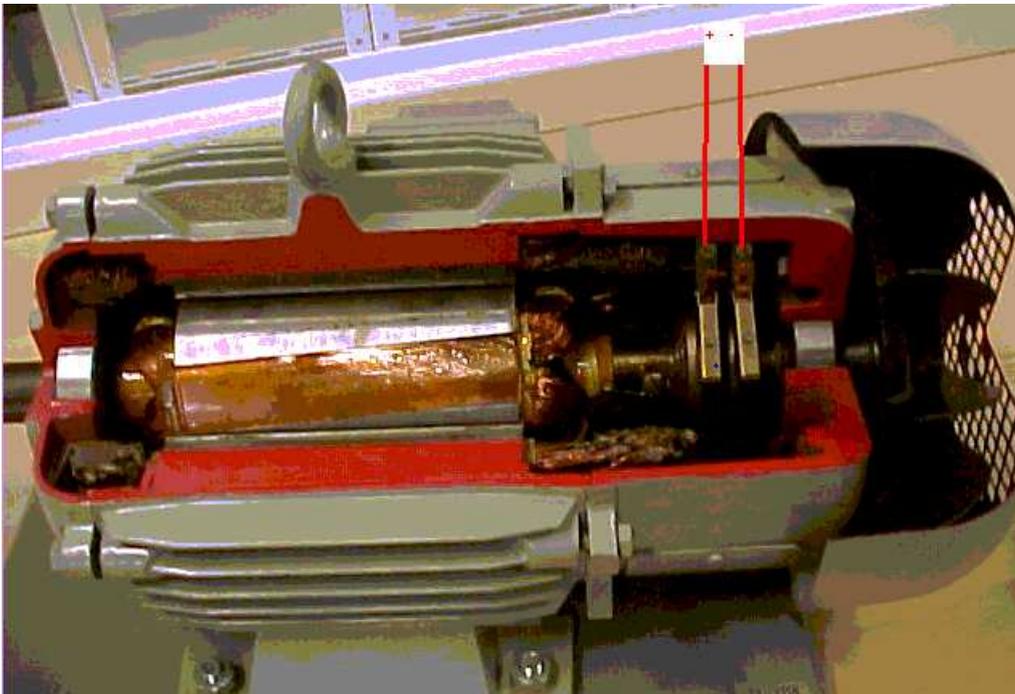


Cours d'électrotechnique

MACHINE TOURNANTE A COURANT ALTERNATIF



LES MACHINES SYNCHRONES

TABLE DES MATIERES

PARTIE N°1 :

Description d'une machine synchrone

PARTIE N°2 :

L'alternateur synchrone

PARTIE N°3 :

Le moteur synchrone

Nomenclature

Symbole	Description	unité	
Φ	Flux magnétique instantané	Wéber	Wb
Φ_M	Flux magnétique maximum	Wéber	Wb
e	Force électro motrice induite dans une spire	Volt	V
E_M	Force électro motrice induite dans une bobine	Volts	V
ω	Pulsation	Rad/s	Rad/s
t	Temps	Seconde	S
E_{eff}	Force électro motrice efficace dans une bobine	Volts	V
f	Fréquence	Hertz	Hz
N	Nombre de spire d'une bobine	Spires	sp
K_1	Facteur de forme		
K_2	Facteur de bobinage		
K	Coefficient de KAPP		
E'_s	Force contre électro motrice d'auto induction dans le stator	Volts	V
p	Nombre de paire de pôle		
n	Vitesse de rotation	Tour/sec	T/s
i_{ex}	Courant d'excitation dans l'inducteur	Ampère	A
X_S	Réactance synchrone ou du stator (induit)	ohms	Ω
R	Résistance du stator (induit)	Ohms	Ω
I	Courant dans l'induit	Ampère	A
U	Tension débitée par l'alternateur	Volts	V
P_{ut}	Puissance utile (puissance électrique)	Watt	W
P_{ab}	Puissance absorbée (puissance mécanique et électrique)	Watt	W
η	rendement		
pf	Perte fer	Watt	W
p_{jex}	Perte joule dans l'inducteur	Watt	W
p_{jst}	Perte joule dans l'induit	Watt	W
E_v	Force électro motrice à vide dans l'induit	Volts	V
I_{CC}	Courant d'induit au court-circuit	Ampère	A
Z	Impédance de l'induit	Ohms	Ω
I_a	Courant actif dans l'induit	Ampère	A

Bibliographie

Les machines électriques

Edition NATHAN TECHNIQUE

J. NIARD

Machines électriques

Edition DELAGRAVE

M. BELLIER et A. GALICHON

Génie électriques

Les machines électriques F3

Edition DELAGRAVE

F. LUCAS et P. CHARRUAULT

Electronique et machines électriques

Edition NATHAN

J. NIARD et R. MOREAU

Machines électriques

Edition NATHAN

J. NIARD, R. MOREAU et J. BATTUT

Cours d'électrotechnique

MACHINE TOURNANTE A COURANT ALTERNATIF

LES MACHINES SYNCHRONES



PARTIE N°1 :

LA DESCRIPTION

TABLE DES MATIERES

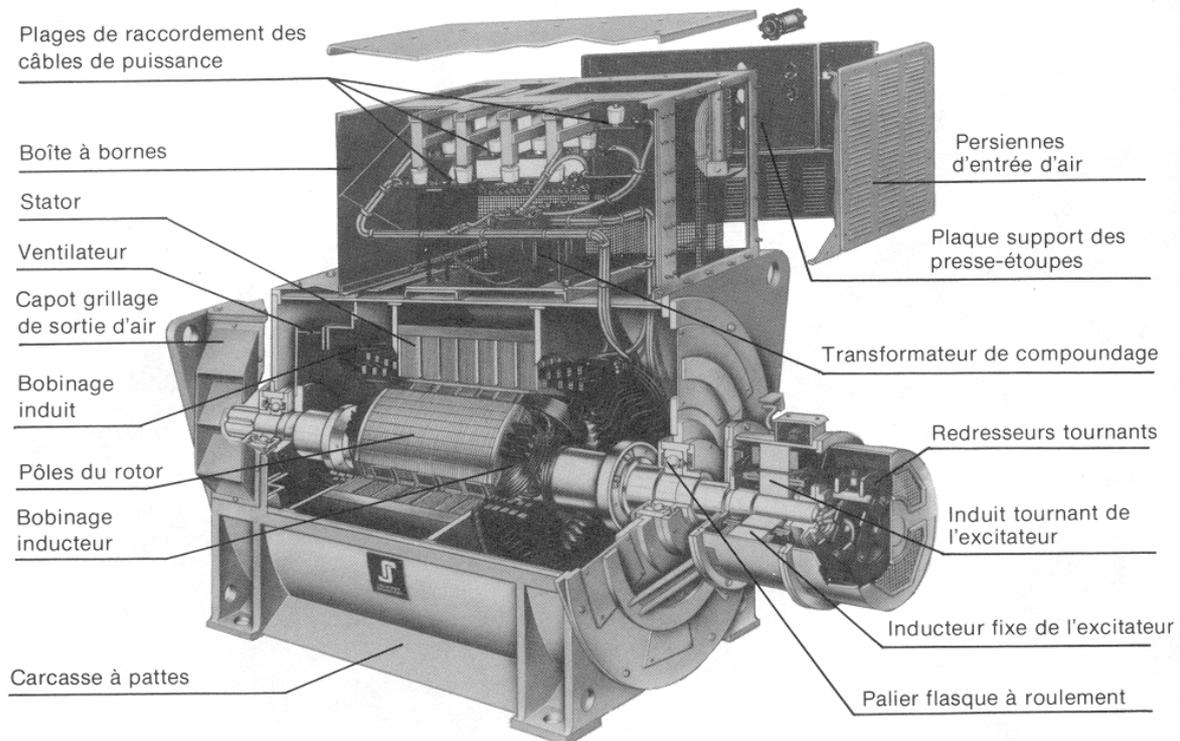
1.	Description de la machine	2
1.1.	Généralités.....	2
1.2.	L'inducteur	2
1.2.1.	Le volant.....	2
1.2.2.	Les noyaux	4
1.2.3.	Les bobines.....	6
	Les bagues	7
1.3.	L'induit.....	8
1.3.1.	La carcasse	8
1.3.2.	Les encoches	10
1.3.3.	Le frettage	10
1.3.4.	L'entrefer.....	10
1.3.5.	Les balais.....	10
1.3.6.	Plaques à bornes	11
1.4.	Vue éclatée d'une machine synchrone.	11
2.	Le flux au sein de la machine.....	12
2.1.	dans le fer :	12
2.2.	dans l'entrefer :.....	12
3.	La génération du champ tournant.....	13
4.	Le théorème de LEBLANC.....	15
5.	Excitation des machines synchrone.....	16
5.1.	Par utilisation d'une excitatrice.....	16
5.2.	Par excitation statique	16

