

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou**



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Électrotechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

*De MASTER ACADEMIQUE EN ELECTROTECHNIQUE
OPTION : MACHINES ELECTRIQUES*

Thème

*Calcul électromagnétique d'une génératrice
synchrone à pôles saillants triphasée 15 KVA*

Proposé par : ELECTRO-INDUSTRIES

EX ENEL

Présenté par :

- **Mr : HAFRAOUI HAMID**
- **Mr : KAHEL RAFIK**

Dirigé par :

M^r : R. KHALDI

Promotion 2013

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont aidé à surmonter toutes les difficultés rencontrées tout au long de mon parcours scolaire et universitaire, ainsi qu'à mes frères et mes sœurs, à tous les membres de la grande famille HAFRAOUI, ainsi qu'à l'ensemble de mes amis et mes enseignants de ma première scolarité à ce jour.

Recevez tous ma sincère gratitude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont aidé à surmonter toutes les difficultés rencontrées tout au long de mon parcours scolaire et universitaire, ainsi qu'à mes frères et mes sœurs, à tous les membres de la grande famille KAHIL, ainsi qu'à l'ensemble de mes amis et mes enseignants de ma première scolarité à ce jour.

Recevez tous ma sincère gratitude.

Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés à mener à bien ce modeste travail, en particulier l'encadreur de notre projet de fin d'études monsieur R.KHALDI Maître assistant classe A à l'U.M.M.TO. Ainsi que Mr Dj. BENTAHA chef de département du l'électro-industries de leurs conseils.

Nos vifs remerciements vont aux membres de jury, qui nous feront l'honneur de juger ce travail.

Et à tous les enseignants et les membres de la bibliothèque de l'université Mouloud Mammeri qui nous on prodiguer ce précieux savoir le long de notre cursus universitaire.

Introductiongénéra.....	1
Chapitre I : généralité sur la machine synchrone	
I-1 Modes de fonctionnement de la machine synchrone.....	4
I-1-1- Fonctionnement en compensateur synchrone.....	4
I-1-2- Fonctionnement en moteur	4
I-1-3- Fonctionnement en génératrice.....	4
I-2- Modes d'excitation de la machines synchrones.....	5
I-2-1- Excitation interne	5
I-2-2- Excitation externe alternateur à bagues et balais.....	5
I-3- Classification des machines synchrones	6
I-3-1- Machines à aiment.....	6
I-3-2- Machines à pôles saillants	7
I-3-3- Machines à pôles lisses.....	7
I-4- Constitution de la machine synchrone	8
I-4-1- Stator.....	8
I-4-2- Rotor	10
I-4-3- Entrefer.....	10
I-5- Synchronisme.....	10
I-6- Schémas.....	11
I-6-1 Répartition du champ magnétique dans l'entrefer	11
I-6-2- Symboles.....	11
I-7- Principe de fonctionnement de l'alternateur.....	12
I-7-1- Fonctionnement d'un alternateur monophasé.....	12
I-7-2- Fonctionnement d'un alternateur triphasé.....	15
I-8- Caractéristique interne de la machine synchrone.....	17
I-8-1- Caractéristique à vide d'une machine synchrone	17
I-8-2- Caractéristique en court-circuit.....	17
I-9- Modèles de la machine synchrone	18
I-9-1- Modèle de Behn-Eschenburg	18
I-9-2- Modèle de Potier	20
I-9-3- Modèle de blondel.....	21
Conclusion	25
Chapitre II : calcul électromagnétique	
Introduction.....	26
II-1- Stator.....	26
II-1-1- la puissance électromagnétique	26
II-1-2- Force électromotrice.....	27
II-1-3- calcul de l'enroulement.....	27
II-1-3-a- Coefficient de l'enroulement.....	27
II-1-3-b- Nombre de conducteur par encoche.....	30
II-1-4- Induction magnétique dans l'entrefer	31
II-1-5- Charge linéaire.....	31
II-1-6- Flux utile par pole.....	32
II-1-7- Induction maximale dans la dent statorique.....	32
II-1-8- Induction minimale dans la dent statorique	32
II-1-9- Induction magnétique dans le dos du stator.....	33

Sommaire

II-1-10- Section de l'encoche statorique	33
II-1-11- Section occupée par l'isolation.....	33
II-1-12- La section utile de l'encoche.....	34
II-1-13- Coefficient de remplissage des encoches statorique	34
II-2- Rotor	34
II-2-1- Induction dans le pole.....	34
II-2-2- Induction dans le dos rotorique	35
Tableau I : résultats de calcul.....	35
Conclusion	36

Chapitre II Calcul du circuit magnétique et des paramètres électriques

Introduction.....	37
III-1- Circuit magnétique statorique	37
III-1-1- La FMM dans la culasse du stator	37
III-1-2- La FMM dans la dent du stator	37
III-2- Circuit magnétique rotorique.....	38
III-2-1- La FMM dans le pôle du rotor	38
III-2-1- La FMM dans le dos du rotor.....	41
III-2-1-La FMM dans le dos du rotor.....	41
III-3- Entrefer	41
III-3-1- La FMM dans l'entrefer	41
III-3-1-1- Coefficient d'entrefer.....	41
III-4- La FMM totale.....	42
III-5- Coefficient de saturation magnétique du stator.....	43
III-6- Le coefficient de saturation de la machine.....	43
III-7- Courant magnétisant.....	43
III-8- Valeurs réduites des FMM et des flux.....	44
III-9- Résultats des inductions et les champs magnétique sur FEMM.....	49
III-10- Calcul des résistances actives et inductives de fuites de l'enroulement.....	54
III-11- calcul des paramètres des enroulements de la machine.....	58
III-12- Tableau de résultats.....	67
Conclusion.....	68

Chapitre IV : calcul des pertes et de rendement

IV-1- Pertes magnétiques	69
IV-1-1- Pertes dans les dents statorique.....	70
IV-1-2- Pertes dans la culasse statorique	70
IV-2-1- Pertes par effet joules statoriques	71
IV-2-2- Pertes par effet joules rotoriques.....	72
IV-3- Pertes mécaniques	72
IV-4- La somme des Pertes totale	73
IV-5- calcul de rendement.....	73
IV-6- Tableau des résultats.....	74
conclusion	74
Conclusion générale.....	75
Annexe.....	77
Bibliographie.....	85

Mots clé

Calcul électromagnétique génératrice synchrone

Génératrice synchrone

Dimensionnement génératrice synchrone

Généralité su la machine synchrone

Caractéristique magnétique d'une génératrice synchrone

Etude par FEMM de génératrice synchrone

Introduction générale

Introduction générale

Les machines électriques sont devenues très importantes ces dernières années à cause du développement technologique qui dépend de l'énergie électrique. Cette énergie est produite par la machine synchrone, telle que les alternateurs ou les génératrices synchrones. Ces dernières sont caractérisées par la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les machines synchrones peuvent aussi être utilisées comme moteurs ou compensateurs synchrones.

La construction de ces machines est devenue une spécialité dans le domaine de l'électrotechnique et se fait avec des étapes précises avec beaucoup de calculs et de vérifications.

Notre travail consiste à calculer une machine synchrone triphasée à pôles saillants de 15 kVA, par la méthode de calcul de machines classique [11] [14]. Cela, afin de prévoir théoriquement ces caractéristiques de fonctionnement. Cette dernière nous a été proposée par l'entreprise ELECTRO-INDUSTRIE (ex ENEL) d'AZAZGA.

Pour entamer notre travail, nous partons des dimensions géométriques et électriques. Pour ce faire nous répartissons notre travail comme suit :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les machines synchrones et en particulier les génératrices synchrones.

Le deuxième chapitre est réservé aux calculs électromagnétiques de la machine.

Le troisième chapitre est dédié aux calculs des forces magnétomotrices du circuit magnétique et aux caractéristiques de cette machine par méthode classique et par

élément fini on exploitant le logiciel de simulation FEMM. Puis, nous déduisons les paramètres électriques et les constantes de temps du régime transitoire.

Le quatrième et le dernier chapitre est prévu aux calculs des pertes et du rendement de la machine synchrone.

Afin de mener à bien les calculs, nous utilisons le logiciel **mathcad14.0**, qui est adapté aux calculs de construction des machines électriques.

A la fin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Généralité sur la machine synchrone

Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales où trapézoïdales. Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

La machine synchrone présente $2p$ pôles magnétiques au rotor ainsi qu'au stator. p représente le nombre de paires de pôles (p pôles nord et p pôles sud). La vitesse de rotation N du rotor dépend directement de la fréquence f de la tension d'alimentation, on parle de vitesse de synchronisme.

Si la fréquence $f = 50$ Hz, les vitesses synchrones possibles sont :

p	n [tr/s]	n [tr/min]
1	50	3000
2	25	1500
3	16.67	1000
4	12.5	750

Tableau I-1

I-Modes de fonctionnement de la machine synchrone : [1][3]

I-1-1- Fonctionnement en compensateur synchrone :

On appelle compensateur synchrone une machine synchrone tournant à vide dont la seule fonction est de consommer ou de fournir de la puissance réactive au réseau. C'est en ajustant le courant d'excitation qu'il est possible de fournir de l'énergie réactive (la machine est surexcitée) ou de consommer de l'énergie (si la machine est sous excitée). De telles machines sont utilisées notamment pour fournir de l'énergie réactive lorsque le réseau est chargé, et pour absorber l'énergie réactive générée par les lignes lorsque la consommation est faible.

I-1-2-Fonctionnement en moteur :

Si les trois enroulements sont alimentés par un système de tensions triphasées de pulsation w , ils créent au centre un champ tournant B_i à la vitesse $W = \Omega$. Un aimant placé au centre, est attiré par ce champ et tourne exactement à la même vitesse Ω ,

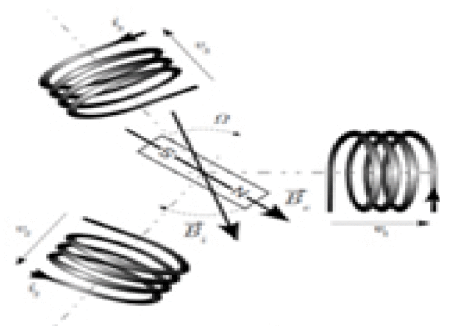


Fig.-I-b

Schéma d'un moteur synchrone

à condition d'entraîner l'aimant à la vitesse de synchronisme pour qu'il s'accroche

I-1-3-Fonctionnement en génératrice (alternateur) :

Généralement la génératrice synchrone à un rotor à pôles saillants on excite ce rotor et on le fait tourner sont champ magnétique crée ou niveau du stator des FEM a leur tour crée un champ statorique qui va tourner à la vitesse du rotor d'où le nom de la machine synchrone.

I-2-Modes d'excitation de la machines synchrones : [2]

I-2-1- Excitation interne (alternateur auto-excité) :

Les puissances d'excitation des alternateurs de forte puissance sont telles (plusieurs mégawatts) qu'il est intéressant d'utiliser la puissance mécanique disponible sur l'arbre pour fournir le courant d'excitation. On utilise alors un système d'excitation monté sur le même arbre que le rotor de l'alternateur Figure-I-1-a-. De plus, il est alors possible de supprimer les contacts glissants nécessaires à l'alimentation de l'excitation : L'excitatrice est en fait un alternateur inversé où le circuit d'excitation est placé sur le stator. Le rotor comporte un système d'enroulement triphasé dont les courants sont redressés afin d'alimenter l'inducteur de l'alternateur.

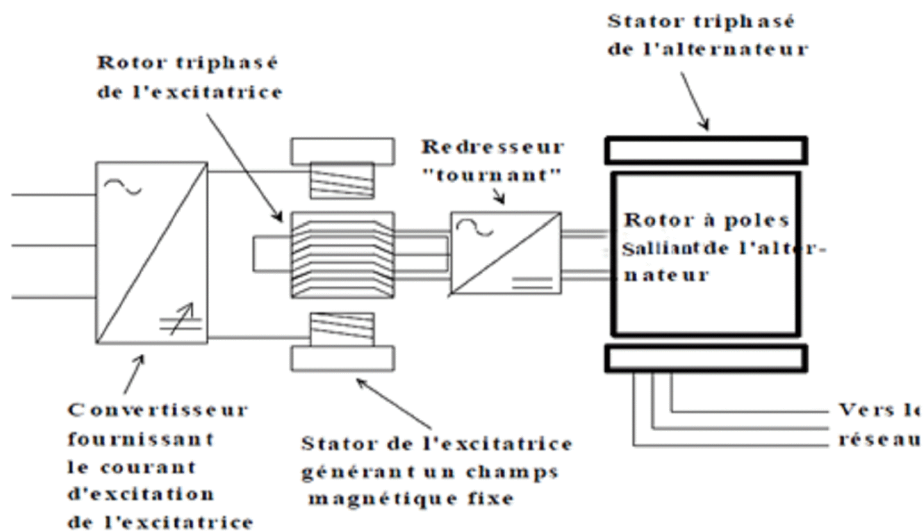


Figure-I-1-a- Alternateur auto excité

I-2-2- Excitation externe alternateur à bagues et balais :

Une source continue extérieure fournit à la machine l'énergie au rotor Fig. -I-1-b (Par l'intermédiaire de balais frottant sur des bagues isolées).

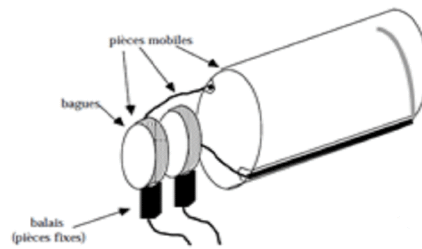


Fig. -I-1-b

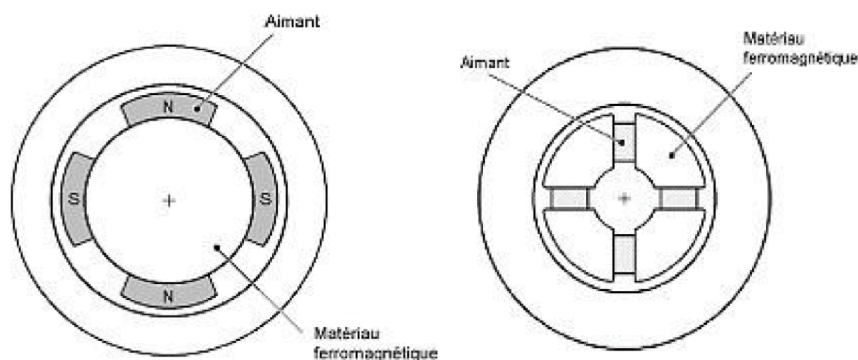
Excitation du rotor d'une machine synchrone

I-3-Classification des machines synchrones : [4]

On peut classer les machines synchrones d'après le mode de construction utilisé pour la fabrication des rotors ou l'induit ; mais quelque soit le type utilisé, sa vitesse est constante ($N = \text{Constante}$). Il existe trois grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimants permanent.

I-3-1- Machines à aiment :

Le rotor est feuilleté et comporte des aimants permanents, soit montés en surface soit enterrés.



**Machines synchrone à aiment
Montés en surface**

**Machines synchrone à aiment
enterrés**

Fig. I-2-a- machine à aiment permanent

I-3-2- Machines à pôles saillants :

Elles utilisent des pièces polaires sur une culasse avec des enroulements d'excitation constituées par des bobines Fig. I-2-b, et ont un entrefer variable comme aussi ont un diamètre plus grand que sa longueur. On utilise ce type de machines dans les centrales hydrauliques, le rotor comporte $2p$ pôles,

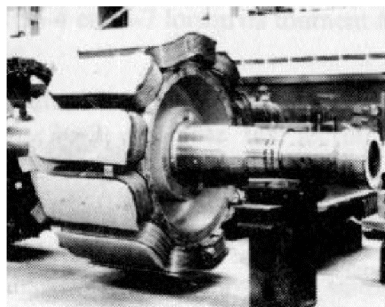


Fig. I-2-b- rotor à pôle saillant

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).

I-3-3- Machines à pôles lisses (entrefer constant) :

A la différence des précédents, ces machines ont un entrefer constant, l'enroulement d'excitation étant placé dans des rainures longitudinales usinées sur un cylindre d'acier massif Fig. I-2-c. 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.

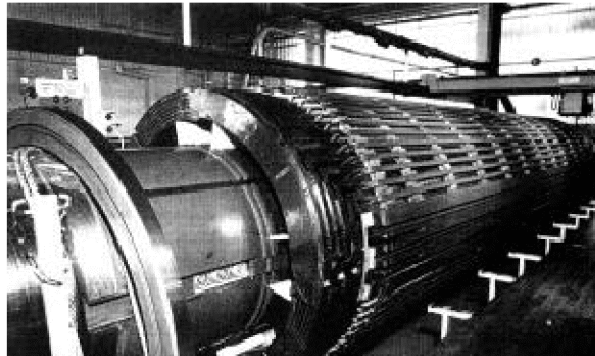


Fig. I-2-c- rotor à pôles lisses

I-4- Constitution de la machine synchrone : [5]

La machine synchrone comporte essentiellement :

I-4-1-Stator (l'induit) :

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur synchrone. Il est fait à partir d'un empilement de tôles laminées et électriquement isolées entre elles ce qui prévient un phénomène d'échauffement. Une fois assemblé, le stator ressemble à un cylindre creux avec des encoches à l'intérieur. Ces encoches servent à accueillir des enroulements, qui sont faits à partir d'un circuit de bobines connectées ensemble. Le conducteur électrique, le nombre de tours de fil ainsi que la façon dont les bobines sont raccordées et disposées sont des facteurs déterminants pour le fonctionnement de la machine. Le stator d'une machine synchrone est identique au stator d'une machine asynchrone. Lorsque le rotor tourne, chaque bobine est soumise à un flux magnétique variable et il se crée alors une tension alternative sinusoïdale $e(t)$ aux bornes de chaque enroulement du stator. Selon LENZ

$$e(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$$

On montre que la tension $e(t)$ a pour valeur efficace (E) :

$$E = 4 \cdot K_f \cdot f \cdot k_d \cdot k_r \cdot k_i \cdot w_1 \cdot \Phi$$

Avec

E : la tension induite en [V]

k_d : coefficient de distribution

k_r : coefficient de raccourcissement

k_i : coefficient d'inclinaison

w_1 : Nombre de spires en série par phase

f : la fréquence en [Hz]

Φ : flux maximal pour une spire dans l'entrefer [Wb]

Et le stator se compose principalement :

- **de la carcasse,**
- **paliers-flasques** : leur fonction principal est évidemment de supporter et guider l'arbre ; de plus les flasques jouent le rôle de protection de l'ensemble de la machine.
- **le capot** : protégeant le ventilateur et canalise l'air pour le diriger vers l'intérieur.
- **Fixation et levage**
- **Supports de la carcasse,**
- **Culasse** : canaliser le flux entre les pôles induits consécutives ; d'où le choix du matériau et de la section
- **Balais et porte balais**

I-4-2-Rotor :

Le rotor est la partie tournante de la machine et se compose essentiellement de

- **Roue polaire** : La Roue polaire comprend un paquet de tôles d'acier, découpées et frappées pour reproduire le profil des pôles saillants.
- **Arbre**
- **Bagues collectrices**
- **Amortisseurs** : sont des barres à haute conductivité électrique sont insérés dans les pôles et soudés aux tôles d'extrémité afin d'obtenir une cage complète
- **Canaux de ventilation.**
- **Ventilateur** : est monté entre la Roue polaire et le palier avant, L'aspiration d'air se trouve à l'arrière de la machine et l'échappement côté accouplement.
- **Roulements** : sont installés à chaque extrémité de la machine. Ils sont démontables et peuvent être remplacés. Les roulements sont protégés contre la poussière extérieure par des étanchéités à chicanes.

I-4-3-Entrefer

C'est la l'aire qui existe entre le stator et le rotor, il est composé de l'air

I-5-Synchronisme :

Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor.

Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme Ω_s .

