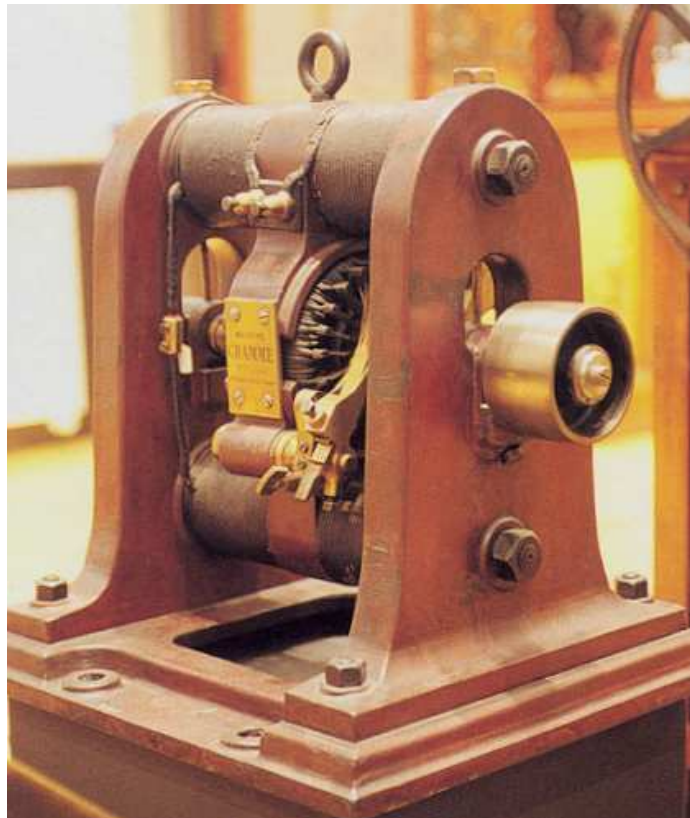


Cours d'électrotechnique

MACHINE TOURNANTE A COURANT CONTINU



Dynamo de Zénobe GRAMME

LES MACHINES A COURANT CONTINU

TABLE DES MATIERES

PARTIE N°1 :

Description d'une machine courant continu

PARTIE N°2 :

La génératrice courant continu

PARTIE N°3 :

Le moteur courant continu

Nomenclature

Symbole	Description	unité	
U	Tension débitée	V	Volt
E	Force Electro Motrice (FEM)	V	Volt
E'	Force Contre Electro Motrice (FCEM)	V	Volt
I	Courant de charge	A	Ampère
i	Courant d'excitation	Ma	Milliampère
I'	Courant d'induit	A	Ampère
R _{AB}	Résistance d'induit + résistance balais-collecteur	Ω	Ohm
Φ _{ei}	Flux inducteur au sein de la bobine inductrice	Wb	Wéber
Φ _{ec}	Flux inducteur au sein des masses magnétiques	Wb	Wéber
Φ _i	Flux inducteur traversant l'induit	Wb	Wéber
N	Nombre de conducteur actif	Cd	conducteur
N _s	Nombre de spire	Sp	Spire
p	Nombre de paire de pôle		
a	Nombre de paire de voie d'enroulement		
n	Vitesse de rotation	T/s	Tour par seconde
C	Couple moteur	Nm	Newton mètre
R _h	Résistance du rheostat de champ	Ω	Ohm
R _{JK}	Résistance de l'enroulement inducteur indépendant	Ω	Ohm
R _{CD}	Résistance de l'enroulement inducteur shunt	Ω	Ohm
R _{EF}	Résistance de l'enroulement inducteur série	Ω	Ohm
R _{GH}	Résistance de l'enroulement de compensation	Ω	Ohm
R _{AB}	Résistance de l'enroulement d'induit plus la Résistance balais-collecteur	Ω	Ohm
μ	Perméabilité absolue (μ ₀ *μ _r)		
S	Section d'un conducteur	mm ²	Millimètre carré
L	Longueur d'un conducteur	M	Mètre

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

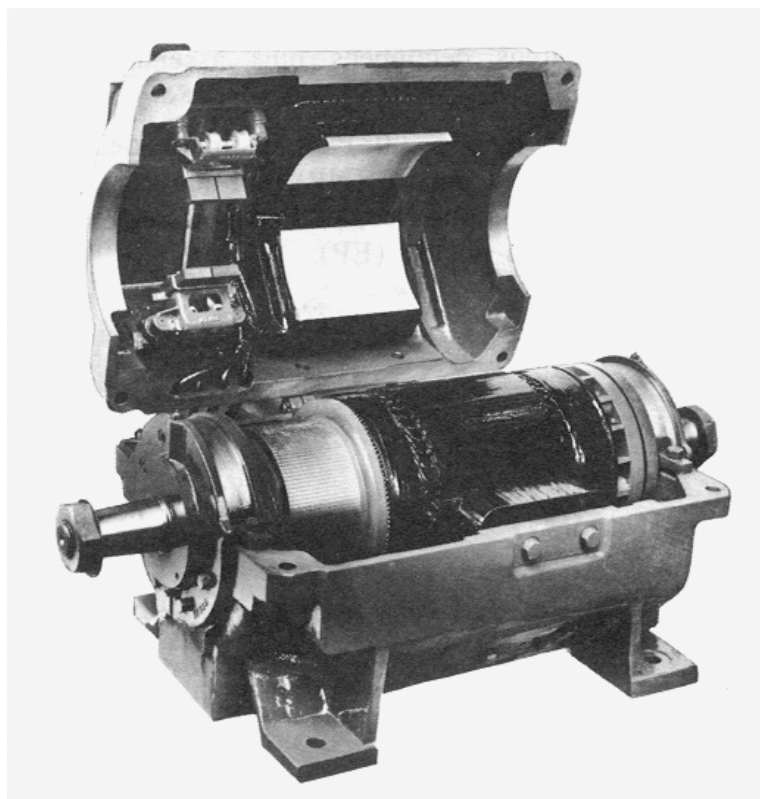
Edition NATHAN

J. NIARD, R. MOREAU et J. BATTUT

Cours d'électrotechnique

MACHINE TOURNANTE A COURANT CONTINU

LES MACHINES A COURANT CONTINU



PARTIE N°1 :

LA DESCRIPTION

TABLE DES MATIERES

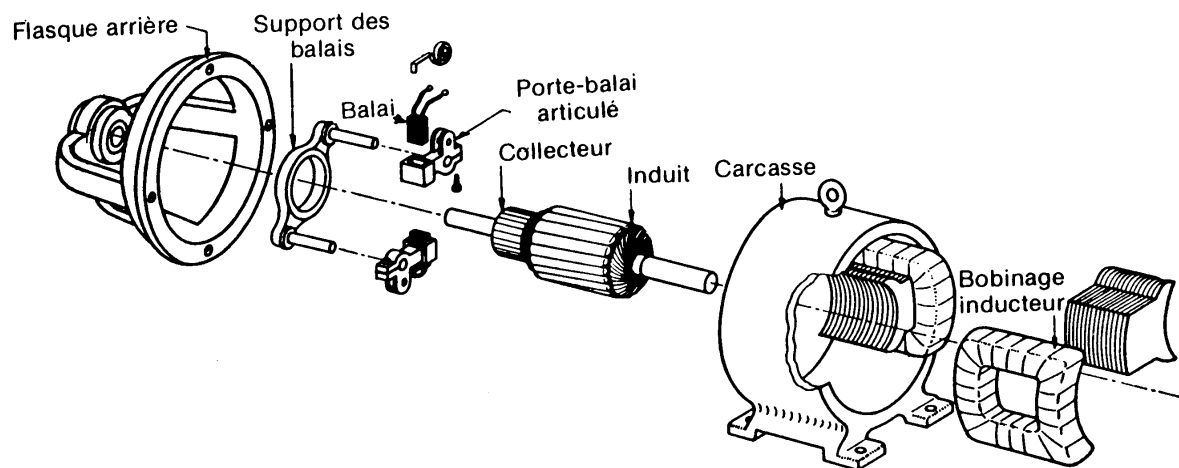
1.	Description de la machine	2
1.1.	Généralités	2
1.2.	L'inducteur.....	2
1.2.1.	La culasse	3
1.2.2.	Les pôles principaux.....	3
1.2.3.	Les bobines inductrices	4
	Rappel sur la polarisation d'une bobine.....	4
1.2.4.	La représentation	6
1.3.	L'induit	7
1.3.1.	La masse tournante.....	7
1.3.2.	Les encoches	7
1.3.3.	L'entrefer.....	7
1.3.4.	Le bobinage	8
1.3.5.	Le frettage	9
1.3.6.	Le collecteur	9
1.3.7.	Les balais.....	10
1.4.	Plaques à bornes.....	10
1.5.	Le flux au sein de la machine.....	11
1.5.1.	Dans le fer	11
1.5.2.	Dans l'entrefer.....	11
2.	Théorie générale	12
2.1.	La force électromotrice ou la force contre-électromotrice.....	12
2.1.1.	La F.E.M. ou F.C.E.M. à vide	12
2.1.1.1.	Pour un conducteur.....	12
2.1.1.2.	Pour N conducteurs	12
2.1.2.	La F.E.M. ou F.C.E.M. en charge	13
2.1.2.1.	La résistance d'induit.....	13
2.1.2.2.	Le circuit magnétique	13
2.1.2.3.	La réaction d'induit	13
2.2.	La commutation	14
2.2.1.	Fonctionnement à vide	14
2.2.2.	Fonctionnement en charge.....	16
3.	Les différents types de machine courant continu.....	19
3.1.	Caractéristiques des enroulements communs.....	19
3.2.	La machine à excitation indépendante	19
3.2.1.	Principe	19
3.2.2.	Caractéristiques de l'enroulement d'excitation	19
3.2.3.	Schéma de câblage	19
3.3.	La machine auto-excitatrices	20
3.3.1.	La machine shunt	20
3.3.1.1.	Principe.....	20
3.3.1.2.	Caractéristiques de l'enroulement d'excitation	20
3.3.1.3.	Schéma de câblage.....	20
3.3.2.	La machine série.....	20
3.3.2.1.	Principe.....	20
3.3.2.2.	Caractéristiques de l'enroulement d'excitation	21
3.3.2.3.	Schéma de câblage.....	21
3.3.3.	La machine compound	21
3.3.3.1.	Principe.....	21
3.3.3.2.	Caractéristiques des enroulements d'excitation.....	21
3.3.3.3.	Schéma de câblage.....	22