1. Description de la machine

1.1. Généralités

La machine comporte deux parties principales :

- L'une est fixe et est appelée « STATOR », il jouera le rôle d'induit.
- L'une est mobile et est appelée « ROTOR », il jouera le rôle d'inducteur.



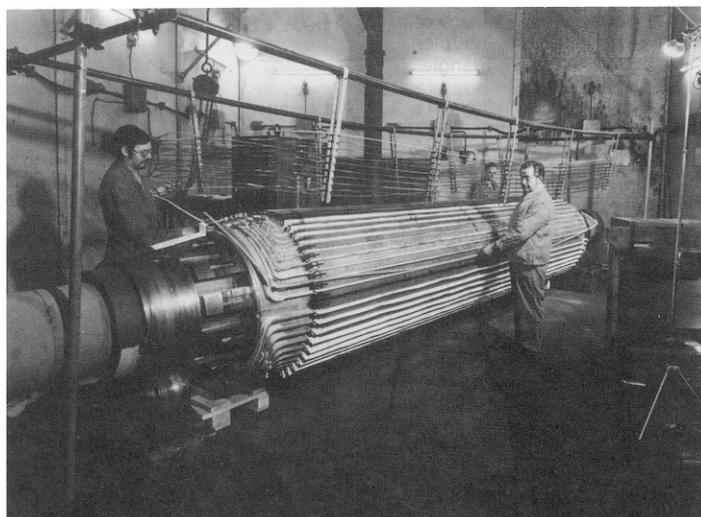
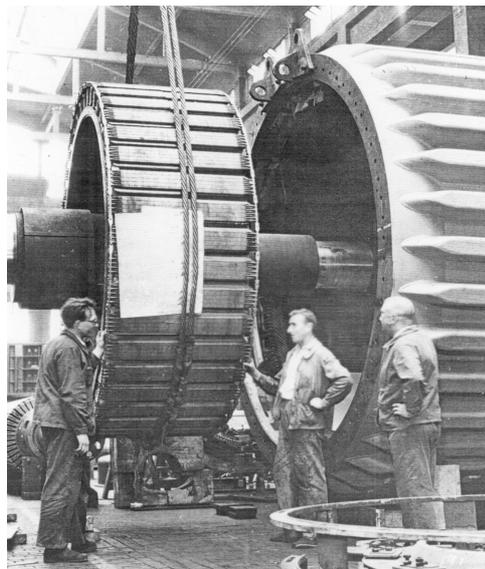
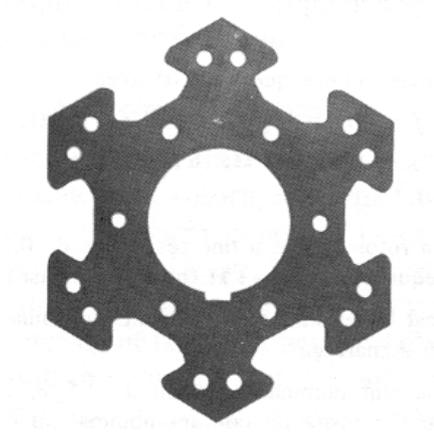
1.2. L'inducteur

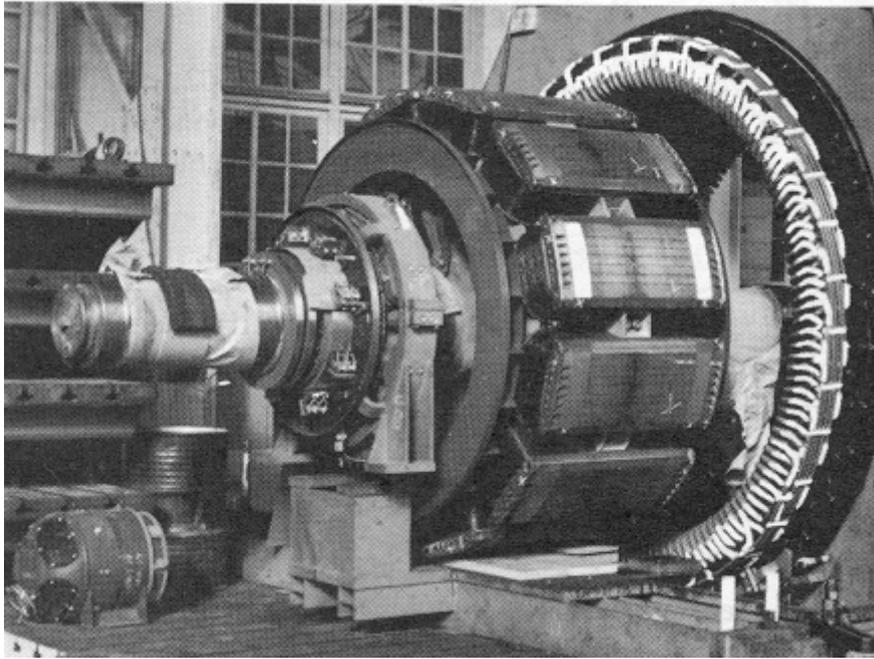
Cette partie de la machine est un des élément essentiel pour que la machine synchrone fonctionne en mode alternateur ou moteur. Il est le plus souvent constitué de pôles saillants. Certaine machine de grosse puissance ont un rotor lisse afin de limiter les problèmes d'inertie à grande vitesse. La plupart de ces machines ont un rotor massif dans lequel on a réalisé des encoches. Le nombre de pôles est souvent de deux rarement de quatre ce qui entraîne une vitesse de rotation élevée.

