

Chapitre II : Théorie des machines synchrones -Alternateur-

II-1. Classification des machines synchrones

On peut classer les machines synchrones d'après le mode de construction utilisé pour la fabrication des rotors ; mais quelque soit le type utilisé, sa vitesse est constante ($n_s = \text{constante}$).

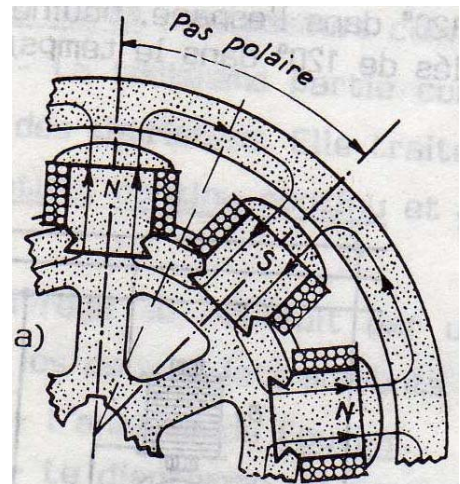
II-1-1. Machines à pôles saillants

Elles utilisent des pièces polaires sur une culasse avec des enroulements d'excitation constituées par des bobines.

On utilise ce type de machines dans les centrales hydrauliques, le rotor comporte $2p$ pôles, sa vitesse de rotation se calcule par la formule suivante :

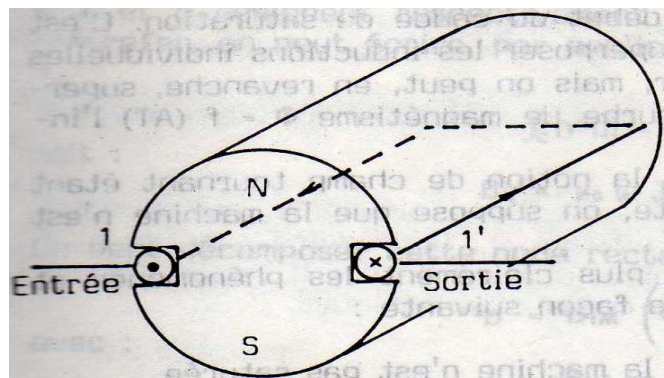
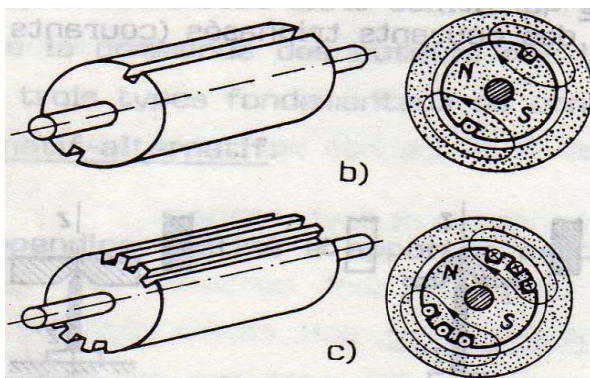
$$\boxed{n_s = \frac{f}{p}} \quad [\text{tr/s}]$$

ou encore : $\boxed{n_s = 60 \cdot \frac{f}{p}} \quad [\text{tr/mn}]$



Remarque

La vitesse de rotation des turbines hydrauliques est faible (moins de 1000 tr/mn : pour une fréquence de 50 Hz, p est supérieur à 3).



II-1-2. Machines à pôles lisses (entrefer constant)

A la différence des précédents, ces machines ont un entrefer constant, l'enroulement d'excitation étant placée dans des rainures longitudinales usinées sur un cylindre d'acier massif. Le rotor peut comporter plusieurs encoches, autrement dit les bobines peuvent être logées dans plusieurs encoches.

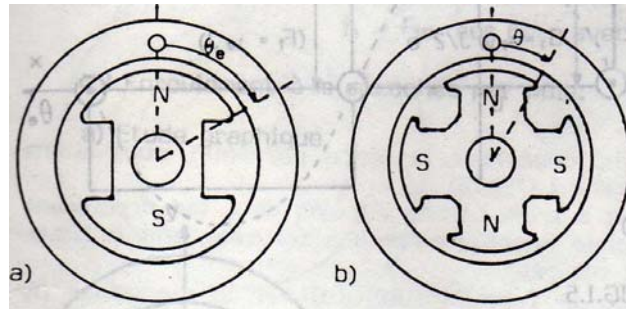
Ce type de machines est utilisé surtout pour les grandes vitesses, donc elles ont 3, 2 ou 1 pair de pôles.