1. Description de la machine

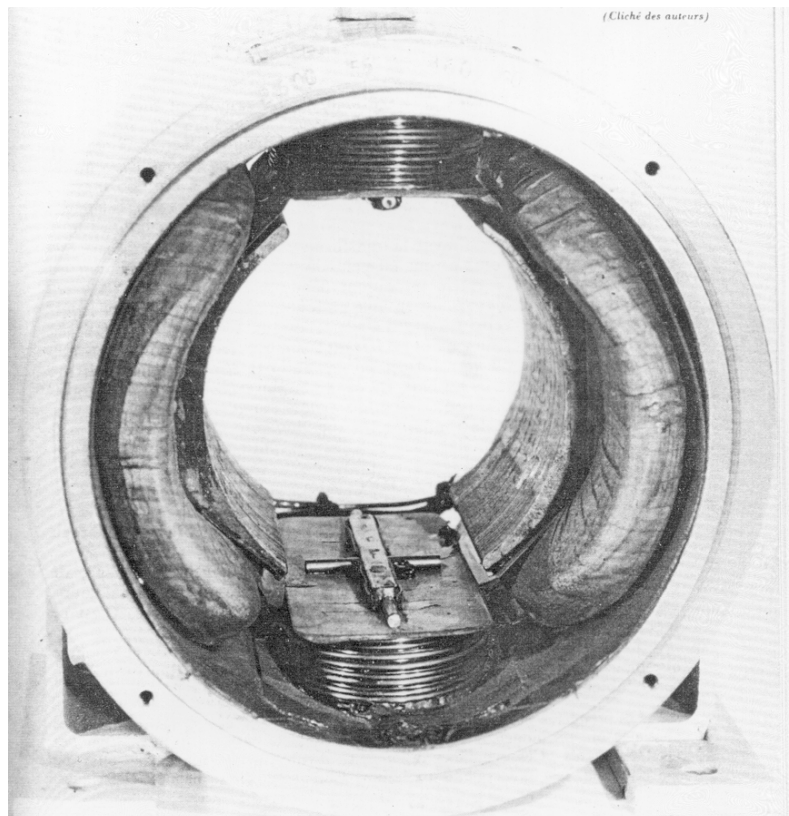
1.1. Généralités

La machine comporte deux parties principales :

- L'une fixe : appelée **STATOR** et qui jouera le rôle d'**INDUCTEUR**
- L'une mobile : appelée **ROTOR** et qui jouera le rôle d'**INDUIT**



1.2. L'inducteur

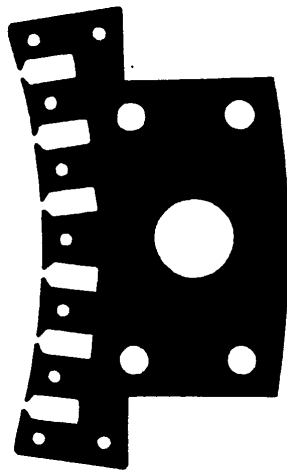


1.2.1. La culasse

L'inducteur est constitué par une **CULASSE** en acier. C'est la carcasse de la machine, elle supporte toutes les parties fixes constitutives de la machine. Aux extrémités, les deux flasques avec leurs paliers recevront l'arbre qui porte le rotor. Cette culasse a aussi pour rôle de fermer le circuit magnétique de la machine.

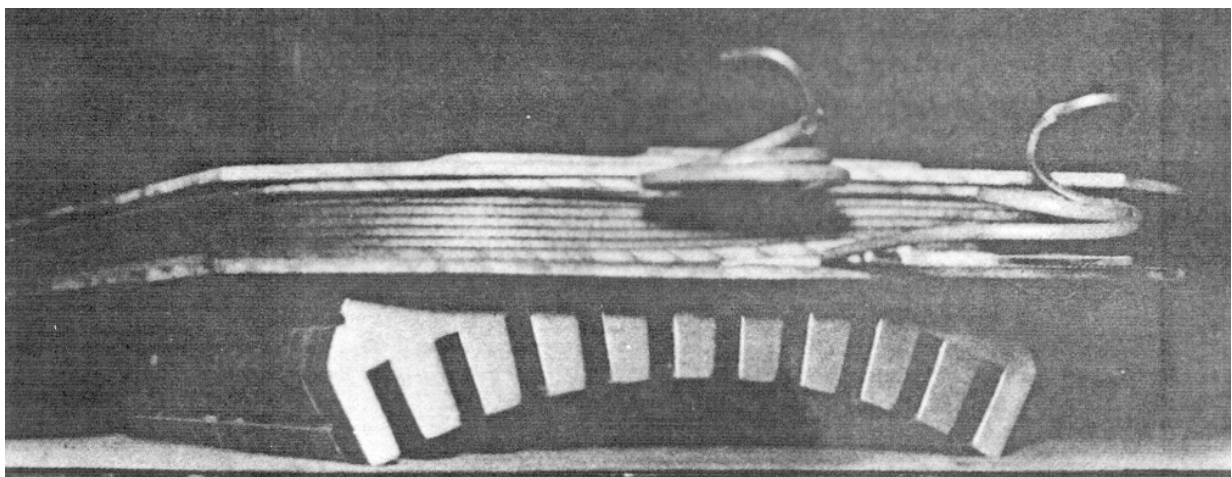
1.2.2. Les pôles principaux

L'inducteur comporte également deux **POLES PRINCIPAUX** qui bien souvent, pour des raisons économiques, sont formés de tôles découpées puis assemblées.



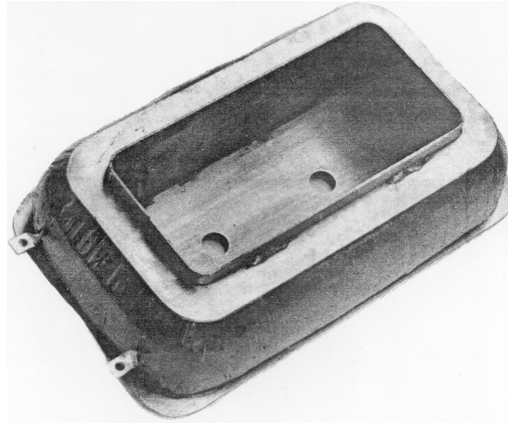
Sur chaque pôle on distingue deux parties :

- Le **NOYAU POLAIRE** sur lequel est logée la bobine inductrice.
- L'**EPANOUISSEMENT POLAIRE** ou pièce polaire qui lui-même est formé par deux **CORNES POLAIRES** symétriques.



1.2.3. Les bobines inductrices

Les **BOBINES INDUCTRICES** sont placées autour des pôles. Les forces magnétomotrices qu'elles développent lorsqu'elles sont parcourues par le **courant inducteur** ou **courant d'excitation** produisent le flux inducteur. Ces bobines sont telles que l'un des épanouissements polaires aura comme polarisation un NORD et l'autre un SUD.



Rappel sur la polarisation d'une bobine.

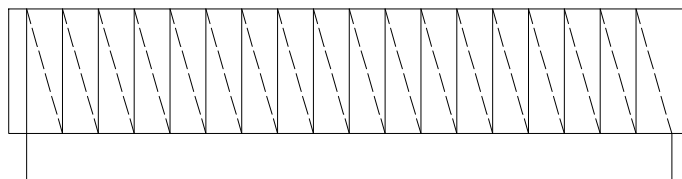
Notre machine courant continu peut être dans le cas le plus simple ramenée à deux aimants fixes et un rotor mis en rotation. C'est le cas du plus simple des moteurs courant continu utilisés dans les jouets pour enfants.

Dans ce cas, le problème de la polarisation NORD et SUD du stator ne se pose pas puisque les aimants seuls sont déjà polarisés.

Dans le cas d'une machine plus importante comme par exemple dans les machines à laver ou les machines de traction ferroviaire, deux aimants permanents ne suffisent plus, il faut dans ce cas utiliser des électro-aimants qui seront capables de développer des champs magnétiques beaucoup plus importants tout en permettant le réglage de ce dernier.

Pour réaliser un électro-aimant, il faut un circuit magnétique qui ne doit en aucun cas être un tore car dans ce cas, le flux se referme sur lui-même empêchant la polarisation du circuit magnétique. Ce circuit magnétique ne doit pas, sauf utilité particulière, être feuilleté. Le coût en est ainsi limité.

Sur ce circuit magnétique, on bobine un conducteur afin de créer notre enroulement dit d'excitation ou inducteur. Le câblage sera tel que l'on puisse ensuite injecter dans cet enroulement un courant. La circulation du courant au sein de notre enroulement engendrera au sein de ce dernier des lignes d'induction qui généreront le flux magnétique et ainsi la polarisation de ce dernier.



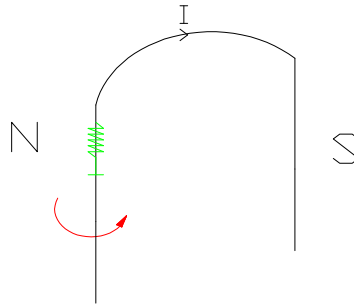
Supposons une bobine sur un noyau jouant le rôle de circuit magnétique et examinons ce qui se passe. La formule générale du flux montre que si la bobine est parcourue par un courant, elle va produire des champs magnétiques (H) au niveau de chaque spire formant la bobine

$$(H = \frac{N \times I}{L}).$$

Ces champs magnétiques vont par combinaison former des lignes d'induction au sein de notre bobine ($\beta = \mu_0 \times \mu_r \times \frac{N \times I}{L}$).

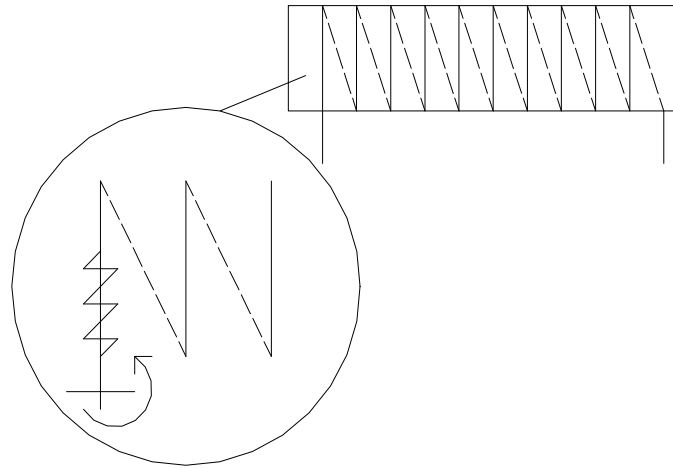
Enfin, ces lignes d'inductions vont générer le flux magnétique au sein du circuit ($\Phi = \beta \times S$).

