

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat



FACULTE: Technologie
DEPARTEMENT : D'électrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Technologie
FILIERE : Electrotechnique
OPTION : MACHINES ELECTRIQUES

Présenté par :

DAHMANI Saad et BLAIDI Yassine

Thème

**Détermination des paramètres de la machine
synchrone à pôles saillants par les essais indiciels**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
1- SAROUTE Mohammed	MAA	President
2- MEKHANET Mohammed	MCA	Examination
3- DAREM El Moradj	MAA	Encadreur
4- BOUFLIGHA Messaoud	MCB	Co-Encadreur

Promotion : 2020/2021

Remerciements

Je voudrais remercier Dieu de nous avoir aidés à faire ce travail malgré tous les obstacles que nous avons traversés cette année. Avec cette épidémie, nous demandons à Dieu de nous bénir avec cette épidémie. Et merci à tous ceux qui nous ont aidés

Tous ceux qui ont de près ou de loin participés à notre éducation.

Et les membres de jury respectables et tout le département d'électrotechnique de tous les professeurs et du personnel administratif de l'Université Ammar Thelidji – Laghouat

Dédicaces

*C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été
une source d'inspiration et de volonté.*

A ma mère et mon père et à mes grands parents

Je le dédie à mes très chers frères.

A toute ma grande famille Belaidi et Dahmani

Une dédicace à tous mes amis

ET pour tous ceux qui connaissent Dahmani Saad et Belaidi

Yassine

Une dédicace spéciale à tous mes amis

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mon binôme

Résumé : Dans ce mémoire nous avons abordé la machine synchrone afin de pouvoir étudier les phénomènes liés à ses régimes de fonctionnement. Par la suite, nous avons proposé des montages qui permettent de faire les essais indiciels pour pouvoir déterminer les paramètres en régime transitoire, subtransitoire et permanent d'une machine synchrone à pôles saillants.

Mots clés : machine synchrone, l'inducteur, pôles saillants, essais indiciels, Park, réactances, constante de temps, Méthode graphique.

Abstract: In these theses we have approached the synchronous machine in order to be able to study the phenomena linked to its operating regimes. As a result, we have proposed assemblies which allow index tests to be carried out in order to be able to determine the parameters, transient and permanent regime of a synchronous machine with smooth poles.

Keywords : synchronous machine, the indicator, salient poles, regimes, index tests, Park, reactance's, time constant.

ملخص : لقد تناولنا في هذه الرسالة الآلة المتزامنة وفقا للمعايير حتى نتمكن من دراسة الظواهر المرتبطة بأنظمة التشغيل الخاصة بها لذلك اقترحنا التركيبات التي تسمح لنا بإجراء اختبارات التعريف من اجل التمكن من تحديد المعالم في الأنظمة الانتقالي والدائم للآلة المتزامنة ذات الأقطاب البارزة

الكلمات المفتاحية : الآلة المتزامنة، العجلة القطبية، أقطاب بارزة، الاختبارات الوحودية ، بارك، المتفاعلات، ثابت الزمن.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Etude théorique	
1 - 1 Description	2
1 - 1 - 1 Stator (induit)	3
1 - 1 - 2 Rotor (inducteur)	3
1 - 1 - 3 Principe de fonctionnement	3
1 - 1 - 4 Equation de fonctionnement	5
1 - 2 Hypothèses simplificateurs	5
I - 2 - 1 Conventions de signe	5
1 - 2 - 2 Equations électriques	5
1 - 2 - 3 Equations magnétiques	6
1 - 2 - 4 Expressions des différentes mutuelles et inductances	7
1 - 3 Transformation de PARK	8
1 - 3 - 1 Forme modifiée de la transformation de PARK	10
1 - 3 - 2 Equations électriques dans les axes d et q :	11
1-3-3 Application de la transformation modifiée de PARK	11
1 - 4 Transformation de Laplace (Impédance opérationnelle)	13
1- 4-1 Impédances opérationnelles suivant les deux axes	13
1 - 5 Régime permanent	15
1- 6 Régimes transitoires	16
1-6-1 Court-circuit triphasé brusque d'un alternateur	16
1-6-1-1 Expressions du courant dans l'induit	17
1-6-1-2 Expressions du courant dans l'inducteur	19
1-7 Définition et expression des réactances et constantes de temps usuelles	20
1-7 - 1 - 1 Réactances subtransitoire X_d'' de l'axe direct	20
1-7-1 - 2 Réactance transitoire X_{d0} de l'axe direct	20
1-7-1-3 Réactance synchrone d'axe direct X_d	21
1-7 - 1 - 4 Réactance subtransitoire X_q'' de l'axe transversal	21
1-7- 1 - 5 Réactance synchrone de l'axe transversal X_q	21
1-7-1-6 Réactances inverse X_i	21

1-7-1-7 Réactances homopolaireX0	21
1-7-2-1 Constantes de temps usuelles	22
1-7-2-2 Constantes de temps de l'axe direct	22
1-7-2-3 Constantes de temps de l'axe en quadrature	23
1 – 8 Conclusion.....	23
Chapitre II : Détermination des paramètres par les essais indiciels	
2 - 1 Introduction	24
2 - 2 Détermination des paramètres par des essais indiciels	24
2 - 2 - 1 L'essai 1 : Attaque de l'induit à inducteur ouvert.....	24
2 - 2 - 2 L'essai 2 : Attaque de l'inducteur à induit ouvert.....	26
2 - 2 - 3 L'essai 3 : essai d'attaque de l'induit à inducteur en court circuit.....	27
2 - 2 - 4 L'essai 4 : essai d'attaque de l'induit à inducteur ouvert.....	28
2 - 3 Détermination les différents paramètres à partir des résultats obtenus.....	30
2 - 3 - 1 Réactances	30
2 - 3 – 2 Constantes de temps	30
2 – 4 Relation entre Réactances et constantes de temps.....	32
2 – 5 Conclusion.....	33
Chapitre III : Etude Pratique	
3 – 1 Introduction	33
3-2 Détermination des positions pour flux max et nul	33
3 - 3 Méthode graphique.....	34
3 - 4 Application des essais indiciels.....	35
3 – 4 - 1 Essai 1 : essai d'attaque de l'induit à inducteur ouvert.....	35
3 – 4 – 1 - 1 Montage	35
3 - 4 - 1 - 2 Courbe	35
3- 4- 1- 3 Détermination des paramètres	36
3 - 4 - 2 Essai 2 : essai d'attaque de l'inducteur à induit ouvert.....	37
3 – 4 – 2 – 1 Montage.....	37
3 - 4 - 2 - 2 Courbe	37
3- 4- 2- 3 Détermination des paramètres	39
3 - 4 – 3 - Essai 3 : essai d'attaque de l'induit à inducteur en court-circuit	39
3 – 4 – 3 – 1 Montage.....	39
3 - 4 - 3- 2 Courbe	39
3- 4- 3- 3 Détermination des paramètres	41

3 - 4 - 4 – Essai 4 : essai d'attaque de l'induit à inducteur ouvert.....	41
3 - 4 - 4 - 1 Montage.....	41
3 - 4 - 4- 2 Courbe.....	41
3- 4- 4- 3 Détermination des paramètres.....	43
3 - 5 Détermination des différents paramètres à partir des résultats obtenue.....	43
3 – 5 -1 Réactances.....	43
3 – 5 - 2 Constantes de temps.....	44
3 – 5 – 3 Relations entre les réactances et les constantes de temps.....	44
3-6 -Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	45
Références bibliographiques.....	46

Liste des figures

Figure 1.1: machine synchrone.....	2
Figure 1.2: Stator (induit)	3
Figure 1.3: Rotor (inducteur)	3
Figure 1.5 : Machine synchrone triphasée avec amortisseurs	4
Figure 1.6 : Machine synchrone triphasée ats en court-circuit, en quadrature l`un de l` autre.	4
Figure 1.7: configuration avec induit tournant	9
Figure 1.8 : décomposition de la fmm résultante selon les axes d et q	9
Figure (3-1) : Détermination des positions pour flux max et nul	33
Figure (3 .2) : méthode graphique	34
Figure (3 - 3) : montage de l`essai 1	35
Figure (3 - 4) : Courbe de l`essai 1	35
Figure (3.5): Courbe de $i_a(t)$	36
Figure (3 - 6) : montage de l`essai 2.....	37
Figure (3 -7) : Courbe de l`essai 2.....	37
Figure (3-8): Courbe de $i_f(t)$	38
Figure (3 - 9) : montage de l`essai 3	39
Figure (3 -10) : Courbe de l`essai 3.....	40
Figure (3-11): Courbe de $i_d(t)$	40
Figure (3 - 12) : montage de l`essai 4.....	41
Figure (3 -13) : Courbe de l`essai 4.....	42

Liste des tableaux

Tableau (3 - 4) : relevés de la courbe $I_a(t)$	36
Tableau (3 - 4) : relevés de la courbe $I_f(t)$	38
Tableau (3 - 4) : relevés de la courbe $I_d(t)$	40
Tableau (3 - 4) : relevés de la courbe $I_a(t)$	42

Liste des abréviations

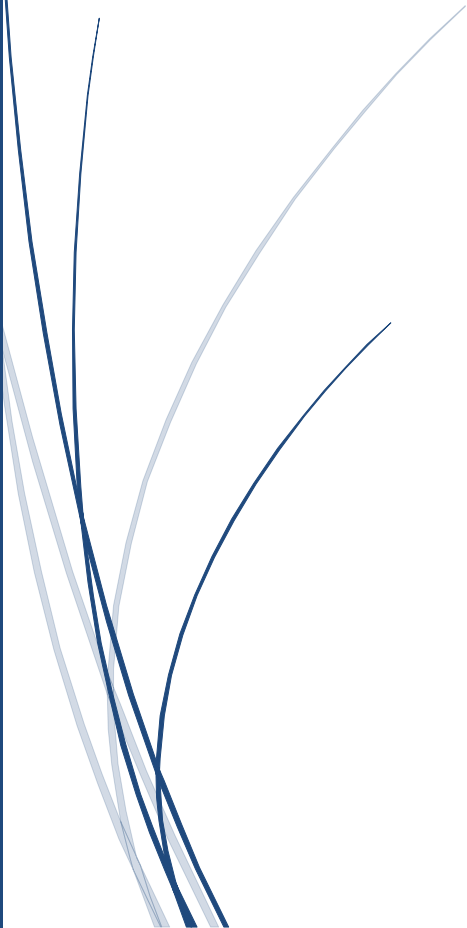
Abréviation	Désignation
θ	l'angle entre phase a et rotor
X	réactance
Z	impédance
R_a	résistance d'une phase de l'induit
L_{aq}	l'inductance longitudinale du stator
L_f	l'inductance propre du rotor
T_{1do}	constante de temps de l'amortisseur
T_{f0}	constants de temps correspondante.
K_{f1d}^2	coefficient de couplage inducteur –amortisseur
T_{aqo}	l'inductance transversale au stator
$K_{a,1q}^2$	coefficient de couplage k_a
M	inductance mutuelle
ia, ib, ic	courant d'une phase de l'induit ;
Ψ_j	flux traversant l'enroulement ($j = a, b, c, f, 1d, 1q$)
I_f	courant de l'inducteur ;
T_{1do}	constante de temps de l'amortisseur
R_f, R_{1d}, R_{1q}	résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et de l'amortisseur d'axe q.
R_a, R_b, R_c, R_s	résistances d'une phase d'induit
$\mathcal{M}_{1d,1q} = \mathcal{M}_{1q,1d}$	inductance mutuelle entre les deux circuits amortisseurs.
K_{af}^2	coefficient de couplage entre les enroulements
T_{1do}	constante de temps de l'amortisseur
L_f	l'inductance propre de Rotor
L_{ad}	l'inductance longitudinale au stator
X	grandeur statorique ou rotorique
X_0	composante homopolaire choisie nulle pour un système équilibre Id , Iq étant supposés ouverts
T_{do}^{\wedge}	constante de temps transitoire d'axe direct en circuit ouvert
$T_{do}^{\wedge\wedge}$	constante de temps subtransitoire d'axe direct en circuit ouvert

T'_d	constante de temps transitoire de l'axe direct en court-circuit
T''_d	constante de temps subtransitoire de l'axe direct en court-circuit.
T''_q	constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit.
T''_{q0}	constante de temps subtransitoire transversale en circuit ouvert.
$\mathcal{M}_{b1d}; \mathcal{M}_{b1q}$	Inductance mutuelle entre l'axe direct et de l'axe transversal.
\mathcal{L}_{ff}	inductance propre de l'inducteur.
$\mathcal{L}_{11d}; \mathcal{L}_{11q}$	inductance propre de chacun des amortisseurs.



INTRODUCTION

Générale



Introduction Générale

Les machines synchrones comme toutes les autres machines électriques sont réversibles et pour cette raison elles peuvent fonctionner indifféremment en générateurs (il s'agit alors d'alternateurs), ou en moteurs (pour la traction électrique ou la compensation par exemple).

Elles sont surtout utilisées comme alternateurs qui sont à l'origine de la quasi-totalité de la puissance électrique fournie aux réseaux sous forme d'alternatif triphasé. Cependant, on les utilise aussi comme moteur ainsi que compensateur synchrone qui, en réalité est un moteur synchrone fonctionnant à vide.

