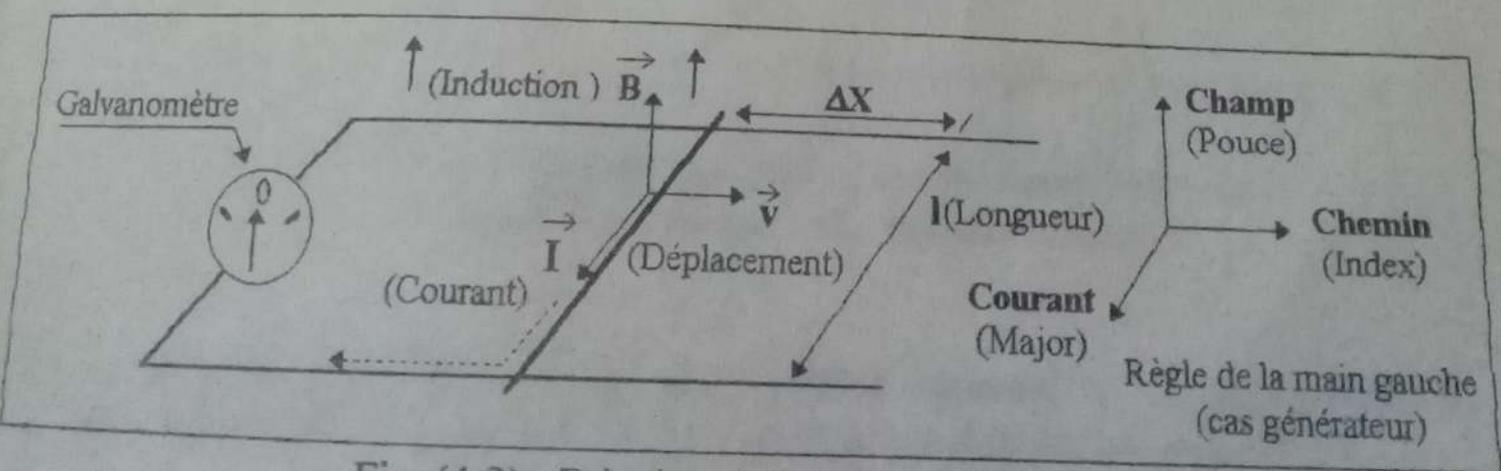


Fig. (4.3) Principe de la loi de LENZ

En appliquant la règle des trois doigts de la main gauche, on obtient le "cas générateur", Fig. (4.3). D'après le principe de conservation de l'énergie on a :

$$dW = I d\phi \text{ et comme: } d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}, \text{ or } d\vec{S} = \vec{L} \wedge d\vec{X}, \text{ avec } d\vec{X} = \vec{v} dt$$

Par ailleurs, à partir de la relation (3.10, (§3.1)), on a :

$$e = \left| \frac{d\phi}{dt} \right| = \frac{\vec{B} \cdot \vec{L} \wedge \vec{v} dt}{dt} = \vec{B} \cdot \vec{L} \wedge \vec{v} \Rightarrow e = B \cdot L \cdot v \cdot \sin\alpha \quad (4.2)$$

Donc tout conducteur de longueur « L », placé dans un champ d'induction magnétique « B », et animé d'une vitesse « v »: est le siège d'une force électromotrice induite « e », dont le module est donné par la relation (4.2) et le sens du courant (i.e.) de la f.e.m est donné par la règle de la main gauche, Fig. (4.3).

4.1.2.2 Cas d'un conducteur rectiligne animé d'un mouvement circulaire uniforme, qui est illustré sur la Fig. (4.4).

Comme on le constate, un conducteur qui est animé d'un mouvement circulaire uniforme est le siège d'une f.e.m d'induction sinusoïdale (forme alternative).