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

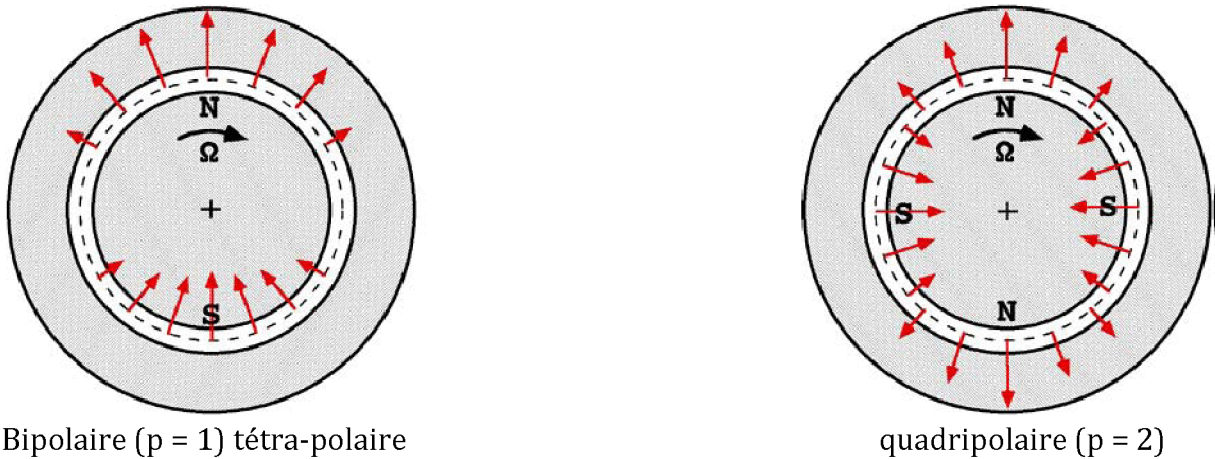
Ou encore $n_s = 60 f/p \text{ [tr/min]}$

I-6- Schémas :

I-6-1- Répartition du champ magnétique dans l'entrefer d'une machine

synchrone :

Dans la figure on montre la répartition du champ magnétique d'une machine bipolaire et quadripolaire.



Bipolaire ($p = 1$) tétra-polaire

quadripolaire ($p = 2$)

Fig. I-6-1- champ magnétique dans la machine synchrone Bipolaire et quadripolaire

Remarque : un champ magnétique à toujours deux pôles, un nord et un sud. C'est pourquoi on parle en termes de paire de pôles.

Représentation de deux types de machines synchrones.

I-6-2-Symboles :

La figure suivante représente les différents symboles de la machine synchrone :

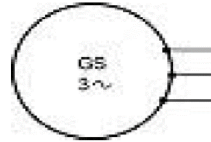


Figure 7.1 – Symbole général d'un générateur synchrone triphasé.

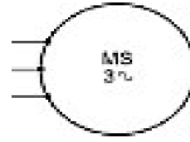


Figure 7.2 – Symbole général d'un moteur synchrone triphasé.

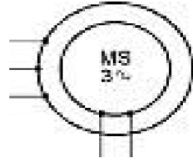


Figure 7.3 – Symbole d'un moteur synchrone triphasé à inducteur bobiné.

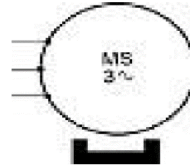


Figure 7.4 – Symbole d'un moteur synchrone triphasé à aimants.

I-6-2- symboles générales de la machine synchrone triphasée

I-7- Principe de fonctionnement de l'alternateur : [6]

I-7-1-Fonctionnement d'un alternateur monophasé :

Par souci de simplification, nous supposons que le stator ne comporte qu'une spire MN (**Fig. I-7-1**). La spire pénètre dans l'encoche du stator en A pour en sortir en A'. Elle entre ensuite dans l'encoche diamétralement opposée en B' pour en sortir en B.

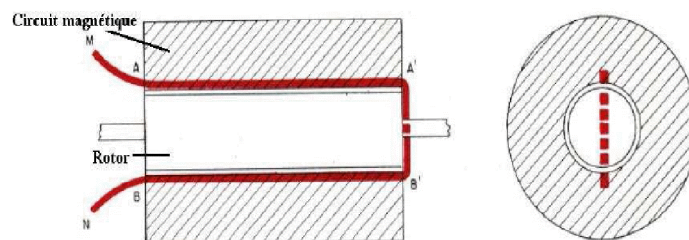


Fig I-7-1-Spire stator MN,

On fait passer un courant continu dans le rotor et on fait tourner ce rotor à une vitesse V . Le champ produit par un aimant qui se déplace devant un fil conducteur engendre dans ce fil une force électromotrice :

1. dont la valeur est proportionnelle au champ et à la vitesse de rotation de l'aimant

2. dont le sens est donné par la règle du tire-bouchon Par conséquent la force électromotrice e_1 , engendrée dans le conducteur AA' sera proportionnelle à H et à la vitesse V du rotor :

$$e_1 = K_1 V H$$

Où H est le champ magnétique produit par le rotor. Ceci provoquant le passage d'un courant dont le sens est donné sur la figure **Fig. I-7-2**

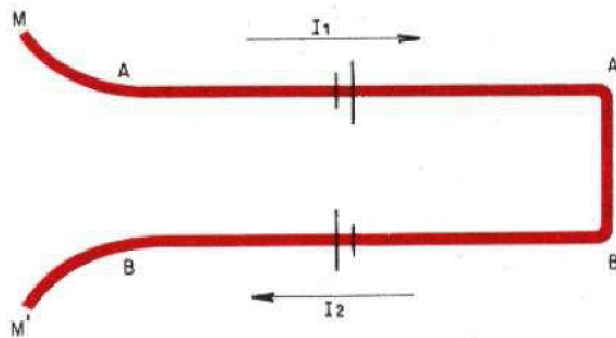


Fig. I-7-2-Sens du courant dans MN

De même pour la force électromotrice e_2 dans BB' :

$$e_2 = K_2 H V$$

La force résultante dans le spire MM' étant la somme de e_1 et e_2 :

$$e = K V H$$

En pratique, la bobine possède plusieurs spires afin d'augmenter la force électromotrice totale engendrée correspondant à la force électromotrice engendrée par toutes les spires.

Si on prend la circonférence du rotor est divisée en 36 parties égales. En supposant que le rotor fasse un tour en une seconde et qu'au temps zéro le pôle nord du rotor se trouve devant le conducteur AA' du stator ; la force électromotrice sera égale à $K H_{max} V$.

1/36^{ème} de seconde après elle sera à : $K H_1 V$

1/36^{ème} de seconde après elle sera à : KH2V

1/36^{ème} de seconde après elle sera à : KH3V

Ainsi quand le pôle sud sera devant le conducteur AA', c'est-à-dire 18/36^{ème} de seconde après, elle reprendra la valeur de KHmax V mais aura un sens inverse à celui qu'elle avait au temps 0, qu'elle retrouvera au bout d'une seconde. Les valeurs prises par le champ et la force électromotrice sont données par les courbes suivantes :

La **fig. I-7-3** et **fig. I-7-4**

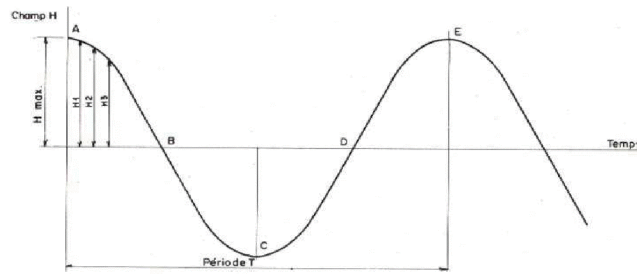


Fig. -I-7-3-Champ magnétique H pendant un tour

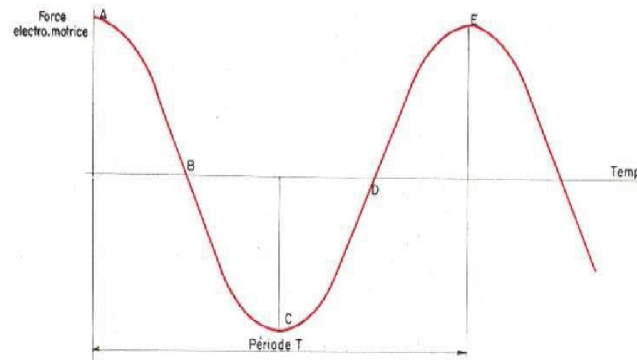


Fig. -I-7-4-Force électromotrice engendrée pendant un tour

La **Fig. -I-7-5** suivante donne les positions du rotor dans le stator aux différents points de fonctionnement A, B, C, D et E.

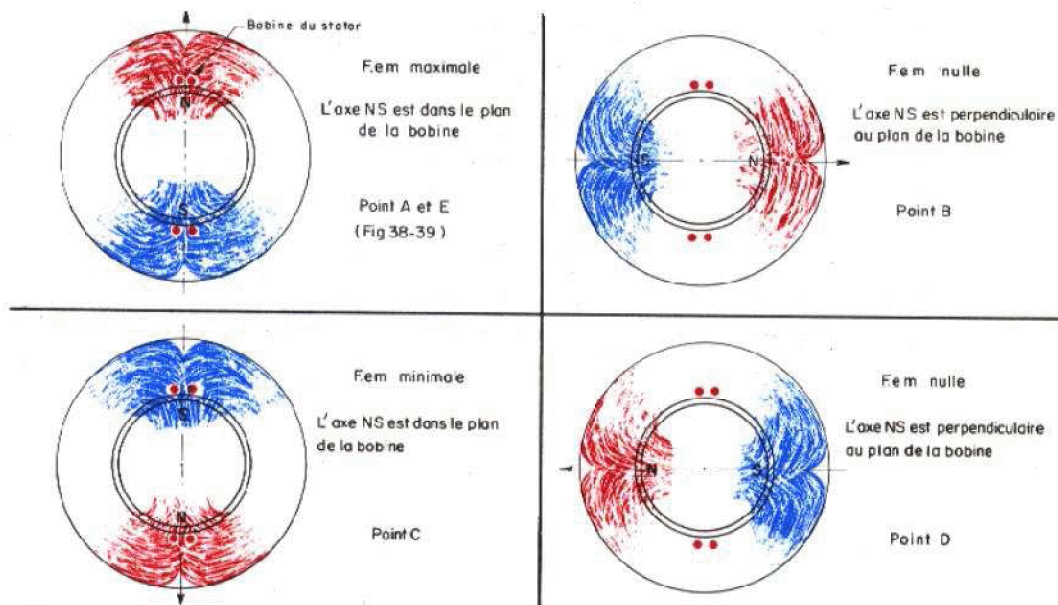


Fig. -I-7-5-Positions du rotor

On appelle courant inducteur i ou courant d'excitation de l'alternateur, le courant qui vérifie :

$$H_{\max} = K_i$$

La force électromotrice sera donc proportionnelle au courant d'excitation de l'alternateur et à la vitesse du rotor qu'on exprime souvent en nombre de tours n dans l'unité de temps (tours par seconde) :

$$E_{\max} = K_{in}$$

I-7-2- Fonctionnement d'un alternateur triphasé :

On trouve sur la **Fig. I-7-6** un enroulement statorique triphasé (A_1, A_2, A_3) dont les axes sont décalé de 120° l'un par rapport à l'autre.

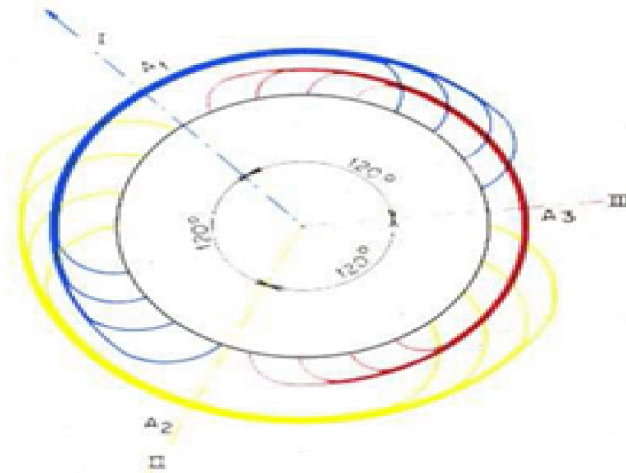
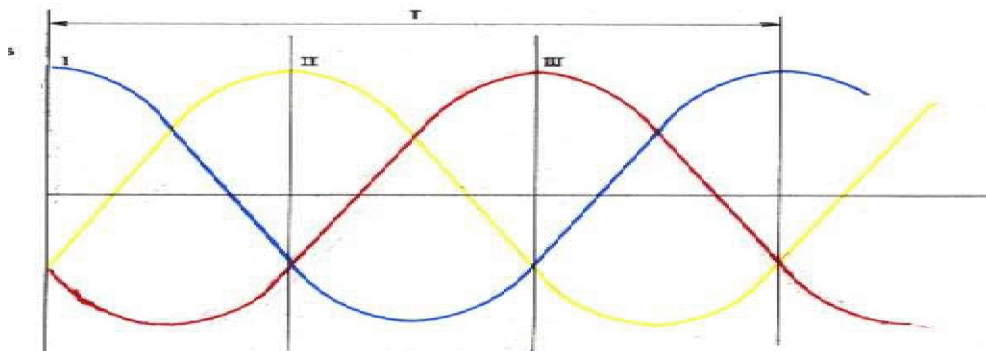


Fig. -I-7-6-stator triphasé

Comme dans le paragraphe précédent, étudions la force électromotrice lors de la rotation du rotor. Pour chaque bobine, nous aurons une force de même valeur maximale, égale à K_{in} et de même période. Cependant les courbes représentatives des 3 forces seront décalées d'un tiers de période l'une par rapport à l'autre. Si l'on reprend l'exemple d'un tour de rotor par seconde on obtient les courbes représentatives suivantes :



I. fém. engendrée dans la bobine A.1

II. fém. engendrée dans la bobine A.2

III. fém. engendrée dans la bobine A.3

Fig. -I-7-7-Force électromotrice d'un alternateur triphasé

On observe alternativement dans les phases A1, A2, A3, des forces électromotrices maximales dans l'une ou l'autre des bobines.

I-8- Caractéristique interne de la machine synchrone :

I-8-1- Caractéristique à vide d'une machine synchrone :

Le point de fonctionnement nominal P **Fig. I-8-2** se trouve généralement entre les points A et B dans le coude de saturation. Sous le point A, la machine serait sous exploitée. Au-dessus du point B, une forte augmentation de I_e ne produit qu'une faible augmentation de E. Pour les points de fonctionnement au dessous de à P, la machine est non saturée, par contre au dessus de ce point la machine est saturé

I-8-2- Caractéristique en court-circuit

Courbe $I_{cc}=f(i_{ex})$ tracée sur **Fig. I-8-1**:

- A la vitesse de rotation : $N_s=cste$
- A la tension $V=0$

Cette proportionnalité entre I_{cc} et i_{ex} est toujours valable dans un alternateur synchrone.

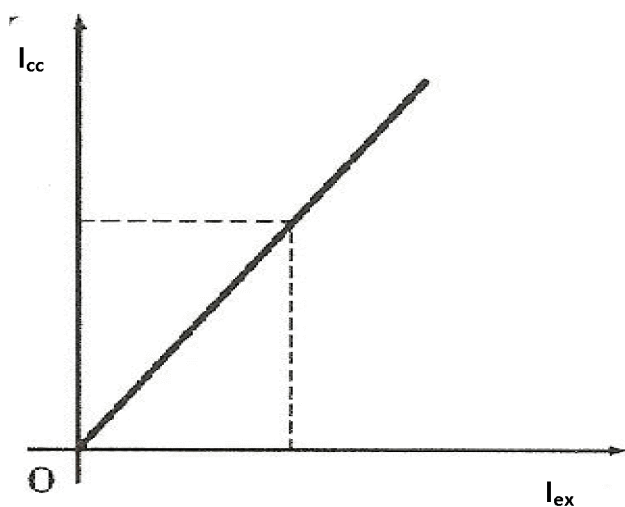


Fig. I-8-1- Caractéristique en court circuit d'une machine synchrone

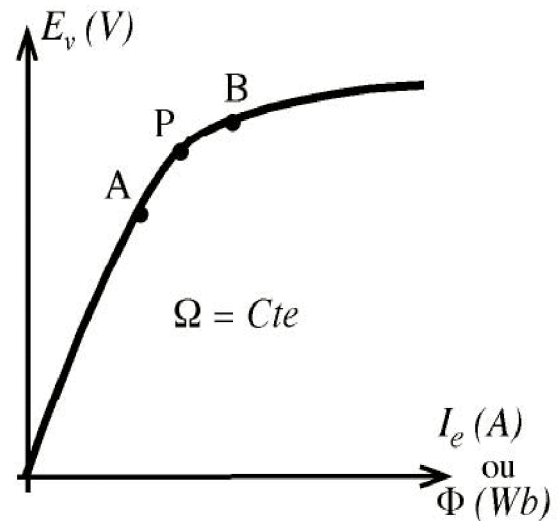


Fig. I-8-2- Caractéristique à vide d'une machine synchrone

I-9-Modèles de la machine synchrone :

I-9-1-Modèle de Behn-Eschenburg :

I-9-1-a-Principe :

- Si l'alternateur fonctionne à vide la f.é.m. induite dépend du courant d'excitation I_f et de la vitesse N : $E_v = f(I_f, N)$.
- Dès que l'alternateur est chargé, les courants triphasés d'induit engendrent un champ tournant qui s'associe au champ tournant rotorique. Dans l'entrefer, on trouve donc un flux dépendant non seulement de I_f mais aussi de l'intensité débitée I . C'est ce qu'on appelle la réaction magnétique d'induit, notée généralement R.M.I.

I-9-1-b-Bilan des flux dans une phase :

Le flux en charge ou flux résultant est composé :

- Du flux inducteur $\Phi_r(I_f)$ balayant la phase au cours de la rotation.
- Du flux de R.M.I. que l'on pose proportionnel au courant d'induit : $\Phi_s(I) = L_s I_f$ avec L_s un coefficient de proportionnalité homogène à une inductance. Sa valeur n'est constante que dans la mesure où le rotor est magnétiquement homogène, c'est à dire à pôles lisses.

Sous l'hypothèse que l'état magnétique de la machine n'est pas saturé il est possible de considérer que l'ajout des différentes forces magnétomotrices rotorique et statorique revient à additionner les flux. On obtient alors:

$$\Phi = \Phi_r(I_f) + \Phi_s(I)$$

A ce flux résultant correspond la f.é.m. en charge appelée également f.é.m. résultante notée E_t

$$E_t = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\phi_r(I_e)}{dt} - \frac{d\phi_s(I)}{dt} = E_v - L_s \frac{dI}{dt}$$

Si R est la résistance d'une phase, alors la tension aux bornes d'une phase est :

$$\overline{V} = \overline{E}_v - jL_s \omega \overline{I} - R \overline{I}$$

Cette relation permet de tracer le schéma équivalent d'une phase statorique selon Behn- Eschenburg Fig. -I-8-. Il est constitué du générateur de Thévenin équivalent d'une phase, avec sa f.é.m. et son impédance interne. La quantité $L_s \omega$ notée X_s est appelée réactance cyclique synchrone. Tout se passe comme si la f.é.m. était inchangée car $E_v = f(I_f, N)$. La R.M.I. est introduite uniquement par la présence d'une réactance.