L'alternateur étant l'élément le plus important du système triphasé de production et de transport de l'énergie électrique, l'analyse de ses différents régimes (permanent et déséquilibre) est d'un grand intérêt pratique.

Notre travail est orienté dans ce sens ; il consiste à identifier la machine synchrone, c'est-à-dire, à déterminer expérimentalement ces paramètres tel que les résistances, les réactances et les constantes de temps intervenant dans l'étude des divers régimes de fonctionnements.

Pour cela, après avoir présenté les équations utilisées pour la machine synchrone, nous utiliserons la transformation de PARK pour établir les équations simplifiées régissant son fonctionnement. De celle-ci nous définirons tous les paramètres.

L'application est faite pour la machine synchrone à pôles saillants se trouvant au laboratoire de machine électrique, on utilisant les essais indiciaires. Le travail présenté dans cette mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on commence par la description et donner le principe de fonctionnement de la machine synchrone, ensuite on cite ses équations de fonctionnements et les hypothèses simplificatrices, après, on donne les équations électriques et magnétiques de la machine synchrone à pôles saillants et la transformation de PARK et ces équations électriques dans les axes d et q pour déterminer les impédances opérationnelles , ensuite , on donne les définitions et expressions des réactances et constantes de temps, enfin, on aborde le régime transitoire et permanent,

Dans le deuxième chapitre on commence par exposé des essais indiciaires, ensuite, on détermine les expressions des réactances et des constantes de temps pour déduire les relations entre elles. , on propose un montage pour déterminer la position de l'inducteur par rapport à la position de l'axe du bobinage de la phase (a) pour avoir un flux max ou un flux nul.

Dans le troisième chapitre, on propose des montages pour les essais indiciaires qui nous permettent de calculer les réactances et les constantes de temps de la machine on utilisant une méthode graphique, en termine par une application on exploitant les courbes expérimentales.



Chapitre 1 :

Etude théorique

1 - 1 Description

Une machine synchrone comprend :

- Un induit formé d'un système d'enroulements triphasés (avec P_1 bobine par enroulement).
- Un inducteur formé d'un système de P_1 paires de pôles alternés (Nord-Sud) qui portent généralement un bobinage parcouru par un courant continu.

Ce bobinage est concentré autour de noyaux dans le cas d'une machine à pôles saillants ou logé dans des encoches dans le cas d'une machine à pôles lisses.

Généralement les pôles excités par le courant continu sont disposés sur la partie tournante de la machine appelée Rotor et l'enroulement de l'induit à courant alternatif est placé sur la partie fixe appelée Stator.

Cependant, dans le cas des machines de faible puissance comme celles rencontrées au laboratoire, cette disposition est inversée et le courant est alors recueilli à l'aide de bagues collectrices.

Le rotor des machines à pôles saillants est muni d'un amortisseur constitué de barres de cuivre logées dans des encoches pratiquées dans les pièces polaires et reliées entre elles par des anneaux conducteurs.

Les amortisseurs entre autres ont pour effet de s'opposer à toute variation rapide du flux à travers le rotor, de réduire les harmoniques, etc.

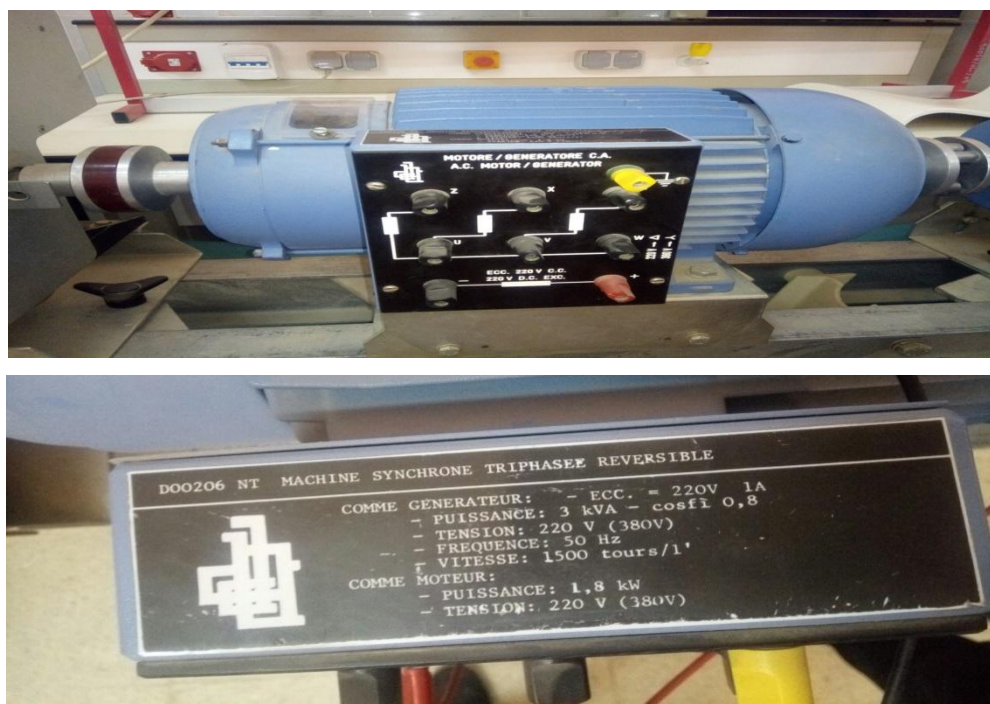


Figure 1.1: machine synchrone

1 - 1 - 1 Stator (induit)

Comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitué de tôles d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé. Parcouru par un système de courant équilibré, il produit un champ tournant : le stator est donc identique à celui de la machine asynchrone. Le stator constitue l'induit de la machine puisqu'il est traversé par le champ inducteur produit par le rotor. Le courant induit peut être fourni (cas générateur) ou absorbé (cas moteur)



Figure 1.2: Stator (induit)

1 - 1 - 2 Rotor (inducteur)

Le rotor dans les machines à pôles lisses est généralement constitué par un cylindre ferromagnétique dans lequel ont été fraisées les encoches qui abritent le bobinage inducteur. Ces machines comportent généralement deux à quatre pôles (turbo-alternateurs). Ce type de construction, caractérisé par un entrefer constant, est utilisé pour les machines de fortes puissances destinées à tourner à grandes vitesses



Figure 1.3: Rotor (inducteur)

1 - 1 - 3 Principe de fonctionnement

On démontre que des fem apparaissent aux bornes d'un bobinage triphasé lorsqu'un champ d'induction glisse par rapport à ce bobinage. Dans les machines synchrones, le glissement

relatif est obtenu en entraînant le rotor par une source d'énergie mécanique à la vitesse ω . Dans les enroulements d'induit apparaissent alors 3 fem triphasées de pulsation $\omega_s = P_1 \cdot \omega$ avec P_1 le nombre de paire de pôles.

En chargeant les enroulements d'induit par une charge triphasée ils débitent 3 courants triphasés de même pulsation ω_s , la machine fonctionne alors en alternateur.

Inversement, en appliquant à ces enroulements des tensions triphasées de pulsation ω_s , on aura des courants de même pulsation ω_s créant un champ tournant à la vitesse $\omega = \omega_s / P_1$. L'interaction entre ce champ et le champ inducteur tournant à la même vitesse donnera un couple électromagnétique.

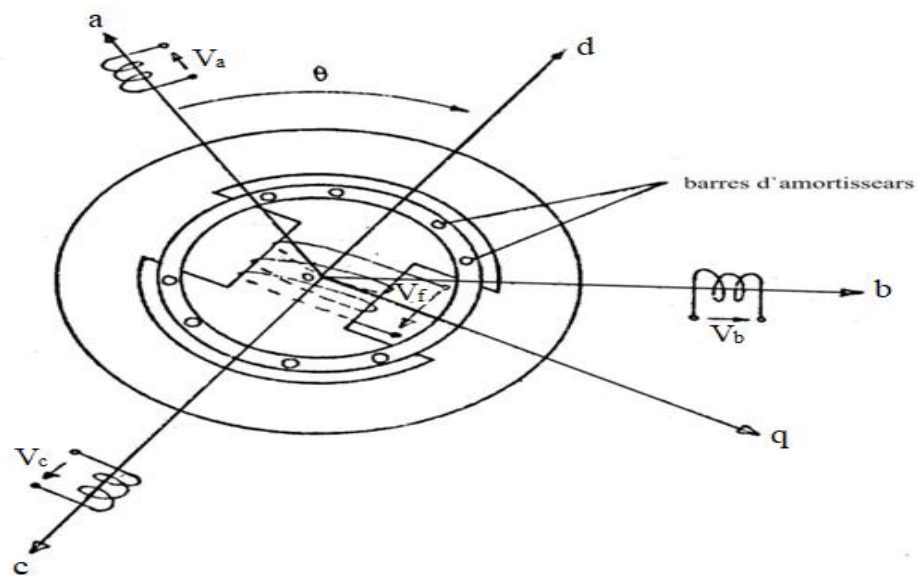


Figure 1.5 : Machine synchrone triphasée avec amortisseurs

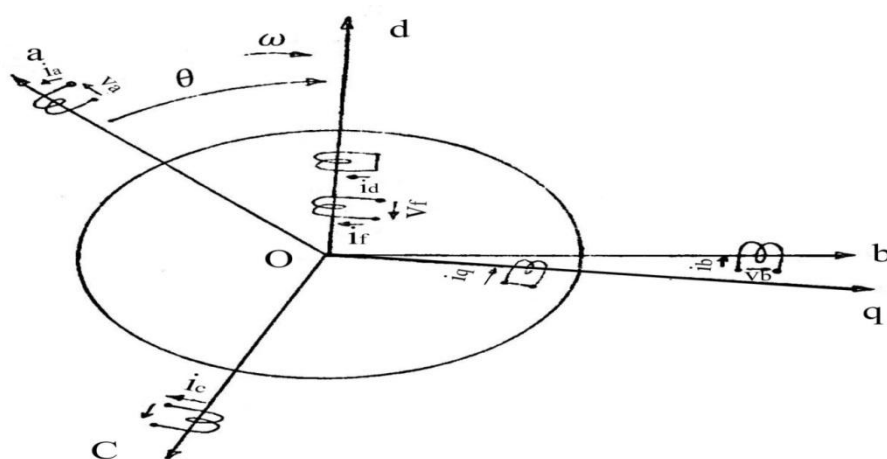


Figure 1.6 : Machine synchrone triphasée amortisseurs assimilés à 2 enroulements en court-circuit, en quadrature l'un de l'autre.

1 - 1 – 4 Equation de fonctionnement

La machine synchrone dont nous allons étudier la mise en équation est une machine bipolaire à pôles saillants. Elle comprendra figure (1 -5) :

- Au stator, les bobinages a,b,c des 3 phases décalées deux à deux d'un angle de 120° électriques.
- Au rotor et suivant l'axe direct ou longitudinal (polaire) le bobinage inducteur f et l'amortisseur 1_d .
- Au rotor et suivant l'axe en quadrature ou transversal (interpolaire) l'amortisseur 1_q figure (1- 6).

1 - 2 Hypothèses simplificateurs

Dans ce qui suit, on supposera que :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé et que les pertes par courants de Foucault et hystérésis sont négligeables.
- Les couplages capacitifs entre enroulements sont nuls.
- Les fmm des enroulements statoriques sont à répartition sinusoïdale et au seul fondamental de la fmm créée par chaque phase d'induit.

I – 2 - 1 Conventions de signe

- Un courant est positif s'il crée un flux positif à travers son propre enroulement.
- Une fem est positive si elle fait circuler un courant positif .
- L'inducteur et l'induit sont considérés comme récepteur (convention moteur) .
- Le sens positif de la vitesse et des angles est le sens des aiguilles d'une montre.
- La position de l'inducteur est caractérisée par l'angle que fait $0a$ avec $0d$ c'est-à-dire θ . Si l'inducteur tourne à la vitesse ω et on aura donc :

$$\theta_a = (0a, 0d) = \theta$$

$$\theta_b = (0b, 0d) = \theta - \frac{2\pi}{3} \dots\dots\dots (1-1)$$

$$\theta_c = (0c, 0d) = \theta - \frac{4\pi}{3}$$

$$\text{et } \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

1 – 2 - 2 Equations électriques

Compte tenu des conventions précédentes, les enroulements de la figure (1 – 6) obéissent aux équations :

$$\begin{aligned}
 v_a &= R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} & v_f &= R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\
 v_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} & 0 &= R_{1d} i_{1d} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} \dots \dots \dots (1-2) \\
 v_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} & 0 &= R_{1q} i_{1q} + \frac{d\psi_{1q}}{dt}
 \end{aligned}$$

Avec $R_a = R_b = R_c = R_s$: résistances d'une phase d'induit.

R_f, R_{1d}, R_{1q} : résistances de l'inducteur, de l'amortisseur d'axe d et de l'amortisseur d'axe q.

$\psi_j (j = a, b, c, f, 1d, 1q)$ = Flux traversant l'enroulement j.