Ces machines nécessitent un moteur d'entraînement rapide qui se spécifie par les turbines à vapeur dans les centrales thermiques par exemple ; ces machines génératrices de courant portent le nom de *turbo-alternateur*.

II-2. Répartition du champ magnétique dans l'entrefer

La répartition du flux dans l'entrefer dépend de la forme des pôles inducteurs dans le cas des machines à pôles saillants ; et de l'écartement des encoches ainsi que le nombre de conducteurs par encoches dans le cas des machines à pôles lisses, donc pour rendre l'induction de forme sinusoïdale, on envisage les deux cas suivants :

a- Pôles saillants



On donne aux épanouissements polaires un rayon de courbure de telle façon à faire accroître ou décroître progressivement l'induction c'est-à-dire suivant une forme sinusoïdale ; cela revient à faire varier l'entrefer car :

$$\sum H \cdot dl = N J$$

$$H_s l_s + H_r l_r + 2H_0 e = N J$$

Puisque $H_s = H_r = 0$ (car la perméabilité du fer $\mu_r \rightarrow \infty$) ; on peut écrire :

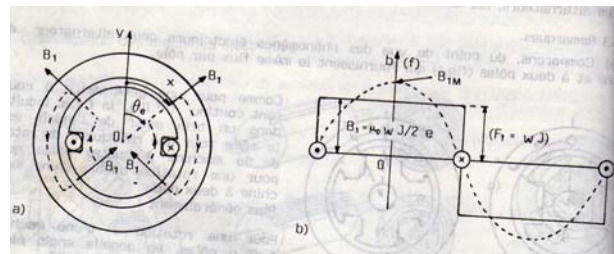
$$H_0 = \frac{N J}{2e} \quad \text{d'où : } B = \mu_a H = \frac{N \mu_0 J}{2e}$$

D'après la formule précédente, on peut faire varier l'entrefer de telle façon à faire varier l'induction de façon sinusoïdal (figure précédente).

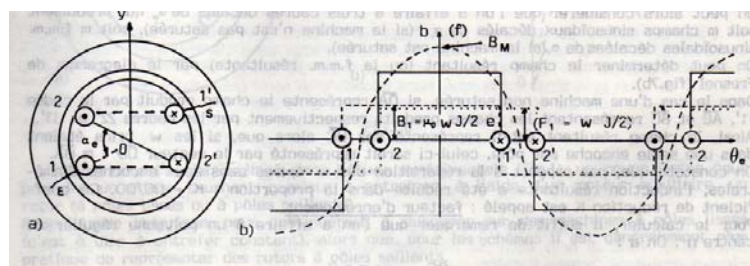
b- Pôles lisses

On agit sur l'écartement entre les encoches et le nombre de conducteurs par encoche ; étudions les cas suivants :

- 1 encoche /pôle.



- 2 encoche /pôle.



Si on multiplie d'avantage le nombre d'encoches par pôle, on obtient une courbe en forme d'escalier qui se rapproche de plus en plus d'une sinusoïde.

II-3. Constitution de l'alternateur

Un alternateur est une machine synchrone qui comporte un inducteur (rotor) et un induit (stator).

II-3-1. Induit (stator)

Le stator est toujours soigneusement feuilleté, il est constitué par une couronne de disques d'acier doux, isolés les uns des autres par du vernis.

La couronne du stator a la même longueur axiale que les pièces polaires, elle porte des encoches dans lesquels loge l'enroulement d'induit.

Enroulement statorique (induit) :

Un enroulement est constitué de tranches généralement préparées d'avance et que l'on relie ensuite entre elles par des connexions extérieures, ce sont les « *sections* ». Chaque section comporte un certain nombre de spires et par conséquent 02 paquets de brins actifs appelé « *faisceaux* ». L'ensemble par pôle de sections d'une même phase s'appelle « *bobine* ».

Les parties frontales (extérieures aux encoches) des bobines constituent « *les têtes de bobines* », elles sont inactives.