1.2.1. Le volant

La partie dite volant est en réalité une masse d'acier coulé, centré sur l'axe de la machine. C'est donc cette partie qui portera les pôles ou noyaux. Dans l'analyse de la mise en œuvre de ce volant, il faut faire une distinction entre la machine synchrone monophasée et triphasée. Bien que nous ayons à faire à une machine alternative, dans le cas d'une machine triphasée, la réalisation d'un feuilletage du rotor ne sera pas nécessaire alors que dans une machine

monophasée, le feuilletage sera indispensable. Nous verrons plus loin dans notre étude que dans le cas d'une machine triphasée, le flux au sein du rotor est nul. Ce phénomène est dû à la recombinaison des flux statoriques. En monophasé, n'ayant qu'un seul flux, il ne peut se recombinaison et notre rotor est donc soumis à des variations de flux qui vont induire des courants de Foucault au sein de la masse.

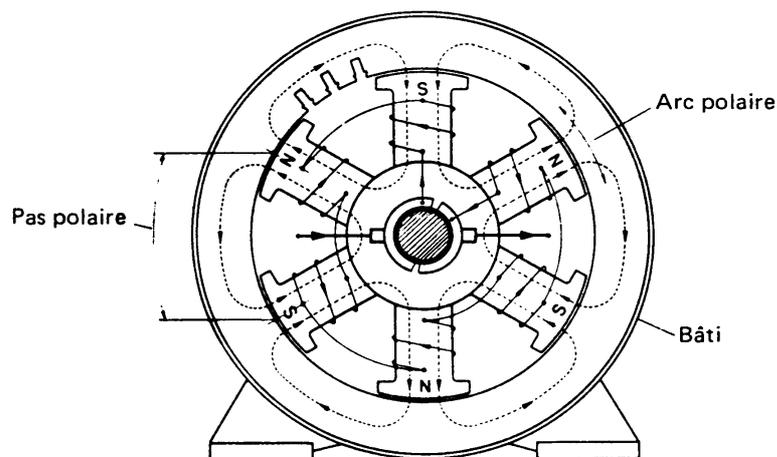




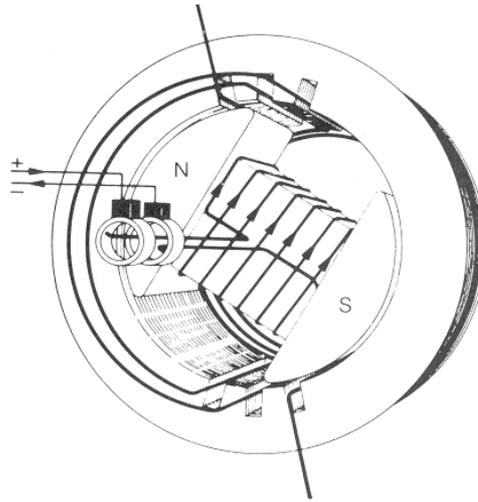
1.2.2. Les noyaux

Les noyaux sont en réalité les bras du volant. En effet, ceux-ci sont fixés sur le noyau et servent en quelque sorte de couloir de conduction au flux inducteur. Nous verrons plus loin que le flux inducteur est la condition indispensable au fonctionnement alternateur ou moteur. Ce flux sera créé par des bobines qui seront localisées sur ces noyaux. La plupart des machines sont dite multipolaire, ce qui sous-entend un nombre important de noyaux. Nous verrons plus loin que chaque noyau sera polarisé en « Nord » ou en « Sud » et que dès lors le nombre de noyau sera toujours un multiple de deux afin d'avoir un nombre de pôle S équivalent au nombre de pôle N.

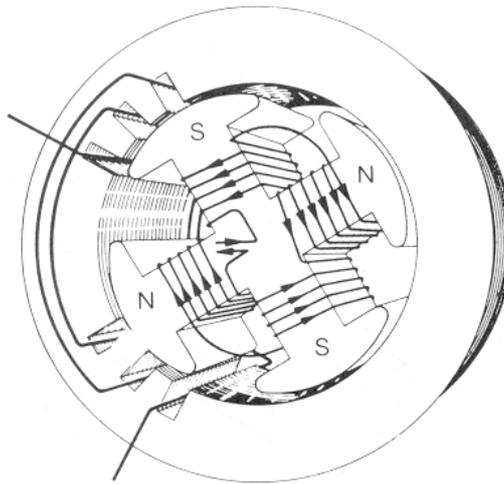
Une notion supplémentaire liée au nombre de noyau est le **pas polaire** qui représente l'angle qui sépare deux noyaux consécutifs.



- Une machine synchrone bipolaire ayant deux pôles à un pas polaire de 180° .

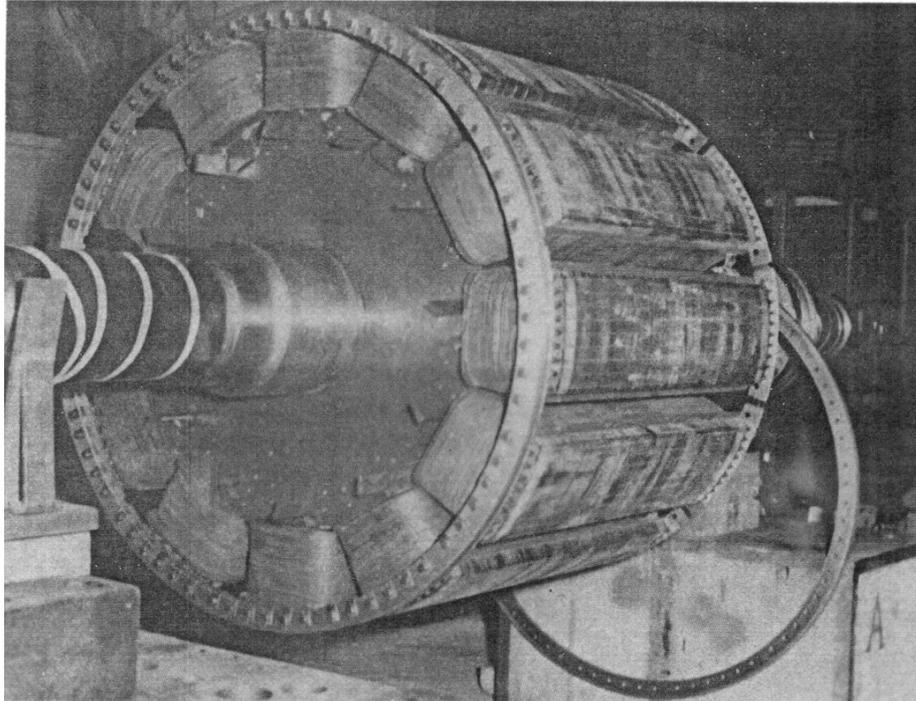


- Une machine synchrone tétrapolaire ayant quatre pôles à un pas polaire de 90° .



- Une machine synchrone ayant X paire de pôles aura un pas polaire de $180^\circ/X$.

Je peux donc conclure et dire que le cycle Nord – Sud sera complet après une rotation angulaire de deux pas polaire. Cette notion sera importante pour l'analyse des vitesses de cette machine.