1 – 2 - 3 Equations magnétiques

On adoptera les notations suivantes pour les diverses inductances :

- $\mathcal{L}_{aa}; \mathcal{L}_{bb}; \mathcal{L}_{cc}$: inductance propre de chaque phase.
- $\mathcal{M}_{ab}; \mathcal{M}_{ac}; \mathcal{M}_{bc}$: inductance mutuelle entre phase.
- $\mathcal{M}_{af}; \mathcal{M}_{bf}; \mathcal{M}_{cf}$: inductance mutuelle de chaque phase avec l'enroulement inducteur
- $\mathcal{M}_{a1d}; \mathcal{M}_{a1q}$: inductance mutuelle de chaque phase avec l'amortisseur de l'axe direct et de l'axe transversal.
- $\mathcal{M}_{b1d}; \mathcal{M}_{b1q}$: inductance mutuelle de chaque phase avec l'amortisseur de l'axe direct et de l'axe transversal.
- $\mathcal{M}_{c1d}; \mathcal{M}_{c1q}$: inductance mutuelle de chaque phase avec l'amortisseur de l'axe direct et de l'axe transversal.
- $\mathcal{M}_{f1d}; \mathcal{M}_{f1q}$: inductance mutuelle de l'enroulement inducteur avec l'amortisseur de l'axe direct et de l'axe transversal.
- \mathcal{L}_{ff} : inductance propre de l'inducteur.
- $\mathcal{L}_{11d}; \mathcal{L}_{11q}$: inductance propre de chacun des amortisseurs.
- $\mathcal{M}_{1d,1q} = \mathcal{M}_{1q,1d}$: inductance mutuelle entre les deux circuits amortisseurs .

La relation matricielle liant flux et courants s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_{1d} \\ \psi_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{aa} & \mathcal{M}_{ab} & \mathcal{M}_{ac} & \mathcal{M}_{af} & \mathcal{M}_{a1d} & \mathcal{M}_{a1q} \\ \mathcal{M}_{ab} & \mathcal{L}_{bb} & \mathcal{M}_{bc} & \mathcal{M}_{bf} & \mathcal{M}_{b1d} & \mathcal{M}_{b1q} \\ \mathcal{M}_{ac} & \mathcal{M}_{bc} & \mathcal{L}_{cc} & \mathcal{M}_{cf} & \mathcal{M}_{c1d} & \mathcal{M}_{c1q} \\ \mathcal{M}_{af} & \mathcal{M}_{bf} & \mathcal{M}_{cf} & \mathcal{L}_{ff} & \mathcal{M}_{f1d} & \mathcal{M}_{f1q} \\ \mathcal{M}_{a1d} & \mathcal{M}_{b1d} & \mathcal{M}_{c1d} & \mathcal{M}_{f1d} & \mathcal{L}_{11d} & \mathcal{M}_{1d1q} \\ \mathcal{M}_{a1q} & \mathcal{M}_{b1q} & \mathcal{M}_{c1q} & \mathcal{M}_{f1q} & \mathcal{M}_{1d1q} & \mathcal{L}_{11q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix}$$

$$[\psi] = [\mathcal{L}][i]$$

1- 2 - 4 Expressions des différentes mutuelles et inductances

Dans la machine à pôles saillants, l'entrefer varie de façon cyclique le long de la périphérie ; la réluctance rencontrée par le flux du Stator dépend donc de, ce qui entraîne d'après le caractère symétrique de la machine:

$$\mathcal{L}_{aa}(\theta) = \mathcal{L}_{aa} \max = \mathcal{L}_{aa} \text{ pour } \theta = k\pi$$

$$\mathcal{L}_{aa}(\theta) = \mathcal{L}_{aa}(\theta + \pi)$$

$$\mathcal{L}_{aa}(\theta) = \mathcal{L}_{aa}(-\theta)$$

Donc $\mathcal{L}_{aa}(\theta)$ est une fonction périodique de θ , de période π , dont le développement en série de Fourier s'écrit :

$$\mathcal{L}_{aa}(\theta) = \mathcal{L}_{aa} + \mathcal{L}_{aa2} \cos 2\theta + \mathcal{L}_{aa4} \cos 4\theta + \dots$$

\mathcal{L}_{bb} et \mathcal{L}_{cc} en déduisent on remplaçant θ respectivement par $\theta - \frac{2\pi}{3}$ et $\theta - \frac{4\pi}{3}$.

\mathcal{M}_{ab} est aussi une fonction périodique de θ , de période π , maximale pour $\theta = \frac{\pi}{3}$; son développement en série de Fourier, s'écrit :

$$\mathcal{M}_{ab} = \mathcal{M}_{ab} + \mathcal{M}_{ab2} \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) + \mathcal{M}_{ab4} \cos(\theta - \frac{\pi}{3}) \dots$$

\mathcal{M}_{bc} et \mathcal{M}_{ac} s'en déduisent en remplaçant θ respectivement par $\theta - \frac{2\pi}{3}$ et $\theta - \frac{4\pi}{3}$.

\mathcal{M}_{af} est une fonction périodique de θ , de période 2π , extrême pour $\theta = k\pi$ et dont le développement en série de Fourier donne :

$$\mathcal{M}_{af} = \mathcal{M}_{af1} \cos \theta + \mathcal{M}_{af3} \cos 3\theta + \mathcal{M}_{af5} \cos 5\theta + \dots$$

\mathcal{M}_{bf} et \mathcal{M}_{cf} s'en déduisent en remplaçant θ respectivement par $\theta - \frac{2\pi}{3}$ et $\theta - \frac{4\pi}{3}$.

De même pour

$$\mathcal{M}_{ald} \text{ et } \mathcal{M}_{ald1} \cos \theta + \mathcal{M}_{ald3} \cos 3\theta + \dots$$

\mathcal{M}_{bld} et \mathcal{M}_{clid} S'obtiennent en remplaçant θ respectivement par $\theta - \frac{2\pi}{3}$ et $\theta - \frac{4\pi}{3}$.

$$\mathcal{M}_{alq} = \mathcal{M}_{alq1} \sin \theta - \mathcal{M}_{alq3} \cos 3\theta - \dots$$

\mathcal{M}_{blq} , \mathcal{M}_{clq} S'obtiennent en remplaçant θ respectivement par $\theta - \frac{2\pi}{3}$ et $\theta - \frac{4\pi}{3}$.

La réluctance rencontrée par le flux rotorique étant indépendante de θ , les coefficients, d'inductance propre et mutuelle relatifs au rotor sont tous des constantes dont certaines sont nulles. Nous écrivons donc :

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{ff} &= \mathcal{L}_{ff}, \mathcal{M}_{fId} = \mathcal{M}_{fId}, \mathcal{L}_{IId} = \mathcal{L}_{IId}, \mathcal{L}_{IIq} = \mathcal{L}_{IIq} \\ \mathcal{M}_{fIq} &= \mathcal{M}_{IdIq} = 0 \text{ (en quadrature).} \end{aligned}$$

L'hypothèse de distribution sinusoïdale de la fmm d'induit, nous amène à écrire dans tous les développements en série de Fourier que les termes constants et les fondamentaux.

On démontre de même que : $\frac{-L_{aa}}{2} = M_{ab} = M_{bc} = M_{ac} = \frac{-L_{a0}}{2} = M_{ab0}$

$$\text{et } M_{ab2} = M_{ac2} = M_{bc2} = L_{aa2} = L_{bb2} = L_{cc2} = L_{a2}$$

$$\text{avec } L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_{a0}$$

La matrice inductance prend alors la forme suivante :

$$\begin{array}{cccccc} L_{a0} + L_{a2}\cos 2\theta & M_{ab0} + L_{a2} \left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{ab0} + L_{a2} \cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{af}\cos\theta & M_{aid}\cos\theta & -M_{aiq}\sin\theta \\ L_{b0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{a0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{ab0} + L_{a2}\cos 2\theta & M_{af}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{aid}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -M_{aiq}\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{c0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{ab0} + L_{a2}\cos(2\pi) & L_{a0} + L_{a2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{af}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{aid}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -M_{aiq}\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ M_{af} + \cos\theta & M_{af}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{af}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & L_{ff} & M_{fld} & 0 \\ M_{aid} + \cos\theta & M_{aid}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & M_{aid}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & M_{fld} & L_{lld} & 0 \\ M_{aiq} + \sin\theta & -M_{aiq}\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -M_{aiq}\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 0 & 0 & L_{llq} \end{array}$$

1 - 3 Transformation de PARK

La transformation de Park appelée aussi transformation des deux axes consiste à faire correspondre aux variables réelles leurs composantes

-Homopolaire (indice o)

-D'axe direct (indice d)

-D'axe en quadrature (indice q)

Pour un système de courants , elle s'écrit :

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 1 & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1 & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$\text{Soit : } [i] = [i_c][A(\theta)]$$

La transformation inverse sera donc :

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Soit : $[i_c] = [i] [A(\theta)]^{-1}$

Le coefficient $\frac{2}{3}$ pour les composantes d et q a été choisi parcequ' il entraine les relations les plus simples entre les valeurs numériques associées au système d , q d'une part , a , b , c , d'autre part , des courants , tensions et flux

Le changement de variables relatif aux tensions est défini par la même transformation

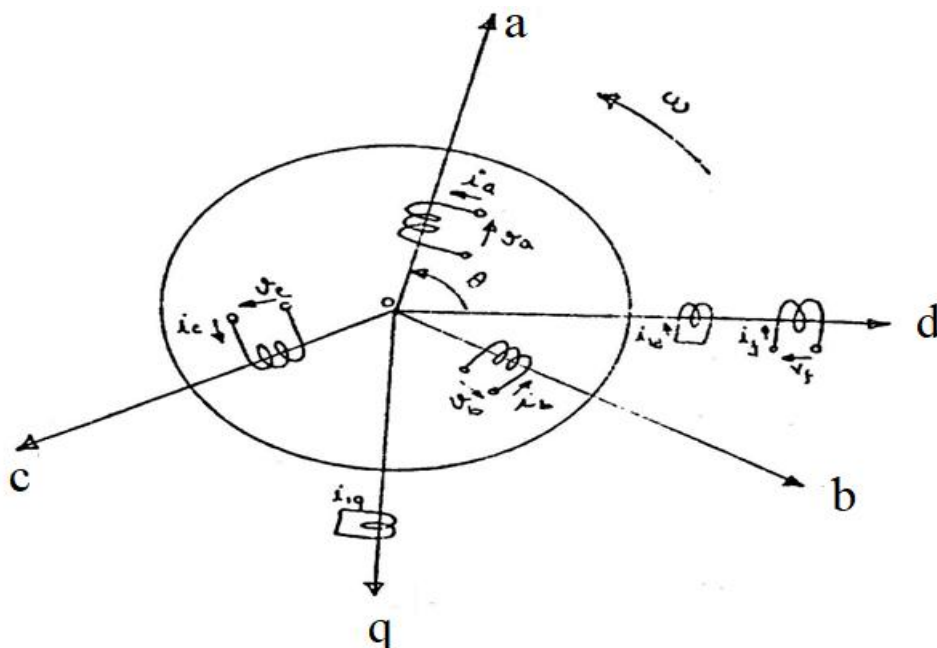


Figure 1.7: configuration avec induit tournant

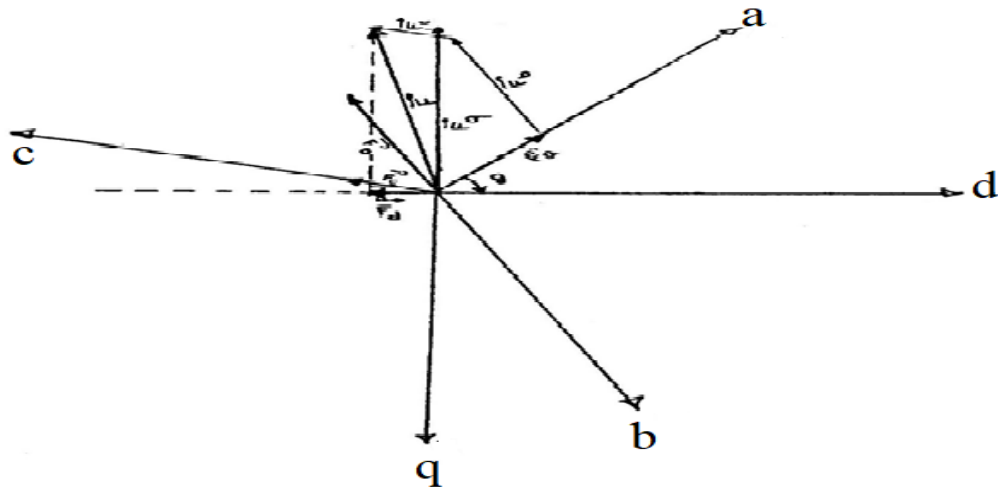


Figure 1.8 : décomposition de la fmm résultante selon les axes d et q

1- 3 - 1 Forme modifiée de la transformation de PARK

La matrice indiquée par PARK n'est pas orthogonale. On peut remarquer le produit scalaire de deux vecteurs colonnes est nul. En divisant chacun de ces vecteurs par sa norme, on obtient la matrice de PARK orthogonalisée qui conserve la puissance instantanée et conduit à des schémas où les inductances mutuelles sont réciproques.

$$[A_1(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 1/\sqrt{2} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

et la matrice inverse :

$$[A_1(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

1-3-2 Equations électriques dans les axes d et q :