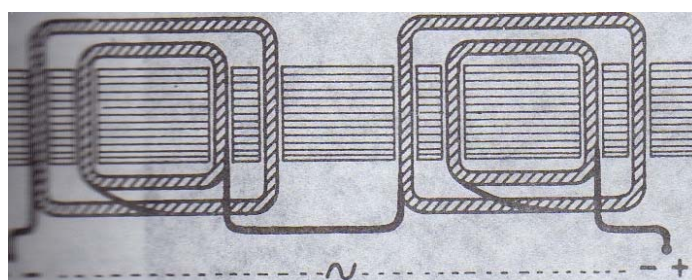
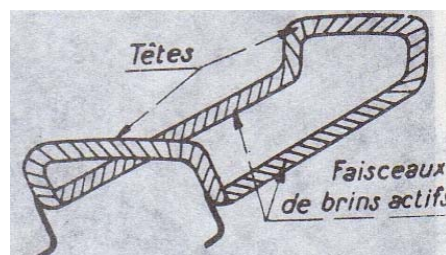
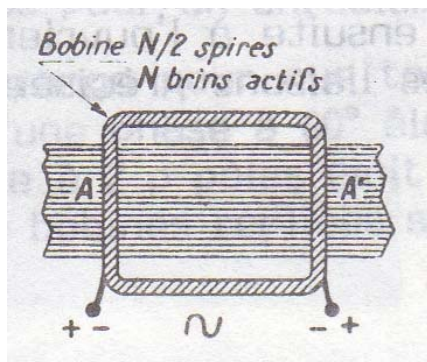
Les brins actifs entre l'entrée et la sortie sont connectés de telle façon que leur f.e.m s'ajoutent.

Il existe 2 types d'enroulement :

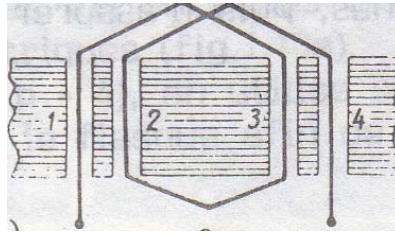
- ❖ Enroulement à bobines séparées.
- ❖ Enroulement enchevêtrées.

a- Enroulement à bobines séparées.

Ce type d'enroulement peut être appelé à bobines concentriques caractérisées par le fait que les sections d'une même bobine sont concentriques mais de dimensions différentes.



b- Enroulement enchevêtrées.



Constitution de l'enroulement statorique :

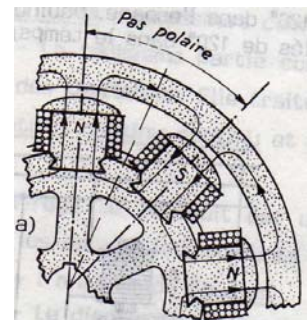
Définitions :

- ❖ **Pas polaire** : c'est l'angle ou l'arc entre 2 pôles successifs de noms contraires (N et S) ; on utilise les formules suivantes :

- $\tau = \frac{\pi}{p}$ en rd

- $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$ en m avec D : diamètre de la machine

- $\tau = \frac{Z}{2 \cdot p}$ en encoche, Z : le nombre total d'encoches

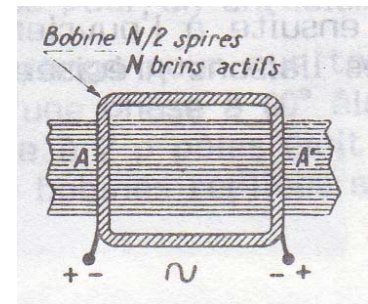


- ❖ **Pas d'encoche** : c'est la distance entre 2 encoches successifs :

$$\tau_e = \frac{\pi \cdot D}{Z} \text{ en m}$$

- ❖ **Pas de la bobine** : c'est la largeur de la bobine (une section)

- Si $y = \tau$ l'enroulement est à pas diamétral
- Si $y < \tau$ l'enroulement est à pas raccourci



- ❖ **Nombre d'encoche par pôle et par phase** :

$$q = \frac{Z}{2 \cdot p \cdot m}$$

Avec m : le nombre de phases

II-3-2. Inducteur (rotor)

Le rotor peut être à pôles lisses ou à pôles saillants ; dans le premier cas, il comporte un nombre réduit de pôles (2 ou 4) ; dans le deuxième cas, il peut comporter un très grand nombre.