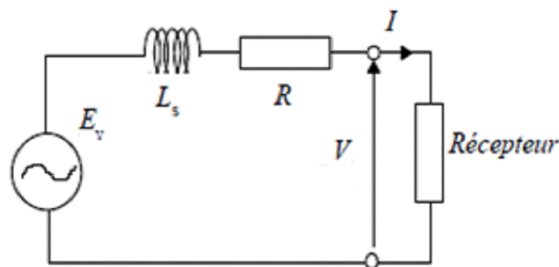


Fig. -I-9-le schéma équivalent d'une phase statorique

Le schéma dans le plan complexe est sur la figure I-9-1

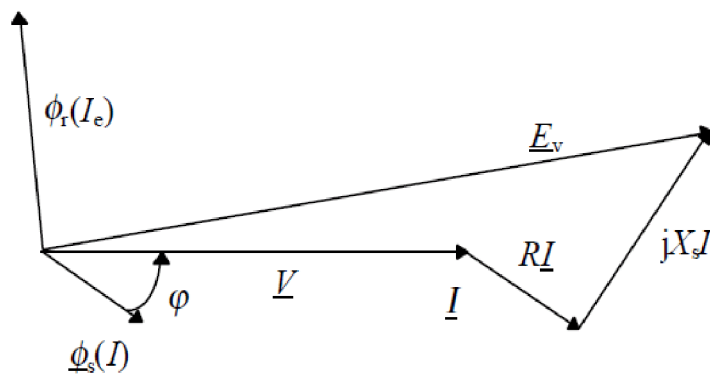


Fig. -I-9-1-Modèle de Behn-Eschenburg

Suite aux mesures, on remarquera que $R \ll X_s$, ce qui explique que sur certains schémas vectoriels le terme RI disparaisse.

I-9-1-c-Conclusion sur Behn-Eschenburg :

La R.M.I est prise en compte dans X_s , ce modèle est proche du comportement réel de la machine lorsque son circuit magnétique est non saturé, et a un rotor lisse. Si on veut prendre en compte la saturation magnétique, il faut utiliser la caractéristique $E_t = f(I_f, N)$. Cette caractéristique est déterminée à partir du flux commun entre l'induit et l'inducteur. Dans Behn-Eschenburg on suppose que toute la réaction d'induit participe à la modification de la f.é.m. pour donner la f.é.m. résultante E_t . En fait une partie du flux créé par l'induit n'arrive pas à l'inducteur. Il n'influence donc pas la f.é.m., il correspond à un flux de fuites. Si on désire travailler dans la zone saturée on ne peut pas additionner les flux. Il faut donc considérer les ampères tours communs à l'induit et à l'inducteur qui influencent la valeur de E_t et ceux qui participent au flux de fuites. Pour ce faire on utilise le modèle de Potier.

I-9-2-Modèle de Potier :

I-9-2-a-Etude théorique :

On prend en compte ici la saturation de la machine. Le système n'étant plus linéaire, les flux ne sont pas séparables. On raisonne donc directement à partir des forces magnétomotrices, en utilisant, la notation complexe pour tenir compte des décalages.

Etant donné que la caractéristique magnétique de la machine a été tracée à partir du courant inducteur, on ramène toutes les f.é.m. à ce dernier en remplaçant

- f.m.m_{rot} par un courant fictif j_r ; la caractéristique à vide étant aussi la caractéristique magnétique $\Phi_r = f(f.m.m_{rot})$, le module de J_r se détermine sur cette dernière en cherchant le courant inducteur correspondant à une tension de valeur E_r
- f.m.m_{rot} par le courant inducteur J (revoir éventuellement, à propos de la notation complexe); son module est égal au courant continu circulant réellement dans le bobinage inducteur
- f.m.m_{st} par un courant inducteur J_{st} que l'on met sous la forme αI pour mettre en évidence le fait que ce courant est en réalité proportionnel à I ; α est appelé coefficient d'équivalence, $J_{st} = \alpha I$ étant le courant inducteur qui, s'il existait seul, produirait le même champ tournant que le courant d'induit I .

Compte tenu de ces définitions, il vient $J_r = J + \alpha I$, soit $J = J_r - \alpha I$

Par ailleurs, on a toujours $E_r = RI + j\lambda\omega I + V$

Il ne reste plus qu'à utiliser le fait que J_r est en quadrature avance sur E_r pour tracer le diagramme ci-dessous Fig. I-8-2, dit diagramme de Potier, qui matérialise dans un même repère l'équation aux forces magnétomotrices et l'équation aux tensions.

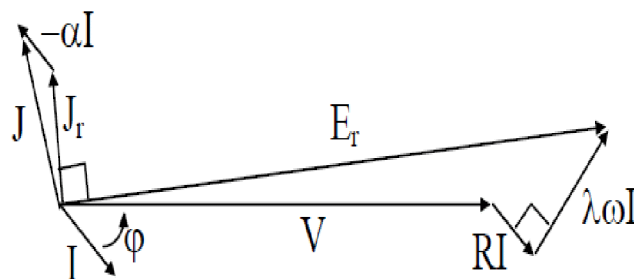


Fig.- I-9-2-Modèle de Potier

I-9-3-Modèle de Blondel

I-9-3-a Principe

Le diagramme de Blondel est utilisé pour les machines à pôles saillants. Dans la méthode de Potier, les fuites magnétiques de l'induit (termes $X_i.I$) ne dépendent pas du déphasage Ψ entre I et la f.e.m de l'alternateur. Cela est vrai pour les alternateurs à pôles

lisses, mais il ne l'est pas pour les machines à pôles saillants, pour cela étudions les 2 cas suivants lorsque le courant est maximal dans la bobine.

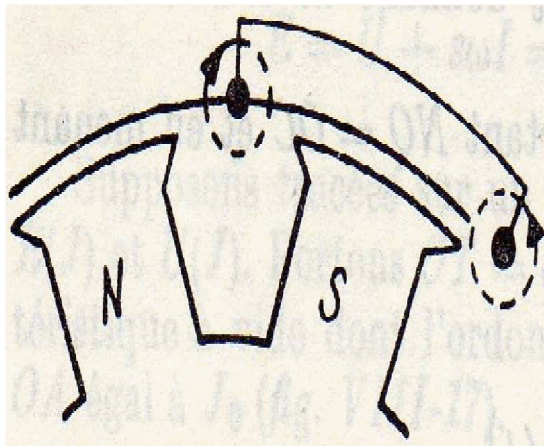


figure (a)

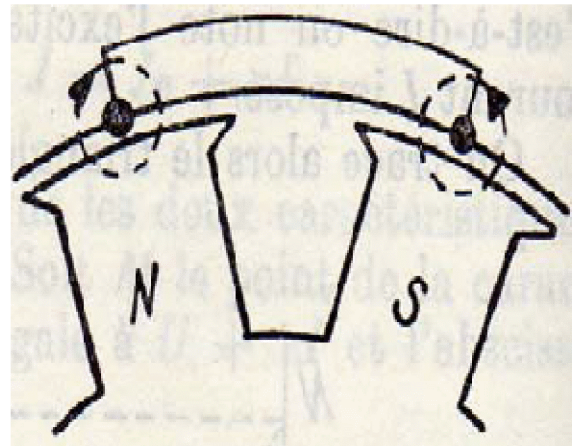


figure (b)

Fig. I-9-3- les fuites magnétiques de l'induit

Dans la figure (a) : les lignes d'induction de fuites de l'induit ont beaucoup d'air (donc la réactance d'induit est constante ne dépendant pas de la saturation).

Dans la figure (b) : les lignes d'induction de fuites de l'induit comportent beaucoup de fer ; (donc la réactance dépend de l'état de saturation de la machine).

Dans le cas où la machine est saturable, on peut décomposer la F.M.M résultante F_r en 2 autres composants :

$$\overline{F_r} = \overline{F_j} + \overline{F_i} = \overline{F_T} + \overline{F_L}$$

Une composante longitudinale $\overline{F_L}$ due à l'action conjuguée de la F.M.M due à l'inducteur et de la composante réactive du courant d'induit ($I_r = I \sin \Psi$).

Les lignes d'inductions produites par cette F.M.M ont des trajets identiques à ceux d'une machine à pôles lisses. Sa réactance interne X_{iL} dite *réactance longitudinale d'induit* est donc saturable qui se calcule par la méthode de Potier.

Une composante transversale $\overline{F_T}$ due uniquement à la composante active du courant d'induit ($I_a = I \cos \Psi$).

Les lignes d'induction produites par cette F.M.M ont des trajets dans l'air importants, c'est pourquoi sa réactance interne X_{iT} dite *réactance transversale d'induit* n'est jamais saturable.

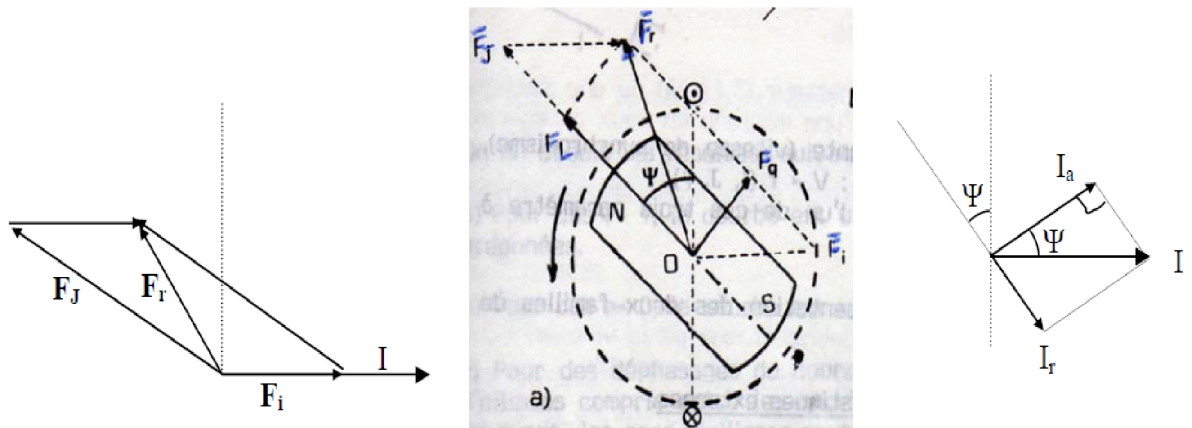


Fig. 9-3-a- les composantes de la fmm

1-9-3-b Equation de Blondel

Pour tenir compte de l'influence du déphasage sur les fuites magnétiques, Blondel considère que la composante active du courant d'induit $I_a = I \cos \Psi$ en phase avec E (f.e.m interne) ajoute encore des fuites, il en résulte une chute inductrice supplémentaire de fuites soit $X_{iT}.I_a = X_{iT}.I.\cos \Psi$; d'autre part la composante réactive du courant d'induit $I_r = I.\sin \Psi$ produit une F.M.M longitudinale dont l'effet est de modifier le flux résultant (réaction d'induit) . Donc l'équation de Blondel (f.e.m de Blondel), s'écrit :

$$\vec{E} = \vec{V} + R\vec{I} + j.X_{iT}\vec{I}_a$$

C'est la f.e.m interne de Blondel.

1-9-3-c Construction du diagramme de Blondel

Prenons le courant d'induit I comme origine des phases ; puis on trace la tension $OA = V$, déphasé de l'angle Ψ par rapport au courant (il dépend de la charge branchée au stator). On trace ensuite $AB = R.I$ en phase avec I, puis $BC = j.x.I$ en avant de 90° par rapport au courant.

Dans le prolongement de BC portons $\vec{CF} = X_{iT}.I$ puis joignons O et F et par le point C, menons CD perpendiculaire à OF.

On mesure OD : OD représente la f.e.m interne E de Blondel et OC : représente la f.e.m en charge.

$$\vec{OC} = \vec{E}_c = \vec{V} + R\vec{I} + j.x\vec{I}$$

2. Machines à pôles saillants saturée :

Dans ce cas $X_i T$ est toujours constante, mais $X_i L$ diminue avec la saturation ; donc la partie [OABCD] du diagramme ne change pas avec la saturation. Comme pour le diagramme de Potier, on a besoin de déterminer le courant d'excitation J avec V , I et φ données ; pour cela, on détermine E de Blondel (vecteur OD) puis, en se reportant à la caractéristique à vide on détermine le courant d'excitation longitudinale J_L qui doit être perpendiculaire à E de Blondel. L'action longitudinale des F.M.M s'exprime par la relation arithmétique : $J = J_L + \alpha I_r$.

Conclusion

Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des généralités sur la génératrice Synchrone. Nous sommes intéressés aux différents types et la structure générale de la machine synchrone. Ainsi qu'aux modes et principe de fonctionnement de cette dernière. Par la suite, on a cité les trois structures d'excitation de la machines synchrones les plus largement utilisées dans l'industrie, dans le but d'avoir une idée générale sur la machines synchrone.

Sommaire

I-1 Modes de fonctionnement de la machine synchrone.....	4
I-1-1- Fonctionnement en compensateur synchrone.....	4
I-1-2- Fonctionnement en moteur	4
I-1-3- Fonctionnement en génératrice.....	4
I-2- Modes d'excitation de la machines synchrones.....	5
I-2-1- Excitation interne	5
I-2-2- Excitation externe alternateur à bagues et balais.....	5
I-3- Classification des machines synchrones	6
I-3-1- Machines à aiment.....	6
I-3-2- Machines à pôles saillants	7
I-3-3- Machines à pôles lisses.....	7
I-4- Constitution de la machine synchrone	8
I-4-1- Stator.....	8
I-4-2- Rotor	10
I-4-3- Entrefer.....	10
I-5- Synchronisme.....	10
I-6- Schémas.....	11
I-6-1 Répartition du champ magnétique dans l'entrefer	11
I-6-2- Symboles.....	11
I-7- Principe de fonctionnement de l'alternateur.....	12
I-7-1- Fonctionnement d'un alternateur monophasé.....	12
I-7-2- Fonctionnement d'un alternateur triphasé.....	15
I-8- Caractéristique interne de la machine synchrone.....	17
I-8-1- Caractéristique à vide d'une machine synchrone	17
I-8-2- Caractéristique en court-circuit.....	17
I-9- Modèles de la machine synchrone	18
I-9-1- Modèle de Behn-Eschenburg	18
I-9-2- Modèle de Potier	20
I-9-3- Modèle de Blondel.....	21
Conclusion	25

Chapitre II
calcul
électromagnétique

Introduction :

Le projet de construction d'une machine électrique commence par le choix des dimensions et les matériaux de ces parties actives et constructives, dans notre cas les dimensions de la machine sont exigées par le constructeur. Donc, nous allons procéder à déterminer les contraintes électromagnétique à partir des dimensions et les caractéristique des enroulements de la machine.

II-1- Stator :

II-1-1- la puissance électromagnétique : [14][16]

$$P_e = m_1 \cdot E_1 \cdot I_{nom1} \quad \text{KVA}$$

Avec :

m_1 : Nombre de phases

E_1 : Force électromotrice

I_{nom1} : Courant nominal

Ou bien :

$$P_e = K_e \cdot S_n$$

K_e : Coefficient qui tient compte de la chute de tension dans la phase statorique, il est donné par la loi suivante

$$K_e := \sqrt{\cos^2 \varepsilon + (\sin \varepsilon + X_\delta^*)^2}$$

X^*_δ : la réactance inductive de dispersion en unité réduite de l'enroulement du stator.

Déterminé à partir de la Fig.1 (annexe)

II-1-2- Force électromotrice :

Elle déterminée par la relation suivante :

$$E_1 = 4K_f \cdot K_{enr1} \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot \Phi$$

Avec :

$K_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$: Coefficient de forme du champ dans l'entrefer.

K_{enr1} : Coefficient de l'enroulement statorique.

f_1 : Fréquence du réseau d'alimentation.

W_1 : Nombre de spire en série d'une phase.

Φ : Flux utile par pole.

II-1-3-calcul de l'enroulement :[10][8]

II-1-3-a- Coefficient de l'enroulement :

Il est donne par la relation suivante :

$$K_{enr1} = K_d \cdot K_r \cdot K_i$$

Avec:

K_d : Le coefficient de distribution

K_r : Le coefficient de raccourcissement

K_i : Le coefficient d'inclinaison d'encoche

$$K_d = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2 \cdot q_1}}$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot q_1}{Z_1}$$

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1}$$

Avec :

α : Zone phasique.

Z_1 : Nombre d'encoches du stator.

q_1 : Nombre d'encoche par pole et par phase.

$$K_r = \sin \left(\beta \cdot \frac{\pi}{2} \right)$$

Avec :

$$\beta = \frac{Y_1}{\tau}$$

β : est le pas de raccourcissement.

$$Y_1 := \frac{Z_1}{2 \cdot P} \quad + \text{ou} - \varepsilon$$

$$\tau := \frac{Z_1}{2 \cdot P}$$

τ : Le pas polaire est l'intervalle entre deux pôles successifs. Comme On peut aussi le caractériser de deux autres façons :

- ✓ L'angle séparent les axes des deux pôles, $\alpha = \pi/P$
- ✓ La distance entre deux pôles, mesurée le long de l'entrefer, $Y_p = \pi \cdot D_{int}/2P$

Avec

Y_1 le pas d'enroulement

ε le pas de raccourcissement

$$K_i := \frac{\sin\left(P \cdot \frac{\gamma e}{2}\right)}{P \cdot \frac{\gamma e}{2}}$$

$\gamma.e$: l'angle d'inclinaison d'encoche

Distance entre deux bobines d'une même phase:

$$\tau_{ph} := \frac{180}{\alpha}$$

Distance entre deux bobines de phases différentes:

$$\tau \mathbf{b} := \frac{120}{\alpha}$$

Avec α l'angle électrique donné par

$$\alpha := \frac{60}{q_1}$$

II-1-3-b- Nombre de conducteur par encoche :

Des conducteurs sont placés dans les encoches. Deux conducteurs sont associés pour former une spire. Plusieurs spires peuvent être placées dans la même encoche et mise en série. L'ensemble de ces conducteurs appelés brins actifs placés dans la même encoche est nommée faisceau.

Une autre solution est de réaliser le faisceau par une barre de section adaptée : il est alors constitué d'un seul conducteur par convention, on représente un faisceau par un conducteur unique qu'il soit formé d'une seule barre ou plusieurs conducteurs.

$$U_{enc1} = \frac{2 \cdot a_1 \cdot m_1 \cdot W}{Z_1}$$

Avec :

a_1 : Nombre de voies parallèles.

W : Nombre de spires d'une branche parallèle d'une phase est donné par la loi suivante :

$$W := \frac{P \cdot q_1 \cdot U_{enc1}}{2a_1}$$

II-1-4- Induction magnétique dans l'entrefer :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{\delta} = \frac{P_e \cdot 10^{-9}}{m_1 \cdot I_{nom1} \cdot 4K_f \cdot W_1 \cdot K_{enc1} \cdot L_i \cdot \pi \cdot a_i \cdot \frac{D_{int1}}{2 \cdot p}}$$

Avec :

L_i : Longueur virtuelle de l'induit.

D_{int1} : Diamètre intérieur du stator.

a_i : coefficient de l'arc polaire virtuel (voir la figure 2)

II-1-5- Charge linéaire : [14]

C'est le courant total de la partie d'encoche par unité de longueur du périmètre de l'induit.

D'autre part on peut considérer que cette charge représente le courant circulant dans un conducteur fictif.

Elle caractérise l'utilisation électrique de la machine, on a donc intérêt à choisir ces valeurs assez grandes que possible, ce qui conduira à l'augmentation de :

- Soit la densité de courant [J], c'est-à-dire des pertes joule et des échauffements
- Soit de la profondeur des encoches, c'est-à-dire à une augmentation des dimensions (cout) ou de l'induction ce qui augmentera les pertes fer et les échauffements. Et la loi de celle-ci est donnée en dessous.

$$A_1 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot I_{nom1} \cdot W_1}{\pi \cdot D_{int1}}$$

La marge admissible de la charge linéaire est : $20 \cdot 10^3 \div 25 \cdot 10^3$ [A/m]

II-1-6- Flux utile par pole :

Il est donné par la formule suivante :

$$\phi = a_i \cdot \tau_1 \cdot L_i \cdot 10^{-6} \cdot \beta_\delta$$

Avec :

a_i : Coefficient de l'arc polaire virtuel.

τ_1 : Le pas polaire en mm.

II-1-7- Induction maximale dans la dent statorique :

Elle est basé sur la loi de la conservation du flux est donnée par l'expression suivante :

$$B_{z1max} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z1max}}$$

II-1-8- Induction minimale dans la dent statorique :

$$B_{z1min} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot b_{z1min}}$$

Avec :

K_{fer} : Coefficient de remplissage des tôles statorique.