En explicitant les expressions des flux et en mettant les équations (1-2) sous forme matricielle, on obtient :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[L_{ss}][i_s] + [M_{sR}][i_R] \dots \dots \dots (1-3)$$

$$[V_R] = [R_R][i_R] + \frac{d}{dt}[M_{Rs}][i_s] + [L_{RR}][i_R]$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad [V_R] = \begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad [i_R] = \begin{bmatrix} i_f \\ i_{Id} \\ i_{Iq} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[R_R] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_{Id} & 0 \\ 0 & 0 & R_{Iq} \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

$$[L_{RR}] = \begin{bmatrix} L_{ff} & M_{f1d} & 0 \\ M_{f1d} & L_{11d} & 0 \\ 0 & 0 & L_{11q} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sR}] = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{a1d} & M_{a1q} \\ M_{bf} & M_{b1d} & M_{b1q} \\ M_{cf} & M_{c1d} & M_{c1q} \end{bmatrix}$$

$$[M_{Rs}] = [M_{sR}]^t$$

1-3-3 Application de la transformation modifiée de PARK

En effectuant le changement de variables dans le système (1-3) : $[V_s] = [i_{cs}][A_1(\theta)]$

et $[i_s] = [i_{cs}][A_1(\theta)]$ il vient :

$$[A_1(\theta)] = [A_1] \text{ étant la matrice modifiée de PARK}$$

Le système d'équations (1-3) devient :

$$[A_1] = [V_{cs}][R_s][A_1][i_{cs}] + \frac{d}{dt} [[L_{ss}][A_1][i_{cs}] + [L_{RR}][i_R]] \dots \dots \dots (1 - 4)$$

$$[V_R] = [R_R][i_R] + \frac{d}{dt} [[M_{Rs}][A_1][i_{cs}] + [M_{sR}][i_R]] \dots \dots \dots (1-5)$$

En multipliant l'équation (1-4) par $[A_1]^{-1}$ on obtient

$$[V_{cs}] = [A_1]^{-1}[R_s][A_1][i_{cs}] + [A_1]^{-1} \cdot \left[\frac{d}{dt} [[L_{ss}][A_1][i_{cs}] + [M_{sR}][i_R]] \right] \dots \dots \dots (1 - 6)$$

On obtient , sachant que $[A_1]^{-1}[A_1] = [I]$ *matrice identité* .

$$[V_{cs}] = [R_s][i_{cs}] + [A_1]^{-1} \cdot \left[\frac{d}{dt} [[L_{ss}][A_1][i_{cs}] + [M_{sR}][i_R]] \right] \dots \dots \dots (1 - 7)$$

$$[V_R] = [R_R][i_R] + \cdot \frac{d}{dt} \left[[M_{Rs}][A_1][i_{cs}] - [i_{RR}] \frac{d}{dt} [i_R] \right] \dots \dots \dots (1 - 8)$$

Effectuant le produit matriciel suivant , on trouve :

$$[L_{ss}][A_1] = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} L_{ao} + 2 M_{abo}/\sqrt{2} & (L_{ao} - M_{abo}) \cos(\theta) & -(L_{ao} - M_{abo}) \sin(\theta) \\ L_{ao} + 2 M_{abo}/\sqrt{2} & (L_{ao} - M_{abo}) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -(L_{ao} - M_{abo}) \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{ao} + 2 M_{abo}/\sqrt{2} & (L_{ao} - M_{abo}) \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -(L_{ao} - M_{abo}) \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \\ + L_{ao} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 1/\sqrt{2} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

En remplaçant $\frac{d}{dt}$ par l'opérateur différentiel P , $\frac{d\theta}{dt}$ par ω (la vitesse angulaire du rotor et en effectuant les différents produits matriciels on obtient la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_o P & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s + L_d P & -R_q \omega & M_f P & M_{KD} P & -M_{KQ} \omega \\ 0 & L_d \omega & R_s + L_q P & M_f \omega & M_{KD} \omega & -M_{KQ} P \\ 0 & M_{KD} P & 0 & R_f + L_f P & M_{fD} P & 0 \\ 0 & M_f P & 0 & M_{fD} P & R_{1d} + L_{11d} P & 0 \\ 0 & 0 & M_{KQ} P & 0 & 0 & R_{1q} + L_{11q} P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix}$$

Avec : $L_d = L_{ao} - M_{abo} + \frac{3}{2} L_{a2}$, $L_q = L_{ao} - M_{abo} - \frac{3}{2} L_{a2}$, $L_o = L_{ao} + 2 M_{abo}$ $M_f = \sqrt{\frac{3}{2}} M_{fa}$

, $M_{KD} = \sqrt{\frac{3}{2}} M_{a1d}$, $M_{KQ} = \sqrt{\frac{3}{2}} M_{a1q}$, $M_{fD} = M_{f1d}$, relations (A) .

1 - 4 Transformation de Laplace (Impédance opérationnelle)

En considérant que les valeurs initiales des différents variables sont nulles, la relation Matricielle (1-9) conduit a un système d'équations différentielles à coefficients constants. On cherchera à en déduire les impédances opérationnelles suivant les deux axes, direct et Quadrature. Ces impédances nous permettront de déterminer les réactances et constantes de temps intervenant dans tous les régimes transitoires et subtransitoires.

1- 4-1 Impédances opérationnelles suivant les deux axes

En négligeant la composante homopolaire, le système (1-9) se met sous la forme

Suivante () :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d P & -L_q \omega & M_f P & M_{KD} P & -M_{KQ} \omega \\ L_d \omega & R_s + L_s P & M_f \omega & M_{KD} \omega & M_{KQ} P \\ M_f P & 0 & R_s + L_s P & M_{fD} P & 0 \\ M_{KD} P & 0 & M_{fD} P & R_{1d} + L_{11d} P & 0 \\ 0 & M_{KQ} P & 0 & 0 & R_q + L_{11q} P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_{1d} \\ I_{1q} \end{bmatrix} \dots(1-9)$$

En désignant par V_f la transformée de la tension réelle V_f et par V_d, V_q, i_d, i_q les transformées des composantes relatives V_d, V_q, i_d, i_q des tension et courants réels $v_a, v_b, v_c, i_a, i_b, i_c, I_{1d}, I_{1q}$ les transformées des courant, i_{1d}, i_{1q} dans les amortisseurs .

En décomposant le système matriciel ci – dessus en sous matrice, on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] & [C] \\ [D] & [F] & [O] \\ [H] & [O] & [j] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \\ [I_3] \end{bmatrix}$$

Ce qui donne : $[A] [I_1] + [B] [I_2] + [C] [I_3] = [V_1] \dots \dots \dots (1)$

$[D][I_1] + [F][I_2] = [V_2] \dots \dots \dots (2)$

$[H][I_1] + [j][I_3] = [0] \dots \dots \dots (3)$

En substituant $[I_3]$ et $[I_2]$ obtenus des relations (2) et (3) en fonction de $[I_1]$,dans la relation (1) , on obtient :

$$[[A] - [B][F]^{-1}[D] - [C][J]^{-1}[H]] [I_1] = [V_1] - [B][F]^{-1}[V_2] \dots \dots \dots (1 - 10)$$

En effectuant les différents produits matriciels et en posant :

$$Z_f = R_f + pL_f, Z_{1d} = R_{1d} + pL_{11q}, Z_{1q} = R_{1q} + pL_{11q}$$

On aboutit à la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d - \frac{(Z_{1d}M_f - M_{fD}M_{KD}P^2)V_f}{Z_fZ_{1d} - M_{fD}^2P^2} \\ V_q - \frac{(Z_{1d}L_f\omega - M_{fD}M_{KD}P\omega)V_f}{Z_fZ_{1d} - M_{fD}^2P^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d p - p^2 \frac{(Z_{1d}L_f^2 + Z_fM_{KD}^2 - 2M_fM_{fD}M_{KD}P)}{Z_fZ_{1d} - M_{fD}^2P^2} - \omega \left(L_q - \frac{M_{KD}^2P^2}{Z_{11q}} \right) \\ \omega \left[L_d - p \frac{(Z_{1d}L_f^2 + Z_fM_{KD}^2 - 2M_fM_{fD}M_{KD}P)}{Z_fZ_{1d} - M_{fD}^2P^2} \right] R_s + PL_q - \frac{M_{KQ}^2P^2}{Z_{1q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

Ces équations peuvent s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} v_d - pG(p)v_f \\ v_q - \omega G(p)v_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\mathcal{L}_d(p) & -\omega \mathcal{L}_q(p) \\ \omega \mathcal{L}_d(p) & R_s + p \mathcal{L}_q(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1-11)$$

En désignant par $\mathcal{L}_d(p)$ et $\mathcal{L}_q(p)$ les inductances opérationnelles suivant l'axe direct et l'axe en quadrature .

Avec $G(p) = \frac{Z_{1d}M_f - pM_{fD}M_{KD}}{Z_fZ_{1d} - P^2M_{fD}^2}$

Les impédances opérationnelles suivantes les deux axes sont alors :

$$Z_d(p) = R_s + p\mathcal{L}_d(p)$$

$$Z_q(p) = R_s + p\mathcal{L}_q(p)$$

En remplaçant les expressions Z_f, Z_{1d}, Z_{1q} dans l'expression des deux inductances $\mathcal{L}_d(p), \mathcal{L}_q(p)$ on obtient :

$$\mathcal{L}_d(p) = L_d - \frac{p^2(L_{11d}M_f^2 + L_fM_{KD}^2) - (2M_fM_{fD}M_{KD}) + P(R_{1d}M_f^2 + R_fM_{KD}^2)}{p^2(L_fL_{11d} - M_{fD}^2) + p(R_fL_{11d} + R_{1d}L_f) + R_fR_{1d}} \dots \dots \dots (1-12)$$

$$\mathcal{L}_q(p) = L_q - \frac{pM_{KQ}^2}{pL_{11q} + R_{1q}} \dots \dots \dots (1-13)$$

D'où les réactances opérationnelles suivants les deux axes :

$$X_d(P) = \omega \mathcal{L}_d(P) \dots \dots \dots (1.14)$$

$$X_q(P) = \omega \mathcal{L}_q(P) \dots \dots \dots (1.15)$$

1 – 5 Régime permanent

C'est le régime qui s'établit lorsque tous les courants variables sont éteints dans le circuit de l'inducteur. D'une façon générale, cela correspond à l'amortissement de toutes les composantes apériodique. Les régimes permanents à la vitesse synchrone correspondant à l'étude classique de la machine synchrone.

Les relations donnant les flux à travers les bobines de l'induit en fonction des courants qui passent dans celles-ci ne sont pas affectés par la présence de l'inducteur et des amortisseurs. On considérera alors les réactances synchrones.

Pour suivre le fonctionnement on charge de la machine synchrone, on se propose d'établir des relations traduisant des diagrammes vectorielles .

Le but de ces diagrammes est de tracer les courbes :

- V(I) à J et $\cos \varphi$ constants.
- J(I) à V et $\cos \varphi$ constants.

V désignât la tension simple aux bornes de l'induit, I le courant débité, φ son déphasage par rapport à V, J le courant d'excitation qui donne à vide une Fém E_j .

Pour les machines à pôles saillants, nous allons construire les diagrammes à partir des équations de PARK pour les tensions.

Pour cela, on considérera la marche on alternateur et dans les équations déjà établies pour un fonctionnement moteur, on inversera le sens des tensions de l'induit.

On aura donc pour les tensions réelles :

$$-v_a = R_s i_a + \frac{d\varphi_a}{dt}; -v_b = R_s i_b + \frac{d\varphi_b}{dt}; -v_c = R_s i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \dots \dots \dots (1-16)$$

et dans des relations (1- 9) traduisant les équations de PARK, on remplacera v_d et v_q par $-v_d$ et $-v_q$ et de même pour leurs transformées.

1- 6 Régimes transitoires

Il débute à l'extinction des courants dans les amortisseurs et dure jusqu'à l'extinction du courant variable dans l'inducteur.

Il y a régime transitoire quand une perturbation (mise en court-circuit, brusque variation de la charge, à-coup de couple) tend à faire varier la Fem de l'induit ou la position de ses pôles par rapport à ceux de l'inducteur ; le passage d'un fonctionnement à l'autre ne pouvant être instantané.

On se propose d'établir les expressions des courants et tension lors de certains régimes transitoires simples, avec l'hypothèse de l'invariance de la vitesse de rotation.

On se limitera aux deux études.

- 1) La mise en court-circuit triphasé brusque.
- 2) Rétablissement de la tension à l'ouverture d'un tel court-circuit.

Ces deux études permettent la détermination des diverses réactances et constantes de temps.

1-6-1 Court-circuit triphasé brusque d'un alternateur

On réunit brusquement les trois bornes de l'induit d'un alternateur bipolaire tournant à vide à la vitesse ω ; son inducteur étant alimenté par une tension constante V_f .

La relation : $[V(p)] = [Z(p)][I(p)]$ nous permettra de déterminer les courants.

Le régime transitoire dû à la brusque annulation des tensions aux bornes de l'induit peut être considéré la superposition :

- D'un régime permanent antérieur.
- Et d'un régime transitoire dû à l'application à l'induit, de tensions opposées aux valeurs antérieures.

1-6-1-1 Expressions du courant dans l'induit

Avant le court-circuit, les seules grandeurs existantes sont : $i_f, V_q = M_f \omega i_f = E\sqrt{3}$; $V_f = R_f i_f$ comme le montre la relation (1-9) à $t = 0$, la mise en court-circuit correspond à l'application de tensions : $V_0 = 0$; $V_d = 0$; $V_q = -E\sqrt{3}p$; $V_f = 0$ (A).