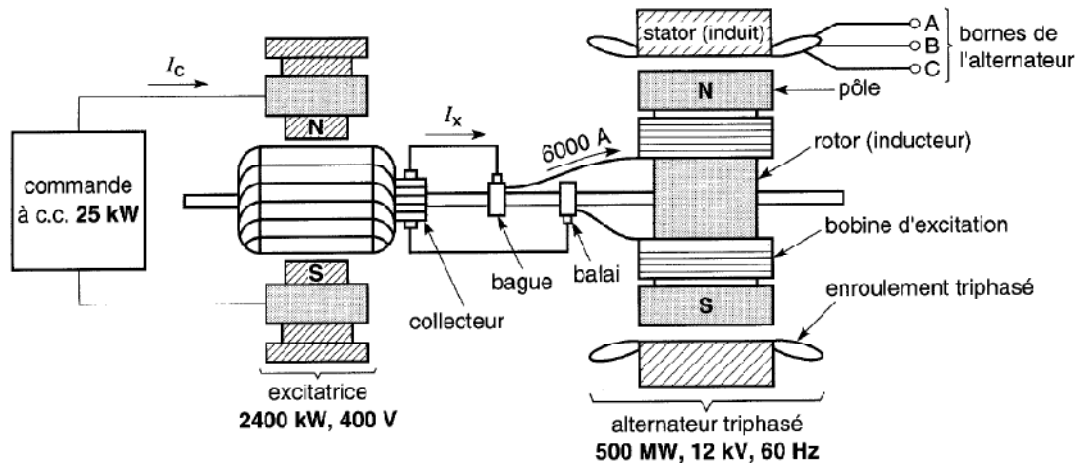
Le circuit magnétique est fermé par le stator, sa forme a été choisie de manière à diminuer la longueur des lignes de champ et à éviter les fuites magnétiques. Comme le champ magnétique est fixe par rapport au rotor, on n'a pas de pertes par courant de Foucault dans

le rotor, pour cette raison le rotor à pôles lisses est toujours massif. Après sa sortie de fonderie sous forme de cylindre, on y pratique des rainures pour loger les conducteurs des enroulements. Par contre le rotor à pôles saillants est généralement feuilleté pour faciliter sa construction.

➤ Bobines de l'inducteur

Les bobines magnétisantes entraînées par le rotor doivent être alimentées en courant continu et ce, par l'un des procédés suivants :

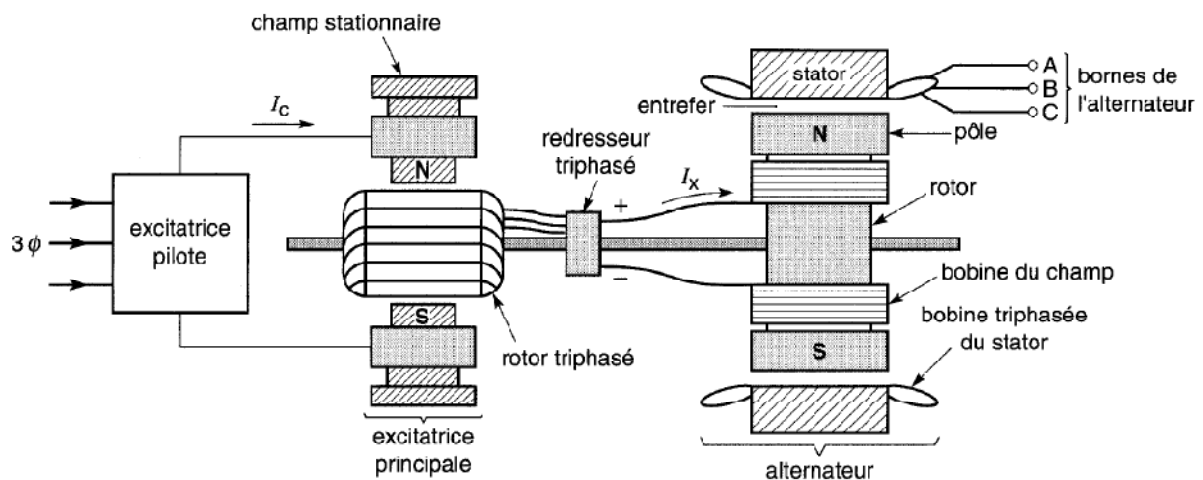
a- Utilisation d'une génératrice à courant continu (dynamo)



Cette génératrice appelée excitatrice est montée en bout de l'arbre, son rôle est de transmettre du courant continu au rotor par l'intermédiaire de 2 bagues en bronze.

Le réglage de l'intensité de ce courant d'excitation étant obtenu par le réglage du courant de l'inducteur de la génératrice excitatrice.

b- Utilisation d'une excitatrice statique

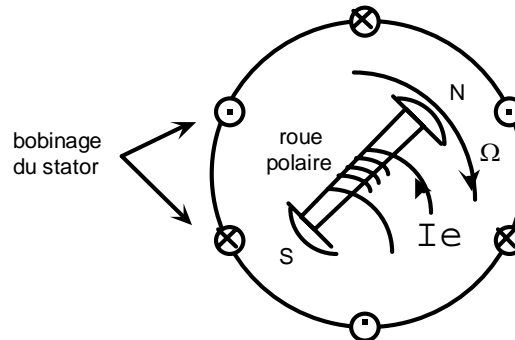


La dynamo est remplacée par un alternateur dit *auxiliaire* auquel on adjoint un redressement de courant qui fournit un courant continu au rotor de l'alternateur principal. Ce procédé est surtout utilisé pour l'excitation des turbo-alternateurs modernes. Il présente l'avantage de ne pas utiliser le collecteur, les bagues, ni les charbons, qui, à cause des étincelles et en présence de l'hydrogène présente un danger permanent.