Si on reprend la théorie, nous savons qu'une spire parcourue par un courant se polarise. Je rappelle que pour trouver le sens du flux dans une spire on peut utiliser la règle du tire-bouchon. Celle-ci nous dit que si on place le tire bouchon parallèlement au conducteur formant la spire et dans le plan de cette dernière, et si nous mettons le tire bouchon en rotation afin qu'il se déplace le long du conducteur dans le même sens que le courant circulant au sein de la spire, nous pouvons trouver le sens du flux au droit de la spire. Pour cela, il suffit de regarder comment le manche du tire bouchon traverse la spire. Si le manche rentre dans la spire par la droite et ressort par la gauche, cela signifie que le nord se trouve à gauche et le sud à droite de la spire.



Rappelez-vous que le flux se déplace à l'intérieur de la spire ou de la bobine du SUD vers le NORD et à l'extérieur de la spire ou de la bobine du NORD vers le SUD.

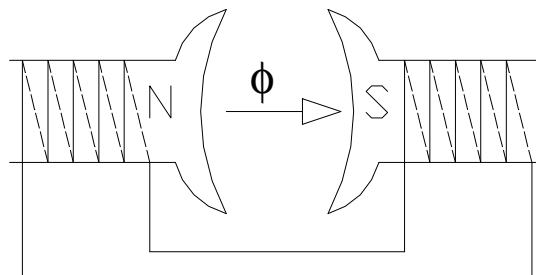
Comprenant la polarisation d'une spire, il est aisé de comprendre dès lors la polarisation d'une bobine puisque cette dernière est la superposition d'un nombre N de spires. Le nord de la première spire se colle au sud de la seconde, le sud de la seconde au nord de la troisième et ainsi de suite sur toute la longueur de la bobine. Dès lors notre bobine sera polarisée soit NORD-SUD soit SUD-NORD. On conclut encore qu'il ne peut y avoir qu'une seule polarisation pour un sens de courant donné. Il en est donc de même pour le circuit magnétique qui porte notre bobine. Il est à noter également que si la polarisation du circuit magnétique se fait grâce à toutes les polarisations individuelles au droit de chaque spire, le module du flux global est aussi dû à la somme des flux individuels.



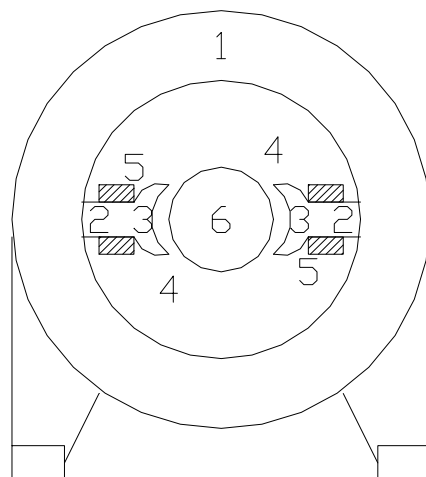
La formule générale ci-dessous nous montre que le flux dépend du courant qui traverse les conducteurs de la bobine. Je peux donc faire varier le flux en faisant varier le courant. La valeur du flux dépend également du nombre de spires que comporte la bobine.

$$\Phi = \mu_o \times \mu_r \times S \times \frac{N \times I}{L}$$

Appliquons ce principe à la machine courant continu et nous remarquerons que nous obtenons une polarisation au droit des épanouissements polaires. Nous utilisons ici une bobine dont la première moitié se trouve sur le noyau polaire de droite et la seconde moitié sur le noyau polaire de gauche. La carcasse jouant le rôle de circuit magnétique, elle permet de fermer le flux entre le côté gauche et le côté droit.



1.2.4. La représentation



- 1. carcasse ou culasse
- 2. noyau polaire
- 3. Epanouissement polaire
- 4. Cornes polaires
- 5. Enroulement inducteur
- 6. induit ou rotor

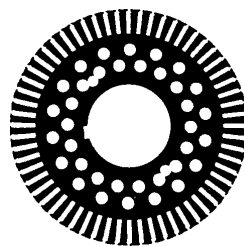
1.3. L'induit

Il tourne dans un champ magnétique fixe créé par le stator, il sera soumis à des variations de flux et sera donc le siège de pertes par hystérésis et par courant de Foucault. Ces dernières interdiraient pratiquement la rotation d'un cylindre plein.



1.3.1. La masse tournante

Pour limiter au maximum les pertes par hystérésis et par courant de Foucault, l'induit sera feuilleté. Les tôles qui le constituent (0.2 à 0.5mm) sont découpées à la presse, isolées les unes des autres par une mince pellicule de vernis et assemblées. Pour réduire les pertes par hystérésis, ces tôles sont en acier au silicium. L'ensemble des pertes dans le fer y est de l'ordre de 2.5 watts par kilogramme pour une induction de 1.4 Tesla et une fréquence de 50 Hz.



1.3.2. Les encoches

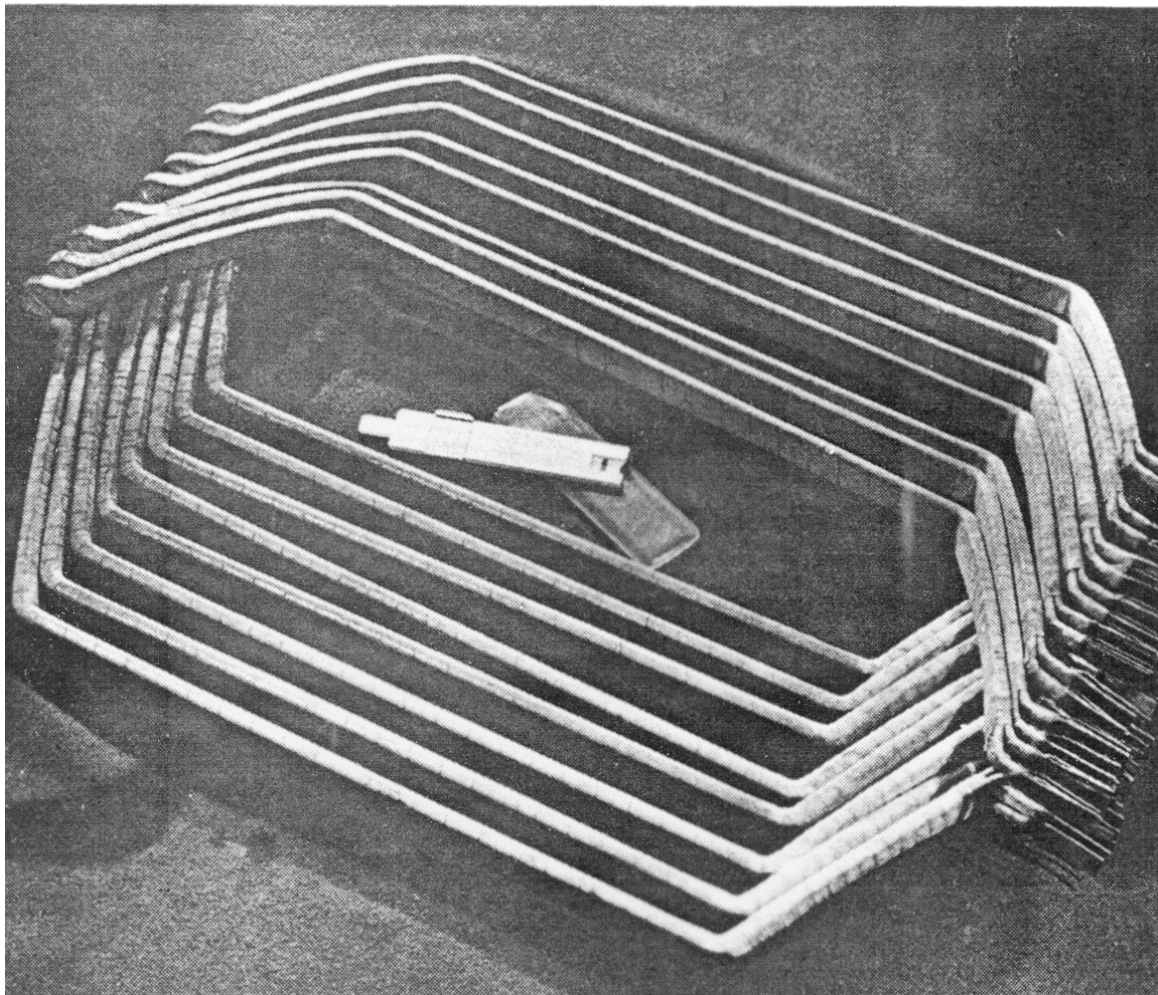
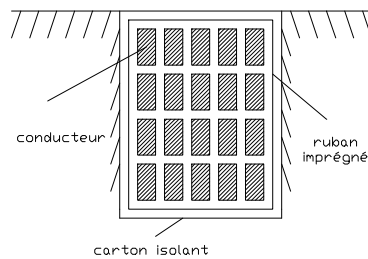
Sur la périphérie de l'induit on a découpé des **ENCOCHES** (ou rainures), dans lesquelles viendront se loger les conducteurs de l'induit. Le morceau de tôle restant entre deux encoches s'appelle une dent.

1.3.3. L'entrefer

Le diamètre extérieur de l'induit est à peine inférieur au diamètre intérieur de l'inducteur : quelques millimètres seulement qui constituent l'**ENTREFER**.

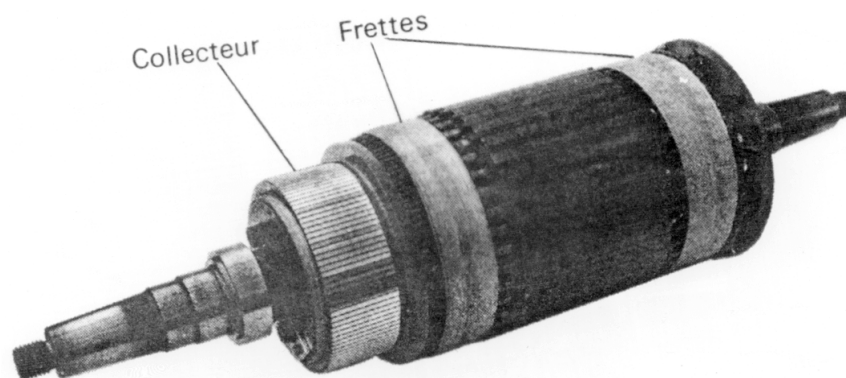
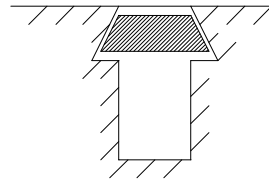
1.3.4. Le bobinage

Chaque bobinage est constitué de spires, deux conducteurs « actifs » forment une spire, les spires sont groupées par section et les sections par bobines avant la mise en place dans les encoches. Chaque conducteur est isolé par un ruban imprégné de vernis. Sur le rotor, la disposition d'une section est telle que deux moitiés se trouvent dans les encoches presque diamétralement opposées ; les conducteurs de sortie de la section sont soudés à deux lames voisines du collecteur. Il y a autant d'encoche que de section.