L'étude de court-circuit triphasé se fera en portant dans les équations opérationnelles de la machine (1-10), les relations (A) :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = [Z(p)] \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = [Z(p)]^{-1} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = [Z(p)]^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{E\sqrt{3}}{p} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1 -17)$$

Avec : $[Z(p)] = \begin{bmatrix} R_s + pL_d(p) & -\omega L_q(p) \\ \omega L_d(p) & R_s + pL_q(p) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1. 18)$

$$[Z(p)]^{-1} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} R_s + pL_q(p) & \omega L_q(p) \\ -\omega L_d(p) & R_s + pL_d(p) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1 . 19)$$

Avec : $\Delta(p) = (R_s + pL_d(p))(R_s + pL_q(p)) + \omega^2 L_d(p)L_q(p) \dots\dots\dots(1 . 20)$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$\Delta(p) = L_d(p)L_q(p)[p^2 + P \left(\frac{R_s}{L_d(p)} + \frac{R_s}{L_q(p)} \right) + \omega^2 \frac{R_s^2}{L_d(p)L_q(p)}] \dots\dots\dots (1. 21)$$

Au voisinage de la vitesse synchrone, les résistances étant faibles devant les réactances on aura :

$$\Delta(p) = L_d(p)L_q(p)[p^2 + P \left(\frac{R_s}{L_d(p)} + \frac{R_s}{L_q(p)} \right) + \omega^2] \dots\dots\dots (1. 22)$$

En faisant apparaître les réactances subtransitoires à la vitesse ω , et en effectuant des simplifications en aboutit à:

$$[Z(p)]^{-1} = \frac{1}{\Delta(p)} \begin{bmatrix} (p + \frac{\omega R_s}{X_q})L_q(p) & \omega L_q(p) \\ -\omega L_d(p) & (p + \frac{\omega R_s}{X_d})L_d(p) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1 . 23)$$

Avec :

$$\Delta(p) = \mathcal{L}_d(p)\mathcal{L}_q(p)(p + \frac{\omega R_s}{X_h} + j\omega)(p + p + \frac{\omega R_s}{X_h} - j\omega) \dots \dots \dots (1.24)$$

$$X_h'' = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{X_d''} + \frac{1}{X_q''} \right] \dots \dots \dots (1.25)$$

- En remplaçant $\mathcal{L}_d(p)$ et $\mathcal{L}_q(p)$ par leurs expressions trouvées en (1-10), et (1-13) dans la relation matricielle (1-17), on trouve :

$$I_d = -\frac{E\sqrt{3}}{L_d} \cdot -\frac{\omega}{p} \cdot \frac{(1+pT'_{d0})(1+pT''_{d0})}{(1+pT'_{d0})(1+pT''_{d0})[p+\frac{\omega R_s}{X_h}+j\omega][p+\frac{\omega R_s}{X_h}-j\omega]} \dots \dots \dots (1.26)$$

$$I_q = -\frac{E\sqrt{3}}{L_q} \cdot -\frac{1}{p} \cdot \frac{(1+pT'_{q0})(p+\frac{\omega R_s}{X_h})}{(1+pT'_{q0})(p+\frac{\omega R_s}{X_h}+j\omega)(p+\frac{\omega R_s}{X_h}-j\omega)} \dots \dots \dots (1.27)$$

On arrive ainsi aux originales de $I_q(p)$ et $I_d(p)$ en les décomposant en fractions simples .

$$i_d(t) = -E\sqrt{3} \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} - \frac{1}{X_d} \cos \omega t \cdot e^{-t/T_a} \right] \dots \dots \dots (1-28)$$

De même : $i_q(p) = -\frac{E\sqrt{3}}{X_d} \sin \omega t \cdot e^{-t/T_a}$ avec $T_a = \left[\frac{\omega R_s}{X_h} \right]^{-1} \dots \dots \dots (1.29)$

T_a est la constante de temps en court-circuit de l'induit.

A l'aide de la transformation modifiée de PARK :

$$i_a = \sqrt{\frac{2}{3}} (i_d \cos \theta - i_q \sin \theta) \text{ avec } \theta = \omega t + \delta$$

le courant dans la phase a s'écrit :

$$i_a(p) = -E_m \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cos \omega t + \delta + E_m \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{X'_d} + \frac{1}{X_q} \right) \cos \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_q} \right) \cos(\omega t + \delta) \right] \dots \dots \dots (1.30)$$

- Les courants i_b, i_c s'obtiennent en remplaçant dans l'expression de i_a , δ par $\delta - \frac{2\pi}{3}$ et $\delta - \frac{4\pi}{3}$.

Le courant i_a se compose de cinq termes qu'on peut regrouper en trois composantes :

1- La composante alternative de pulsation ω qui est la somme :

- du terme permanent d'amplitude $\frac{E_m}{X_d}$.
 - du terme transitoire d'amplitude initiale $(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d})E_m$, amorti avec la constante de temps T'_d .
 - du terme subtransitoire d'amplitude initiale $(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d})E_m$, amorti avec la constante de temps T''_d .
- 2- La composante asymétrique, terme apériodique amorti avec la constante de temps T_a , de valeur initiale $E_m \cos(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d})/2$
- 3- La composante de pulsation 2ω , l'amplitude initiale $E_m (\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d})/2$ amortie avec la constante de temps T_a .
- L'amplitude initiale de la composante alternative est E_m/X''_d .
 - L'amplitude initiale de la composante asymétrique diffère peu de E_m/X''_d parce que $(\frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X'_d})\frac{1}{2} = \frac{1}{X''_d}$.
 - La composante de pulsation 2ω est négligeable du fait que X''_d est proche de X'_d

1-6-1-2 Expressions du courant dans l'inducteur

Le courant d'excitation est la somme du courant $i_{f0} = V_f / R_f$ en régime permanent antérieur et de i_f' dû au régime transitoire.

A partir de la deuxième équation matricielle (paragraphe (1-4-1)).

$$[D][I_1] + [F][I_2] = [V_2]$$

Avec $[D] = \begin{bmatrix} M_f p & 0 \\ M_{kd} p & 0 \end{bmatrix}; [F] = \begin{bmatrix} R_f + pL_f & M_{fd} p \\ M_{fd} p & R_{ld} + L_{ld} p \end{bmatrix}$(1-31)

$$[I_1] = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}; [I_2] = \begin{bmatrix} I'_f \\ I_{ld} \end{bmatrix}; [V_2] = \begin{bmatrix} v_f \\ 0 \end{bmatrix}$$
..... (1. 32)

Puisqu'on applique $V_f = 0$, la relation devient :

$$[I_2] = -[F]^{-1}[D][I_1]$$
.....(1 . 33)

En calculant $[F]^{-1}$ et le produit $[F]^{-1}[D]$

$$I'_f = -\frac{M_f}{R_f} \frac{p(1+pT_{KD})}{(1+pT'_{d0})(1+pT''_{d0})} I_d \dots\dots\dots (1. 34)$$

- En remplaçant I_d par son expression (1-26), avec $E\sqrt{3} = M_f\omega I_{f0}$ et on faisant certaines approximations , on arrive à l'originale de $I'_f(p)$, laquelle en lui ajoutant I_{f0} , on obtient

$$I_f(p) = I_{f0} \left[I + \frac{X_d - X'_d}{X'_d} \left[e^{-\frac{t}{T'_d}} - \left(I - \frac{T_{KD}}{T'_d} \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} - \frac{T_{KD}}{T_a} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos\omega t \right) \right] \right] \dots\dots\dots(1. 35)$$

Le courant I_f est la somme de quatre termes :

- du courant d'excitation I_{f0} qui subsiste à la fin du régime transitoire.
- du courant subtransitoire s'amortissant très vite avec la constante de temps T''_d .
- du courant transitoire s'amortissant lentement avec la constante de temps T'_d .
- du courant de pulsation ω s'amortissant avec la constante de temps T_a .

1-7 Définition et expression des réactances et constantes de temps usuelles

Dans cette partie , nous distinguons sept réactances avec sept expressions :

1-7 – 1 - 1 Réactances subtransitoire $X_{d''}$ de l'axe direct

C'est la réactance opérationnelle $X_d(p)$ au temps $t = 0$ soit $X_{d''} = X_d(\infty)$

$$X_{d''} = \omega \left(L_d - \frac{M_f^2}{L_f} \right) \dots\dots\dots (1. 36)$$

1-7-1 - 2 Réactance transitoire X_{d0} de l'axe direct

C'est la réactance opérationnelle $X_d(p)$ au temps $t = 0$ on admettant que le circuit d'amortisseur de l'axe direct est supprimé. Il suffira de faire tendre L_{11d} vers ∞ :

Soit :

$$X'_d = \omega \left(L_d - \frac{M_f^2}{L_f} \right) \dots \dots \dots (1.37)$$

1-7-1-3 Réactance synchrone d'axe direct X_d

C'est la réactance obtenue en ouvrant dans l'axe direct le circuit de l'inducteur :

$$X_d = \omega L_d \dots \dots \dots (1.38)$$

1-7-1-4 Réactance subtransitoire X_q'' de l'axe transversal

C'est la réactance opérationnelle $X_q(P)$ à l'instant initial soit : $X_q'' = X_q(\infty)$

$$X_q'' = \omega L_q \dots \dots \dots (1.39)$$

On peut obtenir ce résultat de même en négligeant toutes les résistances dans l'expression de $L_q(P)$

1-7-1-5 Réactance synchrone de l'axe transversal X_q

C'est la réactance obtenue en ouvrant dans l'axe transversal le circuit d'amortisseur.

Soit :

$$X_q = \omega L_q \dots \dots \dots (1.40)$$

1-7-1-6 Réactances inverse X_i

C'est la réactance apparente de la machine alimentée par un système de tensions inverse.

On pourra adopter une valeur moyenne :

$$X_i = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \dots \dots \dots (1.41)$$

1-7-1-7 Réactances homopolaire X_0

C'est la réactance apparente de la machine alimentée par un système de tensions homopolaire.

Cette réactance est due aux seuls flux de fuite .

Elle n'a une valeur finie que si l'induit est connecté en étoile avec fil neutre.

1-7-2-1 Constantes de temps usuelles

Leur définition est fonction du régime perturbé considéré .En pratique dans les cahiers

des charges , on demande plus particulièrement les constantes de temps intervenant dans les perturbations symétriques notamment les court-circuit triphasés.

1-7-2-2 Constantes de temps de l'axe direct

L'inductance opérationnelle de l'axe direct s'écrit :

$$\mathcal{L}_d(p) = \left[L_d + \frac{(M_f^2 P)}{(R_f + L_f P)} \right] \dots \dots \dots (1.42)$$

-le dénominateur de $\mathcal{L}_d(P)$ s'écrit :

$$R_f \left[I + p \frac{L_f}{R_f} \right] \dots \dots \dots (1.43)$$

Il diffère peu de :

$$R_f(I + pT_{do}') \dots \dots \dots (1.44)$$

avec :

$$T_{do}' = \frac{L_f}{R_f} \dots \dots \dots (1.45)$$

- le numérateur de $\mathcal{L}_d(P)$ s'écrit sous la forme $L_d R_f (1 + AP)$, peut être décomposé sous la forme :

$$L_d R_f (1 + PT_{d}') \dots \dots \dots (1.46)$$

- le numérateur de $\mathcal{L}_d(P)$ s'écrit :

$$L_d R_f \left(1 + P \left(\frac{L_f}{R_f} \left(1 + \frac{M_f^2}{L_f L_d} \right) \right) \right) \dots \dots \dots (1.47)$$

avec :

$$T_d' = \frac{L_f}{R_f} \left(1 + \frac{M_f^2}{L_f L_d} \right) \dots \dots \dots (1.48)$$

1-7-2-3 Constantes de temps de l'axe en quadrature

L'inductance opérationnelle de l'axe en quadrature s'écrit :

$$\mathcal{L}_q(P) = L_q \dots \dots \dots (1.49)$$

1 – 8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une description de la machine synchrone et présenté son utilisation dans le domaine de la production d'électricité et le domaine de motorisation, nous avons présenté aussi sa construction physique, son principe de base de fonctionnement.

Dans un second lieu nous avons présenté les hypothèses simplificatrices de modélisation des machines synchrones, et les équations électriques et magnétiques, la transformation de PARK et ces formes modifiées ainsi que les équations électriques dans l'axes d et q.

Dans ce lieu, nous avons donné les définitions et d'écrit les expressions des réactances et constantes de temps usuelles et nous avons fait une étude de la machine synchrone en régime transitoire , subtransitoire et régime permanent.

.



Chapitre 11 :

Détermination des paramètres

par les essais indiciels

Chapitre II : Détermination des paramètres par les essais indiciaires

2 - 1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'exposer les essais indiciaires pour la mesure des réactances et des constantes de temps de la machine synchrone testée en régimes permanent, transitoire et subtransitoire. Plusieurs méthodes existent pour la mesure de ces paramètres nous allons exposer dans ce chapitre, une méthode permettant la détermination des plus usités.

Les réactances, résistances et constantes de temps des machines synchrones constituent, comme nous l'avons vu les éléments essentiels qui permettent d'étudier les différents de leur fonctionnement.

Cependant, certains paramètres tels ceux relatifs aux amortisseurs n'étant pas directement mesurables, nous essaierons de les évaluer sous forme de constantes de temps.