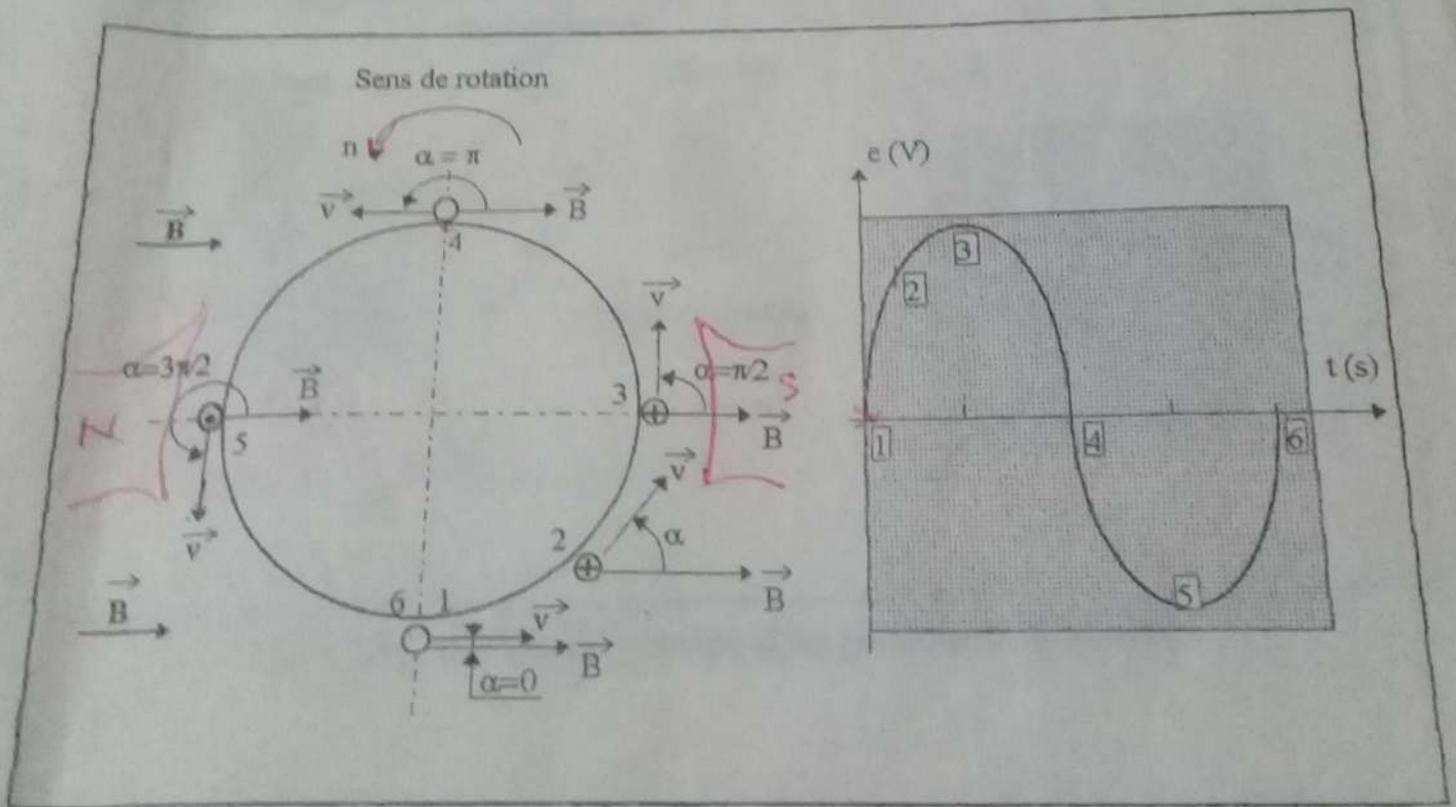


Fig. (4.4) Conducteur rectiligne placé dans un champ uniforme Animé d'un mouvement circulaire uniforme

Les deux précédentes lois fondamentales régissent le fonctionnement de toutes les machines électriques tournantes, à quelles que différences près.

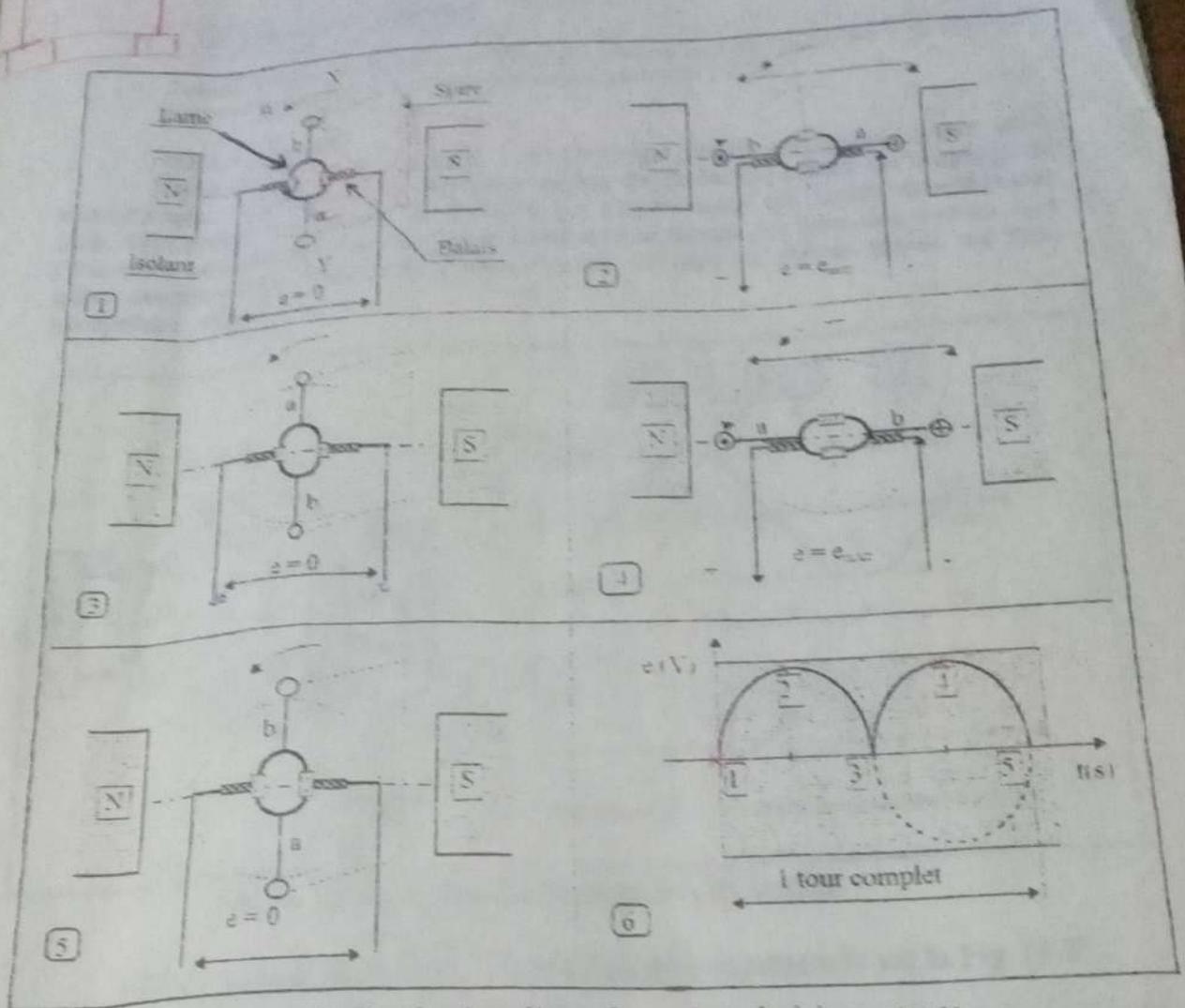


Fig. (4.6) Production d'une f.e.m de polarité constante

Si l'on considère une spire tournante dans le champ d'induction « B », créé par les pôles inducteurs (N-S), elle est le siège d'une f.e.m induite sinusoïdale à l'intérieur. Le système « balais-collecteur » assure le redressement de cette onde à l'extérieur.

Le collecteur qui est constitué de lames de cuivre qui sont séparées entre elles par des feuilles d'isolants, Fig. (4.6(1)), est solidaire de la spire et tourne avec elle.