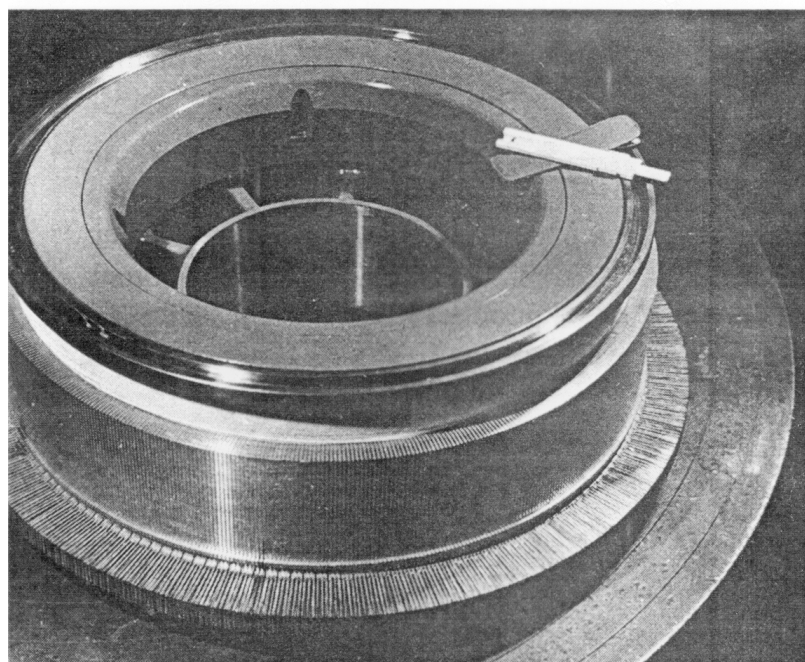
1.3.5. Le frettage

Lors de la rotation, à cause des forces centrifuges, les conducteurs ont tendance à sortir des encoches. Une cale trapézoïdale les en empêche. Les têtes de bobines étant hors des encoches, il est nécessaire de placer autour d'elles des frettes en fil ou en ruban d'acier pour les maintenir. Il faut également tenir compte des forces magnétomotrice qui agissent sur chaque conducteur. Pour rappel, deux conducteurs placés l'un à côté de l'autre et parcouru par un courant de même valeur et de même sens ont tendance à se repousser.



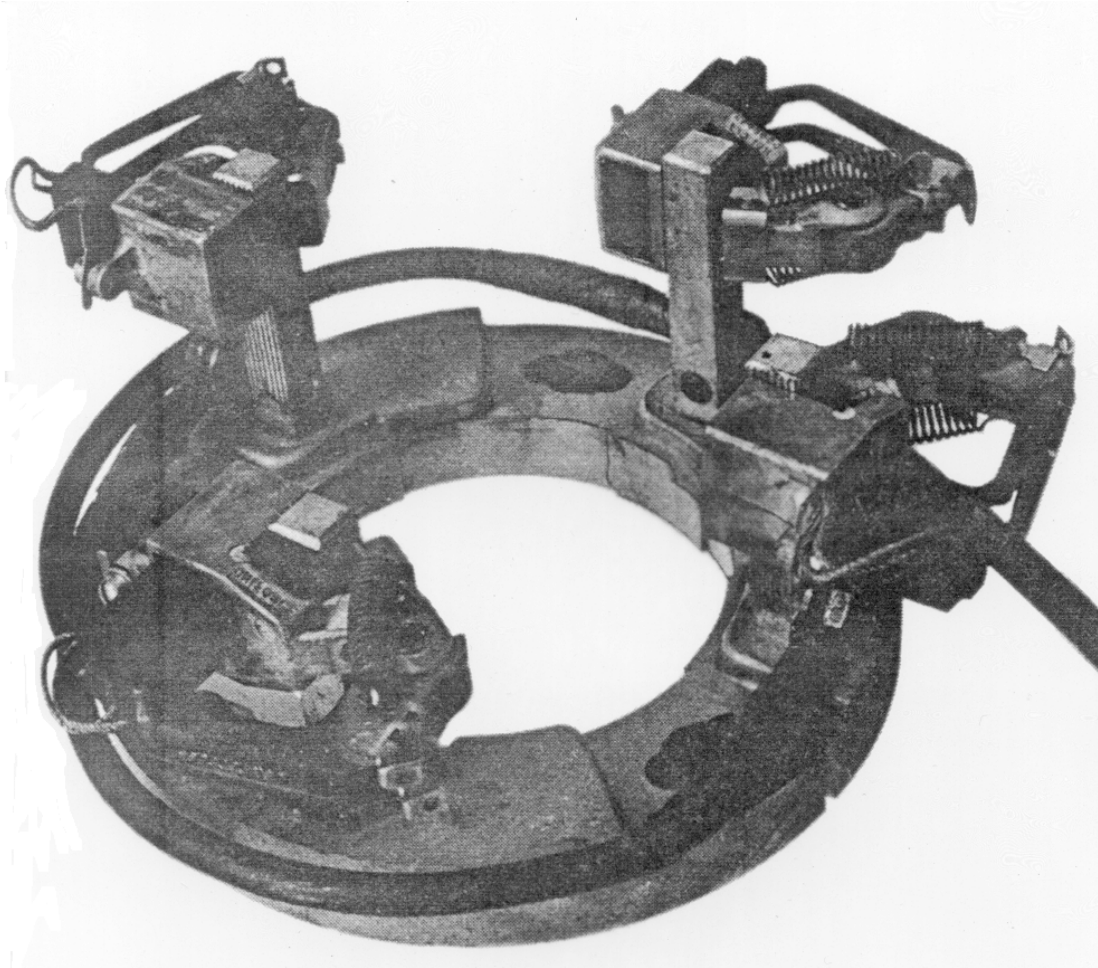
1.3.6. Le collecteur

Placé à l'extrémité de l'induit et calé sur le même arbre, il est formé de lames de cuivre isolées entre elles par un mica. A l'arrière de la lame se trouve une ailette, usinée ou rapportée, dans laquelle sont soudées l'entrée d'une section et la sortie d'une autre. Il y a donc autant de lames de collecteur que de sections.



1.3.7. Les balais

Fixés sur la carcasse par l'intermédiaire de **PORTE-BALAIS**, ils sont en carbone et frottent sur les lames du collecteur. Grâce à des ressorts, une pression de contact est maintenue. Puisque le collecteur tourne, le contact avec les balais est glissant et la densité de courant admise est relativement faible (10 A/cm^2). Bien souvent il y a non pas un seul couple de balais mais une série de couples de balais placés sur une même ligne. Cette façon de procéder va permettre d'augmenter la densité de courant et ainsi transmettre un courant de charge plus important de l'induit vers l'extérieur. **Les balais sont placés sur l'axe des pôles principaux.**



1.4. Plaques à bornes

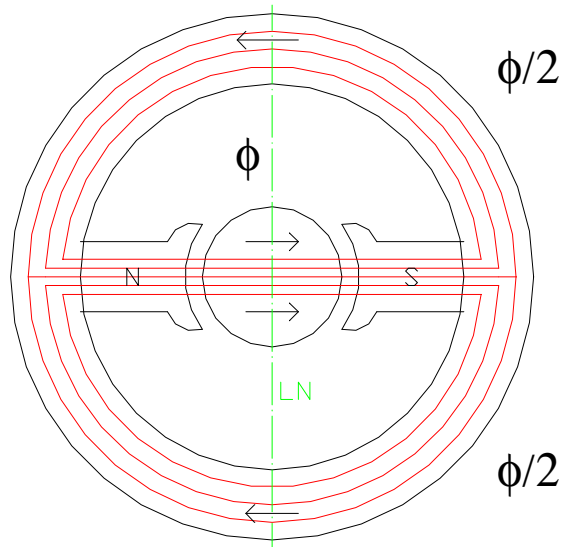
Les liaisons entre les enroulements de l'induit (par l'intermédiaire des balais) et les enroulements inducteurs se fait par l'intermédiaire d'une plaque à bornes, fixée sur le bâti et comprenant les bornes suivantes:

- 2 (deux) bornes pour l'induit
- 2 (deux) bornes pour les enroulements de compensation ou auxiliaire
- 2 (deux) bornes pour l'enroulement inducteur série
- 2 (deux) bornes pour l'enroulement inducteur shunt ou indépendant

1.5. Le flux au sein de la machine

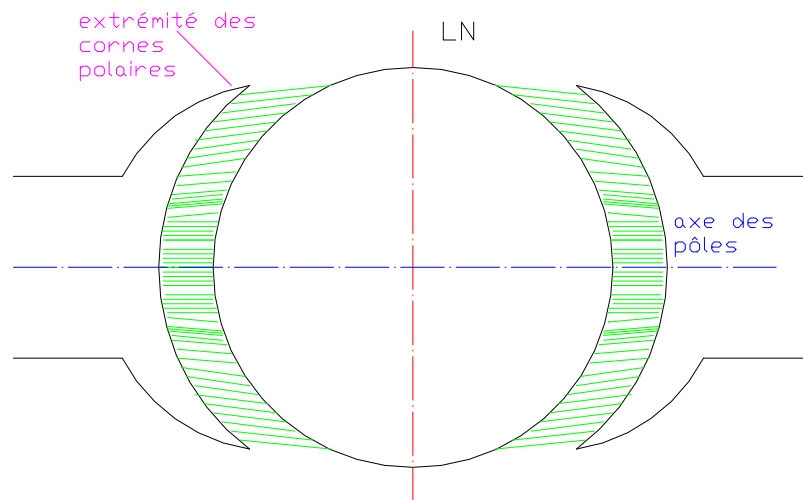
1.5.1. Dans le fer

Les lignes de champs sortent du pôle nord, s'épanouissent un peu dans l'entrefer, traversent l'induit, s'épanouissent à nouveau dans l'entrefer et entrent dans le pôle sud. Elles retournent au pôle nord par les deux demi-culasses formant la carcasse. Le flux dans la culasse est donc égal à la moitié du flux sous un pôle. Perpendiculairement à l'axe des pôles se trouve le plan neutre qui est représenté par la ligne neutre sur le dessin ci-dessous.