Le réglage du courant d'excitation de l'alternateur principal est assuré par l'intermédiaire de l'inducteur fixe de *l'alternateur auxiliaire*.

II-4. Calcul de la f.e.m à vide théorique

On prend une machine bipolaire, on suppose que les f.e.m sont en phase de tout les brins d'une même phase et de forme sinusoïdale.



Le sens de courant est arbitraire

Soit $2N$: le nombre de brins actifs/phase $= N$ spires/phase

Si on suppose que l'inducteur tourne dans le sens horaire du point de vue électrique tout se passe comme si l'inducteur est immobile et le stator tourne dans le sens inverse (sens trigonométrique).

Pour une position quelconque de la normale le flux est sinusoïdal :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \cos \omega t$$

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} = N \omega \Phi_0 \cdot \sin \omega t, \text{ Avec } \omega = 2\pi f \text{ donc } e = 2\pi f N \Phi_0 \cdot \sin \omega t$$

La valeur efficace sera alors : $E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_0$; ce qui donne :

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi \text{ avec } N : \text{ le nombre de spires/phase}$$

On peut utiliser : $E = 2,22 \cdot N' \cdot f \cdot \Phi$ avec N' : le nombre de brins (conducteurs)/phase

II-5. Calcul de la f.e.m à vide réelle

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

$$E_{ph} = 4,44 \cdot K \cdot f \cdot N \cdot \Phi_u$$

Le facteur K dépend de *type d'enroulement* et de *la forme* de la courbe de la f.e.m (ou du flux).

II-5-1. Facteur d'enroulement (bobinage) « K_1 »

Dans la pratique, pour différentes raisons (facilité de construction, réduction des harmoniques, ...), on ne dispose pas la totalité de l'enroulement d'une même phase du stator dans 2 encoches diamétralement opposés. Ce qui entraîne une réduction de la f.e.m

par rapport à la valeur théorique, donc elle doit être corrigée par un facteur d'enroulement qui dépend de la distribution (répartition), de raccourcissement et d'inclinaison de encoches. Le facteur d'enroulement K_1 peut être calculé par la formule suivante :

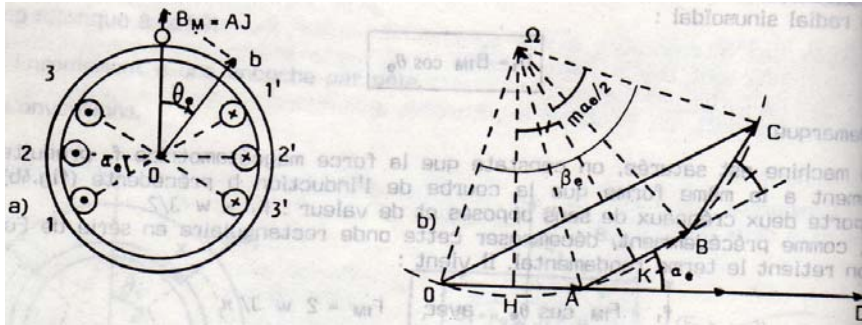
$$K_1 = K_d \cdot K_r \cdot K_i$$

Où K_d : le facteur de distribution

K_r : le facteur de raccourcissement

K_i : le facteur d'inclinaison

a- Facteur de distribution K_d



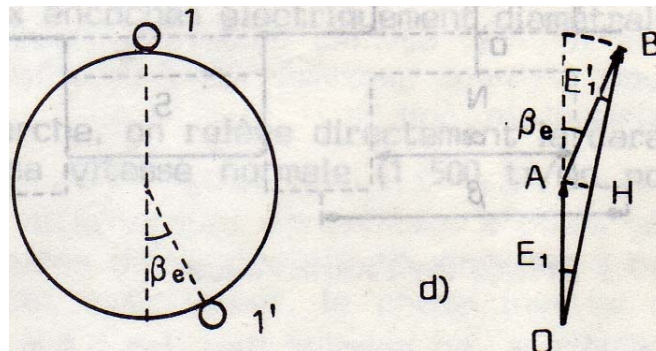
Les spires d'une même phase sont décalées d'un angle électrique α_e , par exemple les f.e.m engendrées par le champ tournant dans les brins actifs qui occupent les encoches (2-2') sont en retard de α_e par rapport à celles engendrées dans les brins actifs des encoches (1-1')