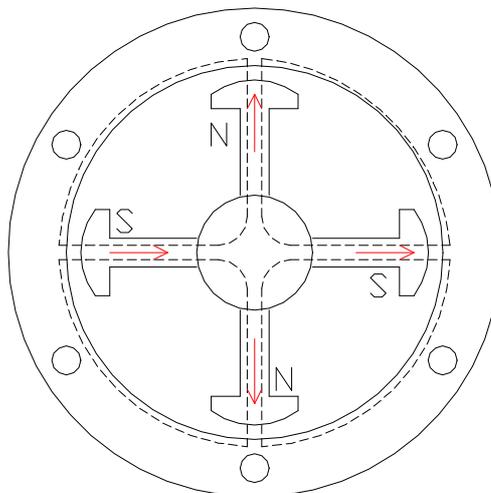


1.2.3. Les bobines

Nous avons dit ci-dessus que les noyaux portaient des bobines et que ces dernières allaient participer à la polarisation des noyaux. Elles sont donc le siège du flux inducteur. Nous savons que si nous voulons réaliser la polarisation des pôles, nous devons générer un flux fixe et que la seule façon pour y parvenir est donc d'alimenter nos bobines avec une tension continue.

La formule de génération de ce flux est $\phi = \frac{N \cdot I}{l} \cdot \mu_o \cdot \mu_r \cdot S$

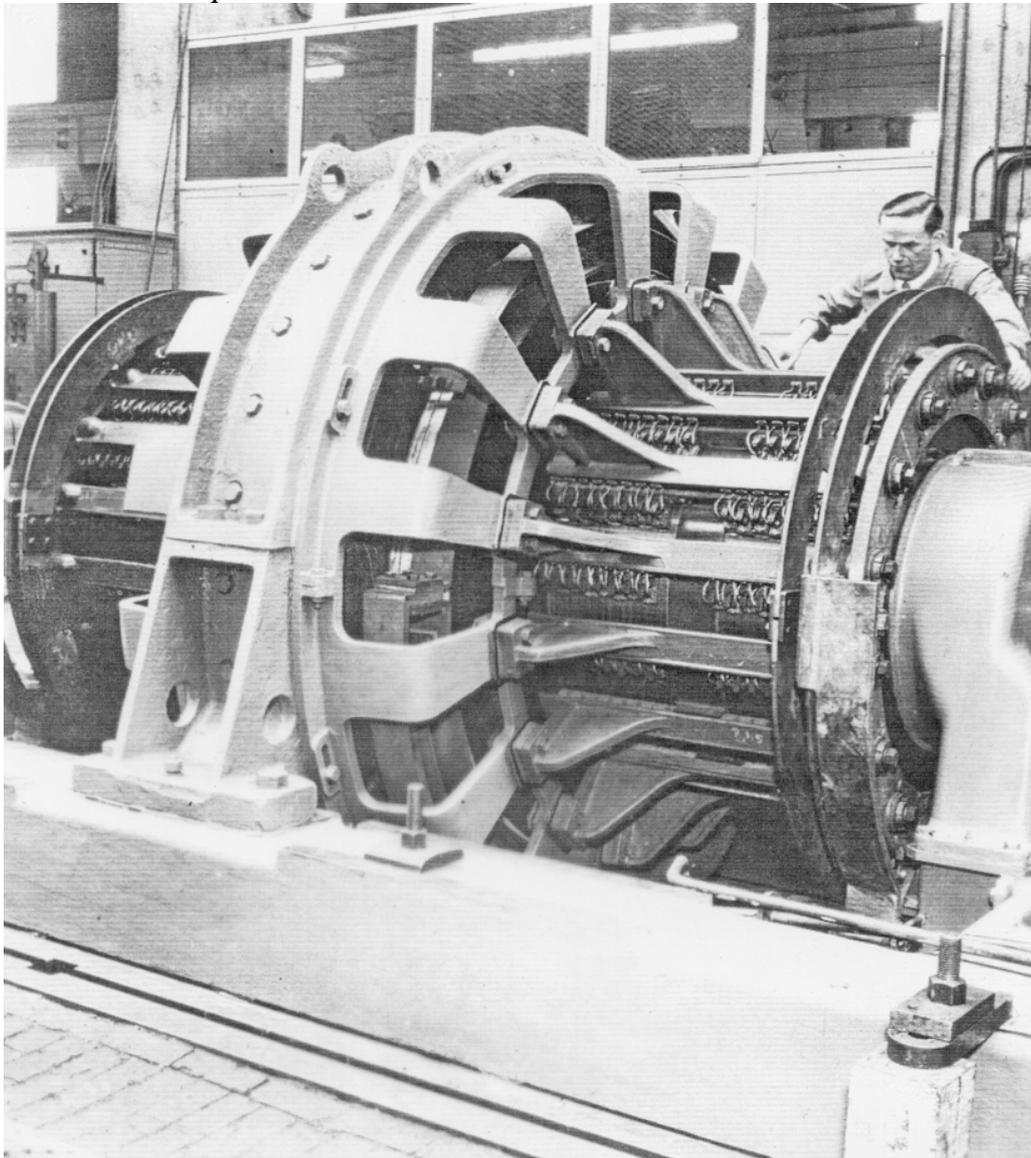
Vous pourriez au vu de ce raisonnement dire que le volant va se saturer par le passage de ces flux inducteurs et donc offrir une limitation de la polarisation des pôles. En réalité il n'en est rien, analysons le schéma ci-dessous.



Nous pouvons remarquer plusieurs choses, chacune des bobines inductrices placées sur les noyaux sont identiques, de plus elles sont toutes soumises à la même tension continue et dès lors elles produisent toutes le même flux. Comme la polarisation de chacun des noyaux se fait aux deux extrémités de ces derniers, je peux dire que sur le volant, j'ai autant de pôle nord que de pôle sud et que sur base de ce qui a été dit ci-dessus, la somme de l'ensemble de ces flux inducteurs est donc nul au droit du volant.