1.5.2. Dans l'entrefer

Les épanouissements polaires ne sont pas tout à fait concentriques à l'induit, l'entrefer est plus large sous les cornes polaires, les lignes de champs y sont moins serrées et l'induction décroît quant on va de l'axe des pôles vers les extrémités. Elle est nulle sur la ligne neutre.



2. Théorie générale

2.1. La force électromotrice ou la force contre-électromotrice

2.1.1. La F.E.M. ou F.C.E.M. à vide

2.1.1.1. Pour un conducteur

Nous savons que notre conducteur placé perpendiculairement au flux inducteur ne fournira une FEM ou FCEM que si le rotor est en rotation, donc qu'il balaie ce flux. Donc nous aurons une

FEM ou FCEM si nous avons une variation de flux donc un $\frac{d\phi}{dt}$. Le dt représente la variation

pendant un tour donc égale à $\frac{1}{n}$ avec n qui représente la vitesse de rotation en tour par seconde.

Si nous observons le parcours du conducteur pour un tour, nous remarquerons qu'il est soumis une fois au pôle nord et une fois au pôle sud donc que sur un cycle il est soumis deux fois à un flux maximum. On peut donc dire que $d\phi = 2 \times \phi_M$.

La FEM « E » ou FCEM « E' » pour un conducteur vaudra donc $E = 2 \times \phi_M \times n$ ou $E' = 2 \times \phi_M \times n$

2.1.1.2. Pour N conducteurs

Nous savons que notre machine est composée d'un nombre de petites bobines ou sections composées chacune d'un certain nombre de spires, elles mêmes formées de deux conducteurs actifs, nous savons également que notre machine se compose de deux voies d'enroulement, donc

que notre FEM ou FCEM n'est composée que par $\frac{N}{2}$ conducteurs puisque nous avons

systématiquement deux conducteurs actifs en parallèle. La FEM ou FCEM totale vaut donc

$E = \frac{N}{2} \times 2 \times \phi_M \times n$ ou $E' = \frac{N}{2} \times 2 \times \phi_M \times n$ ce qui donne après simplification :

$$E = n \times N \times \phi_M$$

$$E' = n \times N \times \phi_M$$

Avec :
E la FEM totale en volt
E' la FCEM totale en volt
n la vitesse de rotation en tr/sec
N le nombre de conducteur actif
 Φ_M le flux induit produit par l'inducteur en Wéber

Lors du fonctionnement à vide, nous pouvons dire que la tension de sortie est égale à la FEM ou FCEM totale. $U = E$ ou $U = E'$

2.1.2. La F.E.M. ou F.C.E.M. en charge

En charge, il se fait que la tension n'est plus égale à la FEM ou FCEM. Tentons d'expliquer ce phénomène. Nous pouvons expliquer la perte de tension grâce à trois causes très connues dans l'électrotechnique.

2.1.2.1. La résistance d'induit

Nous savons que l'enroulement induit par qui est produit la FEM « E » ou la FCEM « E' » est composé de conducteurs de cuivre donc que cette bobine a une certaine résistance, hors nous savons que toute résistance parcourue par un courant entraîne à ces bornes une chute de tension qui sera ohmique. Pour la génératrice, cette chute de tension doit donc être retirée à la FEM et le reste sera ce que l'on appelle la tension « U » débitée et utilisable. Par conséquent la tension débitée par une génératrice sera toujours plus faible que la FEM créée.

Pour le moteur, cette chute de tension doit donc être retirée à la tension du réseau et le reste sera ce que l'on appelle la FCEM « E' ». Par conséquent la tension du réseau sera toujours plus importante que la FCEM créée.

La résistance du bobinage n'est en réalité pas le seul élément de notre machine qui entraîne une chute de tension, les contacts balais-collecteur offrent eux aussi une résistance et donc également une chute de tension. La résistance totale de ces deux phénomènes sera reprise sous le terme résistance d'induit et se notera R_{AB} .

La loi d'ohm applicable à une génératrice devient : $U = E - (R_{AB} \times I')$

La loi d'ohm applicable à un moteur devient : $U = E' + (R_{AB} \times I')$

Avec I' qui représente le courant dans l'induit.

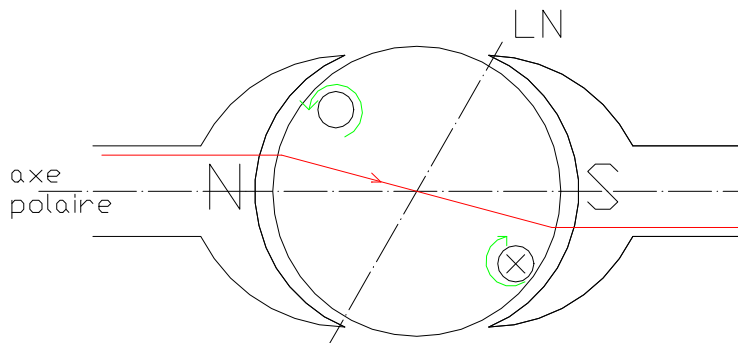
2.1.2.2. Le circuit magnétique

Nous savons que la FEM « E » ou la FCEM « E' » est créée par la combinaison d'un flux et d'une rotation, si l'un des deux varie, la FEM ou FCEM va elle aussi varier. Dans le fonctionnement de la machine, les fluctuations de la tension d'utilisation ne sont pas souhaitables et nous devons les compenser par l'ajustement de E ou de E' elle même ajustée en jouant sur le flux. Ce dernier sera modifié en jouant sur la valeur du courant d'excitation. Si le principe est aussi simple, nous savons que le flux ainsi généré va être conduit par le circuit magnétique et que ce dernier possède une limite de conduction du flux. Il arrivera donc un moment où ce dernier sera saturé. La conséquence sera que toutes augmentations de l'excitation ne sera plus liées à une augmentation de flux inducteur dans l'induit.

Lorsque cette machine se retrouve dans cette situation, il est devenu impossible de maintenir la constance de la tension « U » pour une génératrice ou la constance de la vitesse pour un moteur.

2.1.2.3. La réaction d'induit

Un autre phénomène apparaît encore dans la machine et vient contrecarrer la création de la FEM « E » ou FCEM « E' »; c'est la **REACTION D'INDUIT**. Nous savons qu'en charge notre induit est parcouru par le courant de charge, ce qui sous-entend qu'un courant circule dans les bobines de l'induit et que dès lors ces dernières vont être le siège de champ magnétique.



L'influence de ces derniers est appelé la réaction d'induit et va engendrer comme phénomène une déformation des lignes de flux inducteur ce qui va modifier l'influence du flux sur les conducteurs de l'induit et par conséquent modifier la FEM ou FCEM induite. Il est simple de comprendre que dans le cas d'une génératrice, la tension débitée sera d'autant plus faible que le courant de charge sera important. En effet, si le courant de charge augmente, le flux de réaction d'induit augmente et les déformations du flux inducteur s'amplifient. Ces déformations entraînent au droit de l'induit une diminution du flux inducteur et donc une diminution de la FEM et donc de la tension. Si ce phénomène est important, il en crée en cascade un autre tout aussi important car destructeur, il s'agit du problème de la commutation.

2.2. La commutation

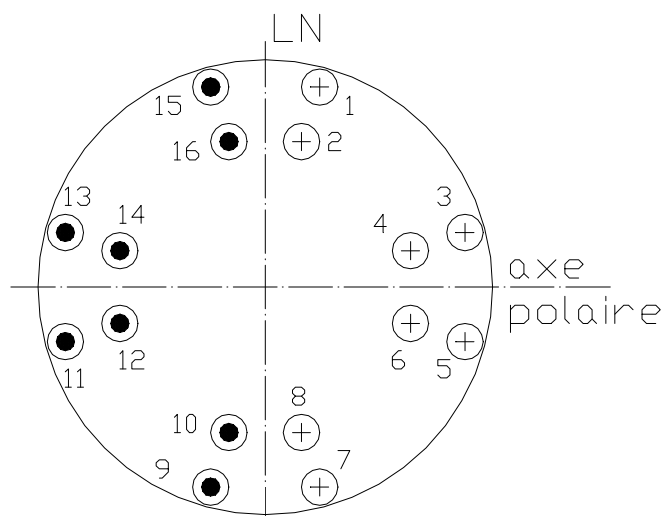
Pour rappel, « e » caractérise la FEM ou FCEM générée au droit d'un conducteur formant une spire. (pour rappel, il faut deux conducteurs « actifs » pour avoir une spire)

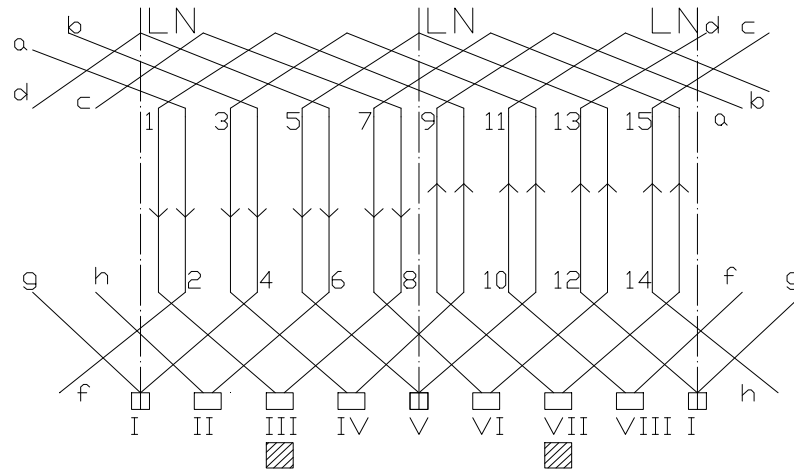
Comme le principe de la commutation est le même lors du fonctionnement générateur ou moteur, nous ne feront qu'une explication commune. Pour un générateur nous parlerons de FEM et pour un moteur nous parlerons de FCEM.

Nous savons que le bobinage d'induit est décomposé en une série de sections ou petites bobines qui sont placées dans des encoches formées sur le rotor. Ces bobines sont couplées entre elles via les lames du collecteur afin non seulement d'obtenir la tension souhaitée mais aussi afin de garder une tension continue et constante en amplitude. Le schéma ci-dessous nous montre une vue de la machine. Nous supposons que chaque section est composée d'un seul conducteur.