Si q est le nombre d'encoche par pôle et par phase, le facteur de distribution est calculé par :

$$K_d = \frac{\sin q \frac{\alpha_e}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha_e}{2}}$$

Où l'angle électrique $\alpha_e = p \cdot \alpha = p \cdot \frac{360}{Z}$

b- Facteur de raccourcissement K_r



Dans ce cas l'ouverture de différentes spires est inférieure au pas polaire, si l'angle électrique d'ouverture d'une spire est $(\pi - \beta_e)$ les f.e.m induites dans les brins actifs disposés dans les encoches 1-1' seront diminuées donc la f.e.m est corrigée par le facteur de raccourcissement

calculé par : $K_r = \cos \frac{\beta_e}{2}$ ou $K_r = \sin \frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}$

si ($y = \tau$) ; $K_r=1$

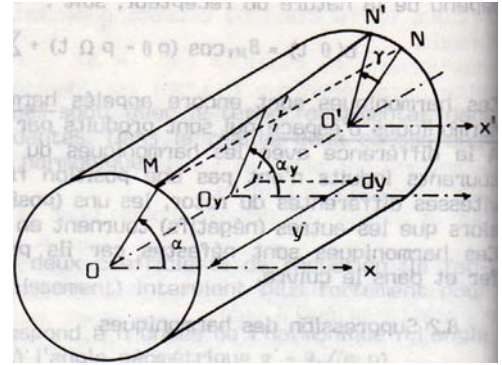
Le pas polaire : $\tau = \frac{\pi.D}{2.p}$ avec D : diamètre moyen de la machine

c- Facteur d'inclinaison K_i

Pour les encoches inclinées, le facteur d'inclinaison se calcule par :

$$K_i = \frac{\sin p \frac{\gamma_e}{2}}{p \cdot \frac{\gamma_e}{2}}$$

Où p : le nombre de paire de pôles, l'angle d'inclinaison γ_e (voir la figure précédente).



II-5-2. Facteur de forme « K_2 »

Pour le calcul théorique de la f.e.m, nous avons supposé que le champ radial dans l'entrefer est sinusoïdal, mais en réalité, cette condition n'est pas réalisée, donc la f.e.m induite n'est pas tout à fait sinusoïdale. Par définition le facteur de forme est calculé par :

$$K_2 = \frac{E_{eff}}{E_{moy}}$$

✓ Pour bien comprendre l'influence de facteur de forme calculons ce facteur pour une

$$\text{f.e.m sinusoïdale : } K_2 = \frac{E_{eff}}{E_{moy}} = \frac{\frac{E_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} E_m} = 1,11$$

✓ Pour une forme non sinusoïdale, on procède de la manière suivante :

- On divise l'intervalle OC en n parties égales
- On mesure les ordonnées $e_1, e_2, e_3, e_4, \dots, e_n$
- On calcule respectivement la f.e.m moyenne et efficace :

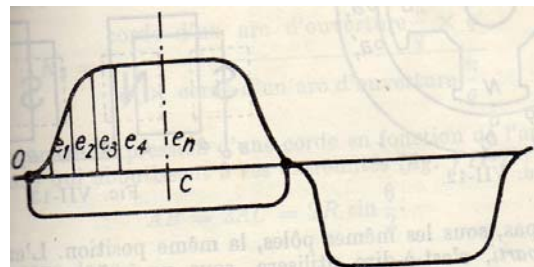
$$E_{moy} = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n}{n}$$

et

$$E_{eff} = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + \dots + e_n^2}{n}}$$

- On en déduit le facteur de forme :

$$K_2 = \frac{E_{eff}}{E_{moy}} \neq 1,11$$



II-5-3. Expression globale de la f.e.m réelle

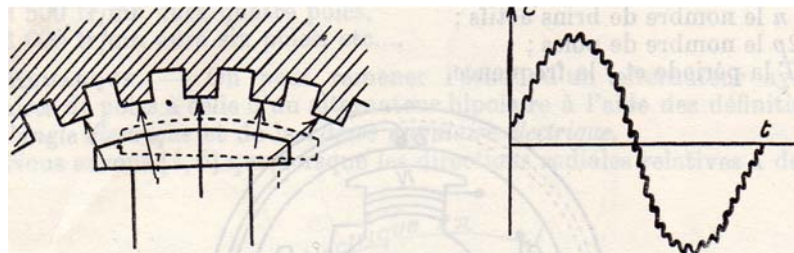
Après correction, la f.e.m réelle se calcule par : $E_{ph} = 4.K_1 K_2 .f.N.\Phi_u$