Les balais sont situés sur la partie fixe de la machine et assurent la liaison électrique entre la partie fixe et la partie tournante.

Pour les différentes positions de la spire de (1) à (5) de la Fig. (4.6), on constate que le sens du courant dans chaque brin (a) et (b) change de signe à chaque passage de l'axe interpolaire XY, cependant le sens du courant sortant des balais reste inchangé. l'onde de sortie est illustrée sur la Fig. (4.6(6)).

4.2.3 Dynamo de Gramme

Zenobe Gramme: Savant Belge (1826-1901), il mit au point le « collecteur » en 1869, qui permit la réalisation de la première dynamo industrielle (1871).

4.2.3.1 Principe

Dans ce type de machine, le bobinage induit est formé d'une suite ininterrompue de spires qui sont bobinées autour d'un cylindre, réalisé par empilage de tôles. Des points équidistants de ce bobinage étaient reliés aux lames du collecteur (Ensemble cylindrique formé de lames conductrices isolées les unes des autres). Les balais constituent les bornes de l'induit et pour ce type ils étaient placés sur l'axe interpolaire, Fig. (4.7).

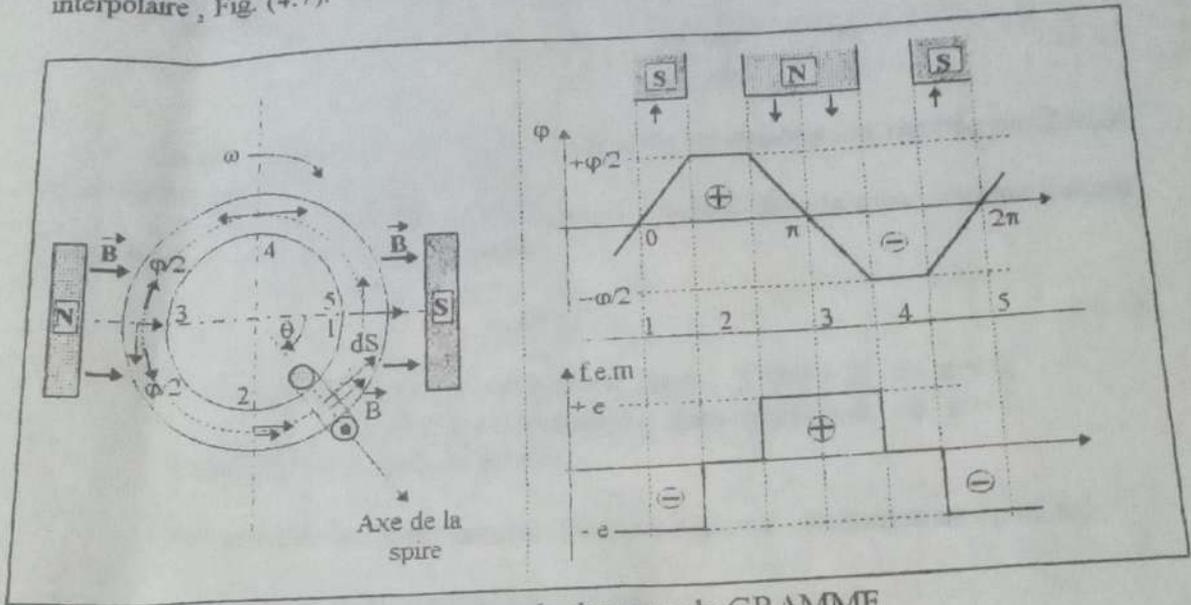


Fig. (4.7) F.e.m dans la dynamo de GRAMME

4.2.3.2 Calcul de la f.e.m: Soit la machine représentée sur la Fig. (4.8) :

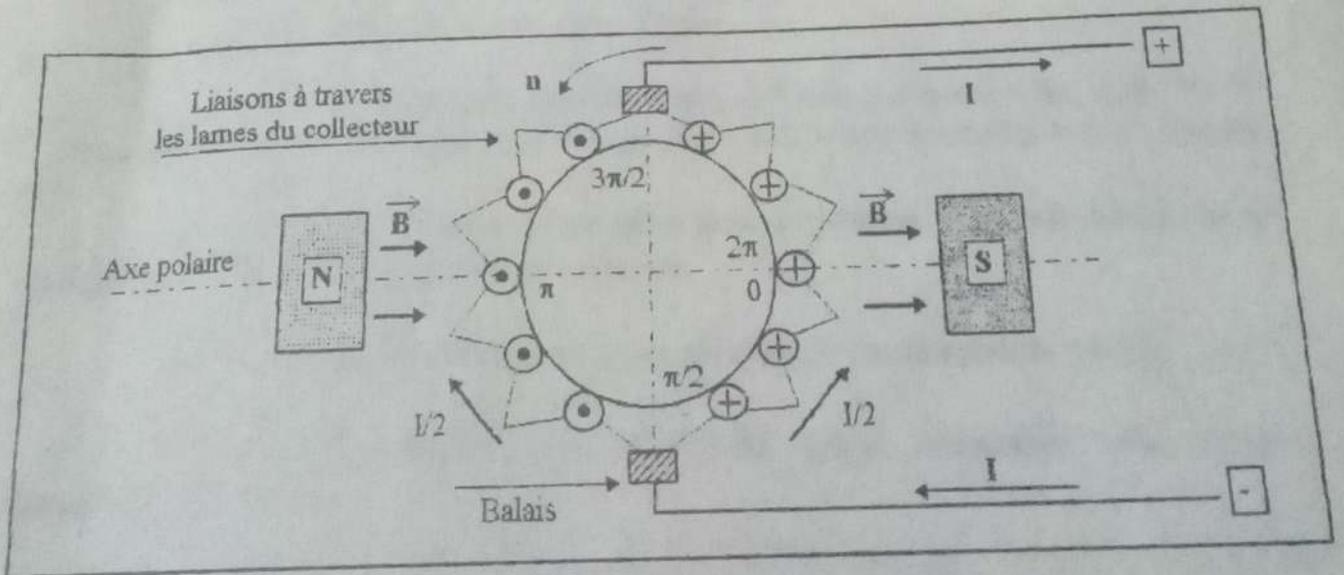


Fig. (4.8) Analogie de la dynamo de GRAMME

- Comportant: N = nombre de spires de l'induit.
- Tournant à la vitesse « ω » en tr/s.
- Le flux ϕ par pôle arrivant sur la surface de l'induit (Nord) et ressortant (Sud), est donné par la relation :

$$\phi = \frac{\Phi}{2} \cdot f(\theta) \quad (4.3)$$

Où $f(\theta) = 0$, pour: $\theta = 0, \pi, 2\pi$, (le cadre n'est pas traversé par le flux).