2 - 2 Détermination des paramètres par des essais indiciaires

- En soumettant les bobinages d'induit et de l'inducteur à des échelons de tension continue on peut déterminer l'ensemble de leurs paramètres à partir des relevés des réponses indiciaires.

Pour cela quatre essais sont nécessaires :

- Pour les trois premiers on fait coïncider l'axe de l'inducteur avec celui de la phase a de l'induit de sorte à avoir un couplage maximum entre les deux bobinages.
- Pour le quatrième, on met les deux axes en quadrature de façon à avoir un couplage nul entre ces deux bobinages.

2 - 2 - 1 L'essai 1 : Attaque de l'induit à inducteur ouvert

- L'inducteur ouvert on applique une tension continue E à la phase a et on enregistre le courant i_a qu'elle absorbe.
- Dans cette position, l'inductance propre de la phase a avec ses inductances mutuelles avec les enroulements f et 1d sont :

$$L_{ad} = L_{a0} + L_{a2} ; M_{af} ; M_{a1d}$$

Les équations opérationnelles régissant le système sont alors :

$$\frac{E}{p} = (R_a + pL_{ad})I_a + M_{a1d}pI_{1d} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$0 = M_{a1d}pI_a + (R_{1d} + pL_{11d})I_{1d}$$

Par élimination de I_{1d} entre des deux équations, on obtient $I_a(p)$:

$$I_a = \frac{E(R_{1d} + pL_{11d})}{P[(L_{ad}L_{11d} - M^2_{a1d})P^2 + (R_a L_{11d} + R_{1d} L_{ad})P + R_a R_{1d}]}$$
(2.2)

Qui peut s'écrire sous la forme :

$$I_{a(p)} = K \frac{P+A}{P(P+B)(P+C)}$$
(2.3)

Avec :

$$K = E \frac{L_{11d}}{(L_{ad}L_{11d} - M^2_{a1d})}; \quad A = \frac{R_{1d}}{L_{11d}}; \quad BC = \frac{R_a R_{1d}}{(L_{ad}L_{11d} - M^2_{a1d})}; \quad \text{et}$$

$$B + C = \frac{R_a L_{11d} - R_{1d} L_{ad}}{L_{ad}L_{11d} - M^2_{a1d}}$$

En prenant la transformée inverse du courant $I_a(p)$ on trouve :

$$i_a(t) = y_0 - y_1 * e^{\frac{-t}{T_1}} - y_2 * e^{\frac{-t}{T_2}}$$
(2.4)

Avec :

$$y_0 = K \frac{A}{BC}; \quad y_1 = K \frac{A-B}{B(C-B)}; \quad y_2 = K \frac{A-C}{C(B-C)}; \quad T_1 = 1 / B; \quad T_2 = \frac{1}{C}$$

- On montrons plus tard comment, à partir de l'enregistrement du courant obtenir y_1, y_2, y_0, T_1, T_2
- On peut trouver l'expression de l_{ad} et R_a en fonction de $y_0, y_1, y_2, T, T_1, T_2$ on considérant les relations ci-dessus :

$$L_{ad} = R_a T_l \frac{1 + \frac{y_2 T_2}{y_1 T_1}}{1 + \frac{y_2}{y_1}} \dots \dots \dots (2.5) \quad ; \quad R_a = \frac{E}{y_0}$$
(2.6)

- La constante de temps T_{ado} , l'amortisseur $1d$ et l'inducteur étant ouverts, aura pour expression ;

$$T_{ado} = \frac{L_{ad}}{R_a} = T_l \frac{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right)\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{1 + \frac{y_2}{y_1}}$$
(2.7)

- De même, la constante de temps de l'amortisseur $1d$, T_{1do} vaudra :

$$T_{1do} = \frac{L_{11d}}{R_{1d}} = T_1 \frac{1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right) + \left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{1 + y_2/y_1} \dots\dots\dots(2.8)$$

- On peut aussi évaluer le coefficient de couplage entre la phase a de l'induit et l'amortisseur $1d$:

$$K_{a1d}^2 = \frac{M_{a1d}^2}{L_{aa}L_{11d}} = \frac{\left(\frac{y_2}{y_1}\right)\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)^2}{\left(y_2/y_1 + \frac{T_2}{T_1}\right)\left(1 + \left(\frac{y_2}{y_1}\right) * \left(\frac{T_2}{T_1}\right)\right)} \dots\dots\dots(2.9)$$

2 - 2 - 2 L'essai 2 : Attaque de l'inducteur à induit ouvert

- L'induit ouvert, on applique maintenant, à $t = 0$, un échelon de tension continue à l'inducteur et on enregistre le courant dans celui-ci .les équations opérationnelles régissant le système sont :

$$\frac{E'}{p} = (R_f + pL_{fd})I_f + M_{f1d}pI_{1d} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$0 = M_{f1d}pI_f + (R_{1d} + pL_{11d})I_{1d}$$

- En éliminant I_{1d} entre ces deux équations, on obtient $I_f(p)$:

$$I_f(P) = \frac{E'(R_{1d} + pL_{11d})}{P[(L_{fd}L_{11d} - M_{f1d}^2)P^2 + (R_f L_{11d} + R_{1d} L_f)P + R_f R_{1d}]} \dots\dots\dots(2.11)$$

Qui peut se mettre sous la forme :

$$I_f(P) = K' \frac{P+A'}{P(P+B')(P+C')} \dots\dots\dots(2.12)$$

Avec :

$$K' = E' \frac{L_{11d}}{(L_{fd}L_{11d} - M_{f1d}^2)} ; A' = \frac{R_{1d}}{L_{11d}} ; BC = \frac{R_f R_{1d}}{(L_{fd}L_{11d} - M_{f1d}^2)} ; \text{ et } B + C = \frac{R_f L_{11d} - R_{1d} L_f}{L_f L_{11d} - M_{f1d}^2}$$

- On obtient l'originale de $I_f(t)$ en la décomposant en fractions simples :

$$i_f(t) = y'_0 - y'_1 * e^{\frac{-t}{T'1}} - y'_2 * e^{\frac{-t}{T'2}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Avec :

$$y_0 = \frac{E}{R_f} \dots\dots\dots(2.14)$$

- De même que précédemment Y'_0, Y'_1, Y'_2, T'_1 et T'_2 sont donnés par l'enregistrement du courant $i_f(p)$.

- On obtient aussi :

➤ l'inductance propre de l'inducteur et la constante de temps correspondante.

$$L_f = R_f * T'_1 \frac{1 + \left(\frac{y'_2}{y'_1}\right)\left(\frac{T'_2}{T'_1}\right)}{1 + \left(\frac{y'_2}{y'_1}\right)} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$T_{f0} = \frac{L_f}{R_f} = T'_1 \frac{1 + \left(\frac{y'_2}{y'_1}\right)\left(\frac{T'_2}{T'_1}\right)}{1 + \left(\frac{y'_2}{y'_1}\right)} \dots\dots\dots(2.16)$$

➤ la constante de temps de l'amortisseur $1d$, lorsque les autres bobinages sont ouverts s'écrit :

$$T_{1do} = \frac{L_{11d}}{R_{1d}} = T'_1 \frac{1 + \left(\frac{y'_2}{y'_1}\right) + \left(\frac{T'_2}{T'_1}\right)}{1 + y'_2/y'_1} \dots\dots\dots(2.17)$$

➤ le coefficient de couplage inducteur –amortisseur $1d$ s'écrit :

$$K_{f1d}^2 = \frac{M_{f1d}^2}{L_f L_{11d}} = \frac{\left(\frac{y'_2}{y'_1}\right)\left(1 - \frac{T'_2}{T'_1}\right)^2}{\left(y'_2/y'_1 + \frac{T'_2}{T'_1}\right)\left(1 + \left(\frac{y'_2}{y'_1}\right)\left(\frac{T'_2}{T'_1}\right)\right)} \dots\dots\dots(2.18)$$

2 - 2 - 3 L'essai 3 : essai d'attaque de l'induit à inducteur en court circuit

- Dans la même position que précédemment, l'inducteur on court-circuit, on applique un échelon de tension d'amplitude E'' à la phase a et on relève le courant.

Les équations régissant le système sont :

$$\frac{E''}{p} = (R_a + pL_{ad})I_a + M_{af}PI_{1f} + M_{a1d}PI_{1d} \dots\dots\dots(2.19)$$

$$0 = M_{af}PI_a + (R_f + pL_f)I_f + M_{f1d}PI_{1d}$$

$$0 = M_{1d}PI_a + M_{f1d}PI_f + (R_{1d} + pL_{11d})I_{1d}$$

En tirant I_f et I_{1d} des deux dernières équations et on remplaçant dans la première, on trouve l'expression de $I_a(p)$ dont l'originale, comme pour les précédentes, se met sous la forme :

$$i_a(t) = y''_0 - y''_1 * e^{-\frac{t}{T}} - y''_2 * e^{-\frac{t}{T'}} + y''_3 e^{-\frac{t}{T''}} \dots \dots \dots (2.20)$$

En procédant de la même façon que pour les deux premiers essais, on peut montrer que les coefficients de couplage entre les enroulements a , f , $1d$ pris deux à deux sont donnés par les relations :

$$K_f^2 = \frac{M^2_{f1d}}{L_f L_{1d}} = \frac{T_{1do}}{T_{fo}} (1 - K_{ad,1d}^2) + \frac{T_{1do}}{T_{ado}} (1 - K_{f,1d}^2) - \frac{TT' + TT'' + TTT''}{T_{fo} - T_{ado}} + 1 \dots \dots \dots (2.21)$$

$$K_{f1d}^2 = \frac{M^2_{f1d}}{L_f L_{11d}} = \frac{R_a y''_1}{E''} * \frac{(T - T')(T - T'')}{T_{fo} - T_{1do}} + \left(\frac{T}{T_{fo}} - 1 \right) * \left(\frac{T}{T_{1do}} - 1 \right) \dots \dots \dots (2.22)$$

2 - 2 - 4 L'essai 4 : essai d'attaque de l'induit à inducteur ouvert

- Le rotor mis dans la deuxième position, on applique à la phase à un échelon de tension continue E''' et en enregistre le courant qu'elle absorbe.

Dans ce cas, l'inductance propre de la phase a et son inductance mutuelle avec l'amortisseur 1_q , sont :

$$L_{aq} = L_{ao} + L_{a2}; \quad M_{a,1q}; \quad M_{af} = 0$$

Les équations régissant le système sont :

$$\frac{E'''}{p} = (R_a + pL_q)I_a + M_{a,1q}pI_{1q} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$0 = M_{a,1q}pI_a + (R_{1q} + pL_{11q})I_{1q}$$

- En élimination I_{1q} dans les deux équations, on trouve l'expression de $I_a(p)$ sous forme opérationnelle :

$$I_a(P) = \frac{K'' (P+A'')}{P (P+B''')(P+C''')} \dots \dots \dots (2.24)$$

Avec :

$$K'' = E''' \frac{L_{11q}}{(L_{aq}L_{11q} - M_{a,1q}^2)}; A'' = \frac{R_{1q}}{L_{11q}}; BC = \frac{R_a R_{1q}}{(L_{aq}L_{11q} - M_{a,1q}^2)}; \text{ et } B'' + C'' = \frac{aL_{11q} - R_{1q} L_{aq}}{L_{aq}L_{11q} - M_{a,1q}^2}$$

L'originale de $I_a(p)$ n'écrit :

$$i_a(t) = y'''_0 - y'''_1 * e^{\frac{-t}{T'''_1}} - y'''_2 * e^{\frac{-t}{T'''_2}} \dots \dots \dots (2.25)$$

Avec

$$y'''_0 = K'' \frac{A''}{B''' C''}; y'''_1 = K'' \frac{A'' - B''}{B'''(C'' - B'')}; y'''_2 = K'' \frac{A'' - C''}{C''(B'' - C'')}; T'''_1 = \frac{1}{B''}; T'''_2 = \frac{1}{C''}$$

$Y'''_0, Y'''_1, Y'''_2, T'''_1$ et T'''_2 sont donnés par l'enregistrement.