Jusqu'à présent, nous avons vu que l'on mettait en place une bobine par encoche. Le courant maximum étant limité par la capacité des balais à conduire ce dernier. Il est toutefois un autre élément constitutif de la machine qui va entraîner une autre limite pour la circulation du courant. Il est évident qu'il s'agit des conducteurs qui vont former les bobinages. En effet, tout conducteur possède une limite dans la conduction d'un courant électrique. Pour obtenir une valeur bien précise du courant maximum que peut supporter la machine, nous devons donc vérifier la capacité des balais, si c'est dernier ne peuvent reprendre la dite valeur, nous multiplierons les couples de balais et nous devons aussi vérifier que les conducteurs ont une section suffisante. En pratique, plutôt que d'augmenter la section on place ce que l'on appelle une seconde voie d'enroulement. Cette dernière consiste à placer en parallèle sur la première bobine une seconde identique. Nous avons ainsi deux bobines par encoches. Noter que l'on peut avoir plus de deux voies d'enroulement. Sur le dessin ci-dessous, les bobines 1 et 2 sont dans la même encoche.

2.2.1. Fonctionnement à vide





Analysons ensemble ce qui se passe au niveau des balais lors de la rotation, donc du déplacement des bobinages dans le flux mais surtout ici face à la ligne neutre. Analysons le nombre de « e » obtenu entre la lame 3 et la lame 7. Nous voyons que les bobines 1,10,3,12,5,14,7 et 16 sont toutes soumises à un flux et que leur FEM ou FCEM s'additionnent car elles sont toutes dans le même sens. Nous venons de voir l'état dans la première voie d'enroulement, voyons ce qui se passe dans la seconde. Nous remarquons que les bobines 8,15,6,13,4,11,2 et 9 sont aussi soumises à un flux et que leurs FEM ou FCEM s'additionnent également car elles ont toutes le même sens. On peut donc conclure en disant que nous avons entre les balais une FEM ou FCEM égale à la somme de 8 « e ». Nous pouvons encore dire pour être exact que les petits « e » n'ont pas tous la même amplitude car ils dépendent de la position dans le flux des bobines qui les génèrent .

Comme chaque voie d'enroulement possède une bobine identique dans chaque encoche, cela suppose que si nous avons la somme de huit « e » provenant de huit bobines placées dans huit encoches distinctes, nous ne pouvons avoir que deux FEM ou FCEM totales égales sur chaque voie d'enroulement. Cette constatation nous permet de dire que la mise en parallèle des deux voies d'enroulement est techniquement correcte, aucune des deux ne travaillera en récepteur sur l'autre.

Analysons le potentiel entre les lames 4 et 8. Nous obtenons donc la mise en série des bobines 3,12,5,14,7,16,9,2 pour la première voie et 11,4,13,6,15,8,10,1 pour la seconde. Dans cette position, nous remarquons que pour la première voie les bobines 9 et 2 nous donnent une FEM ou FCEM inverse de celle dans les autres bobines, ce qui sous-entend que la FEM ou FCEM de 9 va s'opposer exactement à la FEM ou FCEM de 16 et que la FEM ou FCEM de 2 elle s'oppose à la FEM ou FCEM de 7. Par conséquent, il ne me reste plus entre mes balais 4 et 8 que la somme de quatre « e ». Une analyse identique pour la seconde voie d'enroulement nous montre que la FEM ou FCEM de 10 s'oppose à la FEM ou FCEM de 15 et que la FEM ou FCEM de 1 s'oppose à la FEM ou FCEM de 8 ce qui entraîne également une FEM ou FCEM totale égale à une somme de quatre « e ».

Nous pouvons tirer comme conclusions que nous avons entre deux lames une différence de potentiel de quatre « e » qui pourra entraîner des arcs lors de la commutation entre ces lames. Regardons ce qui se passe lorsque nos lames vont commuter, les bobines 1 et 2, de même que les bobines 9 et 10 vont se placer sur la ligne neutre. Sur cette dernière, la FEM ou FCEM produite par les bobines 9 et 10 sera nulle et par conséquent nous aurons pour les lames 3 et 7 une FEM ou FCEM égale à la somme de huit « e » dont deux seront nulles donc seul 6 « e » seront présentes. De même, les lames 4 et 8 auront une FEM ou FCEM égale à 6 « e ». Je peux donc conclure en disant que la différence de potentiel entre les lames 3 – 4 et 7 – 8 est nulle et que le problème de commutation est inexistant.

Une remarque que l'on pourrait se faire est de dire que le potentiel de huit « e » est plus grand que le potentiel de six « e » donc que la tension aux bornes de mes balais n'est pas constante. Il ne faut pas oublier que lorsque mon rotor tourne, les bobines sont soumises à des densités de flux qui varient le long des épanouissements polaires. Il se fait que lorsque je perds deux « e » parce que les bobines se trouvent sur la ligne neutre, deux autres sont soumises à une densité de flux plus importante. Elles produisent donc une FEM ou FCEM plus grande, ce qui compense exactement la non génération de certaines bobines.

Notre schéma ne comporte que 8 lames, donc à priori que 4 bobines. En réalité, il va de soit que nous avons beaucoup plus de bobines et donc de lames au collecteur. N'oublions pas non plus que les bobines qui passent par une FEM ou FCEM nulle ne le font pas de façon instantanée. En effet, elles arrivent petit à petit à une FEM ou FCEM nulle car lors de leur rotation, elles sont soumises à une

densité de flux de plus en plus faibles pour arriver à un flux nulle sur la ligne neutre. Notons encore que suite à la forme des cornes polaires, les bobines ne produisent plus de FEM ou FCEM un rien avant d'être sur la ligne neutre.

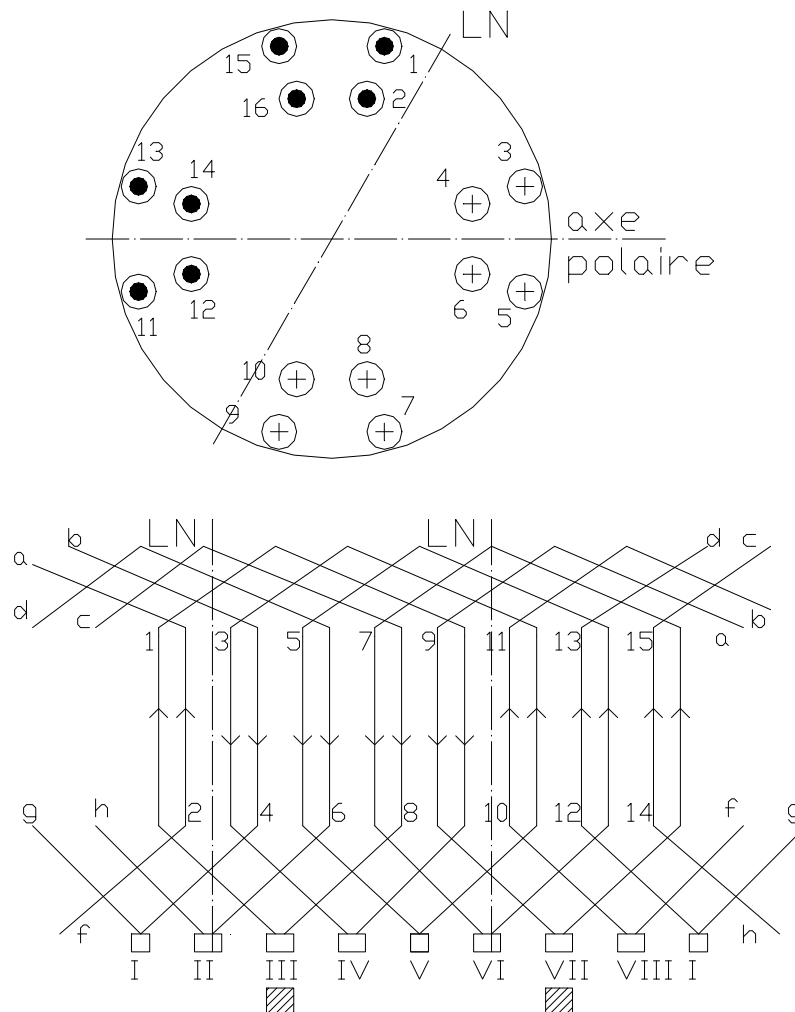
Noter encore que si nous avons dans notre cas parlé de deux voies d'enroulement, vous pouvez trouver des machines ayant un nombre plus important de voies d'enroulement. Cette augmentation ne modifiera en rien le raisonnement tenu ci-dessus.

Pour ce qui est du nombre d'encoches et donc du nombre de sections ou de bobines, rappelez-vous que plus il y aura de bobines et plus on couvrira les pôles ce qui aura pour avantage de rendre la FEM ou la FCEM plus constante. Nous réaliserons ainsi une amélioration du facteur d'ondulation de notre FEM ou FCEM.

2.2.2. Fonctionnement en charge

Nous savons que en charge, nous devons tenir compte des chutes de tension ohmique, de la saturation du circuit magnétique et du phénomène de réaction d'induit. Pour les deux premiers, cela n'aura aucune répercussion sur la problématique de la commutation. Pour le troisième par contre, il en sera tout autrement. Noter que la déformation du flux inducteur engendre une rotation de la ligne neutre car cette dernière est perpendiculaire aux lignes de flux. Supposons que les conducteurs qui se trouvent à proximité de la ligne neutre perpendiculaire à l'axe des pôles à vide continuent à engendrer une FEM ou FCEM, suite à la déformation du flux inducteur. Cela signifie que le potentiel entre deux lames va varier et que dès lors nous allons obtenir une différence de potentiel entre les lames et un risque d'arc lors de la commutation.

Reprenons le raisonnement que nous avons tenu lors du fonctionnement à vide.

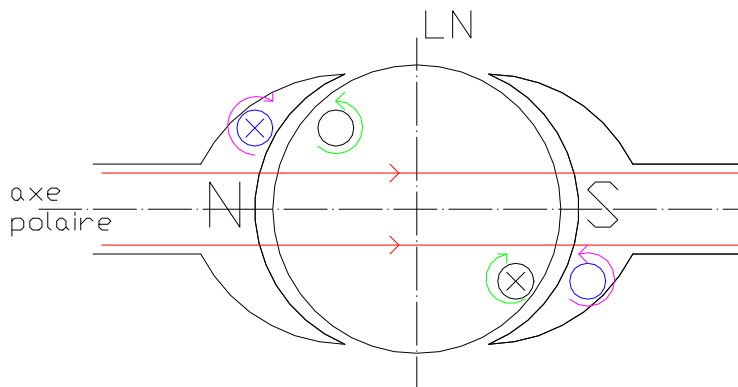


Supposons que la ligne neutre est déviée de telle sorte qu'elle se positionne entre 2 – 3 et 10 – 11. Cela sous-entend sur mon développement panoramique que le sens de la FEM ou FCEM dans 1 et 2 de même que dans 9 et 10 sont inversés du fait qu'il se trouve de l'autre côté de la ligne neutre. La FEM ou FCEM est donc la somme des « e » des conducteurs 1, 10, 3, 12, 5, 14, 7 et 16 dont les conducteurs 1 et 10 ont une « e » inverse, la FEM ou FCEM totale se ramène à 4 « e ». De même pour la deuxième voie d'enroulement avec les conducteurs 8, 15, 6, 13, 4, 11, 2 et 9 dont les conducteurs 2 et 9 ont une FEM ou FCEM inverse, la FEM ou FCEM totale se ramène également à 4 « e ». Une première remarque est que la FEM ou FCEM totale sera plus faible sous l'effet de la réaction d'induit.