$f(\theta) = \pm 1$, pour: θ compris dans la zone interpolaire.

(i.e.) que: $f(\theta) = 1$, pour: $\theta = \frac{\pi}{2}$ et $f(\theta) = -1$, pour: $\theta = \frac{3\pi}{2}$.

(le cadre reçoit le maximum de flux).

Par ailleurs :

$$e = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = - \omega \frac{d\phi}{d\theta} \quad (4.4)$$

Comme illustré sur la Fig. (4.7), la spire en rotation est repérée par l'angle « θ » qu'elle fait avec l'axe du pôle Sud.

Du flux « ϕ » on passe à la f.e.m « e » induite dans la spire, comme indiqué par les relations (4.8) et (4.9), on aura :

$$e = - \omega \frac{\Phi}{2} f'(\theta) \quad (4.5)$$

Sachant que si: $f(\theta)$ est croissante, alors: $f'(\theta) > 0, \Rightarrow e < 0$,
si: $f(\theta)$ est décroissante, alors: $f'(\theta) < 0, \Rightarrow e > 0$.

Où $f'(\theta)$ est la dérivée de $f(\theta)$.

On voit que la f.e.m induite dans une spire est alternative et de valeur :

- * $e > 0$ sous le pôle nord,
- * $e < 0$ sous le pôle sud,
- * $e = 0$ sur l'axe interpolaire.

* F.e.m totale ou f.e.m entre balais

Si « N » est le nombre total de spires, la f.e.m totale entre les balais est la somme des f.e.m qui sont engendrées dans les « $N/2$ » spires situées sous le même pôle.

* Le flux « ϕ » à travers une spire pour la position « θ_1 » est donné par la relation (4.8), avec $f(\theta)$ définie précédemment.

* La f.e.m induite dans cette spire est donnée par la relation (4.10). (4.15)

* La f.e.m induite pour $(N/2\pi) \cdot d\theta$ spires comprises sous l'angle élémentaire « $d\theta$ » est :

$$e \frac{N}{2\pi} d\theta = - \frac{\Phi}{2} \frac{N}{2\pi} \omega \cdot f'(\theta) \cdot d\theta \quad (4.6)$$

Comme la f.e.m totale «E» est la somme des f.e.m élémentaires engendrées entre deux balais (i.e.) sous un même pôle, alors on intègre par rapport à «θ» entre: (π/2) et (3π/2), donc:

$$E = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} - \frac{\Phi}{2} \frac{N}{2\pi} \omega \cdot f'(\theta) \cdot d\theta = - \frac{\Phi}{2} \frac{N}{2\pi} \omega \left[f\left(\frac{3\pi}{2}\right) - f\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (4.7)$$

$$E = - \frac{\Phi}{2} \frac{N}{2\pi} \omega [-2] \quad (4.8) \quad (4.9)$$

Comme:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (4.10) \quad (4.11)$$

avec n = fréquence de rotation en tr/s, et après simplification on aura :

$$E = N \cdot n \cdot \Phi \quad (4.10)$$

- Où : E = f.e.m exprimée en (V) ,
- n = Vitesse de rotation exprimée en (trs/s) ,
- N = Nombre total de conducteurs
- Φ = flux par pôle en (Wb)

Ceci étant l'expression pour une génératrice bipolaire à induit en anneau (Machine de Gramme).

4.2.4 Avantage des machines à induit en tambour

4.2.4.1 Cas de la machine de Gramme (ou anneau de Gramme)

Pour une spire, seul le conducteur situé dans l'entrefer est utile, alors beaucoup de cuivre est inutile, donc un impact économique sur le prix de revient de la machine. Par ailleurs, l'induit est difficile à bobiner et à placer sur l'arbre, entraînant ainsi des difficultés de construction, Fig. (4.9a).

4.2.4.2 Cas de la machine à induit en tambour

On met en série des conducteurs placés sur la périphérie du tambour (rotor ou induit) donc tous utiles. Dans ce cas le bobinage est plus simple à réaliser. Le montage du circuit magnétique sur l'arbre de la machine est plus aisé, Fig. (4.9b).