Les bagues

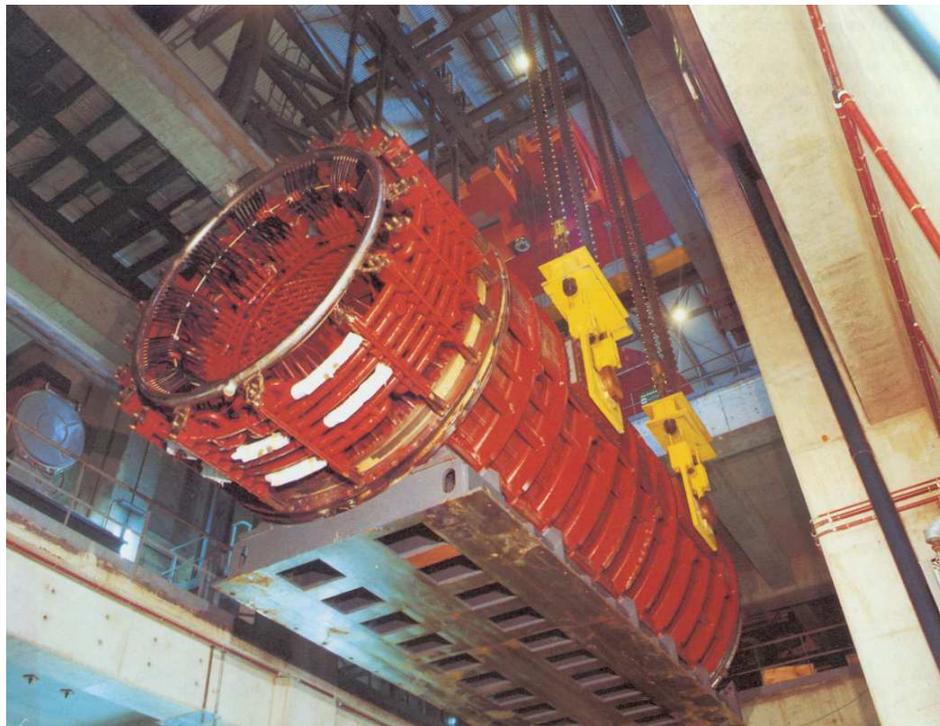
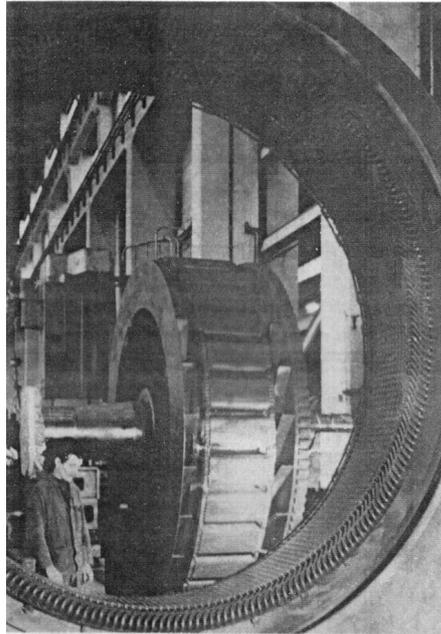
Etant donné que notre rotor est en mouvement et qu'il faut lui amener une tension continue, il n'y a pas d'autre solution que de réaliser l'alimentation du rotor par l'intermédiaire de bagues et de balais. Comme le courant qui va circuler dans les enroulements inducteurs est faible en regard au courant que pourra véhiculer le stator, je peux dire que la durée de vie des balais face au courant qui va les traverser reste admissible.

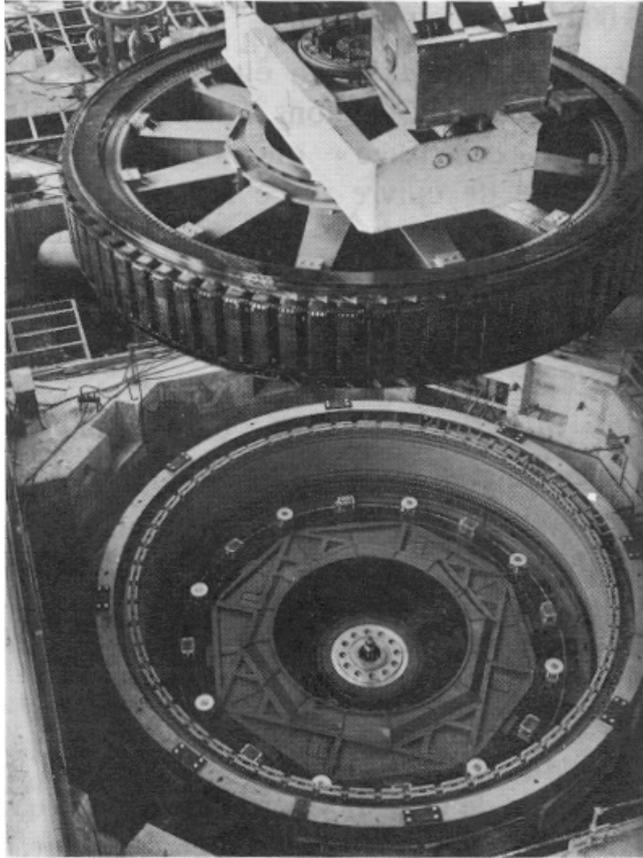


1.3. L'induit

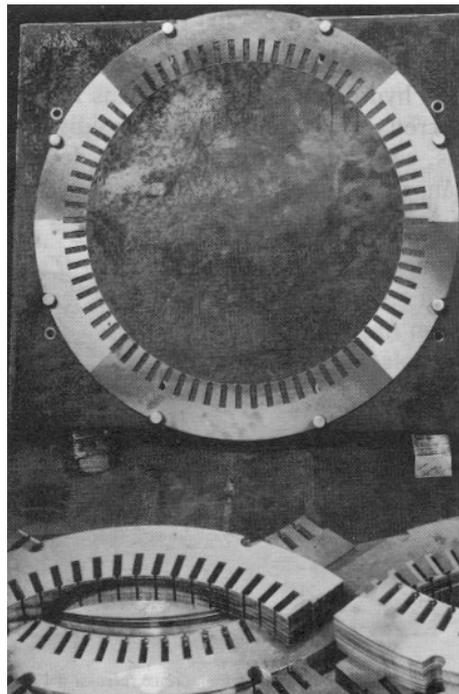
C'est la partie fixe de la machine, on l'appelle aussi le stator car en effet c'est lui qui va porter les enroulements induit. La machine synchrone classique est du type triphasé ce qui me permet de dire que le stator sera constitué d'un nombre de bobines multiple de trois (une bobine par phase). Le positionnement de l'ensemble de ces bobines ne peut être quelconque et devra respecter un angle de déphasage de $360^\circ / \text{nb de bobinages}$

1.3.1. La carcasse



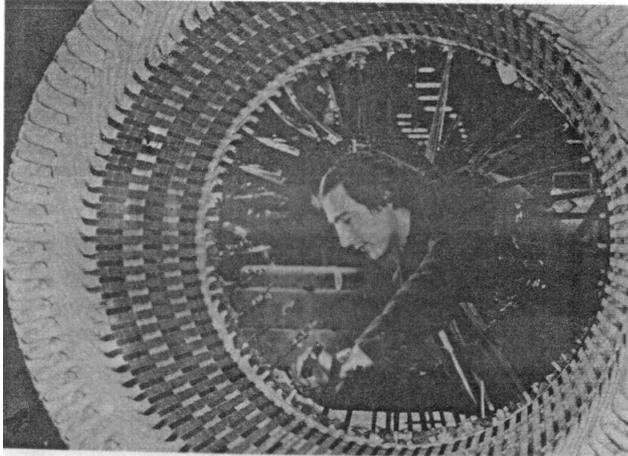


Cette dernière est le support physique des bobines statoriques. Nous verrons plus loin que le rotor sera en rotation lors du fonctionnement de la machine synchrone, je peux donc dire que les flux rotoriques seront variables vu du stator. Le stator verra donc un champ variable qui aura pour conséquence d'induire des courants de Foucault donc les masses magnétiques du stator. En conclusion, le stator devra être feuilleté pour limiter les pertes par courant de Foucault.



1.3.2. Les encoches

Sur la périphérie de l'induit on a découpé des encoches (ou rainures), dans lesquelles viendront se loger les conducteurs de l'induit. Le morceau de tôle restant entre deux encoches s'appelle une dent.