II-1-9- Induction magnétique dans le dos du stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{c1} = 0.5 \cdot \frac{a_i \cdot \tau_1 \cdot B_\delta}{K_{fer} \cdot h_{c1}}$$

Avec :

h_{c1} : La hauteur du dos de stator.

II-1-10- Section de l'encoche statorique :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{enc} = 0.5(b_{enmax} + b_{enmin}) \cdot h_{z1}$$

Avec :

b_{enmax} : La largeur maximale de l'encoche statorique.

b_{enmin} : La largeur minimale de l'encoche statorique.

h_{en} : La hauteur utile de l'encoche statorique.

II-1-11- Section occupée par l'isolation :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{eniso} = 0.5(b_{enmax} + b_{enmin} + 2 \cdot h_{z1}) \cdot b_{iso}$$

Avec :

b_{iso} : Epaisseur d'isolation.

II-1-12- La section utile de l'encoche :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$S_{enc1} = S_{enc} - S_{eniso}$$

II-1-13- Coefficient de remplissage des encoches statorique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$K_{rempl} = \frac{N_{el} \cdot U_{enc1} \cdot d_{iso}^2}{S_{enc1}}$$

La marge admissible :

$$K_{rempl} = 0.7 \div 0.75$$

II-2- Rotor :

II-2-1- Induction dans le pole :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{pm} = \frac{\sigma_1 \cdot 10^6}{K_{fer} \cdot L_p \cdot b_p}$$

$$\sigma_1 = \frac{K_{\sigma r} \cdot 35 \cdot \delta}{\tau_1^2} + 1$$

$$K_{\sigma r} = 1.25 \cdot h_{ep2}$$

Avec :

L_p : longueur géométrie de rotor

b_p : largeur du pôle

σ_1 : valeur préliminaire de coefficient de dispersion des pôles

K_{or} : coefficient de dispersion dans l'épanouissement polaire

II-2-2- Induction dans le dos rotorique :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$B_{c2} = \frac{\sigma_1 \cdot B_\delta \cdot L_l \cdot \tau_1}{2 \cdot h_{cr} \cdot L_p \cdot K_{fer}}$$

Tableau I : résultats de calcul

Désignation	Symbole	Résultat	Unité
la puissance électromagnétique	P_e	15.7	KVA
Force électromotrice simple	E_1	229.88	V
Coefficient de l'enroulement	K_{enr1}	0.963	-
Le pas polaire	$\tau_{.1}$	159.75	mm
		6	enc
		0.524	rd
Le pas d'enroulement	Y_1	26.625	mm
		5	enc
La zone phasique	α_e	60	°élec
l'angle électrique entre deux encoches voisines	α	30	°élec
Distance entre deux bobines de phases différentes	$\tau_{,ph}$	4	enc
Distance entre deux bobines d'une même phase	$\tau_{,b}$	6	enc
Nombre de conducteur par encoche	U_{enc1}	22	cond

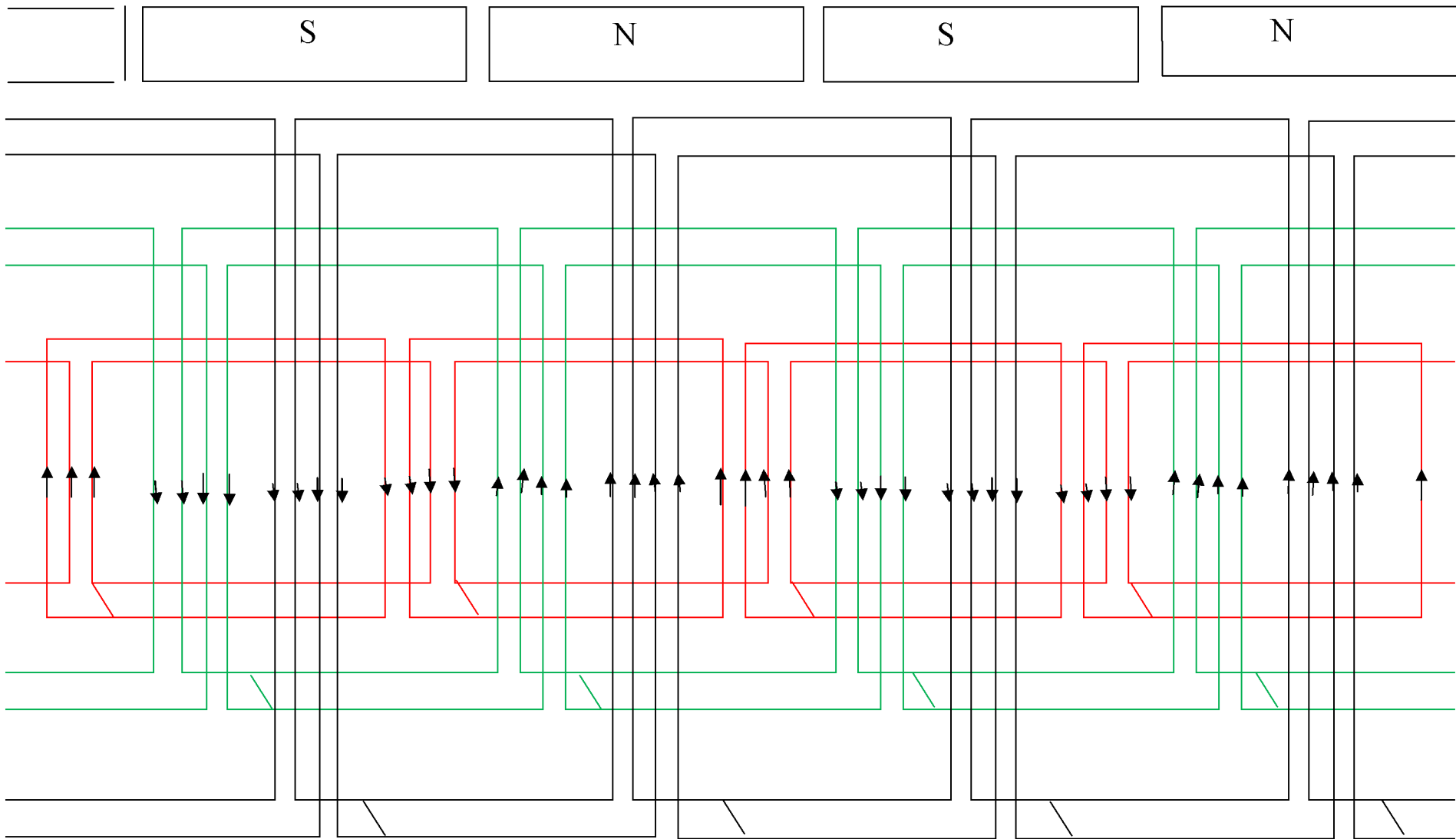
Induction magnétique dans l'entrefer	B_{δ}	0.76	T
Charge linéaire	A_1	18890	A/m
Flux utile par pole	φ	0.012	weber
Induction maximale dans la dent statorique	B_{z1max}	1.578	T
Induction minimale dans la dent statorique	B_{z1min}	1.752	T
Induction magnétique dans le dos du stator	B_{c1}	1.54	T
Section de l'encoche statorique	S_{enc1}	183.125	mm ²
Section occupée par l'isolation	S_{eniso}	24.43	mm ²
Section utile de l'encoche	S_{enc}	158.69	mm ²
Coefficient de remplissage des encoches statoriques	K_{rempl}	0.71	-
Induction dans le pôle	B_{pm}	1.74	T
Induction dans le dos rotorique	B_{c2}	1.19	T

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de calculer les différents paramètres électromagnétiques tels que les inductions et la charge linéaire ainsi que le coefficient de remplissage. Nous estimons que les résultats obtenus sont satisfaisantes du fait qu'ils se trouvent dans les marges admissible fixée par les constructeurs.

Sommaire

Introduction.....	26
II-1- Stator.....	26
II-1-1- la puissance électromagnétique.....	26
II-1-2- Force électromotrice	27
II-1-3-calcul de l'enroulement.....	27
II-1-3-a- Coefficient de l'enroulement.....	27
II-1-3-b- Nombre de conducteur par encoche	30
II-1-4- Induction magnétique dans l'entrefer.....	31
II-1-5- Charge linéaire.....	31
II-1-6- Flux utile par pole	32
II-1-7- Induction maximale dans la dent statorique	32
II-1-8- Induction minimale dans la dent statorique.....	32
II-1-9- Induction magnétique dans le dos du stator.....	33
II-1-10- Section de l'encoche statorique.....	33
II-1-11- Section occupée par l'isolation.....	33
II-1-12- La section utile de l'encoche.....	34
II-1-13- Coefficient de remplissage des encoches statorique.....	34
II-2- Rotor.....	34
II-2-1- Induction dans le pole.....	34
II-2-2- Induction dans le dos rotorique.....	35
Tableau I : résultats de calcul	35
Conclusion	36



Enroulement d'un stator triphasé concentrique à double couche à pas égale compris 4 bobines et 2 encoches par pôles et par phase dont les bobines connectées en série

Chapitre III
Calcul de circuit
magnétique
Et
Des paramètres
électriques

Introduction

Ce chapitre nous permet de calculer les forces magnétomotrices dans les différentes parties de la machines qui serviront à tracer la caractéristique de magnétisation à vide. Puis, nous utilisons le logiciel FEMM de simulation pour vérifier les résultats obtenus. Et, enfin on s'intéresse aux calculs des diverses inductances, des résistances et aussi les constantes de temps.

III-1- Circuit magnétique statorique : [14]

III-1-1- La FMM dans la culasse du stator :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot L_{cs} \cdot 10^{-3}$$

Avec :

H_{cs} : L'intensité du champ magnétique qui correspondant à l'induction dans la culasse B_{cs} , elle est égale B_{c1} ($B_{c1} = B_{cs}$) (annexe A3)

L_{cs} : La longueur du parcours moyen de la ligne du champ magnétique,

Calculer par la formule suivante :

$$L_{cs} = \frac{\pi \cdot (D_{ext1} - h_{c1})}{2 \cdot p}$$

III-1-2- La FMM dans la dent du stator :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot L_{z1} \cdot 10^{-3}$$

Avec :

h_{z1} : Hauteur de la dent statorique.

H_{z1} : L'intensité du champ magnétique dans la dent du stator correspondant à l'induction dans la dent B_{z1} ;

III-2- Circuit magnétique rotorique :

III-2-1- La FMM dans le pôle du rotor :

Elle est donnée par la formule suivante :

$$F_{pm} = H_{pm} \cdot L_{pm} \cdot 10^{-3}$$

Avec :

L_{pm} : Longueur moyenne des lignes du champ dans le pôle.

$$L_{pm} = h_p + 0.7 \cdot h_{ep}$$

H_{pm} : Valeur de l'intensité du champ magnétique correspondant à l'induction B_{pm}

Si la valeur de l'induction dans le pôle dépasse 1.7 Tesla, le calcul de la fmm se fera en considérant la variation du flux, dans le sens de la hauteur des pôles.

On a la valeur de $B_{pm} > 1.7$ T donc on va calculer B_p de cette façon :

III-2-1-1- Le champ magnétique sur la base du pôle :

III-2-1-1-a- Le flux magnétique sur la base du pôle :

$$\phi_{p1} = \phi \cdot \sigma_1$$

III-2-1-1-b- L'induction magnétique sur la base du pôle :

$$B_{p1} = \frac{\phi_{p1} \cdot 10^6}{K_{frem} \cdot L_p \cdot b_p}$$

III-2-1-2- Le champ magnétique dans l'épanouissement polaire :

III-2-1-2-a- Le flux magnétique dans l'épanouissement polaire :

$$\phi_{p2} = \phi_{p1} + \left(\frac{\lambda_{ep}}{\lambda_p} \right) \phi_\sigma$$

$$\lambda_p := \lambda_{ep} + \lambda_{pc} + \lambda_{pb}$$

$$\lambda_{ep} := 140 \left(\frac{h_{ep}}{a_{ep}} - 0.25 \right) + 55 \cdot \left(\frac{b_p}{a_{ep}} - 0.2 \right) - 40 \cdot \left(\frac{b_p}{a_{ep}} - 0.5 \right)^2$$

$$\lambda_{pc} := \frac{55 \cdot h_p}{\tau_1 - b_p - (h_p + 2 \cdot h_{ep} + 2 \cdot \delta) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot P}}$$

$$\lambda_{pb} := \frac{37b_p}{L_p}$$

λ_{pc} Coefficient de conductibilité magnétique du flux de dispersion a partir des pôles

λ_{pb} Coefficient de conductibilité magnétique de flux de dispersion dans les sections étroites des pôles

λ_{ep} : coefficient de conductibilité de flux magnétique dispersion à partir des surfaces l'épanouissement polaire

III-2-1-2-b- L'induction magnétique dans l'épanouissement polaire :

$$B_{p2} = \frac{\phi_{p2} \cdot 10^6}{K_{rem} \cdot L_p \cdot b_{ep}}$$

On tirera la valeur de H_{p2} du tableau qui correspondant la valeur de B_{p2}

III-2-1-3- Le champ magnétique dans la section du milieu du pôle :

III-2-1-3-a- Le flux magnétique dans la section du milieu du pôle :

$$\phi_{pmoy} = 0.5 \cdot (\phi_{p1} + \phi_{p2})$$

III-2-1-3-b- L'induction magnétique dans la section du milieu du pôle :

$$B_{pmoy} = \frac{\phi_{pmoy} \cdot 10^6}{K_{rem} \cdot L_p \cdot b_p}$$

On tirera la valeur de H_{pmoy} du tableau qui correspondant la valeur de B_{pmoy}

L'intensité du champ magnétique au milieu des pôles est donnée par :

$$H_p = \frac{H_{p1} \cdot H_{p2} \cdot 4 \cdot H_{pmoy}}{6}$$

On peut maintenant calculer la valeur de F_{pm} par la formule suivante :

$$F_{pm} = H_p \cdot L_{pm} \cdot 10^{-3}$$

III-2-1- La FMM dans le dos du rotor :

III-2-1-a- L'induction dans le dos du rotor :

$$B_{c2} = \frac{\phi_{pm} \cdot 10^6}{2 \cdot L_p \cdot K_{ferm} \cdot H_{cr}}$$

III-2-1-La FMM dans le dos du rotor :

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot L_{c2} \cdot 10^{-3}$$

L_{c2} : Etant la longueur moyenne des lignes du flux magnétique dans le dos du rotor

$$L_{c2} = \frac{\pi}{2p} (D_2 + h_{cr})$$

III-3- Entrefer :

III-3-1- La FMM dans l'entrefer :

III-3-1-1- Coefficient d'entrefer :

$$K_{\delta} = K_{\delta 1} \cdot K_{\delta 2} \cdot K_k$$

K_{δ} : Coefficient de carter.

Avec :

$K_{\delta 1}$: Le coefficient qui prend en considération l'existence des encoches du stator
il est calculé comme suit :

$$K_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{f1}}{t_1 - b_{f1} + \frac{5 \cdot \delta * t_1}{b_{f1}}}$$

Avec :

$K_{\delta 2}$: Le coefficient qui prend en considération l'existence des encoches du rotor
comme dans notre cas pas d'encoches rotorique on prend $K_{\delta 2}=1$

K_k : coefficient tenant compte de l'existence des canaux de ventilation.

$K_k = 1$; pas de canaux de ventilation.

III-3-1-1- Induction dans l'entrefer :

$$B_{\delta} = \frac{\phi \cdot 10^6}{a_i \cdot \tau_1 \cdot (L_i + 2\delta)}$$

$$F_{\delta} = 0.8 \cdot \delta \cdot K_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^3$$

III-4- La FMM totale :

La FMM totale d'une paire de pôle est la somme des FMM partielles du circuit magnétique de la machine, elle est donnée par la relation suivante :

$$F_{ex} = \sum F_i = 2(F_{\delta} + F_z + F_{pm}) + F_{cs} + F_{c2}$$

III-5- Coefficient de saturation magnétique du stator :

$$K_{sat} = \frac{F_{\delta zc}}{2 \cdot F_{\delta}}$$

Avec :

$F_{\delta zc}$: La FMM du stator par paire de pôle.

$$F_{\delta zc} = 2(F_{\delta} + F_z + F_{z2}) + F_{cs}$$

III-6- Le coefficient de saturation de la machine :

Le coefficient de saturation de la machine est défini comme étant le rapport de la FMM totale sur la FMM dans l'entrefer. Le coefficient de saturation est compris entre 1.1 et 1.4, il est donné par la relation suivante :

$$K_{sat} = \frac{\sum F_i}{2F_{\delta}}$$

III-7- Courant magnétisant :

Pour un circuit fermé, le courant magnétisant représente la partie réactive.

Il est donné par la formule suivante :

$$I_m = \frac{p \cdot F_{ex}}{0.9 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{enr1}}$$

III-8- Valeurs réduites des FMM et des flux : [2]

Pour pouvoir déterminer la caractéristique magnétisation complète de la machine $\phi^* = f(F_{ex})$ se fait en unité réduite. Pour les valeurs du flux dans l'entrefer ou de la FEM E^* sur les limites de [0.5 à 1.3].

La valeur de base (unité réduite) de la FMM correspond à une tension de phase nominale

$$F^*_{\delta zc} := \frac{F_{\delta zc}}{F_{ex0}}$$

$$\Phi^*_{pm} := \frac{\Phi_{pm}}{\Phi_{\delta 0}}$$

$$F^*_{ex} := \frac{F_{ex}}{F_{ex0}}$$

$$F^*_{pc} := \frac{F_{pc}}{F_{ex0}}$$

Il est recommandé de faire une comparaison entre la caractéristique à vide calculé et la caractéristique normalisée qu'il faudra tracer avec les éléments suivants

$E^*, \Phi^* [Ur]$	0	0.5	1	1.1	1.2	1.3
$F_{ex} [Ur]$	0	0.47	1	1.17	1.4	2

Tableau III-8-a

La différence entre les deux caractéristiques dans la zone de fonctionnement ne doit pas dépasser 15%

III-8- 1-Tableau des résultats de calculs du circuit magnétique à vide

Pour plusieurs valeurs de flux Φ on a le tableau suivant

Φ^*m	0.5	1	1.1	1.2	1.3
Φ	0.006	0.012	0.013	0.014	0.016
Variables	Induction B				
Entrefer	0.381	0.762	0.838	0.914	0.99
Dent du stator	0.789	1.578	1.736	1.89	2.051
pôles	0.854	1.70	1.87	2.049	2.22
Dent du rotor	0.772	1.18	1.302	1.47	1.59
Dos du rotor	0.615	1.23	1.78	1.47	1.59
F_{δ}	342.5	685	753	822.19	890.7
F_{δ}^*	0.2	0.41	0,457	0.498	0.54
F_z	0.23.54	11.28	17.5	28.144	0.54
F_z^*	0.0012	0.006	0.01	0.017	56.56
F_{cs}	50.57	124	227.27	575.35	0.034
F_{cs}^*	0.03	0.075	0.13	0.349	1181
F_{z2}	0.9	2.014	2.38	2.98	0.71
F_{z2}^*	0.005	0.0012	0.0014	0.0018	0.0022
F_{pm}	6.17	51.41	139	312.94	1181
F_{pm}^*	0.0034	0.03	0.084	0.18	0.71
F_{c2}	7	23.93	30.84	41.29	62.79
F_{c2}^*	0.004	0.011	0.018	0.025	0.0381
F_{ex}	763	1648.15	2083	2949.16	5508.96
F_{ex}^*	0.46	1	1.26	1.78	2.8
$F_{\delta zc}$	744.61	1521.39	1774.38	2281.99	3082.87
$F_{\delta zc}^*$	0.45	0.92	1.07	1.38	1.87
F_{pc}	19.34	126.76	308.91	667.17	2426.09
F_{pc}^*	0.011	0.07	0.18	0.404	1.47

Tableau-III-8- 1

Résultats des calculs du circuit magnétique à vide

III-8- 2-Interprétation des résultats

Les résultats des calculs pour plusieurs valeur du Φ_m sont donné par le Tableau-III-8-1 est tracé sur les figure III-8-2-1 et III-8-2-2 sous la forme de la caractéristique à vide et de magnétisation d'une machine synchrone à pôles saillants.