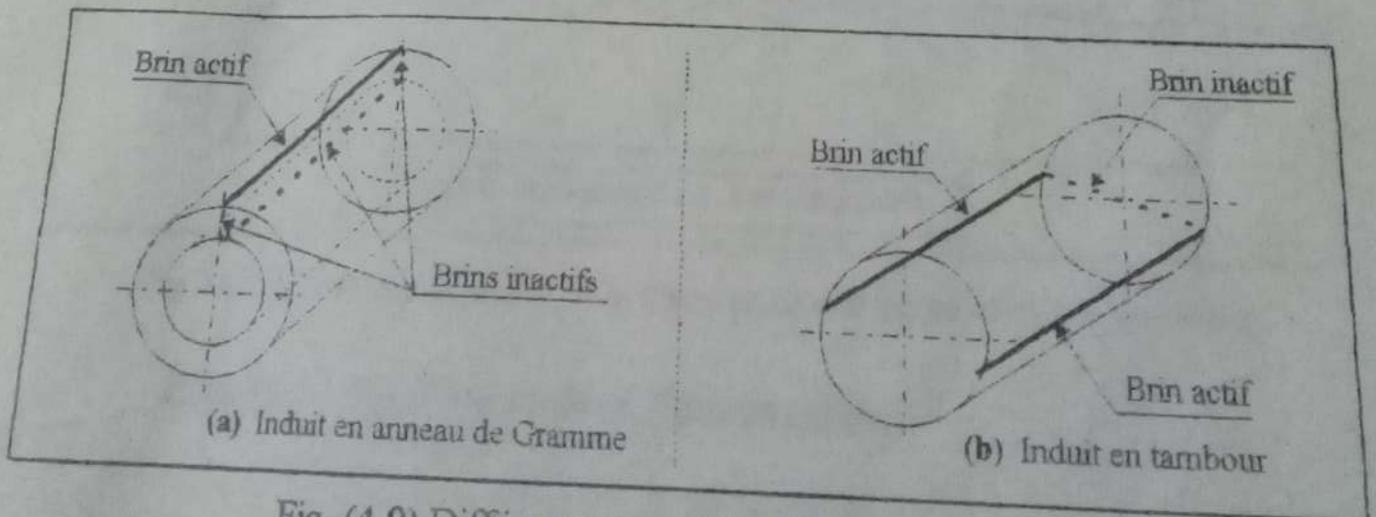


Fig. (4.9) Différents types d'induit des M.C.C

4.2.5 Généralisation de l'expression de la f.e.m

4.2.5.1 Association en série de plusieurs conducteurs actifs

En augmentant le nombre de conducteurs actifs par section, on accroit la f.e.m et on diminue les ondulations du courant. Fig. (4.10). En effet, la f.e.m élémentaire de chaque conducteur est faible, alors on doit disposer de plusieurs conducteurs en série pour obtenir des f.e.m usuelles (120 V ou 220V par exemple). De même, pour augmenter la puissance de la machine (i.e.) du courant, on doit placer plusieurs voies en parallèles.

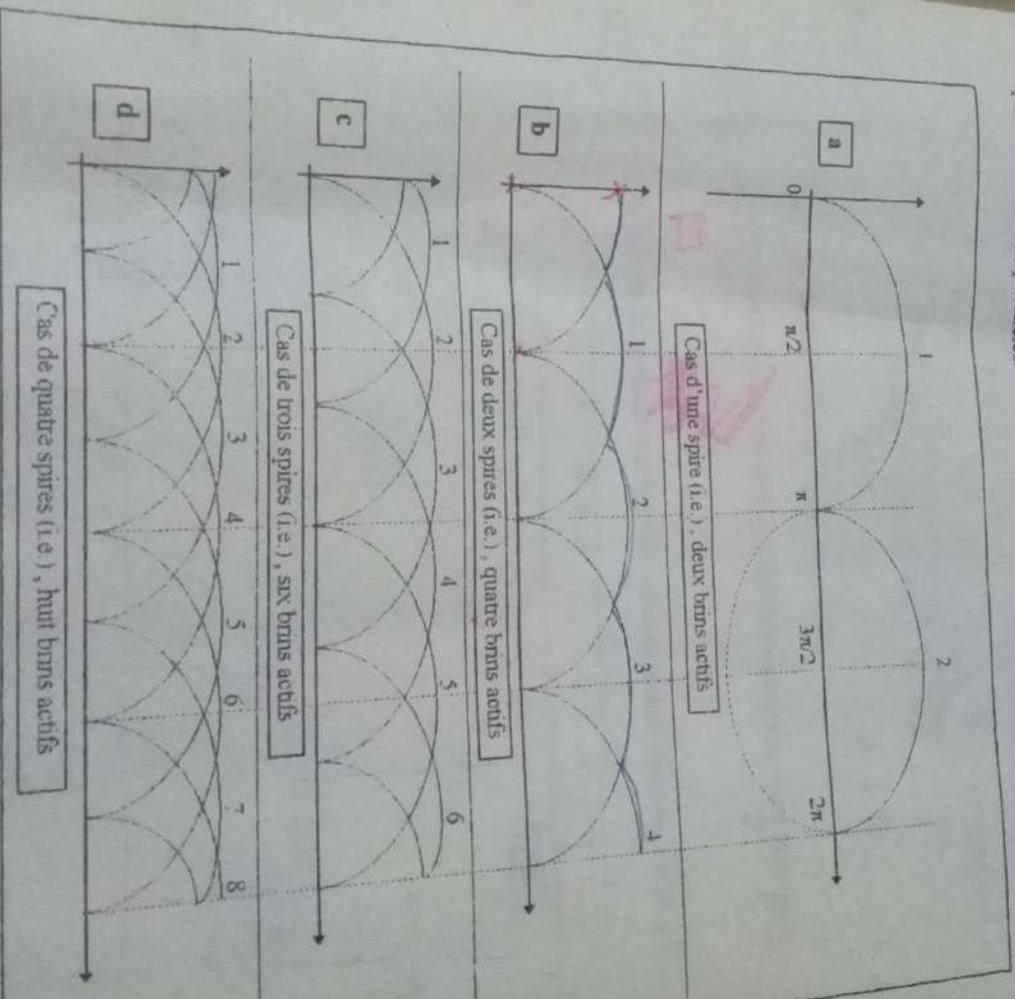


Fig. (4.10) Formes d'ondes de la f.e.m pour différents nombres de spires

Exemple : Cas d'une machine bipolaire simple.