Par des relations analogues à celles déduites du premier essai, on trouve :

$$L_{aq} = R_a * T'''_1 \frac{1 + \left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right)\left(\frac{T'''_2}{T'''_1}\right)}{1 + \left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right)} \dots \dots \dots (2.26)$$

La constante de temps de la phase a, l'inducteur et l'amortisseur 1_q ouverts :

$$T_{aqo} = \frac{L_{aq}}{R_a} = T'''_1 * \frac{1 + \left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right) + \left(\frac{T'''_2}{T'''_1}\right)}{1 + \left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right)} \dots \dots \dots (2.27)$$

La constante de temps de l'amortisseur 1_q :

$$T_{1qo} = \frac{L_{11q}}{R_{1q}} = T'''_1 * \frac{1 + \left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right) + \left(\frac{T'''_2}{T'''_1}\right)}{1 + \left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right)} \dots \dots \dots (2.28)$$

Le coefficient de couplage k_{a1q} entre les enroulements a et 1_q :

$$K_{a,1q}^2 = \frac{\left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right)\left(1 - \frac{T'''_2}{T'''_1}\right)^2}{\left(\frac{y'''_2}{y'''_1} + \frac{T'''_2}{T'''_1}\right)\left(1 + \left(\frac{y'''_2}{y'''_1}\right) * \left(\frac{T'''_2}{T'''_1}\right)\right)} \dots \dots \dots (2.29)$$

2 - 3 Détermination les différents paramètres à partir des résultats obtenus

2 - 3 - 1 Réactances

- En tenant compte de l'approximation faite au paragraphe $M_{abo} = -\frac{L_{ao}}{2}$ et des relations , on aura :

➤ La réactance synchrone d'axe direct X_d :

$$X_d = L_d \omega = \left(L_{ao} - M_{abo} + \frac{3}{2} L_{a2} \right) \omega \simeq \frac{3}{2} (L_{ao} + L_{a2}) \omega = \frac{3}{2} \omega * L_{ad} \dots \dots \dots (2.30)$$

➤ La réactance synchrone de l'axe transversal X_q :

$$X_q = L_q \omega = \left(L_{ao} - M_{abo} - \frac{3}{2} L_{a2} \right) \omega \simeq \frac{3}{2} (L_{ao} - L_{a2}) \omega = \frac{3}{2} \omega * L_{aq} \dots \dots \dots (2.31)$$

➤ La réactance transitoire de l'axe direct X'_d :

$$X'_d = L_d \omega \left(1 - \frac{M_f^2}{L_f L_d} \right) = L_d * \omega \left(1 - \frac{(3/2) M_{fa}^2}{(3/2) L_{ad} L_f} \right) = \frac{3}{2} \omega * L_{ad} (1 - K_{af}^2) \dots \dots \dots (2.32)$$

➤ La réactance subtransitoire de l'axe direct X''_d :

$$X''_d = L_d \omega \left[1 - \frac{L_{11d} M_f^2 + L_f M_{KD}^2 - 2 M_f M_{KD} M_{fD}}{L_d L_f L_{11d} \left(1 - \frac{M_{fD}^2}{L_f L_{11d}} \right)} \right] = L_d \omega \left[1 - \frac{1}{1 - K_{f1d}^2} \left(\frac{M_f^2}{L_d L_f} - 2 \sqrt{\frac{M_f^2}{L_d L_f}} * \sqrt{\frac{M_{fD}^2}{L_f L_{11d}}} * \right. \right.$$

MKD2LdL11d

D'où

$$X''_d = \frac{3}{2} \omega L_{da} \left(1 - \frac{K_{af}^2 + K_{a1d}^2 - 2 K_{af} K_{fd} K_{a1d}}{(1 - k_{f1d}^2)} \right) \dots \dots \dots (2.33)$$

➤ La réactance subtransitoire de l'axe transversal X''_q :

$$X''_q = L_q \omega \left(1 - \frac{M_{K0}^2}{L_q L_{11q}} \right) = L_q \omega \left(1 - \frac{(3/2) M_{a1d}^2}{(3/2) L_{aq} L_{11q}} \right) = (3/2) L_{aq} \omega (1 - K_{a1q}^2) \dots \dots \dots (2.34)$$

2 - 3 - 2 Constantes de temps

Elles sont définies précédemment :

➤ Constante de temps transitoire d'axe direct en circuit ouvert T'_{do} :

$$T'_{do} = \frac{L_f}{R_f} = T_{f0} \dots \dots \dots (2.35)$$

- Constante de temps subtransitoire d'axe direct en circuit ouvert T''_{do} :

$$T''_{do} = \frac{L_{II d}}{R_{I d}} \left(I - \frac{M^2_{fD}}{L_f L_{II d}} \right) = T_{KDo} (I - K^2_{f,Id}) \dots \dots \dots (2.36)$$

- Constante de temps transitoire d'axe direct en court-circuit T'_d :

$$T'_d = \frac{L_f}{R_f} \left(I - \frac{M^2_f}{L_d L_f} \right) = T_{fo} (I - K^2_{af}) \dots \dots \dots (2.37)$$

- Constante de temps subtransitoire d'axe direct en court-circuit T''_d :

$$T''_d = \frac{L_{II d}}{R_{I d}} \left[I - \frac{I}{I - \left(\frac{M^2_f}{L_d L_f} \right)} \left(\frac{M^2_{fD}}{L_{II d} L_f} + \frac{M^2_{KD}}{L_d L_{II d}} - 2 \frac{L_{II q}}{R_{I q}} \sqrt{\left(\frac{M^2_{fD}}{L_{II d} L_f} \right)} * \sqrt{\left(\frac{M^2_{KD}}{L_d L_{II d}} \right)} \right) \right]$$

D'ou

$$T''_d = T_{KDo} \left(1 - \frac{K^2_{f,Id} + K^2_{a,Id} - 2K_{af} * K_{f,Id} * K_{a,Id}}{1 - K^2_{af}} \right) \dots \dots \dots (2.38)$$

- Constante de temps subtransitoire transversale en circuit ouvert T'''_{qo} :

$$T'''_{qo} = \frac{L_{11 q}}{R_{1 q}} = T_{Kqo} \dots \dots \dots (2.39)$$

- Constante de temps subtransitoire transversale en court circuit T''_q :

$$T''_q = \frac{L_{11 q}}{R_{1 q}} \left(1 - \frac{M^2_{K0}}{L_q L_{11 q}} \right) = T_{Kqo} (1 - K^2_{a,1q}) \dots \dots \dots (2.40)$$

- Constante de temps des fuites de l'amortisseur d'axe direct :

$$T_{KD} = \frac{L_{11 d}}{R_{1 d}} \left(1 - \frac{M_{fD} M_{KD}}{M_f L_{11 d}} \right) = \frac{L_{11 q}}{R_{1 q}} \left(1 - \sqrt{\frac{M^2_{fD}}{L_f L_{11 d}} * \frac{L_f L_d}{M^2_f} * \frac{M^2_{KD}}{L_d L_{11 d}}} \right)$$

D'ou

$$T_{KD} = T_{KDo} \left(1 - \frac{K_{f,Id} * K_{a,Id}}{K_{af}} \right) \dots \dots \dots (2.41)$$

2 – 4 Relation entre Réactances et constantes de temps

- Pour l'axe direct, en obtient la relation suivant :

$$\frac{T_{do'}}{T_{d'}} = \frac{1}{1 - \frac{M_f^2}{L_d L_f}} = \frac{L_d}{L_d - \frac{M_f^2}{L_d}} = \frac{X_d}{X_{d'}} \dots\dots\dots(2.42)$$

donc :

$$\frac{T'_{do}}{T'_d} = \frac{X_d}{X'_d} \dots\dots\dots(2.43)$$

de même :

$$\frac{T''_{do}}{T''_d} = \frac{L_f L_{11d} - M_{fd}^2}{L_f L_{11d}} \cdot \frac{L_{11d}(L_d L_f - M_f^2)}{L_d L_f L_{11d} - L_{11d} M_f^2 - L_d M_{fd} - L_f M_{KD}^2 + 2M_f M_{fd} M_{KD}} = \left(L_d - \frac{M_f^2}{L_f} \right) \cdot \frac{I}{L_d - \frac{L_{11d} M_f^2 + L_f M_{KD}^2 - 2M_f M_{fd} M_{KD}}{L_f L_{11d} - M_{fd}^2}} = \frac{X'_d}{X''_d} \dots\dots\dots(2.44)$$

On aura donc :

$$\frac{T'_{do}}{T''_d} = \frac{X'_d}{X''_d} \dots\dots\dots(2.45)$$

Des deux précédentes, on en déduit :

$$\frac{X_d}{X''_d} = \frac{T'_{do} \cdot T''_{do}}{T'_d \cdot T''_d} \dots\dots\dots(2.46)$$

- Pour l'axe en quadrature, en obtient la relation suivante :

$$\frac{T''_q}{T''_{qo}} = \frac{X''_q}{X_q} \dots\dots\dots(2.47)$$

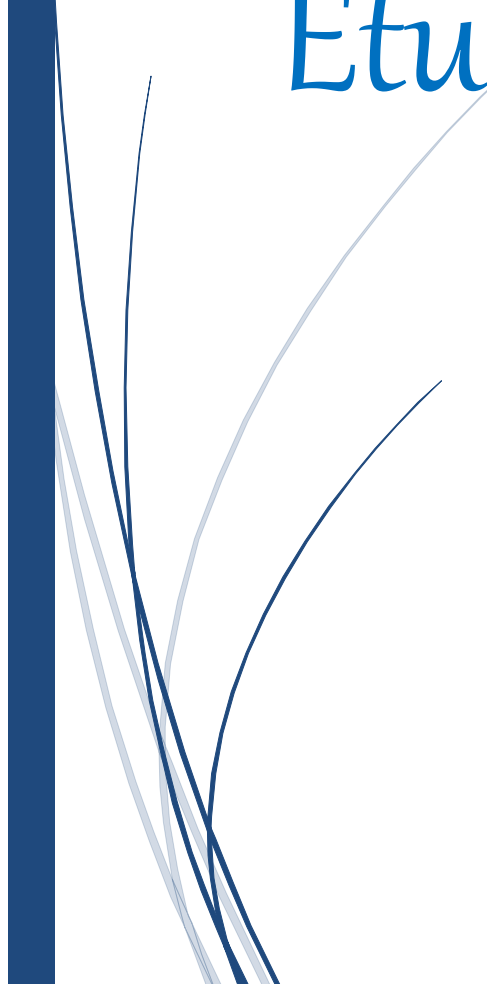
2 – 5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les expressions des réactances et constantes de temps usuelles et nous avons fait une étude de la machine synchrone en régime transitoire subtransitoire et régime permanent, tout cela nous permet de calculer les paramètres de la machine à partir des essais indiciels.



Chapitre III :

Etude Pratique



Chapitre III : Etude pratique

3 – 1 Introduction

La machine synchrone à pôles saillants sur laquelle sont effectués les essais a les caractéristiques suivantes :

Nombre de paires de pôles : $P_1 = 2$

Puissance apparente $S_n = 3\text{KVA}$;

Facteur de puissance $\cos \varphi = 0.8$

$U_n = 380\text{ V}$ en montage étoile ;

$U_n = 220\text{ V}$ en montage triangle ;

Fréquence $f = 50\text{ Hz}$

Vitesse de rotation $N_n = 1500\text{ tours /min}$

Courant d'excitation $J_n = 1\text{ A}$

3-2 Détermination des positions pour flux max et nul

On alimente l'induit par une source de tension continue (4V, 1A par exemple) figure (3-1) et on branche un galvanomètre aux bornes de l'inducteur.

On fait tourner la machine à la main, on remarque que l'aiguille du galvanomètre dévie du minimum au maximum en passant par zéro.

Pour superposer l'axe de la phase a sur l'axe de l'inducteur, il faut obtenir la déviation maximale donc le flux maximal. Pour la quadrature il faut obtenir la déviation nulle donc le flux zéro.

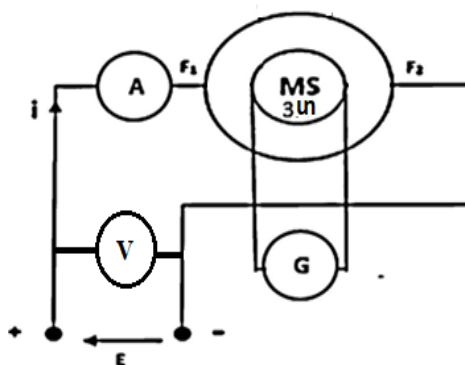


Figure (3-1) : Détermination des positions pour flux max et nul

3 - 3 Méthode graphique

Comme nous l'avant établi précédemment, les équations régissant les réponses indicielles des bobinages soumis à des échelons de tension sont de la forme :

$$Y(t) = y_0 - \sum_{i=1}^n y_i \cdot e^{-t/T_i} \dots \dots \dots (3.1)$$

L'exploitation de ces différentes courbes relevées à l'oscilloscope nécessiterait donc la connaissance des paramètres y_i et T_i .

Il existe plusieurs méthodes pour l'identification des paramètres de ces fonctions.

Dans le cadre de notre projet, nous nous bornerons à l'application de la méthode graphique pour la détermination des paramètres y_i et T_i des fonctions inverses des fonctions des courbes enregistrées.

Sur papier semi-logarithmique.

Exemple : soit $Y(t)$ la fonction à identifier avec :

$$Y(t) = y_0 - y_1 * e^{-t/T_1} - y_2 e^{-t/T_2} - y_3 * e^{-t/T_3} \dots \dots \dots (3.2)$$

La méthode est d'autant plus précise que les T_i sont différents, c'est à dire, on peut négliger T_2 devant T_1 et T_3 devant T_2 . Le tracé de $Y(t)$ dans un repère d'unités simple nous fournit facilement y_0 ($y_0 \neq Y(t)$ pour t grand).

On trace ensuite sur papier semi-logarithmique $Z(t) = y_0 - Y(t)$.