III-8- 2-1- La caractéristique à vide :

on remarque lorsque l'excitation est faible le flux d'induction mutuelle Φ_m^* est proportionnelle à la FMM total par paire de pôle (F_{ex}) qui se confond pratiquement avec la courbes normalisé fig. III-8- 2-1. Mais dès que le courant d'excitation dépasse sa valeur nominale, la tension E^* ou Φ_m^* augmente pu à pu par rapport à FMM total par paire de pôle F_{ex} .

III-8- 2-2-La caractéristique de magnétisation des tôles magnétique :

La figure. III-8- 2-2 nous montre que pour la Fmm du pôle et du dos de rotor F_{pc} accuse une croissance notable parce que dans la production de flux magnétique de rotor $\Phi_{pm} = \Phi_m + \Phi_\sigma$ un rôle de plus en plus grand revient au flux de dispersion Φ_σ qui croit, lorsque l'excitation augmente, sensiblement plus vite que le flux d'induction mutuelle Φ_m . Il résulte que la FMM F_{pc} diffère de plus en plus de F_δ et la caractéristique $\Phi_m = f(F_{pc})$ s'écarte davantage de la caractéristique de magnétisation rectiligne de l'entrefer $\Phi_m = f(F_\delta)$. La caractéristique $\Phi_m = f(F_{\delta zc})$ à une allure analogue à celle de la courbe de magnétisation normalisée à vide $\Phi_m = f(F_{ex})$.

Remarque

On tirera les valeurs de champ magnétique H du tableau acier 2013 pour les dents et la culasse qui correspondent aux valeurs des inductions B

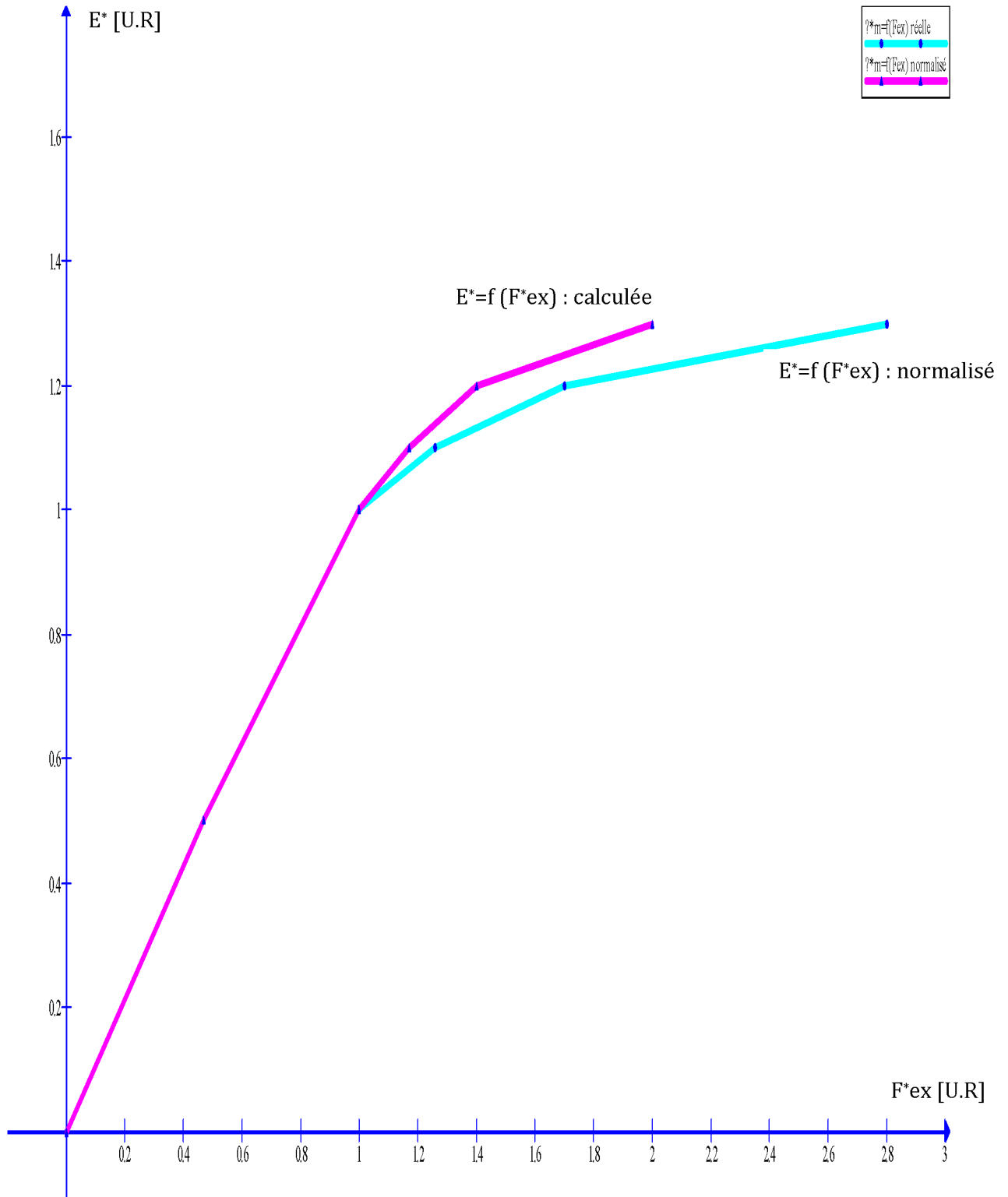


Fig. III-8- 2-1- Caractéristiques normales et réelle à vide da la machine synchrone à pôles saillants 15 KVA

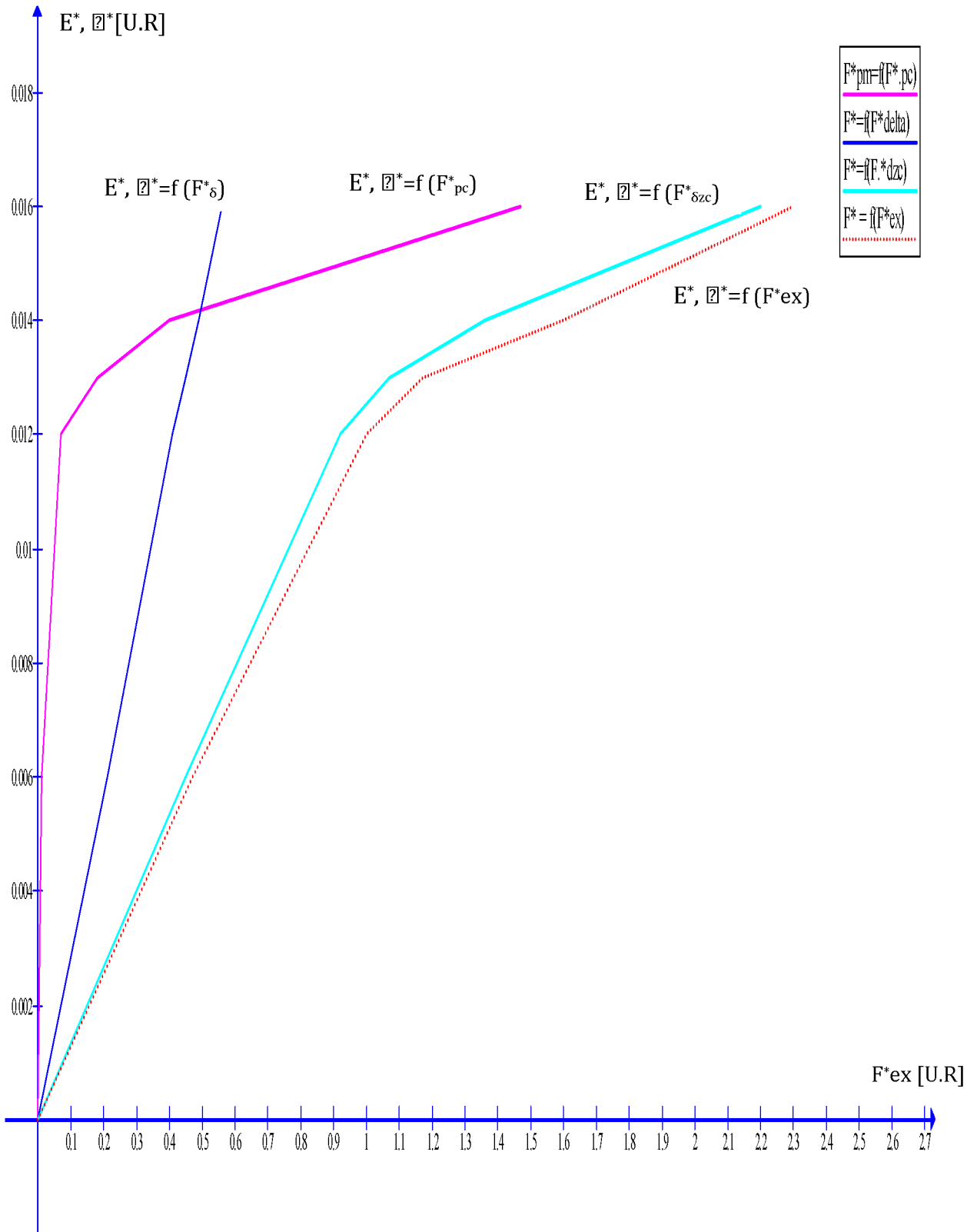


Fig. III-8- 2-2- Caractéristique de magnétisation d’une machine synchrone à pôles saillants 15KVA

III-9-Simulation de la génératrice par le logiciel FEMM [17]

III-9-1-Définition

Le logiciel FEMM est une suite de programmes modulaires utilisés pour résoudre les problèmes magnétostatique et électrostatique en deux dimensions (axisymétrique ou plan) ; le FEMM constituer en trois parties essentielles :

- **Preprocessor** (femme.exe) : C'est un programme de CAO pour la définition de géométrie du problème à résoudre, et définissant les conditions aux limites.
- **Solver** (fkern.exe) : Le solver prend en compte les fichiers de données décrivant le problème et résout les équations de Maxwell pour obtenir les valeurs de l'induction magnétique dans domaine de résolution.
- **Postprocessor** (femmview.exe) : C'est un programme graphique qui affiche les résultants sous forme de champ, de contour et densité. Le programme permet aussi à l'utilisateur d'inspecter le champ aux points arbitraires, et d'évaluer plusieurs différentes intégrales et tracer diverses quantités d'intérêt le long des contours définis par l'utilisateur. Deux programmes supplémentaires sont aussi appelés pour exécuter des tâches spécialisées. Ceux-ci sont:

a. triangle.exe : Triangle découpe la région avec en grand nombre de triangles, c'est une partie vitale du procédé d'éléments finis.

b. femmplot.exe : Ce programme est utilisé pour afficher les diverses solutions en 2D.

III-9-2-Résultats des inductions et les champs magnétique sur FEMM

III-9-2-1- Représentation de la génératrice synchrone à pole saillant :

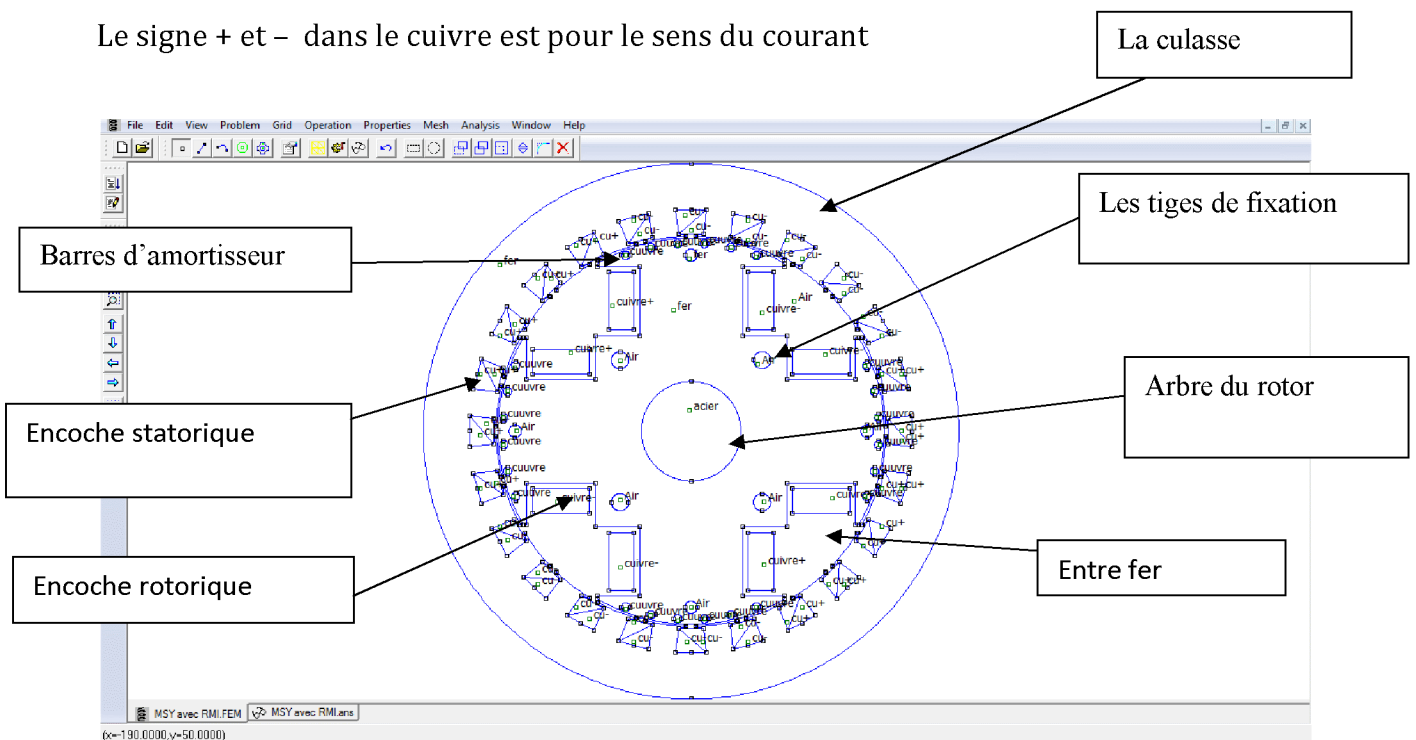
Pour tracer la géométrie de la génératrice complète sur le FEMM, se fait manuellement et en deux dimension.

Les dimensions de la génératrice synchrone à pôles saillants introduis dans ce logiciel sont données en annexe A₁

Les matériaux utilisés

- Fer : pour le rotor et le stator (culasse)
- Cuivre : pour les bobines
- Acier : pour l'arbre
- Aire : pour l'entrefer

Le signe + et - dans le cuivre est pour le sens du courant



III-9-1-La génératrice synchrone à pôles saillants représentée dans FEMM

III-9-2- Le maillage et la résolution

Nous avons utilisé le logiciel FEMM 4.2 Ce logiciel fait un maillage automatique et résout les problèmes de magnétostatique non linéaire en deux dimensions.

La figure III-9-2-1 montre un aperçu de maillage de la machines synchrone à pôles saillants. Le maillage comporte ainsi 27322 nœuds et 54302 éléments. Et la résolution comme montre la figure III-9-2-2 se fait à base de résoudre les équations de MAX WELL en magnétostatique.