1.3.3. Le frettage

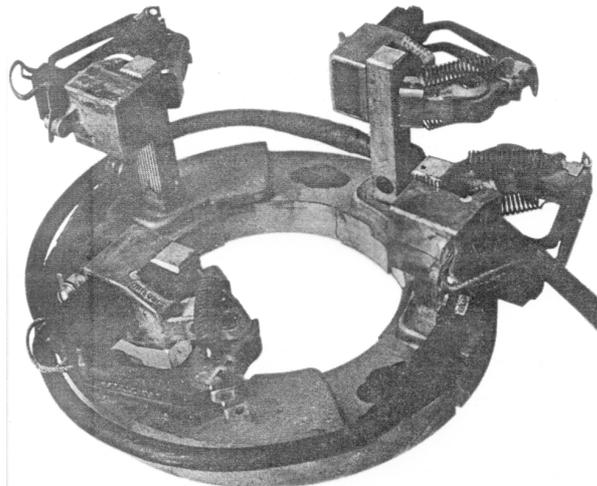
Lors de la rotation, à cause de l'inertie centrifuge, les conducteurs ont tendance à sortir de leurs encoches. Une cale trapézoïdale est ainsi placée à la tête de chaque encoches afin de refermer cette dernière et ainsi empêcher les conducteurs de quitter leur emplacement. Pour les conducteurs situés en dehors des encoches, il sera réalisé un frettage qui consiste à appliquer autour des conducteurs des frettes en fil ou en ruban afin de former une enveloppe qui empêchera tout déplacement des conducteurs.

1.3.4. L'entrefer

Le diamètre extérieur de l'inducteur est à peine inférieur au diamètre intérieur de l'induit. Cette espace est nécessaire d'un point de vue mécanique pour éviter tout couple résistant entre les deux parties. D'un point de vue électrique, cette espace est appelé l'entrefer.

1.3.5. Les balais

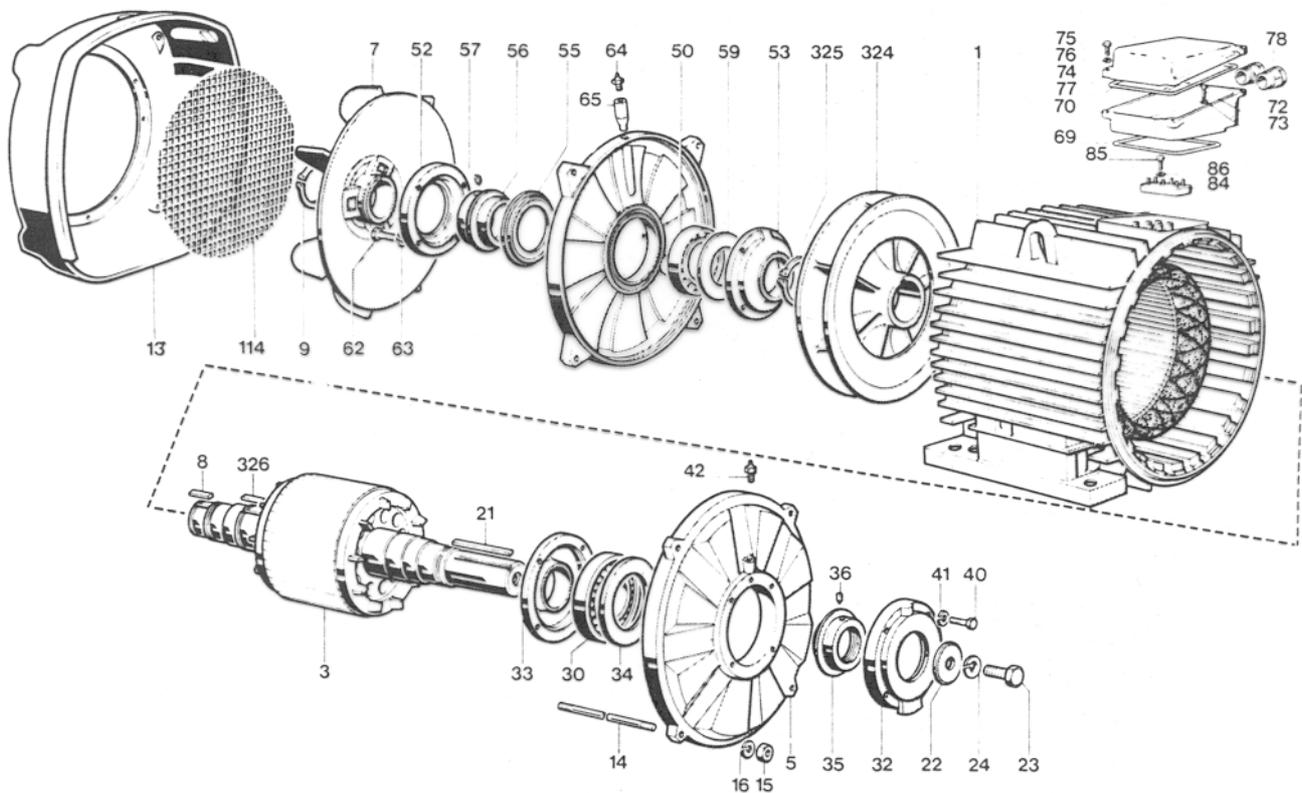
Fixés sur la carcasse par l'intermédiaire de porte-balais, ils sont les élément indispensable pour transmettre la tension continue vers le rotor. Se seront eux qui vont conduire le courant entre la partie fixe le stator et la partie mobile le rotor. Ils sont constitués en carbone et frottent sur les bagues solidaires du rotor. Grâce à des ressorts, une pression de contact est maintenue sur le balais et donc sur les bagues. Puisque les bagues tournent, le contact avec les balais est glissant et la densité de courant admise est relativement faible ($10\text{A}/\text{cm}^2$). La localisation des balais est quelconque et sera fixé de façon aléatoire avec comme seul condition de limiter au maximum l'encombrement.



1.3.6. Plaques à bornes

La liaison avec les enroulements de l'inducteur (via les bagues et les balais) d'une part et des bobines inductrices d'autre part se fait par l'intermédiaire d'une plaque à bornes. Cette dernière est fixée sur le bâti et comprend 8 bornes. Deux pour l'inducteur qui seront alimentée en courant continu et 6 représentant les trois bobines du stator. Un couplage étoile ou triangle des bobines du stator sera possible au départ des six bornes à disposition.

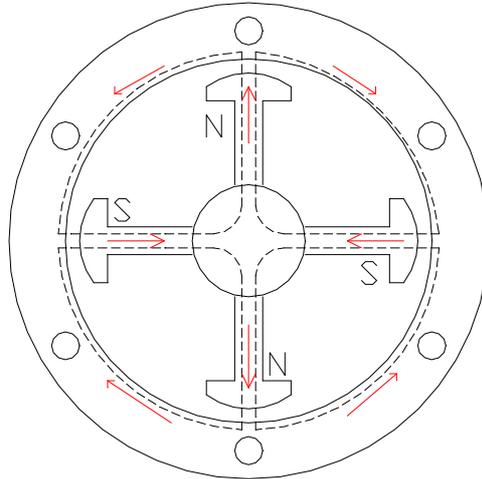
1.4. **Vue éclatée d'une machine synchrone.**



2. Le flux au sein de la machine

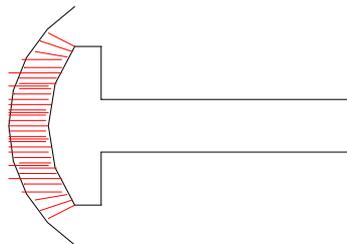
2.1. dans le fer :

Les lignes de champs rotoriques sortent du pôle nord, s'épanouissent un peu dans l'entrefer, traverse une partie du circuit magnétique statorique, retransverse l'entrefer et entrent dans le pôle sud d'un des noyaux du rotor. Noter encore que le flux rotoriques sortant d'un pôle nord du rotor se partage en deux dans le stator pour se refermer via les pôles sud.