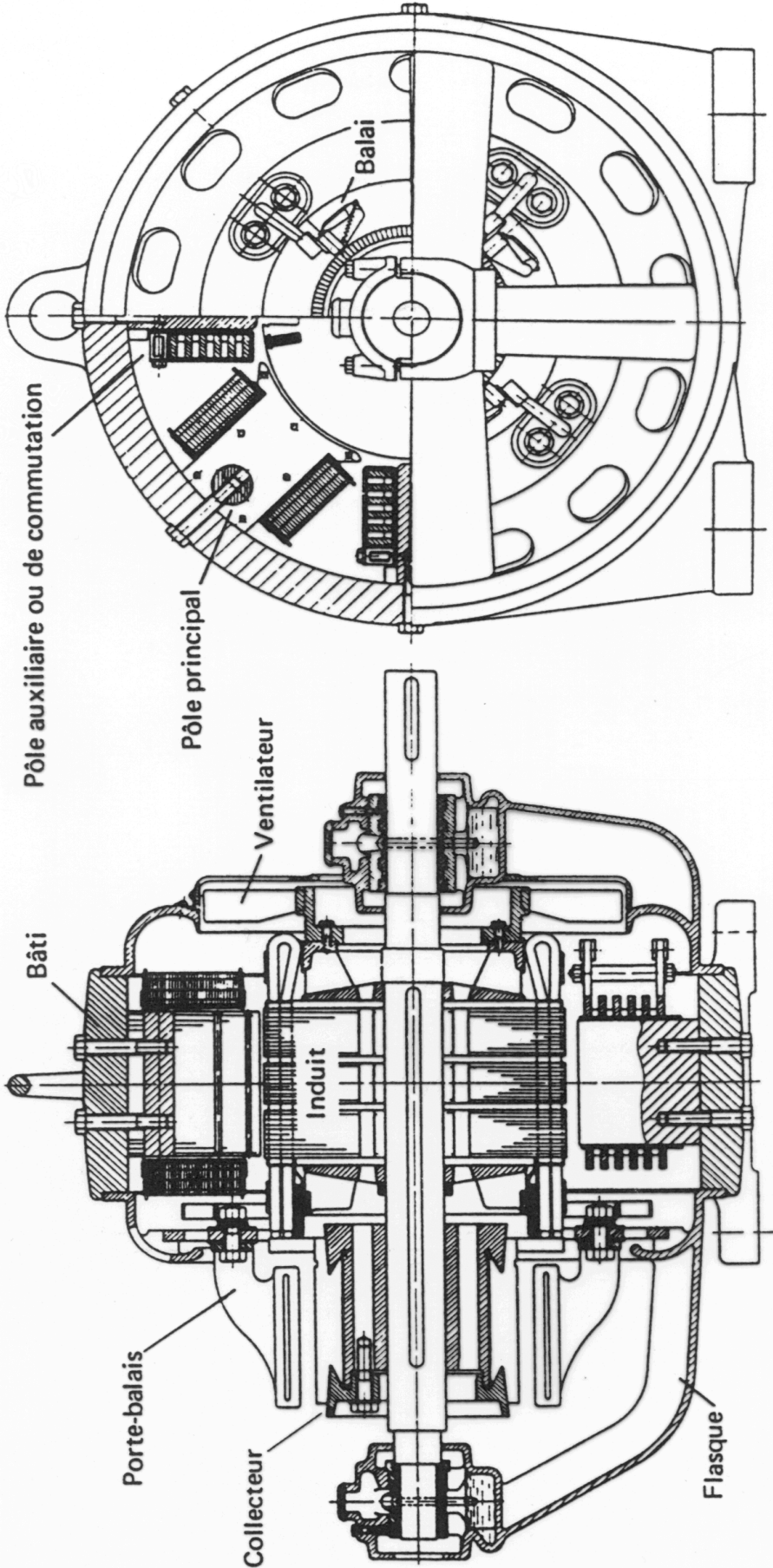
Nous remarquons donc que notre FEM ou FCEM ne vaut déjà plus 8 « e » mais 4 « e ». Regardons maintenant ce qui se passe sur les lames conjointes 4 et 8. Les conducteurs 3, 12, 5, 14, 7, 16, 9 et 2 nous donnent tous une « e » qui sont toutes dans le même sens donc nous avons 8 « e ». Pour la seconde voie d'enroulement, nous avons les conducteurs 11, 4, 13, 6, 15, 8, 10 et 1 qui nous donnent aussi 8 « e ».

Si une rotation intervient, cela veut dire que les conducteurs 3, 4, 11 et 12 vont se trouver sur la ligne neutre et donc engendrer une FEM ou FCEM nulle. Ce qui veut dire que la FEM ou FCEM sur les lames 3 et 7 va se ramener à 2 « e » et la FEM ou la FCEM sur les lames 4 et 8 à 6 « e ». En conclusion, nous obtenons une différence de potentiel de 4 « e » entre deux lames contigües lors de la commutation, ce qui ne peut engendrer que des arcs avec risque d'un flash au collecteur.

La solution apportée est simple, mais pas parfaite à 100%. Nous placerons une bobine du même type que l'induit mais bobinée de telle sorte que lorsqu'elle est parcourue par le même courant que l'induit elle crée des champs magnétiques identiques aux champs magnétiques générant la réaction d'induit mais de sens opposé. Cette bobine est la bobine de compensation, elle est câblée en série avec l'induit et est placée dans les épanouissements polaires du stator. Notons que ces enroulements ne seront efficaces qu'à la condition que le circuit magnétique ne soit pas saturé, une fois la saturation atteinte, le flux de réaction d'induit va prendre de plus en plus d'importance et donc entraîner une dérive de la ligne neutre avec les problèmes que nous venons de voir ci-dessus.



Ci-joint une illustration des enroulements auxiliaires ou de commutation.



3. Les différents types de machine courant continu

3.1. Caractéristiques des enroulements communs

La machine est constituée au rotor par un enroulement d'induit. Ce dernier sera traversé par le courant d'induit ou de charge qui peut être selon les machines très élevé. On peut donc dire que cet enroulement sera formé de conducteurs de grosse section mais que la bobine qu'ils forment comportera peu de spires.

Nous trouvons également un enroulement de compensation qui se placera en série avec l'enroulement d'induit afin qu'il soit lui aussi parcouru par le courant d'induit ou de charge. Par un raisonnement analogue, on peut dire que cet enroulement est formé de conducteurs de section élevée et que la bobine ainsi formée comporte peu de spires.

3.2. La machine à excitation indépendante

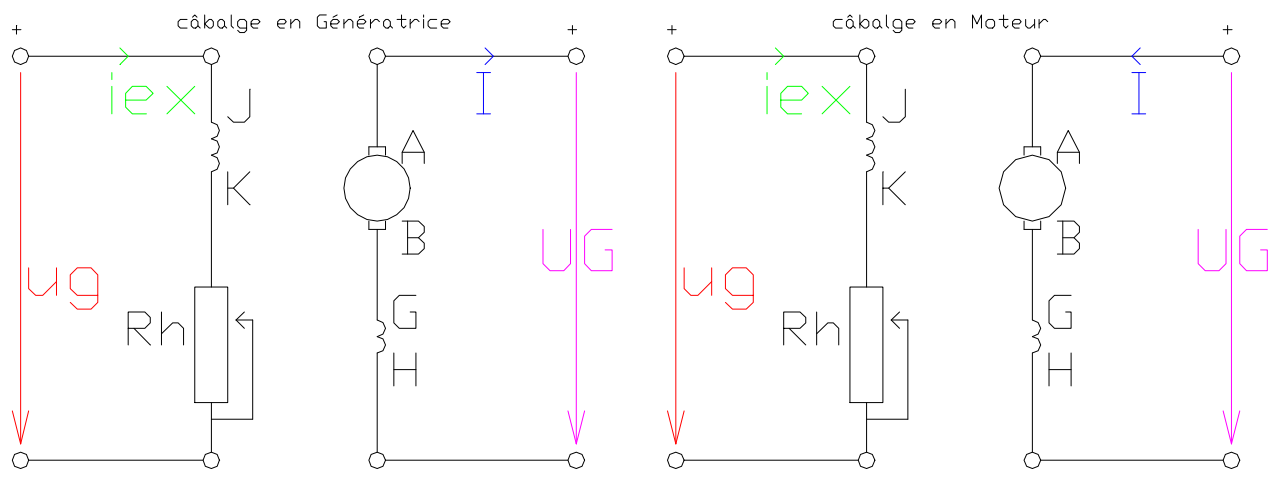
3.2.1. Principe

Dans le cas de cette machine, il faut absolument une source extérieure de tension continue afin de réaliser l'excitation. Comme le dit son nom, l'enroulement inducteur soit le stator est alimenté par une source de tension extérieure, ce qui a pour avantage de garder l'excitation constante quelles que soient les variations pouvant intervenir au sein de la machine.

3.2.2. Caractéristiques de l'enroulement d'excitation

Nous trouverons un enroulement d'excitation qui sera couplé en série avec un rhéostat de champ qui a pour utilité de permettre la variation du courant d'excitation. Cette ensemble sera placé sur une source de tension continue indépendante mais de valeur fixe. Le courant étant limité dans ce cas par le rhéostat, le courant dit d'excitation est de faible valeur ce qui permet d'écrire que les conducteurs sont de faible section et que la bobine comporte un nombre élevé de spires.

3.2.3. Schéma de câblage



A-B : représente l'induit de la machine (enroulement induit, collecteur et balais)

G-H : représente l'enroulement de compensation

J-K : représente l'enroulement indépendant ou l'enroulement inducteur ou encore l'enroulement d'excitation

Rh : représente le rhéostat de champ.