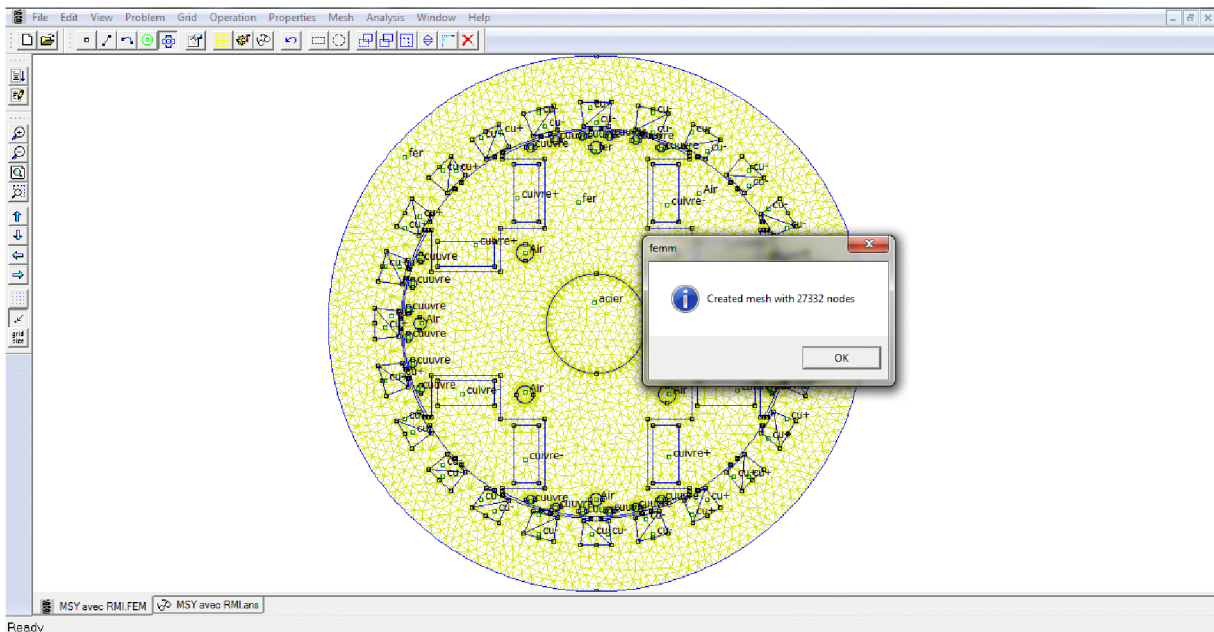


Figure III-9-2-1 Le maillage

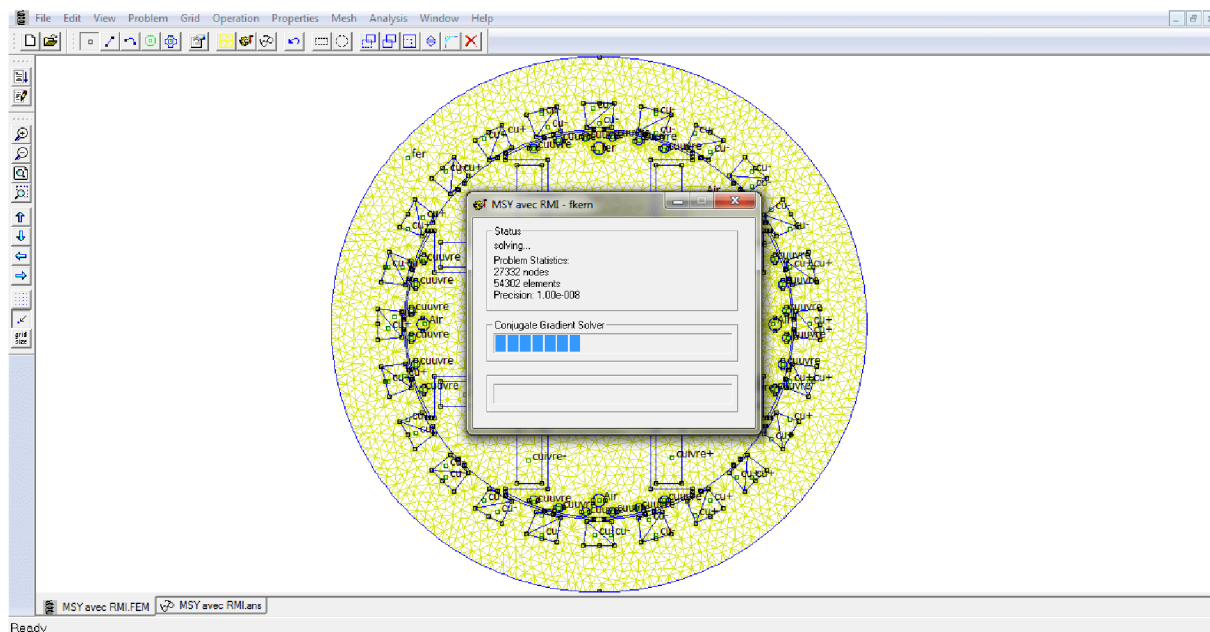
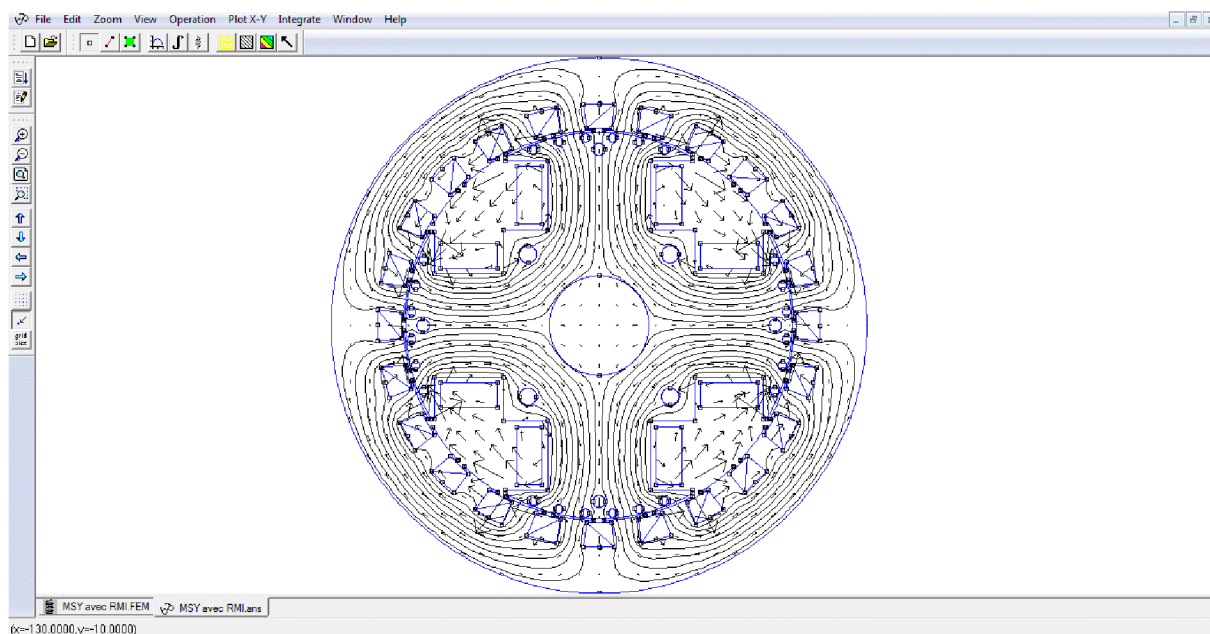


Figure III-9-2-2 la résolution

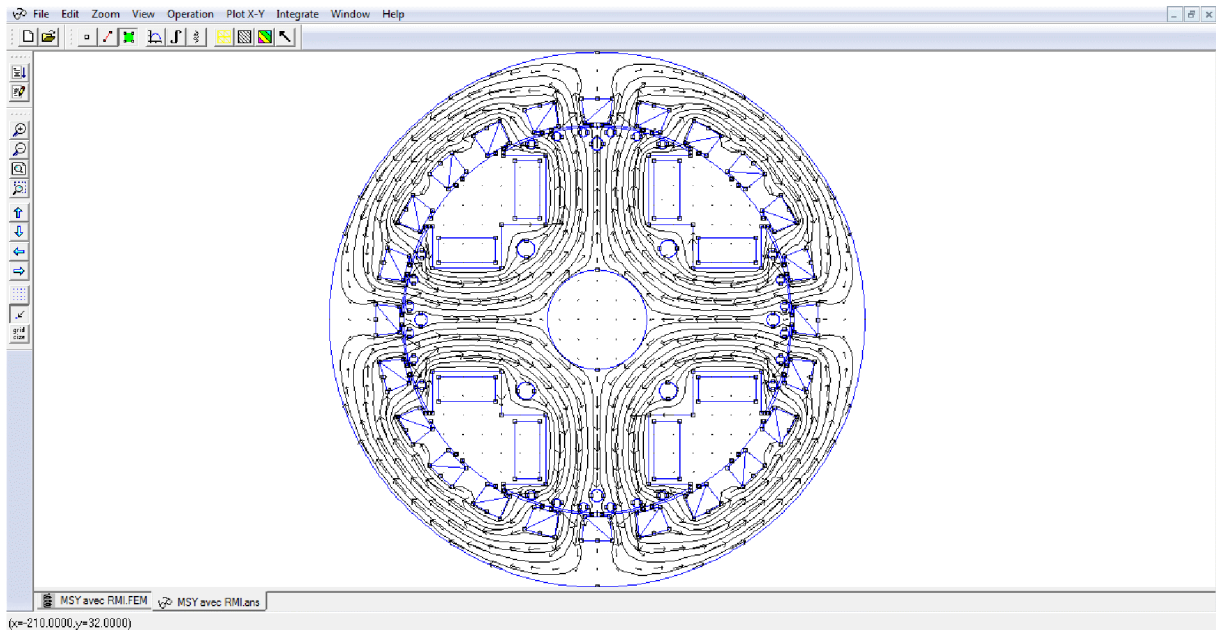
III-9-3- Exploitation des résultats

III-9-3- 1- Les lignes équipotentielles vecteurs du champ magnétique H



Figures III-9-3- 1 Les lignes équipotentielles
Vecteurs du champ magnétique H

III-9-3- 2-Les lignes équipotentielles vecteurs du champ induction magnétique B



**Figures III-9-3- 2 Les lignes équipotentielles
Vecteurs du champ induction magnétique B**

III-9-3- 2-interprétation

Les figures III-9-3-1 à III-9-3-2, nous montrons des lignes du champ crée par le courant d'excitation dans. Des lignes de champ du côté du flanc du rotor et des lignes de champ de fuite entre deux dents de stator. Le modèle des lignes de champ sont constitués de juxtapositions d'arcs de cercle de manière à ce qu'une ligne de champ sorte de pôle nord pour rentré au pôle sud de la surface d'un matériau ferromagnétique. Nous voyons en outre que l'induction dans l'entrefer est radiale au voisinage de l'alésage statorique.

III-9-3- 3-La densité de flux magnétique

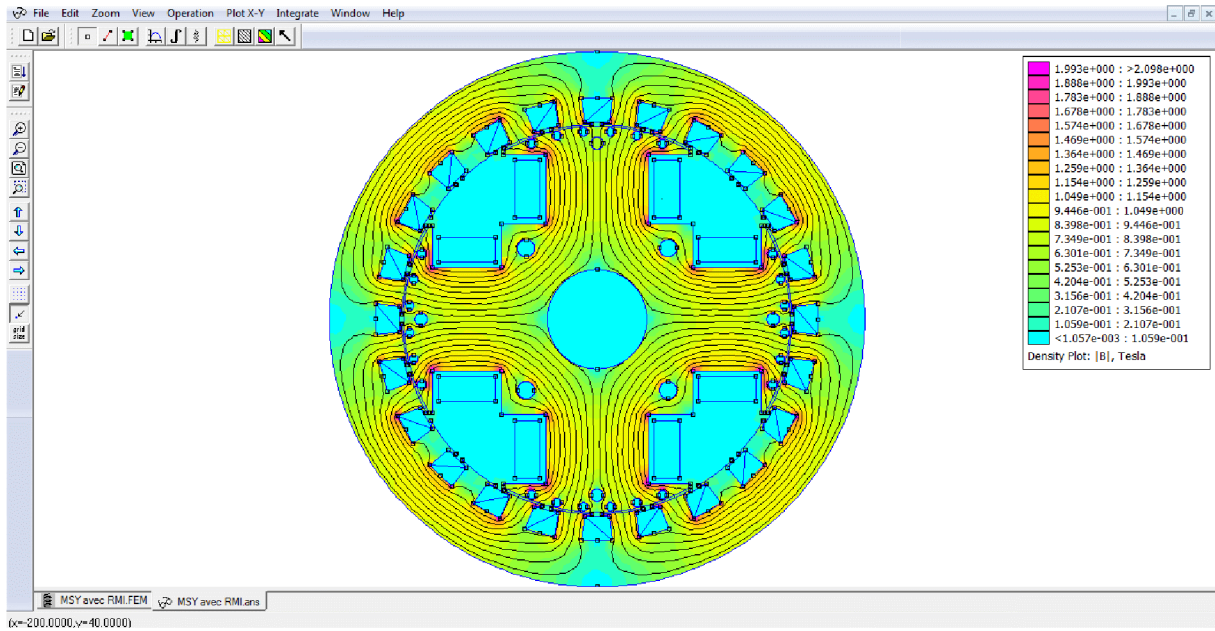


Figure-III-9-3-3 La densité de flux magnétique

III-9-3- 4-Intensité du champ magnétique

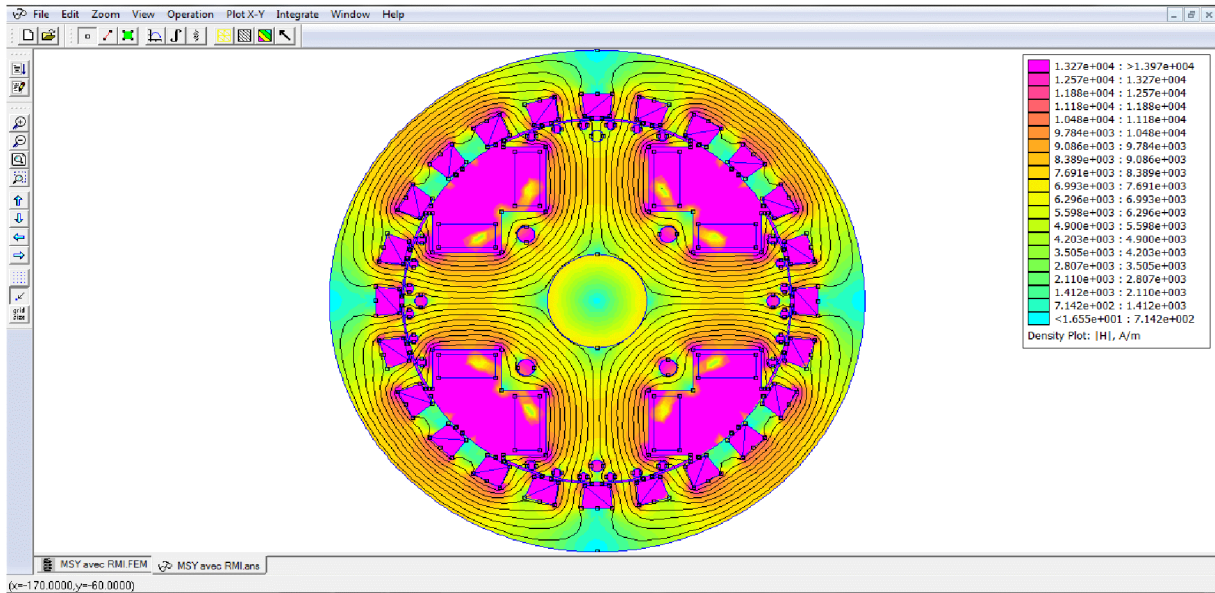


Figure-III-9-3-4 Intensité du champ magnétique

III-9-3- 4-1-interprétation

Nous pouvons vérifier sur la figure III-9-3-3 que les inductions dans les parties principales du rotor et de stator sont inférieure à 2,098 Tesla, ce qui expliqué par la méthode du calcul précédemment. Comme nous remarquons aussi des saturations locales au niveau des coins du rotor et des coins de certaines dents de stator.

Aussi on remarque sur la figure III-9-3-4 que l'intensité de champ sur les matériaux magnétique ne dépasse pas 9784 A/m comme représenté sur les tableaux normalisé acier 2013.

III-10- Calcul des résistances actives et inductives de fuites de l'enroulement

III-10-1- Résistance active en unité réduite : [12] [14]

$$R_{1r}^* = \frac{R_1}{V_{1n}} \cdot I_{1n}$$

III-10-2- Vérification de la résistance :

$$R_{1rv}^* = \frac{\pi \cdot D_{int1} \cdot A_1 \cdot J_1 \cdot L_{1moy} \cdot 10^{-6}}{114 \cdot m_1 \cdot V_{1n} \cdot I_{1n}}$$

III-10-3- Réactance de fuite par phase de l'enroulement statorique :

Pour déterminer les réactances de fuite de l'enroulement statorique, il est nécessaire d'étudier les différents flux de fuite, ces derniers sont caractériser par des coefficients de dispersion qui dépendent des dimensions et de l'encoche.

III-10-3-a- Coefficient de conductibilité magnétique de dispersion de l'encoche :

$$\lambda_{en1} = \frac{h_1}{3b_{en1}} \cdot K_\beta + \left(\frac{h_{11}}{b_{en1}} + \frac{3 \cdot h_{k1}}{b_{en1} + 2b_{f1}} + \frac{h_{f1}}{b_{f1}} \right) \cdot K_\beta$$

K_β ; K_β sont des coefficient de raccourcissement qu'on preleva de la figure 3

III-10-3-b- Coefficient de conductibilité magnétique de dispersion différentielle :

$$\lambda_{d1} := \frac{0.03 \cdot \tau_1 \cdot \alpha \cdot c_d}{\delta \cdot K_\delta \cdot q_1}$$

III-10-3-c- Coefficient de dispersion des parties frontales :

$$\lambda_{f1} := 0.34 \cdot \frac{q_1}{L_i} \cdot (L_{1front} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau_1)$$

III-10-3-d- Coefficient de dispersion entre les cornes des dents :

$$\lambda_k := 0.04 + k_k + 0.07 \cdot \sqrt{\frac{t_1 - b_{f1}}{b_{f1}}}$$

K_k la valeur est donnée par la courbe $K_k=f(k_{\beta\delta})$ Figure 5

$$k_{\beta\delta} := \frac{b_{f1}}{\delta \cdot K_\delta}$$

III-10-3-e-coefficient de dispersion globale du stator

$$\lambda_{\sigma} := \lambda_{en1} \cdot \lambda_{d1} \cdot \lambda_{f1} \cdot \lambda_k$$

D'ou la réactance de fuite du stator est

$$X_{\sigma} := \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot f \cdot L_{ep} \cdot W_1^2 \cdot \lambda_{\sigma}}{P \cdot q_1}$$

$L_{ep} = R_1 \cdot \theta_2$ longueur de l'épanouissement polaire

III-10-3- 1-réactance de fuite en unité réduite:

$$X_{\sigma}^* := \frac{X_{\sigma} \cdot l_n}{U_n}$$

III-10-3- 2-vérification de réactance de fuite en unité réduite:

$$X_{\sigma}^* := \frac{0.6 \cdot (D_{int1} \cdot A_1)^2 \cdot L_{\delta} \cdot \lambda_{\sigma} \cdot 10^{-3}}{m \cdot U_n \cdot l_n \cdot Z_1 \cdot q_1}$$

III-11- calcul des paramètres des enroulements de la machine : [11]

III-11-1-a- Resistance inductive longitudinale de la réaction d'induit :

$$X_{ad} := 2 \cdot m \cdot f \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-10} \cdot D_{int1} \cdot L_i}{K_{\delta} \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot K_{en}^2}{p^2} \cdot K_{d1}$$

$$X^*_{ad} := \frac{X_{ad}}{Z_n}$$

Avec :

K_{d1} : coefficient longitudinal de la réaction de l'induit est donné par la figure 4.

III-11-1-b- Résistance inductive transversale de la réaction d'induit :

$$x_{aq} := 2 \cdot m \cdot f \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-10} \cdot D_{int1} \cdot L_i}{K_{\delta} \cdot \delta} \cdot \frac{W^2 \cdot K_{en}^2}{p^2} \cdot K_q$$

$$X^*_{aq} := \frac{x_{aq}}{Z_n}$$

III-11-1-c- Réactance inductive longitudinal synchrone :

$$X^*_d := X^*_{ad} + X^*_\sigma$$

III-11-1-d- Réactance synchrone transversale :

$$X^*_q := X^*_{aq} + X^*_\sigma$$

III-11-2-Résistance de l'enroulement d'excitation :

III-11-2-1-Résistance active de l'enroulement d'excitation rapporté à l'enroulement du stator à la température de fonctionnement:

Sur l'axe d :

$$R^*_{exd} := K_{ad} \cdot R^*_{ex}$$

$$K_{ad} := \frac{K_{d1}}{K_f}$$

Sur l'axe q :

$$R^*_{exq} := R^*_{ex} \cdot K_{aq}$$

$$K_{aq} := \frac{K_q}{K_f}$$

K_{ad} , k_{aq} on peut les vérifier sur la figure 6

III-11-2-1- inductance de l'enroulement d'excitation :

$$X_{ex} := \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-10} \cdot D_{int1} \cdot L_i}{K_{\delta} \cdot \delta} \cdot \frac{W_{ex}^2}{P^2}$$

$$X_{ex}^* := \frac{X_{ex}}{Z_n}$$

Sur l'axe d :

$$X_{exd}^* := X_{ex}^* \cdot K_{ad}$$

Sur l'axe q :

$$X_{exq}^* := X_{ex}^* \cdot K_{aq}$$

III-11-2-2- Réactance de dispersion de l'enroulement d'excitation :

$$X_{ex\sigma}^* := X_{ad}^* - X_{ex}^*$$

III-11-2-3- Réactance inductive de l'enroulement rotorique ramène au stator :

$$X_{exs}^* := X_{ex}^* \cdot \frac{W \cdot K_{en}}{W_{ex}}$$

III-11-3- Calcul des résistances inductives et réactives de l'enroulement

amortisseur : [13]

$$R_D := \frac{L_p \cdot N_2 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot \left(\frac{d_{amo}}{2} \cdot 10^{-3} \right)^2}$$

Avec :

N_2 nombre d'amortisseur total

d_{amo} : diamètre de l'amortisseur

$$R_D^* := \frac{R_D}{Z_n}$$

III-11-3-1- Coefficient de perméance d'une barre unique d'amortisseur par unité de longueur :

$$\lambda_{pd} := \frac{0.35 \cdot R_D}{4\pi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-6}}$$

III-11-3-2- Coefficient de perméance de l'encoche des barres d'amortisseur :

$$\lambda_{pdt} := \lambda_{pd} + \frac{h_p}{b_p}$$

III-11-3-3- Coefficient de perméance des barres d'amortisseur :

$$\lambda := \frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot D}{\delta \cdot P}$$

III-11-3-4- Réactance longitudinale synchrone propre de l'amortisseur :

$$x_{Dd} := \frac{(W_1 \cdot 0.34)^2 \cdot 8 \cdot f \cdot L_i}{P \cdot 10^8} \cdot \left[K_d \cdot \lambda + \frac{\lambda \cdot p \cdot d \cdot t}{N_2 \cdot (1 + K')} \right]$$

$$x^*_{Dd} := \frac{x_{Dd}}{Z_n}$$

III-11-3-5- Réactance transversale synchrone propre de l'amortisseur :

$$x_{Qq} := \frac{(W_1 \cdot 0.34)^2 \cdot 8 \cdot f \cdot L_i}{P \cdot 10^8} \cdot \left[K_q \cdot \lambda + \frac{\lambda \cdot p \cdot d \cdot t}{N_2 \cdot (1 - K')} \right]$$

$$x^*_{Qq} := \frac{x_{Qq}}{Z_n}$$

Avec

$$K' := \frac{\sin(\xi \cdot 2)}{2 \cdot \sin(\xi)}$$

ξ Angle entre deux barres amortisseur

III-11-3-6- Réactance mutuel rapporté au stator entre l'enroulement d'excitation et l'amortisseur direct :

$$X_{Ded} := \frac{(W_1 \cdot 0.34)^2 \cdot 8 \cdot f \cdot L_j}{P \cdot 10^8} \cdot (\lambda_{pdt} \cdot K_{d1})$$

$$X^*_{Ded} := \frac{X_{Ded}}{Z_n}$$

III-11-3-6- Réactance mutuelle d'une phase du stator et l'amortisseur transversal :

$$X_{Qeq} := \frac{(W_1 \cdot 0.34)^2 \cdot 8 \cdot f \cdot L_j}{P \cdot 10^8} \cdot (K_q \cdot \lambda_{pdt})$$

$$X^*_{Qeq} := \frac{X_{Qeq}}{Z_n}$$

III-11-4- Réactance transitoire de l'enroulement du stator :