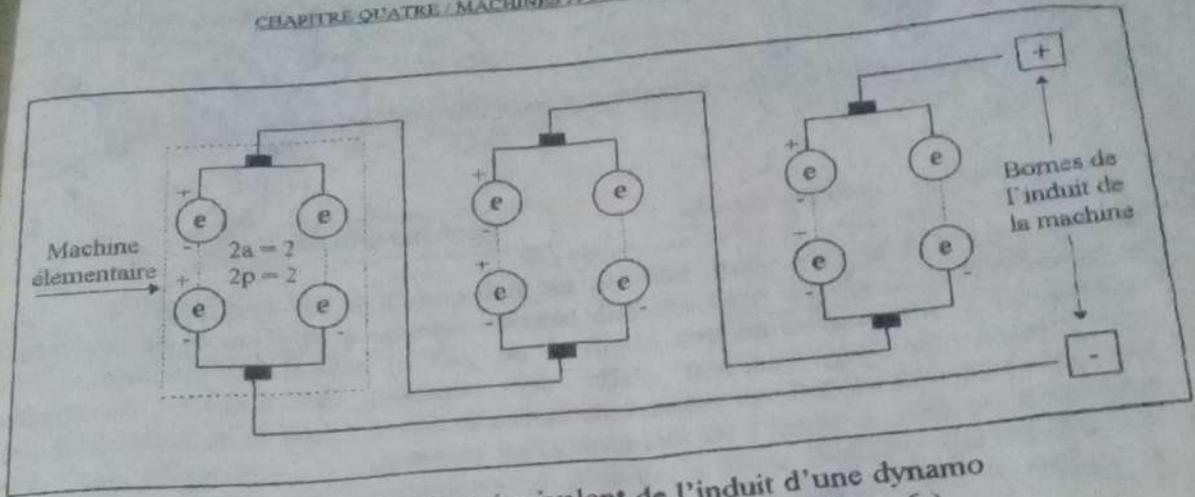


Fig. (4.12) Schéma équivalent de l'induit d'une dynamo multipolaire série ($2a = 2$, $2p = 6$)

(3) Dynamo multipolaire série-parallèle: Fig. (4.13)

C'est un groupement mixte, regroupant les deux premiers cas, mais avec « p » différent de « a », alors :

$$E = (p/a) \cdot N \cdot n \cdot \phi$$

Cas particulier de la dynamo multipolaire série-parallèle: lorsque « p = a », alors :

$$E = N \cdot n \cdot \phi$$

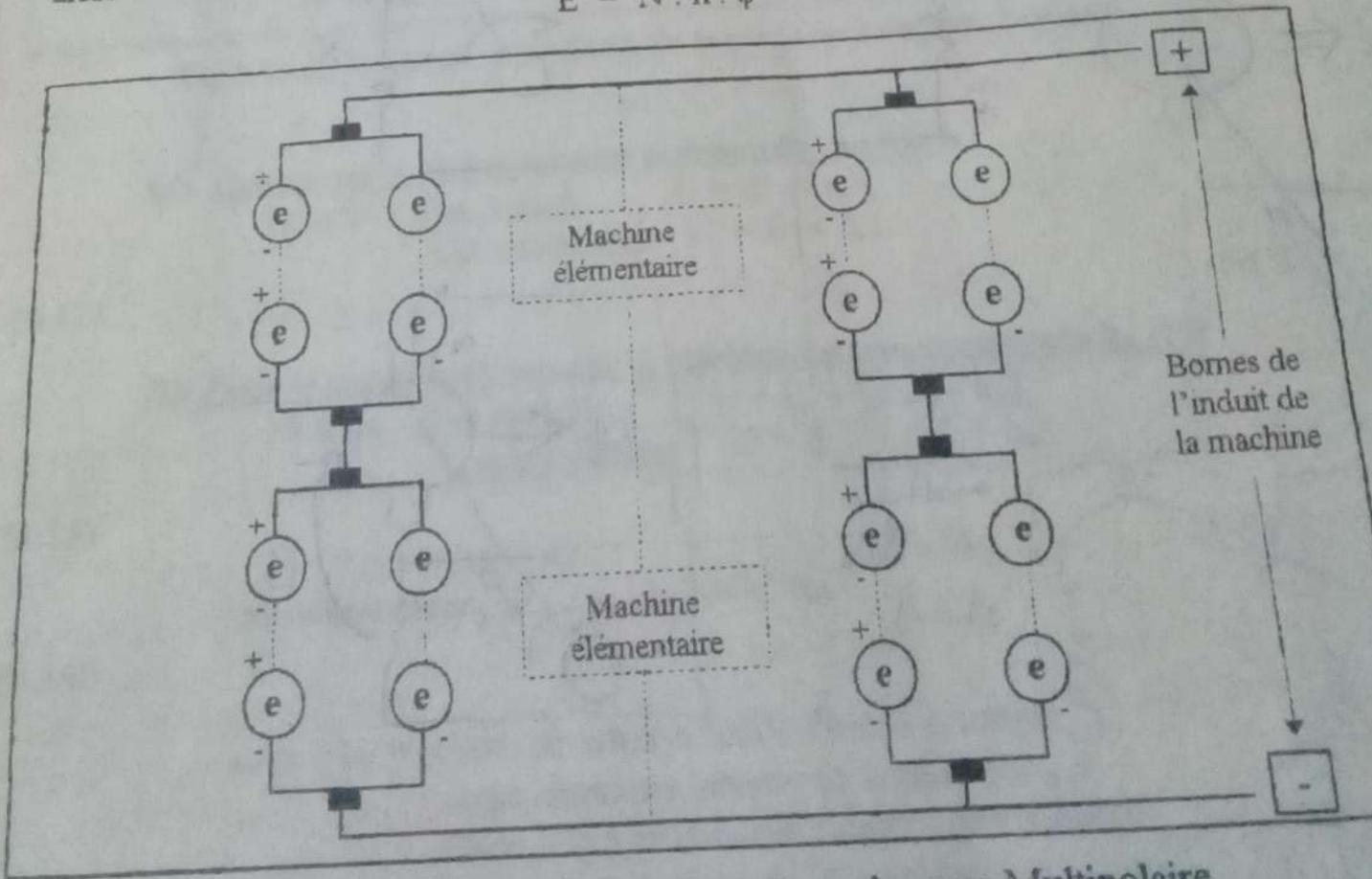


Fig. (4.13) Schéma équivalent d'une dynamo Multipolaire série-parallèle ($2a = 6$, $2p = 12$)

4.3.1 Equations des tensions

Comme il a été déjà introduit au chapitre trois, Fig. (3.16), les schémas équivalents de la machine à courant continu dans les deux modes de fonctionnement sont représentés sur la Fig. (4.16), où la chute supplémentaire due à la réaction magnétique d'induit est négligée. En effet, parcouru par un courant, en fonctionnement en charge, l'induit se comporte comme une bobine dont l'axe coïncide avec l'axe interpolaire. Ce nouveau comportement de l'induit a pour effet de créer une chute de tension supplémentaire (en plus de la chute ohmique pour effet de créer résistance interne de l'induit) qui s'opposera à la f.e.m quelque soit le régime de fonctionnement. Ce phénomène important fera l'objet du prochain chapitre.