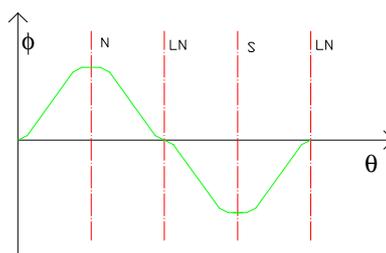


2.2. dans l'entrefer :

Les extrémités des noyaux appelé épanouissements polaires ne sont pas tout à fait concentriques à l'induit, cela signifie que la courbure des épanouissements polaires est différente de la courbure de l'induit. Cette différence entraîne une légère déformation des lignes de champs. Je signale que les lignes sortant d'un des noyaux du rotor sont plus denses au centre de l'épanouissement que sur les extrémités.

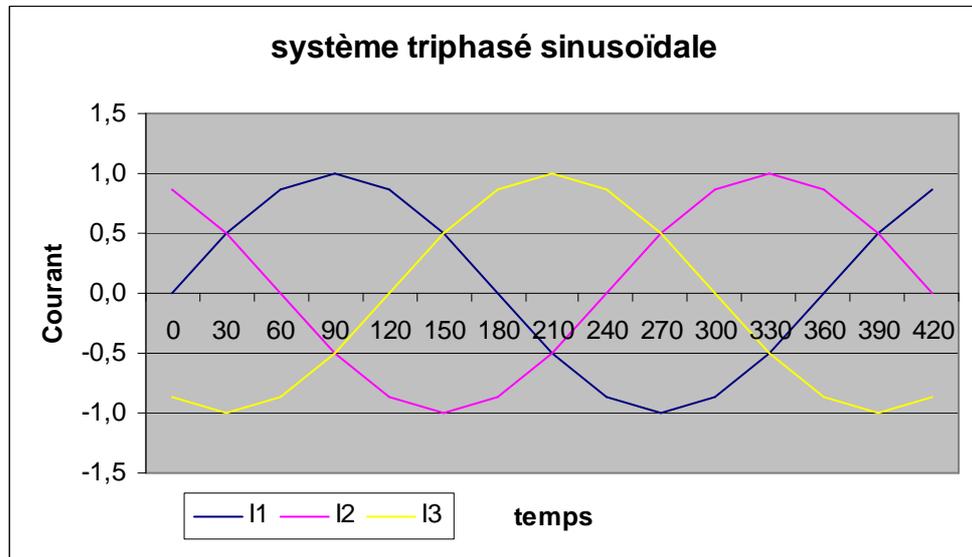


L'allure du champ inducteur dans le stator ressemble donc à ce qui suit. Noter que vous verrez ce signal si le rotor est mis en rotation et que vous êtes fixe sur le stator ou rotor fixe et que vous vous déplacez sur le stator.



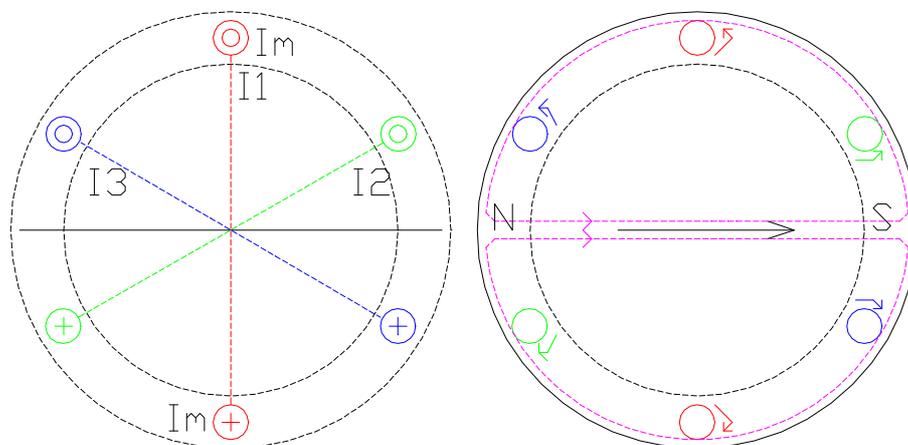
3. La génération du champ tournant

Nous savons qu'une bobine parcourue par un courant alternatif crée un flux alternatif. Dans le cas d'un réseau triphasé, je sais que j'ai trois bobines déphasées de 120° et parcourue chacune par un courant alternatif. Je me retrouve donc avec trois flux alternatifs déphasés les uns par rapport aux autres. Analysons ce que devient la combinaison de ces trois flux alternatifs.



Voyons au sein du stator la répartition des courants dans les bobinages et le flux résultant pour un état fixé au 90° électrique.

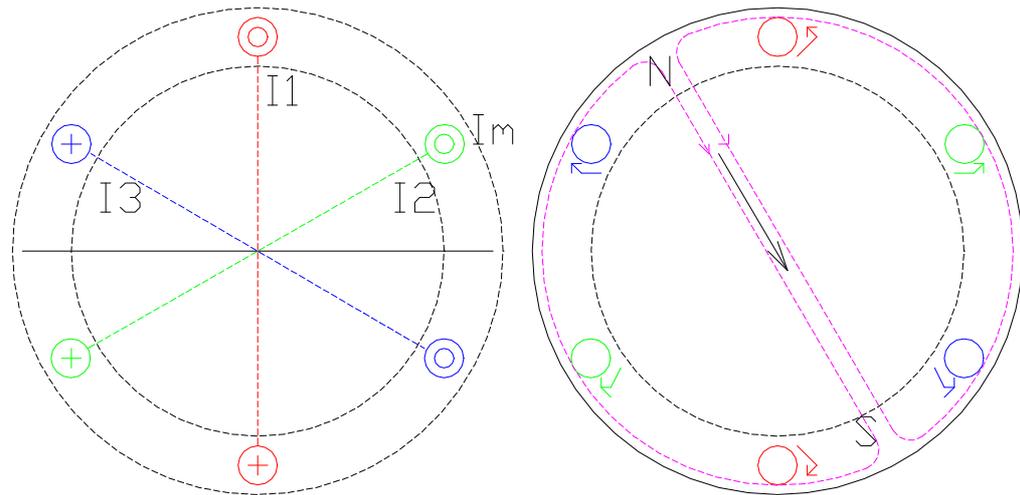
Sur le graphe des trois sinusoïdes, nous pouvons lire que pour un angle de 90° , le courant I1 est maximum positif et les courants I2 et I3 sont négatifs et valent la moitié du courant maximum. Prenons comme hypothèse qu'un courant positif est un courant qui sort du conducteur, nous le noterons par un rond et que dès lors à l'autre extrémité nous aurons un courant rentrant que nous noterons par une croix. On peut visualiser sur le schéma de gauche ci-dessous les courants dans chacun des conducteurs. Noter que notre schéma représente trois conducteurs symbolisant les trois bobines elles-mêmes placées à 120° l'une de l'autre.