Sur l'axe d :

$$X'^*_{d1} := X^*_d - \frac{3}{2} \cdot \frac{X^*_{Ded}{}^2}{X^*_{ex}}$$

Sur l'axe q :

$$X'^*_{q1} := X^*_q - \frac{3}{2} \cdot \frac{X^*_{Qeq}{}^2}{X^*_{Qq}}$$

III-11-5- Résistance transitoire et subtransitoire de l'enroulement du stator : [14]

III-11-5-1- Réactance transitoire longitudinale de l'enroulement du stator :

$$X'^*_{d} := X^*_{\delta} + \frac{X^*_{ad} \cdot X^*_{ex\sigma}}{X^*_{ad} + X^*_{ex\sigma}}$$

III-11-5-2- Réactance transitoire transversale de l'enroulement du stator :

$$X'^*_{q} := X^*_{q}$$

III-11-5-3- Réactance subtransitoire longitudinale de l'enroulement du stator :

$$X''^*_{d} := X^*_{\delta} + \frac{x^*_{Dd} \cdot (X'^*_{d} - X^*_{\delta})}{x^*_{Dd} + X'^*_{d} + X^*_{\delta}}$$

III-11-5-4- Réactance subtransitoire transversale de l'enroulement du stator :

$$X''^*_{q} := X^*_{\delta} + \frac{X^*_{aq} \cdot X''^*_{d}}{X^*_{aq} + x^*_{Qq}}$$

III-11-6- Constantes des temps : [12] [15]

III-11-6-1- Constante du temps transitoire longitudinale en circuit ouvert :

$$T'_{d0} := \frac{X^*_{ex}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R^*_{ex}}$$

On pose:

$$\sigma_{af} := 1 - \frac{\frac{3}{2} \cdot X_{Ded}^*{}^2}{X_a^* \cdot X_{ex}^*}$$

$$\tau_d := \frac{x_{Dd}^*}{2\pi f \cdot R_D}$$

$$\sigma_{fd} := \frac{X_{Ded}^*{}^2}{X_{ex}^* \cdot X_{Dd}^*}$$

$$\sigma_{ad} := 1 - \frac{X_{Ded}^*{}^2}{X_{ad}^* \cdot X_{Dd}^*}$$

$$K_{af} := \frac{X_{Ded}}{\sqrt{X_{ad}^* \cdot X_{ex}^*}}$$

$$K_{aD} := \frac{X_{Ded}^*}{\sqrt{X_{ad}^* \cdot X_{Dd}^*}}$$

$$K_{fD} := \frac{X_{Ded}}{\sqrt{X_{ex}^* \cdot X_{Dd}^*}}$$

III-10-6-2- Constante du temps subtransitoire longitudinale en circuit ouvert :

$$T''_{d0} := \sigma_{fd} \cdot \tau_d$$

III-11-6-3- constante du temps transitoire longitudinale en court circuit

$$T'_d := \sigma_{af} \cdot T'_{d0}$$

III-11-6-4- constante du temps subtransitoire longitudinale court circuit

$$T''_d := \tau_d \cdot \frac{\sigma_{af} + \sigma_{fd} + \sigma_{ad} - 2 \cdot \left(1 - \frac{3}{2} \cdot K_{af} \cdot K_{aD} \cdot K_{fD} \right)}{\sigma_{af}}$$

III-11-6-5- constante du temps subtransitoire transversale en circuit ouvert

$$T''_{q0} := \frac{x^*_{Qq}}{2 \cdot \pi \cdot f R^*_Q}$$

III-11-6-6- constante du temps subtransitoire transversale en court circuit

$$T''_q := T''_{q0} \cdot \left(1 - \frac{X^*_{Qeq}{}^2}{X^*_{aq} \cdot x^*_{Qq}} \right)$$

III-11-6-Définition des constantes du temps

T'_{d0} : Constante de temps de l'inducteur, les enroulements de l'induit d et l'amortisseur

D est supposé ouvert

T''_{d0} : Constante de temps de l'amortisseur D, l'inducteur étant supposé en court circuit l'induit en circuit ouvert

T'_d : Constante de temps de l'inducteur, l'induit est supposé en court circuit et l'amortisseur D en circuit ouvert

T''_d : Constante de temps de l'amortisseur D l'inducteur et l'induit sont court circuit

T''_{q0} Constante de temps de l'amortisseur Q, l'induit en circuit ouvert

T''_q Constante de temps de l'amortisseur Q, l'induit en cour circuit

III-12- Tableau de résultats :

Désignation	Symbole	résultat	Unité
La FMM dans la dent du stator	F_{cs}	24.78	A
La FMM dans le pôle du rotor	F_{pm}	74.94	A
Le flux magnétique sur la base du pôle	Φ_{p1}	0.013	Wb
L'induction magnétique sur la base du pôle	B_{p1}	1.74	T
Le flux magnétique dans l'épanouissement polaire	Φ_{p2}	0.013	Wb
L'induction magnétique dans l'épanouissement polaire	B_{p2}	0.91	T
Le flux magnétique dans la section du milieu du pôle	Φ_{pmoy}	0.013	Wb
L'induction magnétique dans la section du milieu du pôle	B_{pmoy}	1.74	T
L'induction dans le dos du rotor	B_{c2}	1.18	T
La FMM dans le dos du rotor	F_{c2}	2.91	A
La FMM dans l'entrefer	F_{δ}	684.142	A
Coefficient d'entrefer	K_{δ}	1.124	-
Induction dans l'entrefer	B_{δ}	0.9	T
La FMM totale	F_{ex}	1739	A
Le coefficient de saturation de la machine	K_{sat}	1.095	-
Résistance active en unité réduite	R^*_{1r}	0.036	Ur
Vérification de la résistance	R^*_{1rv}	0.037	Ur
Résistance inductive longitudinale de la réaction d'induit	X^*_{ad}	20.3	Ω
Résistance inductive transversale de la réaction d'induit	X^*_{aq}	11.42	Ω
Réactance inductive longitudinal synchrone	X^*_d	2.29	Ur

Réactance synchrone transversale	X_q^*	1.37	Ur
Réactance de dispersion de l'enroulement d'excitation	$X_{ex\sigma}^*$		Ur
Réactance inductive de l'enroulement rotorique ramène au stator	$X_{exs\lambda}^*$	0.04	Ur
Coefficient de perméance d'une barre unique d'amortisseur par unité de longueur	λ_{pd}	0.35	-
Coefficient de perméance de l'encoche des barres d'amortisseur	λ_{pdt}	1.02	-
Réactance longitudinale synchrone propre de l'amortisseur	X_{Dd}	4.02	Ω
Réactance transversal synchrone propre de l'amortisseur	X_{Qq}	4.52	Ω
Réactance mutuel rapporté au stator entre l'enroulement d'excitation et l'amortisseur direct	X_{Ded}	0.26	Ω
Réactance mutuelle d'une phase du stator et l'amorti transversal	X_{Qeq}	0.12	Ur
Réactance transitoire longitudinale de l'enroulement du stator	X_d''	2.29	Ur
Réactance subtransitoire longitudinale de l'enroulement du stator	X_d'''	0.08	Ur
Réactance subtransitoire transversale de l'enroulement du stator	X_q'''	0.13	Ur
Réactance subtransitoire longitudinale de l'enroulement du stator	X_d'''		
Constante du temps transitoire longitudinale en circuit ouvert	T_{d0}'	$1.8 \cdot 10^{-3}$	s
Constante du temps subtransitoire longitudinale en circuit ouvert	T_{d0}''	$2.1 \cdot 10^{-3}$	s
Constante du temps transitoire longitudinale en court circuit	T_d'	$1.89 \cdot 10^{-3}$	s
Constante du temps subtransitoire longitudinale en court circuit	T_d''	$2.84 \cdot 10^{-3}$	s
Constante du temps subtransitoire transversale en circuit ouvert	T_{q0}''	$4.3 \cdot 10^{-3}$	s
Constante du temps subtransitoire transversale en court circuit	T_q''	$1.6 \cdot 10^{-3}$	s

Tableau : III-11-1

Conclusion

A partir du calcul du circuit magnétique nous déduisons les forces magnétomotrices dans les différentes parties de la machine. On comparant la caractéristique magnétique à vide calculée à celle normalisée, nous constatons qu'elles sont confondues au régime linéaire, mais un écart existe au-delà du point de fonctionnement. Par la suite, le logiciel FEMM nous permet d'obtenir globalement les mêmes résultats en partant seulement de la géométrie et des caractéristiques des matériaux de la machine. Enfin, les paramètres électriques et les constantes de temps sont déduits aisément.

Sommaire

Introduction.....	37
III-1- Circuit magnétique statorique.....	37
III-1-1- La FMM dans la culasse du stator	37
III-1-2- La FMM dans la dent du stator	37
III-2- Circuit magnétique rotorique	38
III-2-1- La FMM dans le pôle du rotor.....	38
III-2-1- La FMM dans le dos du rotor.....	41
III-2-1-La FMM dans le dos du rotor.....	41
III-3- Entrefer.....	41
III-3-1- La FMM dans l'entrefer	41
III-3-1-1- Coefficient d'entrefer.....	41
III-4- La FMM totale.....	42
III-5- Coefficient de saturation magnétique du stator	43
III-6- Le coefficient de saturation de la machine.....	43
III-7- Courant magnétisant.....	43
III-8- Valeurs réduites des FMM et des flux	44
III-9-Résultats des inductions et les champs magnétique sur FEMM	49
III-10- Calcul des résistances actives et inductives de fuites de l'enroulement.....	54
III-11- calcule des paramètres des enroulements de la machine	58
III-12- Tableau de résultats.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.

Calculs
des pertes
et
de rendement

Introduction :

Si nous étudions les pertes d'une machine tournante, nous pouvons les diviser en 4 groupes

1-Les pertes mécaniques comprenant :

- ✓ Les pertes par frottement aux paliers.
- ✓ Les pertes par frottement aux balais.
- ✓ Les pertes par ventilation et frottement sur l'aire.

2-Les pertes dans le fer réunissant

- ✓ Les pertes par hystérésis dues au flux principal
- ✓ Les pertes fer supplémentaire à vide produite par des variations locales d'induction
- ✓ Les pertes supplémentaires en charge

3-Les pertes dans le cuivre :

- ✓ Les pertes joule normales dans les enroulements
- ✓ Les pertes supplémentaires dans le cuivre à vide et en charge

4-Les pertes par chutes de tension aux contacts aux balais

IV-1- Pertes magnétiques (pertes fer) : [9] [16]

Ce sont des pertes par hystérésis et courants de Foucault due au flux principal. Les pertes par hystérésis sont des pertes qui résultent de la transformation de l'organisation de la matière sous l'effet de la variation en intensité du champ magnétique

appliqué, par contre les pertes par courants de Foucault sont dues aux courants créés dans la tôle par la FEM induite par aimantation alternative.

Une grande partie de ces pertes se dissipe au niveau des dents et de la culasse statorique. Par contre dans le rotor ces pertes sont négligeables à cause de faible variation du flux dans le rotor.

IV-1-1- Pertes dans les dents statorique :

$$m_d = \left((b_{en1max} + b_{en1min}) \frac{h_{z1}}{2} + 0.5 \left((b_{en1min} + 5) \frac{h_{k1}}{2} + 5 \right) \right) \cdot \gamma_T \cdot L_i \cdot Z_1 \cdot 10^{-9}$$

Avec :

m_d : La masse des dents du stator.

γ_T : Masse volumique des tôles.

$$P_{fd} = 4 \cdot (K_h \cdot f \cdot K_f \cdot (10^{-3} \cdot L_i \cdot f)^2) \cdot B_{z2}^2 \cdot m_d \cdot 10^{-3}$$

Avec :

K_f : Le coefficient de caractéristique de la tôle magnétique figure 7.

K_h : Le coefficient de pertes par hystérésis figure 8.

IV-1-2- Pertes dans la culasse statorique :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{fcs} = 2 \cdot (K_h \cdot f \cdot K_f \cdot (10^{-3} \cdot L_i \cdot f)^2) \cdot B_{cs}^2 \cdot m_{cs} \cdot 10^{-3}$$

Avec :

m_{cs} : La masse de la culasse du stator.

Il se calcul par cette formule :

$$m_{cs} = \gamma_T \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{ext1}^2 - (D_{int1} + h_z)^2) \cdot L_i \cdot K_{fer} \cdot 10^{-9}$$

IV-2- Pertes électriques :

Ce sont des pertes par effet joules dans les enroulements d'induit, d'excitation et, plus généralement, dans toutes les parties conductrices d'une machine traversées par des courants. elles sont proportionnelles aux carré du courant qui traverse les conducteurs. Donc, on distingués :

IV-2-1- Pertes par effet joules statorique :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{js} = m_1 \cdot (R_1 \cdot I_n^2)$$

Avec :

R_1 : La résistance d'une phase statorique.

I_n : Le courant qui traverse la phase statorique.

IV-2-2- Pertes par effet joules rotorique :

Elles sont données par la relation suivante :

$$P_{jr} = (R_r \cdot I_{exn}^2)$$

Avec :

R_r : La résistance de circuit d'excitation rotorique.

I_{exn} : Le courant qui traverse l'enroulement d'excitation rotorique

IV-3- Pertes mécaniques :

Ces pertes prennent en compte tous les frottements dus à la rotation de la partie tournante de la machine, que ce soit des frottements entre solides ou entre solide et fluide.

Les pertes dues aux phénomènes principaux, en particulier celles qui correspondent aux courants et flux à fréquence fondamentale, sont appelées pertes normales.

Les pertes dues à tous les phénomènes parasites, en particulier celles qui correspondent aux flux de fuite, même à la fréquence fondamentale, et aux courants et flux aux fréquences harmoniques sont appelées pertes supplémentaires.

Cette formule ci-dessous donne la somme des toutes les pertes mécanique.

$$P_{mec} = 8 \cdot D_{int1} \cdot (L_i \cdot 10^{-3} + 0.15) \cdot V_1^2 \cdot 10^{-3}$$

Avec :

V_1 : Vitesse linéaire du rotor.

Il se calcul par cette formule :

$$V_1 = \left(N \cdot \frac{2\pi}{60} \right) \cdot \frac{D_{int1} \cdot 10^{-3}}{2}$$

IV-4- La somme des Pertes totale :

Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_T = P_{fd} + P_{fcs} + P_{js} + P_{jr} + P_{mec}$$

IV-5- calcul de rendement :

Elle est donnée par cette relation :

$$\eta = \frac{S_n \cdot \cos \varphi}{S_n \cdot \cos \varphi + P_T \cdot 10^{-3}}$$

Cette définition ne prend pas en compte les pertes supplémentaires, mais donne tout de même une bonne indication de la performance de la machine en termes de rendement. L'estimation du rendement requiert une connaissance des pertes Joule et pertes fer. Ces pertes supplémentaires sont dues essentiellement aux courants de Foucault dans le fer et dans le cuivre. Elles ne sont pas calculables mais peuvent être mesurées par des essais en court-circuit.

IV-6- Tableau des résultats :

Désignation	Symbole	Résultats	Unité
Pertes dans les dents statorique	P_{fd}	35.682	W
Pertes dans la culasse statorique	P_{cs}	172.012	W
Pertes par effet joules statoriques	P_{js}	538.034	W
Pertes par effet joules rotoriques	P_{jex}	425.441	W
Pertes mécaniques	P_{mec}	122.502	W
La somme des Pertes totale	P_T	1293,671	W
rendement	η	0.903	-

Conclusion

Après le calcul des pertes dans les différentes parties de la génératrice on remarque que les pertes par effet joule dans les enroulements statorique et rotorique sont importantes et couvre 74% des pertes de la machine.

Sommaire

IV-1- Pertes magnétiques (pertes fer) :.....	69
IV-1-1- Pertes dans les dents statorique :	70
IV-1-2- Pertes dans la culasse statorique :	70
IV-2-1- Pertes par effet joules statoriques :	71
IV-2-2- Pertes par effet joules rotoriques :.....	72
IV-3- Pertes mécaniques :.....	72
IV-4- La somme des Pertes totale :	73
IV-5- calcul de rendement :	73
IV-6- Tableau des résultats :	74
conclusion.....	74

Conclusion général

Conclusion général

Dans ce mémoire, on s'est intéressé au calcul électromagnétique de la génératrice synchrone à pôles saillants. Ce calcul est basé sur les dimensions géométriques et électriques.

Le calcul électromagnétique des machines est un domaine vaste et complexe. Ceci s'explique par le grand nombre de paramètres interdépendants qui interviennent dans ces calculs.

Nous avons déterminé les contraintes électromagnétiques à partir des données géométriques connues de la machines telles que les inductions statorique et rotorique, la charge linéaire, le flux magnétique et le coefficient de remplissage des encoches nous constatons que les paramètres se situent dans les limites des marges admissibles.

En suite, on a fait des calculs du circuit magnétique a vide pour déterminer les FMM statorique et rotorique, qui nous menons à tracer les caractéristiques de magnétisation de cette machine. Le logiciel FEMM nous a permis de vérifier les résultats obtenus par la méthode classique. Puis on à déterminé les paramètres électriques et les constants de temps.

En dernier on a calculé les pertes dans les différentes parties de la machine pour déterminer le rendement qui est d'ailleurs de valeur acceptable.

Nous estimons que les résultats obtenus sont satisfaisants du fait qu'ils se trouvent dans les limites des marges admissible fixée par les constructeurs :

- Les inductions dans les différentes parties de la machine.

- Le coefficient de remplissage et de saturation.
- Les constantes du temps.

L'importance de l'outil informatique (MathCad 14.0) réside dans la rapidité d'exécution du calcul et la précision des résultats.