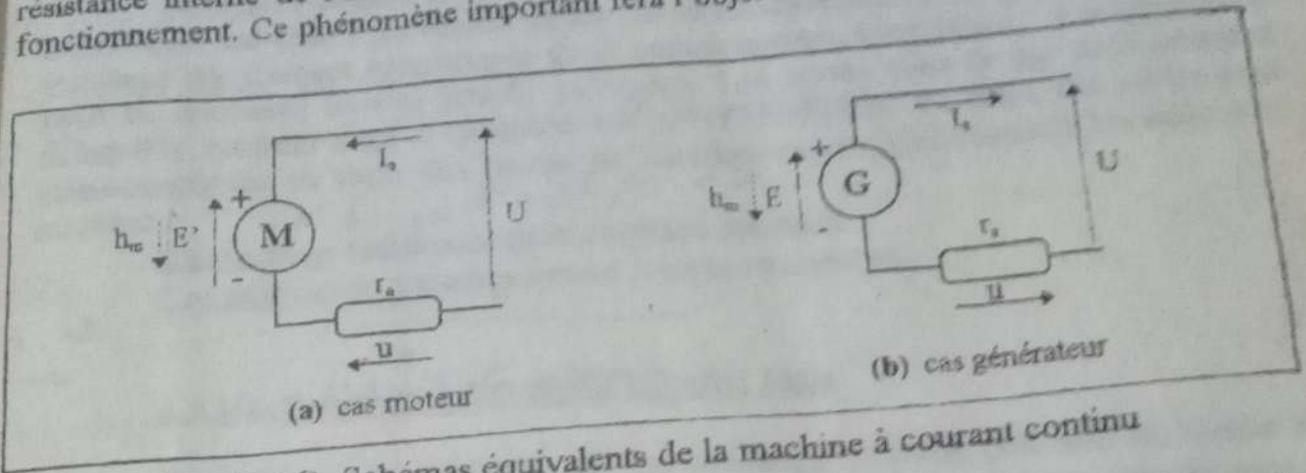


Fig. (4.16) Schémas équivalents de la machine à courant continu

- (1) Dans le cas où la machine est compensée $h_m \neq 0$.
 on aura : Cas moteur $U = E' + r_a \cdot I_a$
Cas générateur $U = E - r_a \cdot I_a$

(4.12)

- (2) Dans le cas général, lorsque la machine est non compensée $h_m \neq 0$.
 on aura : Cas moteur $U = E' + (r_a \cdot I_a - h_m)$
Cas générateur $U = E - (r_a \cdot I_a + h_m)$

(4.13)

On définit alors : $h_t = u \pm h_m$

(4.14)

- avec : h_t = chute de tension totale dans la machine.
 u = chute ohmique interne de la machine.
 h_m = chute due à la réaction magnétique d'induit.
 U = Tension aux bornes de la machine.
 E' et E = f.c.e.m et f.e.m à vide.
 E'_{ch} et E_{ch} = f.c.e.m et f.e.m en charge.
 I_a = courant dans l'induit.

(4.15) En effet:
$$h_{in} = E - E_{cb} = K.n.\Delta\phi$$

Où « $\Delta\phi$ » : représente la réduction du flux qui est due à la réaction magnétique d'induit, qui devient faible lorsque la machine est munie d'enroulements de compensation.

4.3.2 Bilan des puissances - Pertes

Pour les systèmes de puissance électrique le rendement est d'une très grande importance, car cela a un impact direct sur le fonctionnement de la machine et une incidence sur l'aspect économique de la consommation énergétique, principalement pour les machines de très grande puissance. Les pertes dans le fer déjà introduit (Chap.02) rentrent dans la catégorie des pertes constantes. En effet, ces pertes sont quasi-constantes en vertu des modes de fonctionnement généralement imposés à la machine:

Cas moteur: fonctionnement à tension constante.

Cas générateur: fonctionnement à vitesse constante.

4.3.2.1 Pertes cuivre ou pertes par effet Joule

Tout conducteur parcouru par un courant I et possédant une résistance R , dépense une partie de l'énergie qui le traverse sous forme de chaleur connue sous le nom « d'effet Joule », cela est donné par la relation (4.26).

$$P_j = R \cdot I^2 \quad (4.16)$$

où : P_j est exprimée en (W), R en (Ω), I en (A).

Mais, R doit être la résistance effective lorsque la machine fonctionne, par contre celle qui est mesurée en courant continu est légèrement inférieure, spécialement en courant alternatif (cas de la résistance interne de l'induit des M.C.C).

Comme il a été déjà présenté au préalable (Chap.02), un flux variable (i.e.) changeant donne naissance à des courants induits appelés courants de Foucault (principalement dans les masses), dont le sens est opposé au changement du flux. Un courant alternatif établit de tels flux à travers la section du conducteur dont le sens est transversal au sens du courant.

Les effets du courant principal « I » et des courants de Foucault qui prennent naissance « i_{CF} », peuvent être considérés indépendamment si la résistivité du conducteur est uniforme à travers la section du conducteur.

Actuellement on superpose les courants de Foucault « i_{CF} » sur le courant principal « i », ce qui résulte en une mauvaise distribution du courant à travers le conducteur, entraînant des pertes supplémentaires, difficiles à quantifier d'une manière simple.

Cela peut être compris en considérant le cas idéal suivant, représenté sur la Fig. (4.14), [10].