3.3. La machine auto-excitatrices

3.3.1. La machine shunt

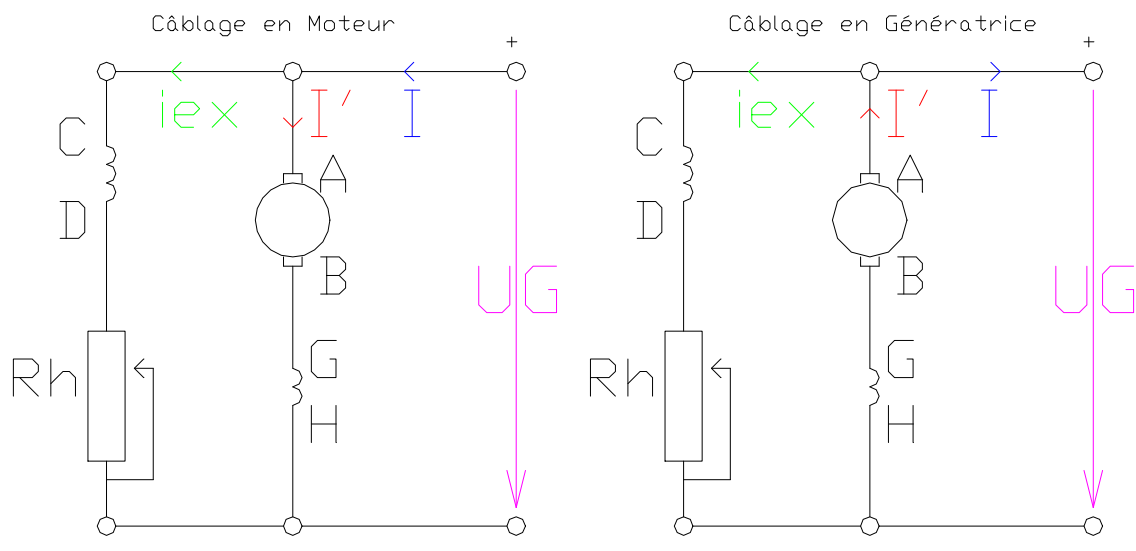
3.3.1.1.Principe

Dans le cas de cette machine, l'alimentation de l'enroulement inducteur se fait par branchement en parallèle sur l'induit. C'est donc l'induit qui va générer la tension du circuit inducteur via la FEM ou la FCEM. L'inconvénient est que notre enroulement inducteur est donc soumis à la moindre variation pouvant intervenir dans la machine.

3.3.1.2.Caractéristiques de l'enroulement d'excitation

Nous trouverons un enroulement d'excitation qui sera couplé en série avec un rhéostat de champ qui a pour utilité de permettre la variation du courant d'excitation. Cet ensemble sera placé en parallèle sur l'induit afin d'être soumis au potentiel disponible aux bornes de l'induit de la machine.

3.3.1.3.Schéma de câblage



A-B : représente l'induit de la machine (enroulement induit, collecteur et balais)

G-H : représente l'enroulement de compensation

C-D : représente l'enroulement shunt ou l'enroulement inducteur ou encore l'enroulement d'excitation

Rh : représente le rhéostat de champ.

3.3.2. La machine série

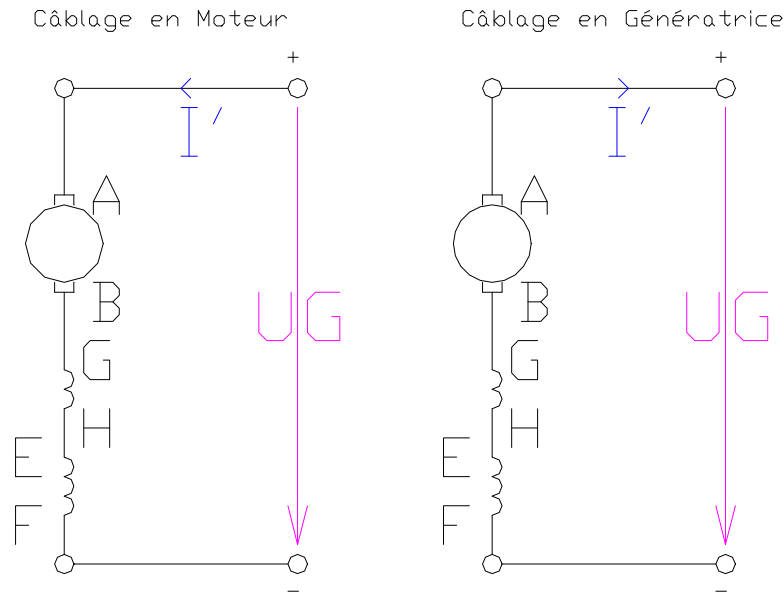
3.3.2.1.Principe

Dans le cas de cette machine, l'enroulement d'excitation n'est plus vraiment alimenté par une source de tension mais plutôt par un courant. En effet, dans le cas de la machine série, l'enroulement inducteur est directement parcouru par le courant de charge traversant l'induit ce qui a pour avantage, mais attention, dans une certaine mesure, d'obtenir une auto régulation de notre machine.

3.3.2.2. Caractéristiques de l'enroulement d'excitation

Nous trouverons un enroulement d'excitation qui sera couplé en série avec l'enroulement de compensation et l'enroulement d'induit et sera par conséquent parcouru par le courant de charge. La conclusion est donc similaire en ce qui concerne les enroulements cités ci-dessus, à savoir que les conducteurs de l'enroulement série auront une grosse section mais que la bobine comportera peu de spires.

3.3.2.3. Schéma de câblage



A-B : représente l'induit de la machine (enroulement induit, collecteur et balais)

G-H : représente l'enroulement de compensation

E-F : représente l'enroulement série ou l'enroulement inducteur ou encore l'enroulement d'excitation

3.3.3. La machine compound

3.3.3.1. Principe

Dans le cas de cette machine, nous trouvons deux enroulements d'excitation, un en série avec l'induit et un second en parallèle avec l'enroulement d'induit. J'attire ici l'attention sur le fait que les deux enroulements sont parcourus par des courants tout à fait différents.

L'enroulement shunt sera parcouru par un petit courant « i ». Ce dernier sera un pourcentage du courant de charge « I » de la machine.

L'enroulement série sera lui parcouru par le courant d'induit « I' ». Avec $I = I' + i$.

Cette machine a l'avantage d'être la machine qui s'auto régule pour autant que le câblage des enroulements soit exacte. Cette remarque se lie au sens du passage du courant en fonction du sens de bobinage des enroulements inducteurs.

3.3.3.2. Caractéristiques des enroulements d'excitation

Nous trouverons deux enroulements d'excitation, le premier est couplé en série avec l'enroulement de compensation et l'enroulement d'induit et sera par conséquent parcouru par le courant d'induit. En conclusion les conducteurs de l'enroulement série auront une grosse section mais la bobine comportera peu de spires.

Le second est l'enroulement shunt qui lui est câblé en parallèle sur l'induit et parcouru par « i » de faible valeur. Dans ce cas on peut dire que les conducteurs de l'enroulement shunt seront de faible section mais que la bobine comportera un nombre élevé de spires.

On peut encore préciser que le couplage compound peut offrir quelques variantes en regard au couplage des enroulements d'excitation.

En effet, nous pouvons trouver une machine compound câblée en long shunt ou en court shunt. La différence réside en la mise en parallèle de l'enroulement shunt en amont ou en aval sur l'enroulement série.

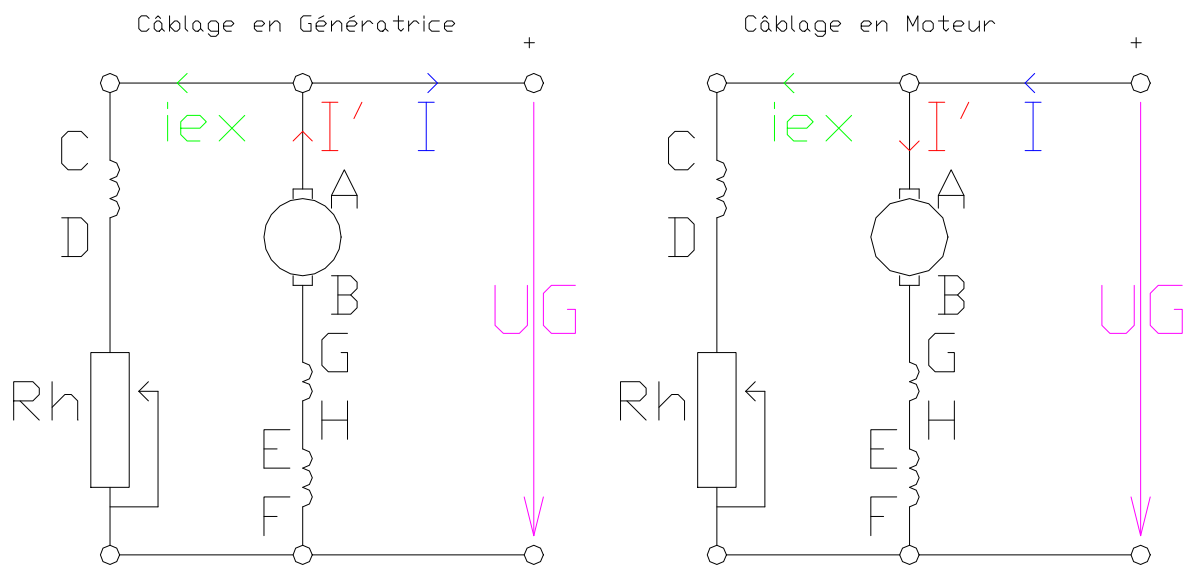
Comme nous avons deux enroulements d'excitation, nous pouvons conclure que ces derniers jouent un rôle dans la génération du flux inducteur. Deux cas de figures peuvent se présenter, la compound dite hyper compound ou l'enroulement série possède un excès de spires.

La seconde est la compound dite hypo compound ou l'enroulement série possède un manque de spires.

Un autre cas de figure mais qui n'offre aucun avantage, il s'agit du résultat d'une erreur de câblage, le fonctionnement est alors discordant. Dans ce cas, les flux générés par les enroulements série et shunt se détruisent l'un l'autre au lieu de se compléter. L'erreur provient de l'inversion d'un des enroulements d'excitation.

3.3.3.3. Schéma de câblage

Long shunt



A-B : représente l'induit de la machine (enroulement induit, collecteur et balais)

G-H : représente l'enroulement de compensation

E-F : représente l'enroulement série ou l'enroulement inducteur ou encore l'enroulement d'excitation

C-D : représente l'enroulement shunt ou l'enroulement inducteur ou encore l'enroulement d'excitation

Rh : représente de rhéostat de champ.

Court shunt