Annexe

Annexe A₁**Les dimensions géométrie de la machine****1-stator**

Paramètres	Indice	Valeurs	Unité
Diamètre extérieur	D_{ext}	290	mm
Diamètre intérieur	D_{int}	203.4	mm
Langueur	l	145	mm
Nombre de fonte	Z	24	-
Diamètre de conducteur	D_{con1}	0.8*6	mm

2- rotor

Paramètres	Indice	Valeurs	Unité
Hauteur de pole	h_p	36	mm
Largeur de pole	b_p	54	mm
Hauteur de l'épanouissement polaire	h_{ep}	14.5	mm
Langueur de l'amortisseur	L_i	145+3.2	mm
L'entrefer	δ	0.7	mm
Nombre de fonte	N_2	24	-
Diamètre de la fonte	d_{en}	4.4	mm
Diamètre d'amortisseur	d_{amo}	4	mm
Rayon de pole	R_1	96	mm
Diamètre de conducteur	D_{con2}	1.1	mm
Nombre de pôles	$2p$	4	-

3-Paramètres électrique pour l'excitation

Paramètres	Indice	Valeurs	Unité
La densité de courant	J_{ex}	4.63	A/mm ²
Nombre de tour bobines	W_{ex}	435	-
La résistance	R_{ex}	3.75	Ω

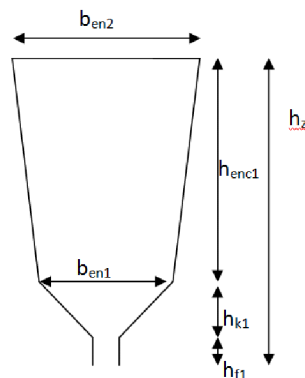
4-Paramètres électrique de l'induit

Paramètres	Indice	Valeurs	Unité
La densité de courant	J_{ex}	7.56	A/mm ²
Nombre de tour bobines	W_{ex}	22	-
La résistance	R_1	0.345	Ω

5-Les valeurs des coefficients choisir à partir des courbes

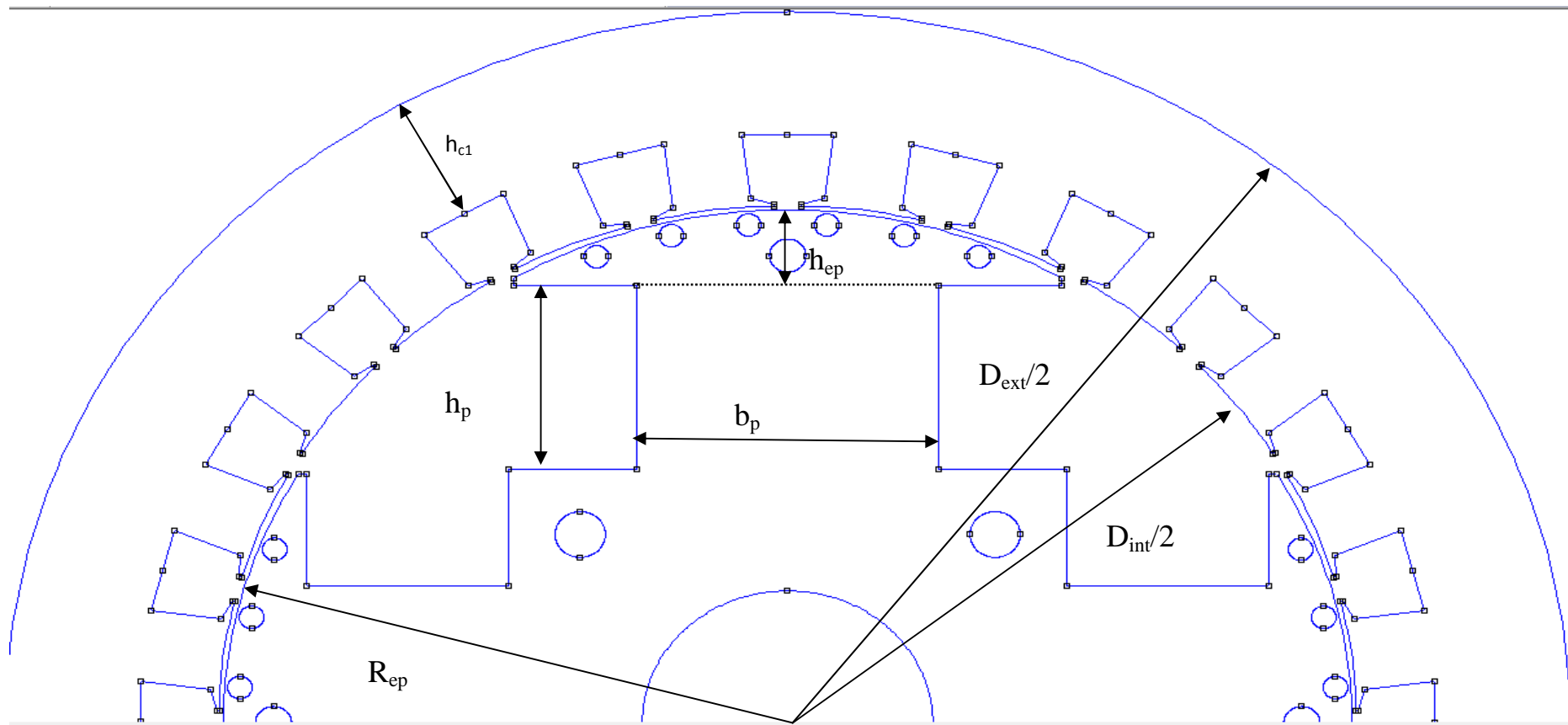
a_i	0.68
$X^*.\delta$	0.075
a_1	1
$K.d1$	0.8
$K.q$	0.45
$K.ad$	0.708
$K.aq$	0.398
$\gamma.T$	$7.8 \cdot 10^3$
ε	-1
$K_\beta ; K_\beta$	1
c_d	0.82
K_k	0.1
ξ	0.07 rd

6- Encoche trapézoïdale statorique :



Désignation	Valeurs (mm)
b_{en1}	16.3
b_{en2}	13
h_{enc1}	12.5
h_{f1}	1
h_{k1}	1.5
h_z	14

Tableau de dimension d'encoche



Annexe A₂

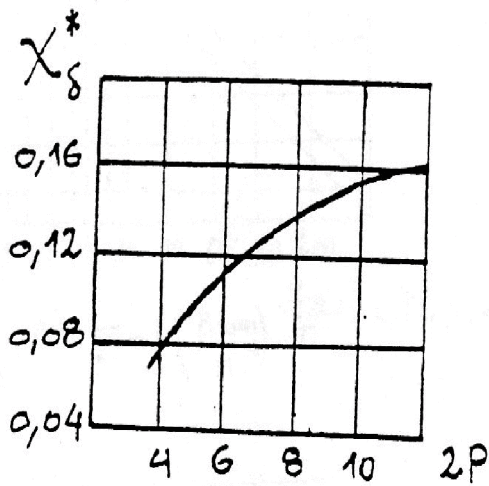


Fig. 1 $X^*_{\delta} = f(2P)$
courbe pour la détermination de X^*_{δ}

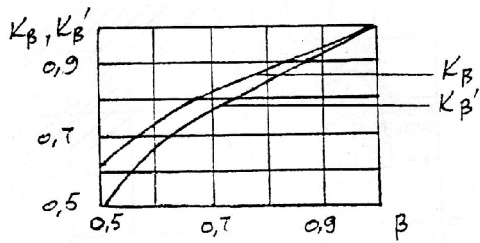
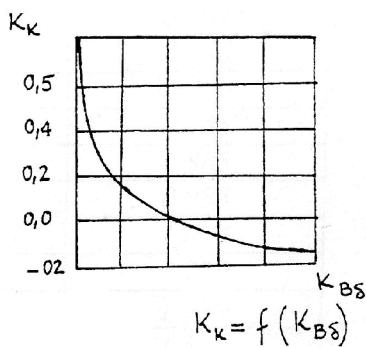


Figure 3

$$K_{\beta} = f(\beta)$$

$$K'_{\beta} = f(\beta)$$

courbes pour la détermination de K_{β}
et K'_{β}



$$K_{\kappa} = f(K_{B\delta})$$

Figure 5

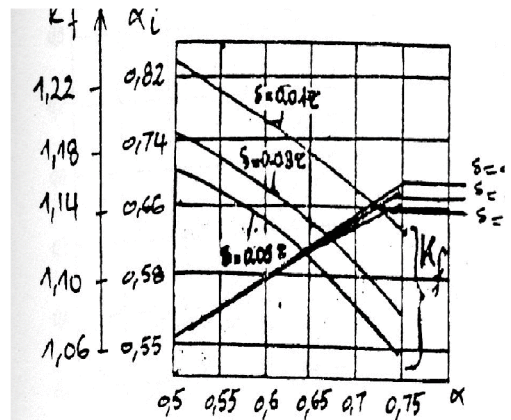


Fig 2 $\alpha_i = f(\alpha)$

courbes pour la détermination de α_i et K_f

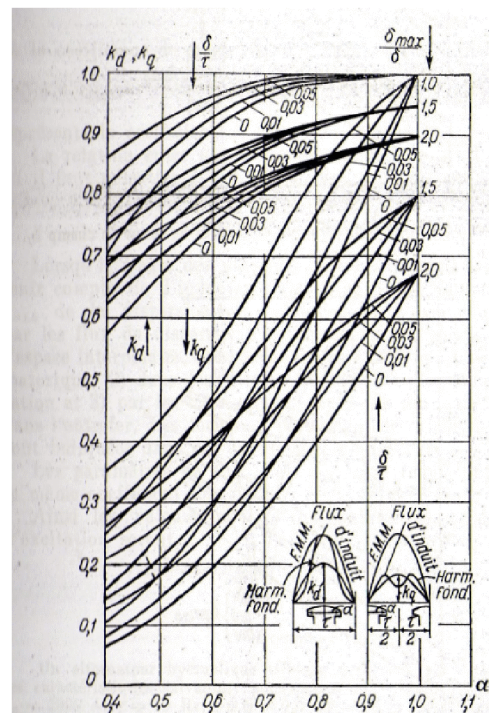


Fig. 8-8. Courbes pour la détermination des coefficients k_d et k_q .

Figure 4

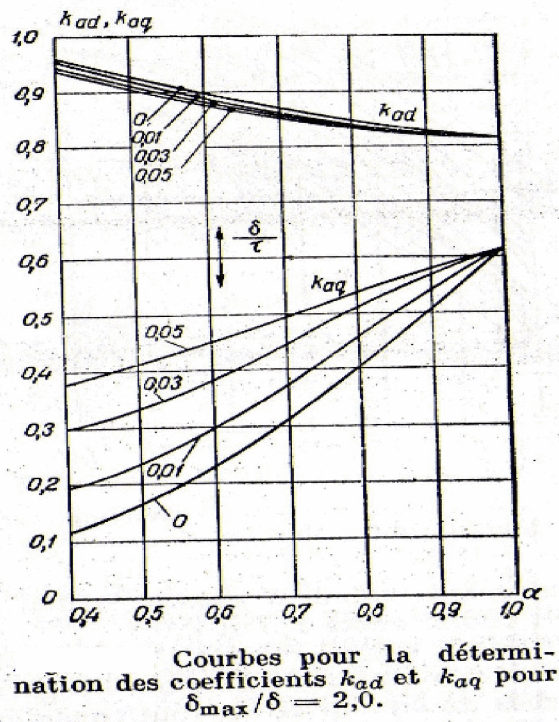


Figure 6

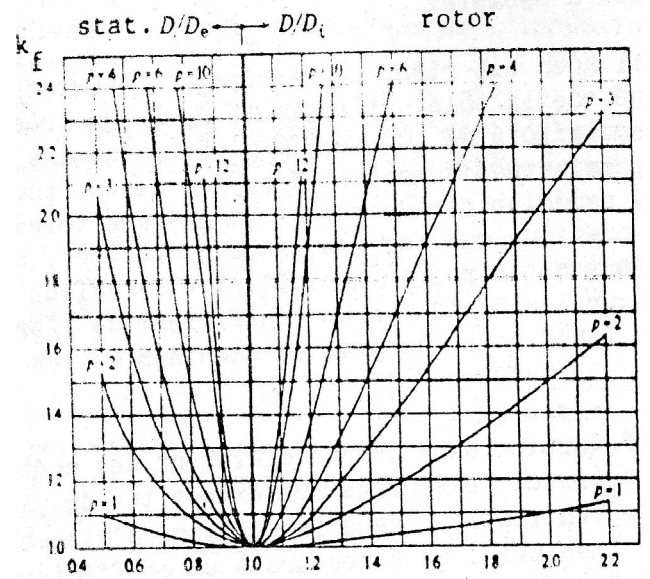


Figure 7

coubes pour la détermination de K_f
coefficient de caractéristique de toles

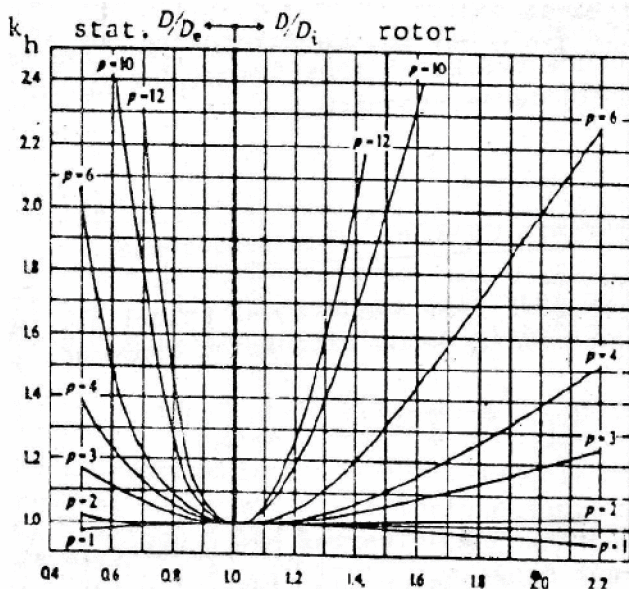
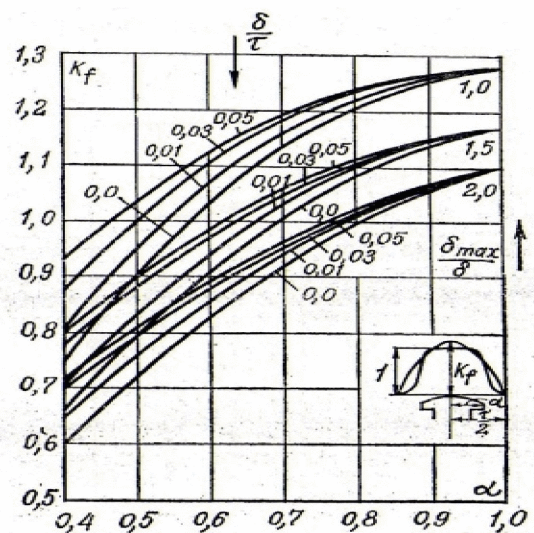


Figure 8

courbes pour la détermination de K_h
coefficient des pertes par hysteresis



Courbes pour la détermination du coefficient k_f .

Figure 9

Annexe A₃

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/Cm].									
0.4	1.24	1.27	1.3	1.33	1.36	1.38	1.41	1.44	1.47	1.5
0.5	1.54	1.57	1.6	1.64	1.67	1.71	1.74	1.77	1.8	1.84
0.6	1.88	1.91	1.94	1.98	2.01	2.05	2.08	2.12	2.16	2.24
0.7	2.33	2.26	2.29	2.33	2.36	2.4	2.43	2.47	2.50	2.53
0.8	2.56	2.59	2.62	2.65	2.68	2.71	2.74	2.77	2.80	2.89
0.9	2.86	2.90	2.93	2.97	3.01	3.04	3.08	3.12	3.16	3.20
1.0	3.24	3.29	3.33	3.38	3.42	3.46	3.50	3.55	3.60	3.65
1.1	3.70	3.75	3.80	3.95	3.91	3.96	4.01	4.06	4.11	4.17
1.2	4.24	4.30	4.36	4.42	4.48	4.55	4.61	4.67	4.73	4.79
1.3	4.86	4.95	5.04	5.14	5.24	5.33	5.63	5.74	5.84	5.95
1.4	5.86	5.98	6.10	6.22	6.34	6.46	6.58	6.70	6.83	6.86
1.5	7.09	7.22	7.35	7.49	6.63	7.77	7.91	8.05	8.20	8.35
1.6	8.5	8.78	9.06	9.34	9.62	9.90	10.2	10.5	10.8	11.1
1.7	11.5	11.8	12.2	12.5	12.9	13.3	13.6	14.0	14.4	14.8
1.8	15.2	15.7	16.2	16.7	17.2	17.7	18.3	18.9	19.5	20.1
1.9	20.7	21.6	22.5	23.4	24.3	25.2	26.4	27.6	28.9	30.2
2.0	31.5	33.2	35.0	36.8	38.6	40.4	42.6	44.8	47.0	49.2
2.1	51.4	54.4	57.4	60.5	63.6	66.7	71.2	75.7	80.2	84.7
2.2	89.2	94.3	99.4	104.6	109.8	115	120	126	132	138
2.3	144	1151	158	165	172	180	188	196	205	214

Table de magnétisation des dents des machines à courant alternatif
de l'acier 2013. (T -1)

B[T]	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
	H [A/Cm].									
0.4	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62
0.5	0.64	0.65	0.66	0.67	0.69	0.71	0.72	0.74	0.76	0.78
0.6	0.80	0.81	0.89	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93	0.95	0.97
0.7	1.0	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.15	1.18	1.21
0.8	1.24	1.28	1.29	1.32	1.35	1.38	1.40	1.43	1.46	1.49
0.9	1.52	1.55	1.58	1.61	1.64	1.68	1.71	1.74	1.77	1.81
1.0	1.85	1.88	1.91	1.95	1.99	2.03	2.06	2.09	2.13	2.17
1.1	2.21	2.25	2.29	2.33	2.37	2.41	2.45	2.40	2.58	2.57
1.2	2.62	2.67	2.72	2.77	2.83	2.89	2.95	3.01	3.07	3.13
1.3	3.20	3.27	3.34	3.41	3.49	3.57	3.65	3.73	3.82	3.91
1.4	4.00	4.10	4.20	4.30	4.40	4.50	4.64	4.78	4.92	5.06
1.5	5.20	5.42	5.64	5.86	6.08	6.30	6.54	6.78	7.02	7.26
1.6	7.50	7.88	8.26	8.64	9.02	9.40	9.82	10.2	10.7	11.1
1.7	11.5	12.2	12.9	13.6	14.3	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0
1.8	20.0	21.6	23.2	24.9	26.5	28.1	29.6	31.1	32.7	34.2
1.9	35.7	38.0	40.3	42.6	44.9	47.2	49.3	51.4	53.5	55.6
2.0	57.7	60.0	63.0	66.0	70.0	74.0	79.0	84.0	90.0	97.0

Table de magnétisation des dos des machines à courant alternatif
de l'acier 2013 Tableau (T- 2)

Bibliographie

Bibliographie

[1] Alternateurs hydrauliques et compensateurs

Techniques de l'ingénieur [D 3 540]

[2] A. IVANOV-SMOLIENSKI
Machines électriques Tome II
Editions Mir MOSCOU 1983

[3] http://physique.iscles.free.fr/TGET/animations/a5_champ_tournant.swf

[4] Mr PIERE MAYE

Aide mémoire électrotechnique
Edition DUNOD PARIS 2006

[5] Mr H.BOYER Mr M. NORBERT Mr PHILEPPE

Cours de construction du materiel électrique tome III 4^e édition

Edition UZES (grad)

[6] M. Jean-Yves ROGER

Modélisation électromagnétique des développantes et du circuit magnétique de turbo alternateurs

Stage de fin de deuxième année de Master (Mars-Septembre 2009) Université de Strasbourg

[8] R.MERLET
Bobinage des machines électriques et des transformateurs statiques Tome III
Edition BORDAS Paris 1976 huitième édition nouveau tirage

[9] D^r ING M. LIWSCHITZ
Calcul des machines électrique tome I
Edition SPES LAUSANE 1967

[10] M^r R. KHLDI
Cours de la construction des machines électriques 2010/2011 MM T-O

[11] M. KOSTENKO ET L. PIOTROVSKI
Machines électriques (technique Soviétique) volume II
Editions Mir 1979

- [12] PHILEP BARRET
Régime transitoire des machines électriques tournantes
Edition EYROLLES PARIS 1982
- [13] M^r MOUTAWE ACHAB
Influence de type d'amortisseur des machines synchrones sur leur coefficient d'amortissement et leur réactance transitoire et subtransitoire.
Thèse de doctorat à l'école polytechnique fédérale de Zurich
- [14] M^r L. ASSELGOU M^r S.KABRI M^r TAGHEROUBT
Calcul d'une machine synchrone à pôles saillants 22 KVA
Mémoire d'ingénieur à l'UMMTO 2000
- [15] M^r S.HADDAD professeur à l'UMMTO
Cours de régime transitoire des machines électriques 2011/2012
- [16] A.BELLOT
Calcul des machines tournantes
Ecole supérieure de l'électricité 1976
- [17] BOUCHAREB Ilhem
Modélisation & Simulation de défauts d'une machine synchrone à réluctance variable
Mémoire de Magister en Electrotechnique Université de Constantine 2009