II-6. Harmoniques supérieurs de la f.e.m

II-6-1. Causes des harmoniques

En réalité la f.e.m n'est pas sinusoïdale à cause des harmoniques qui sont dus à :

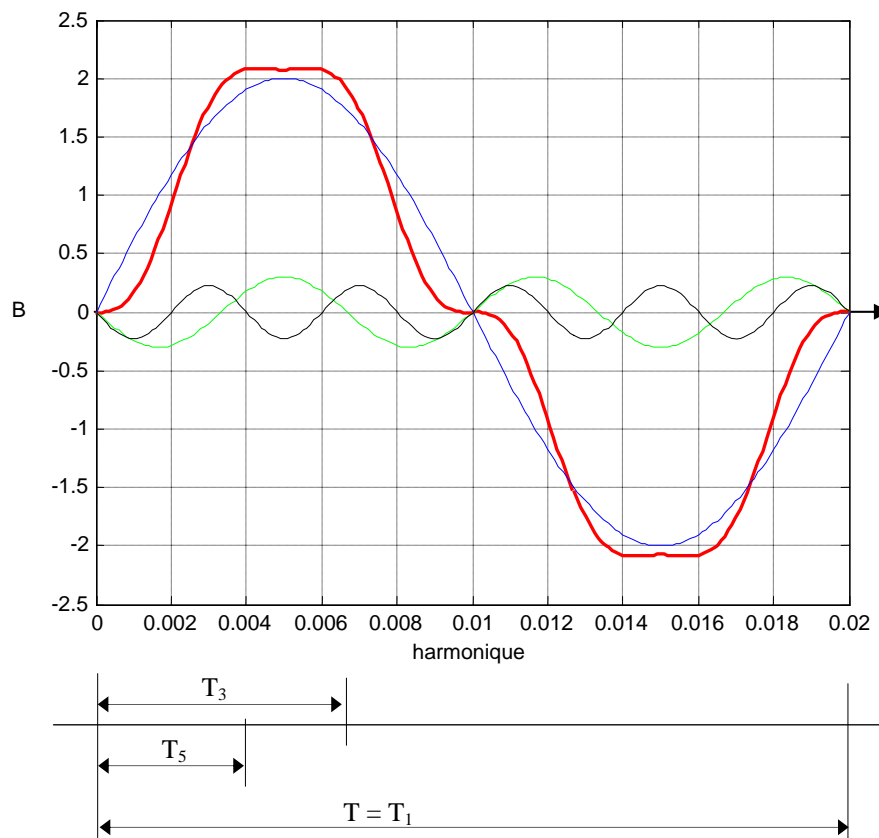
- a- Répartition non sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer : la forme des pôles dans le cas des pôles saillants et le nombre d'encoches par pôle dans le cas des machines à pôles lisses.
- b- Déformations supplémentaires dues à la réaction d'induit.
- c- Ondulations périodiques sous l'action de la denture de l'induit ou de l'inducteur, la variation de la reluctance de la denture. La figure montre que suivant la position de la pièce polaire par rapport aux dents, la reluctance de l'entrefer est modifiée et par conséquent le flux et la f.e.m seront modifiés. La courbe des f.e.m comporte alors des déformations.



❖ Etude d'une courbe périodique mais non sinusoïdale

Soit la fonction B une fonction périodique de fréquence f :

D'après la décomposition de Fourier une courbe périodique est la somme de plusieurs courbes sinusoïdales d'ordre impaire (1, 3, 5, 7 etc....)



$$B = B_{1M} \left[\cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta - \dots \right]$$

❖ Coubre rouge : courbe réelle

Soit $\nu = 1, 3, 5, \dots = 2k + 1$ rang (ordre) de l'harmonique

❖ Pour : $\nu = 1$ la courbe B_1 (courbe sinusoïdale bleue) c'est l'harmonique d'ordre 1, on l'appelle l'harmonique fondamental de même période et de même fréquence que la courbe réelle $f_1 = f$

❖ Pour : $\nu = 3$ la courbe B_3 (courbe sinusoïdale verte) c'est l'harmonique d'ordre 3. C'est une fonction sinusoïdale de fréquence $f_3 = 3f$