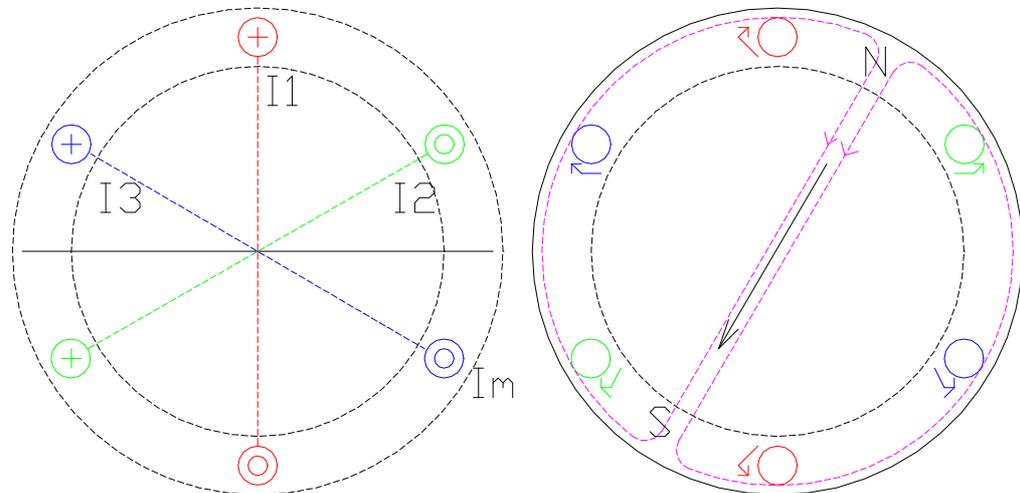
Le schéma de droite nous montre au droit de chacun des conducteurs le sens du flux et la valeur qui sera maximum lorsque le courant correspondant est maximum. Nous voyons ainsi que le conducteur développant le flux maximum est entouré de deux conducteurs développant un champ de mêmes sens mais de valeur égale à la moitié. Je peux donc conclure que ces flux vont s'associer pour définir deux pôles comme représenté sur le dessin.

Refaisons ce raisonnement pour d'autre angle.

Voyons ce qui se passe à 150°



Voyons ce qui se passe à 210°

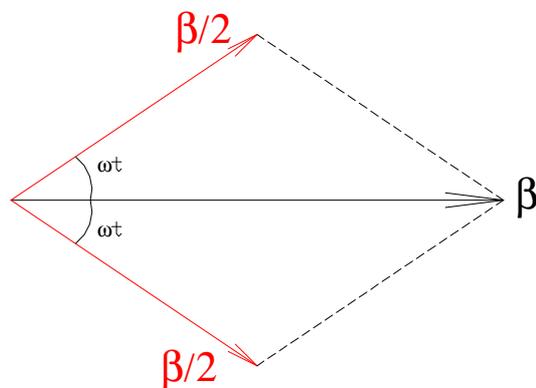


Je peux donc visualiser clairement l'apparition d'un champ tournant que l'on peut caractériser par un nord et un sud mis en rotation à une vitesse fixée par la fréquence de la tension d'exploitation.

4. Le théorème de LEBLANC

Monsieur LEBLANC a démontré que un champ alternatif peut être considéré comme étant la résultante de deux champs, tournant en sens inverse, l'un de l'autre, à une vitesse de rotation égale à la fréquence du champ initial. Ces deux champs se croisent sur la direction horizontale du champ initial ; leur intensité ou module est constant et égale à la moitié de l'intensité du champ initial.

Soit un champ alternatif $b=B_M.\sin(\omega.t)$. Considérons maintenant ce même champs décomposé en deux autres avec une intensité égale à $\frac{B_M}{2}$. Chacun de ces deux vecteurs tourne en sens opposé autour du point 0 à une vitesse ω fonction de la fréquence. Ces deux champs font avec l'axe des abscisses des angles respectifs égaux à ωt et $-\omega t$.



Vérifions que la somme de ces deux vecteurs est bien à tout moment égale au vecteur initial.

$$\begin{aligned}
 b &= \sqrt{\frac{B_M^2}{4} + \frac{B_M^2}{4} - 2 \cdot \frac{B_M}{4} \cdot \frac{B_M}{4} \cdot \cos(2 \cdot \omega.t)} \\
 b &= \sqrt{\frac{B_M^2}{2} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega.t))} \\
 b &= \frac{B_M}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \cos(2 \cdot \omega.t)} \\
 b &= \frac{B_M}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \sin^2(\omega.t)} \\
 b &= B_M \cdot \sin(\omega.t)
 \end{aligned}$$

Transposons cette théorie à la machine synchrone. Je peux dire que chaque enroulement du stator est le siège d'un flux et que ces derniers peuvent être décomposé en deux composantes. Trois composantes tourneront donc dans le même sens que le rotor et à la même vitesse et les trois autres dans le sens contraire à une vitesse double. Les trois composantes tournant avec le rotor formeront le champ tournant fictif. Et les trois autres composantes le champs tournant statorique. Noter que pour une machine triphasée, le champs fictif ne pourra induire le rotor puisque qu'il tourne à la même vitesse que le rotor et pour ce qui est de l'autre champ, il n'aura non plus aucune influence car la somme vectorielle de trois vecteurs de même module et déphasé l'un par rapport à l'autre de 120° est nulle. Cela n'est pas vrais pour la machine monophasée. Dans ce cas, le champ fictif n'a pas d'influence mais le second champ ne pouvant se combiner avec d'autre ne sera jamais nul et ira dans ce cas induire les masses du rotor. Ce dernier devra donc être feuilleté pour limiter les courants de Foucault.

5. Excitation des machines synchrones

5.1. Par utilisation d'une excitatrice

Cette solution était jusqu'il n'y a pas si longtemps la seule utilisée pour réaliser l'excitation. Il s'agissait d'accoupler une génératrice courant continu shunt ou compound sur l'arbre de l'alternateur. La génératrice ainsi couplée permettait l'excitation de l'alternateur avec une régulation obtenue par réglage de l'excitation de l'excitatrice. Dans les machines de grosse puissance, cette excitatrice est elle même excitée par une excitatrice auxiliaire.

5.2. Par excitation statique

Il s'agit dans ce cas d'utiliser l'électronique de puissance pour convertir la tension d'exploitation via un pont redresseur en tension continue qui via un réglage rhéostatique sert ensuite appliqué à l'excitation de l'alternateur. Le système peut s'amorcer automatiquement grâce au flux rémanent. Pour des machines de grosse puissance, on utilise des batteries de condensateur pour fournir le courant nécessaire au démarrage de la machine. Une fois en fonctionnement, les condensateurs seront rechargé en vu de leur prochaine utilisation.

Deux types de redresseurs peuvent être utilisés, soit avec des diodes et dans ce cas nous n'avons aucun moyen de réglage sur la valeur de la tension redressée soit par thyristors et dans ce cas nous aurons en régulant les impulsions de gâchette la possibilité de modifier la valeur de la tension redressée et ainsi le courant d'excitation.