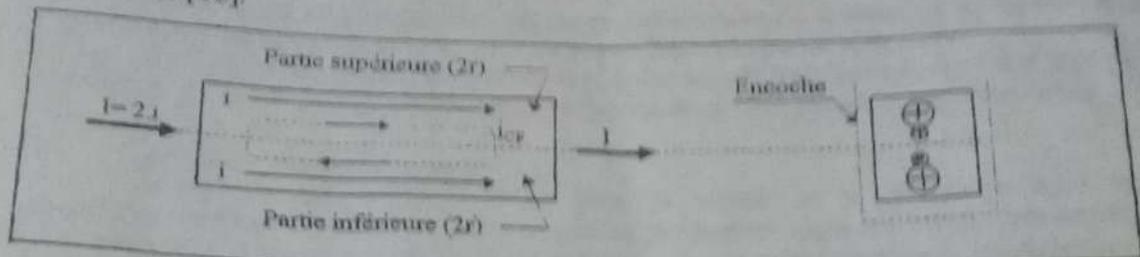


Fig. (4.14) Représentation des courants de Foucault

On suppose que la portion de conducteur a une résistance « R ».
 La partie supérieure de résistance « $2.r$ », traversée par « $i + i_{CF}$ ».
 La partie inférieure de résistance « $2.r$ », traversée par « $i - i_{CF}$ ».
 Les deux parties sont en parallèles, les pertes totales seront égales à :

$$P_B = (i + i_{CF})^2 \cdot 2r + (i - i_{CF})^2 \cdot 2r = 4.r (i^2 + i_{CF}^2)$$

$$P_B = 4.i^2.r (1 + (i_{CF}/i)^2) \quad (4.17)$$

Avec une distribution de courant uniforme, les pertes doivent être égales à :

$$4.i^2.r = I^2.r = I^2.R$$

Alors les pertes par courant de Foucault peuvent être calculées séparément et croissent avec la fréquence. La résistance en courant continu, à la température de fonctionnement « R », est corrigée par le facteur : « $(1 + (i_{CF}/i)^2)$ ».

$$R_{CA} = R \cdot (1 + (i_{CF}/i)^2) \quad (4.18)$$

4.3.2.2 Pertes électriques additionnelles

* Le flux alternatif dû au courant de charge peut créer des courants de Foucault et des pertes additionnelles dans les différentes parties de la machine (i.e.) dans tous les matériaux conducteurs. Ces pertes sont, en général, faibles et difficiles à quantifier.

* D'autres pertes peuvent apparaître dans les machines comportant des systèmes « balais-collecteur » ou bagues, qui sont aussi difficilement quantifiables. En général, on les quantifie par la chute de tension aux balais qui est d'environ : 1V/balais.

* Pertes joules du circuit inducteur, cas des machines à courant continu ou des machines synchrones, sont de l'ordre de quelques (%) de la puissance nominale.

4.3.2.3 Pertes mécaniques

En général, ces pertes sont faibles et proviennent du frottement au niveau des paliers, roulements ou coussinets, entre la partie fixe et la partie tournante.

Les pertes dues à la ventilation sont aussi en général faibles. En effet lors de la rotation, le ventilateur brasse de l'air, ce qui implique des pertes complémentaires.

4.3.2.4 Pertes constantes

D'une manière générale si le flux, la vitesse et la fréquence sont des paramètres constants, ou qui varient très peu et faiblement alors les pertes mécaniques, les pertes dans le fer et les pertes d'excitation sont approximativement indépendantes de la charge. Parfois on les regroupe ensemble sous le nom de pertes constantes « P_{Ctes} ».

4.3.3 Le rendement « η »

En effet, pour tous les systèmes le rendement vrai « η » est défini comme étant le rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée.

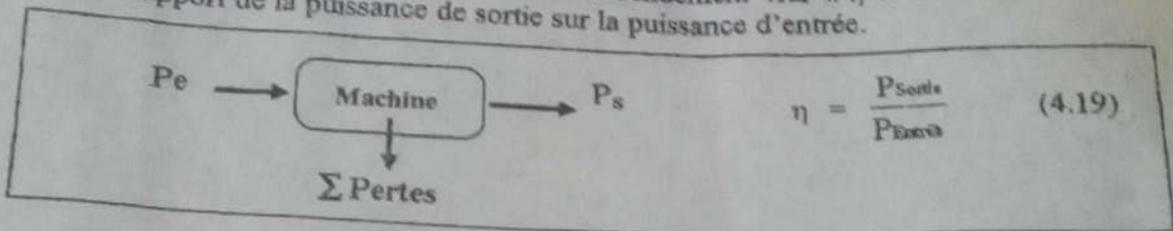


Fig. (4.15a) Diagramme du rendement

$$\eta_{app} = \frac{P_{Abs} - \Sigma \text{ Pertes}}{P_{Abs}} = \frac{P_s}{P_s + \Sigma \text{ Pertes}} \quad (4.20)$$

La relation (4.20) donne le rendement approché, car il est impossible de déceler toutes les pertes dans la machine. On utilise d'une manière générale, l'une des expressions selon la convenance et cela pour toutes les machines.

η_{app} : s'exprime en terme fractionnaire ou en pourcentage (%).

Rendement maximal

D'une manière générale le rendement « η » est maximal pour:

$$0.6.I_n \leq I_n \leq 1.0.I_n$$

Car dans cette plage on considère, que le rapport des pertes à la puissance consommée est minimal. En dehors de cette plage, les pertes devenant beaucoup

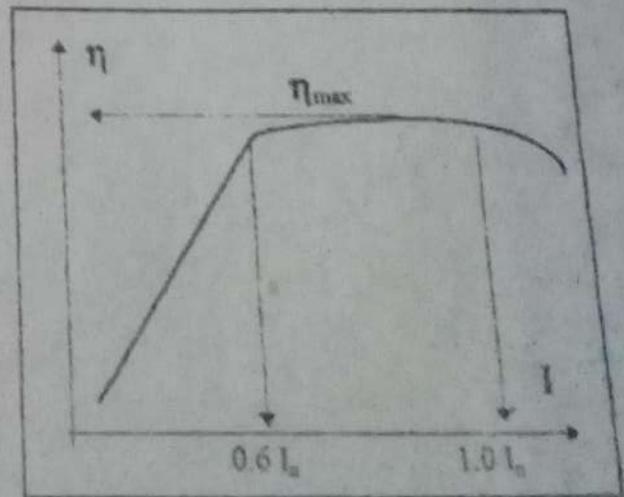


Fig. (4.15b)