❖ Pour : $\nu = 5$ la courbe B_5 (courbe sinusoïdale noire) c'est l'harmonique d'ordre 5. C'est une fonction sinusoïdale de fréquence $f_5 = 5f$

Donc pour une fonction d'ordre ν , la fréquence est de $f_\nu = \nu \cdot f$

$$\text{De même } \tau_\nu = \frac{\tau_1}{\nu} = \frac{\tau}{\nu}$$

❖ **Calcul de la f.e.m induite par un harmonique supérieur**

La f.e.m des harmoniques est donnée par: $E_\nu = 4,44 \cdot N \cdot K_{1,\nu} \cdot f_\nu \cdot \Phi_\nu$

$K_{2,\nu} = 1,11$ car les harmoniques sont de forme sinusoïdale

Facteur de bobinage : $K_{1,\nu} = K_{d,\nu} \cdot K_{r,\nu}$

$$K_{r,\nu} = \sin \nu \cdot \frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}, \quad (\text{Si le pas est diamétral } K_{r,\nu} = 1)$$

$$K_{d,\nu} = \frac{\sin \nu \cdot q \cdot \frac{\alpha_e}{2}}{q \cdot \sin \nu \cdot \frac{\alpha_e}{2}}$$

Après avoir calculé les f.e.m des harmoniques, la f.e.m totale (réelle) sera alors :

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots}$$

Calcul de la distorsion harmonique (déformation):

$$D(\%) = \frac{\sqrt{E_3^2 + E_5^2 + \dots}}{E_1} \times 100$$

II-6-2. Inconvénients des harmoniques

- Pour les harmoniques supérieurs à 3, le courant induit produit plus de pertes par effet Joules dans le cuivre et par courant de Foucault dans le circuit magnétique, donc plus de pertes supplémentaires.
- Les harmoniques donnent lieu à des perturbations radiofréquences puisqu'ils atteignent des HF.

II-6-3. Atténuations et suppression des harmoniques

Si on ne peut pas éliminer totalement les harmoniques, par contre on peut les réduire à leur valeur minimales :

1-Etude de l'harmonique d'ordre 3 :

Considérons 3 f.e.m induites triphasées en un système équilibré :

$$e_1 = \sqrt{2} E_1 \sin \omega t, \quad e_2 = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 120^\circ), \quad e_3 = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Comme le pas polaire de l'harmonique 3 est le tiers du pas polaire du fondamental, avec les mêmes conventions, on aura :

$$\begin{aligned} e_1 &= \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t, \\ e_2 &= \sqrt{2} E_3 \sin (3\omega t - 360^\circ) = \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t, \\ e_3 &= \sqrt{2} E_3 \sin (3\omega t - 720^\circ) = \sqrt{2} E_3 \sin 3\omega t. \end{aligned}$$

Alors que les tensions induites constituent, pour le fondamental, un système triphasé équilibré, les trois tensions induites par l'harmonique 3 sont en phase.

Dans les cas d'un montage en étoile, ces 3 tensions disparaissent totalement car elles s'équilibrent deux à deux. Mais si le montage est en triangle, ces 3 tensions ajoutent leurs effets, ce qui provoquent un courant de circulation entre les phases, donc il produit plus de pertes supplémentaires.

❖ **Conséquence** : pour éliminer les harmoniques 3 et multiple de 3, il suffit que le montage (couplage) soit en étoile.

- 2- Pour les machines à pôles saillants, on donne aux épanouissement un rayon de courbure plus faible que l'armature d'induit, ce qui a pour effet de faire varier l'induction de façon sinusoïdale.
- 3- Pour les machines à pôles lisses, on agit sur le nombre d'encoches de telle façon à obtenir une courbe se rapprochant de l'harmonique fondamentale.
- 4- On emploie un pas raccourci bien déterminé

Exemple : si le pas est diamétral : $K_{r,v} = 1$, donc les harmoniques ne sont pas nuls.

Si on prend par exemple : $\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{4}{5}$, $K_{r,v} = \sin v \cdot \frac{4}{5} \cdot \frac{\pi}{2}$, pour les harmoniques 5 et multiples de 5 : $K_{r,v} = 0$, ce qui donne les f.e.m des harmoniques 5 et multiples de 5 nuls. Donc en choisissant un pas raccourci de $\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{4}{5}$, on a pu éliminer les harmoniques 5 et multiples de 5

- 5- On élimine les harmoniques de denture en inclinant par rapport à l'axe du rotor, de telle façon à rendre la reluctance constante dans l'entrefer quelque soit la position de l'inducteur.