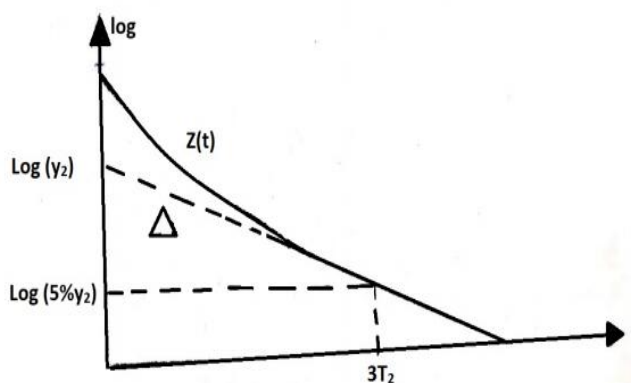


Figure (3.2) : méthode graphique

$$Z(t) = y_1 * e^{-t/T_1} + y_2 e^{-t/T_2} + y_3 * e^{-t/T_3} \dots \dots \dots (3.3)$$

Après un certain temps, la courbe $Z(t)$ est confondue avec une droite Δ dont l'extrapolation à $t = 0$ fournit y_1 . On déduit ensuite graphiquement la courbe $z'(t) = z(t) - y_1 e^{(-t) / T_1}$ sur la figure ($Z(t) - \Delta$). Pour t assez grand, T_3 étant négligeable devant T_2 , $Z'(t) \neq y_2 * e^{-t/T_2}$ qui est une droite dont l'extrapolation à $t = 0$ fournit y_2 .

L'ordonnée 5% y_2 donne sur la courbe, l'abscisse $3T_2$ d'où T_2 , de même pour T_1 .

On reporte ensuite la courbe $Z'(t) - y_2 * e^{-t/T_2} = y_3 e^{-t/T_3}$ qui donne par le même procédé y_3 et T_3 .

Remarque : Cette méthode demande une grande précision dans le relevé de la courbe à identifier.

3 - 4 Application des essais indiciels

3 - 4 - 1 Essai 1 : essai d'attaque de l'induit à inducteur ouvert

3 - 4 - 1 - 1 Montage

L'essai d'attaque de l'induit à l'inducteur ouvert doit être réalisé aussi bien lorsque le rotor est mis sur la position longitudinale que celle transversale.

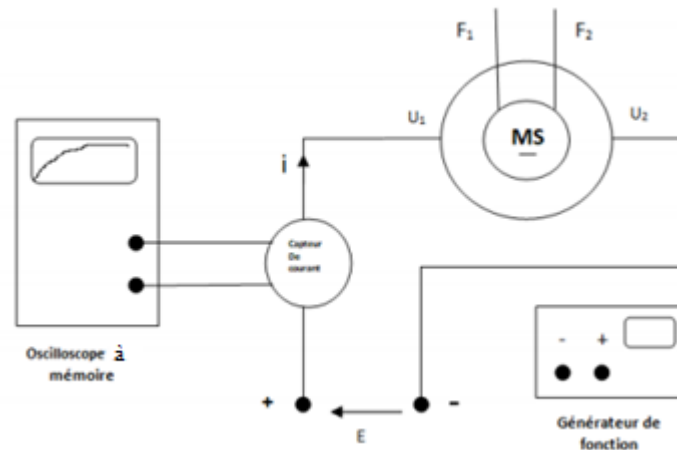


Figure (3 - 3) : montage de l'essai 1

3 - 4 - 1 - 2 Courbe

La courbe enregistrée sur l'oscilloscope est la suivante :

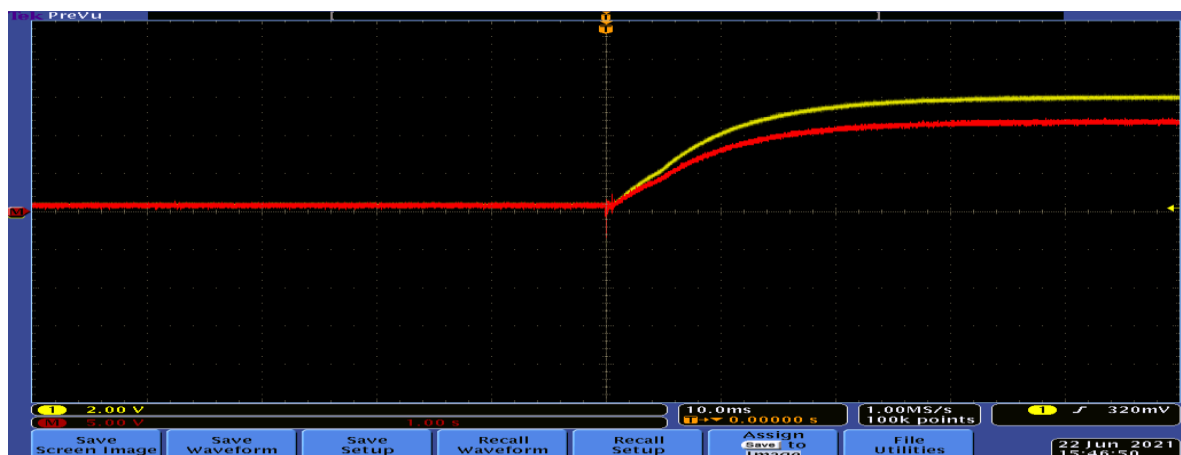


Figure (3 - 4) : Courbe de l'essai 1

La courbe de l'essai 1 représente l'équation du courant $I_{a(p)}$

$$I_{a(p)} = K \frac{P+A}{P(P+B)(P+C)} \dots\dots\dots(3.4)$$

Son inverse représente le courant $I_{a(t)}$ qui est

$$i_a(t) = y_0 - y_1 * e^{\frac{-t}{T_1}} - y_2 * e^{\frac{-t}{T_2}} \dots\dots\dots(3.5)$$

Les relevés nous donnent le tableau suivant qui nous permettent de tracer la courbe de $i_a(t)$

$I_a(t)$ (A)	2.5	1.5	0.75	0.375	0.25
T (ms)	0	5	10	15	20

Tableau (3 - 1) : relevés de la courbe $i_a(t)$

En utilisant la méthode graphique on va tracer la courbe du courant $i_a(t)$ sur papier semi-Logarithmique, on obtient la figure (3.4)

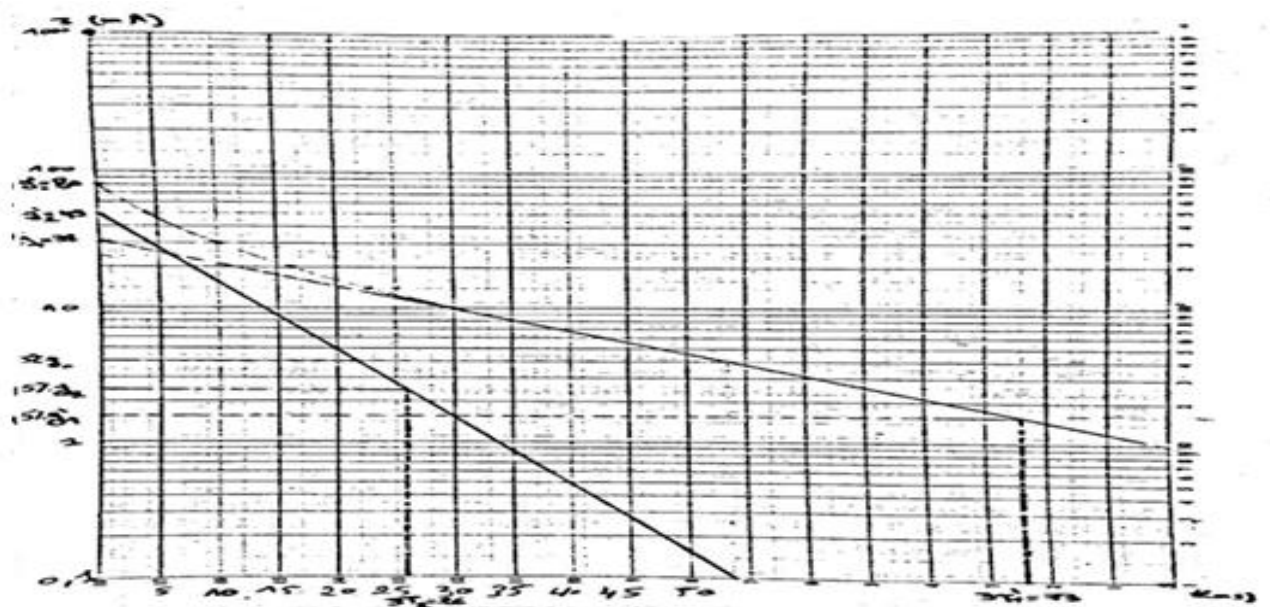


Figure (3.5): Courbe de $i_a(t)$

3- 4- 1- 3 Détermination des paramètres

On appliquant la méthode graphique on obtient les données suivantes :

- E = 6V ; Y₀ = 2.5A ; Y₁ = 0.58A ; Y₂=1.92A
- T₁ =22.5 ms ; T₂ = 6.6 ms

donc :

$$i_a(t) = 2.5 - 0.58 * e^{\frac{-t}{0.022}} - 1.92 * e^{t/0.006}$$

On utilisant les relations des paramètres trouvés dans l'essai 1 du chapitre 2, on obtient :

$$E = 6V; \quad L_{ad} = 106.40 \text{ mH}; \quad L_{11d} = 80.98 \text{ mH} \quad T_{ado} = 10.23 \text{ ms}$$

$$T_{1do} = 18.79\text{ms}; \quad K_{ald} = 0.485 \quad M_{ald} = 1.29 \text{ mH}; \quad R_{Id} = 4.31\Omega$$

3 - 4 - 2 Essai 2 : essai d'attaque de l'inducteur à induit ouvert

3 - 4 - 2 - 1 Montage

L'essai d'attaque de l'inducteur à induit ouvert doit être réalisé aussi bien lorsque le rotor est mis sur la position longitudinale que celle transversale.

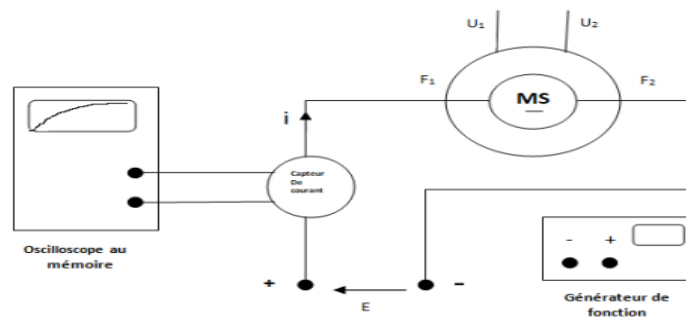


Figure (3 - 6) : montage de l'essai 2

3 - 4 - 2 - 2 Courbe

La courbe enregistrée sur l'oscilloscope est la suivante :

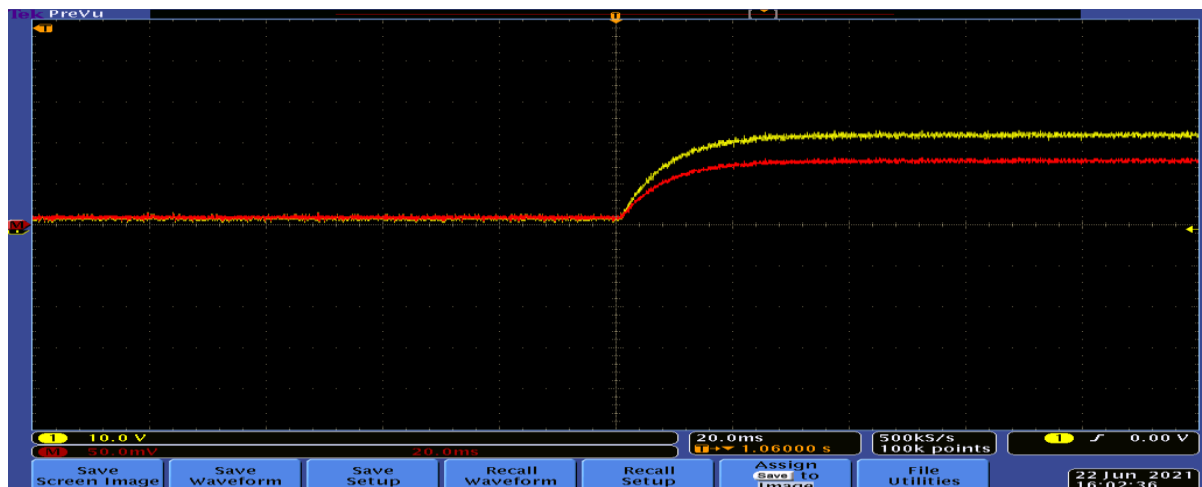


Figure (3 -7) : Courbe de l'essai 2

La courbe de l'essai 2 représente l'équation du courant $I_f(P)$

$$I_f(P) = \frac{E'(R_{1d} + pL_{11d})}{P[(L_{fd}L_{11d} - M^2_{f1d})P^2 + (R_{fd}L_{11d} + R_{1d}L_{fd})P + R_{fd}R_{1d}]}$$
(3 . 6)

Son inverse représente le courant $i_f(t)$ qui est

$$i_f(t) = y'_0 - y'_1 * e^{\frac{-t}{T'1}} - y'_2 * e^{\frac{-t}{T'2}}$$
(3 . 7)

Les relevés nous donnent le tableau suivant qui nous permettent de tracer la courbe de $i_f(t)$

$I_f(t)$ (A)	80	30	20	15	10
T (ms)	0	10	16	23	30

Tableau (3 - 2) : relevés de la courbe $i_f(t)$

En utilisant la méthode graphique on va tracer la courbe du courant $i_f(t)$ sur papier semi-

Logarithmique, on obtient la figure (3-7)

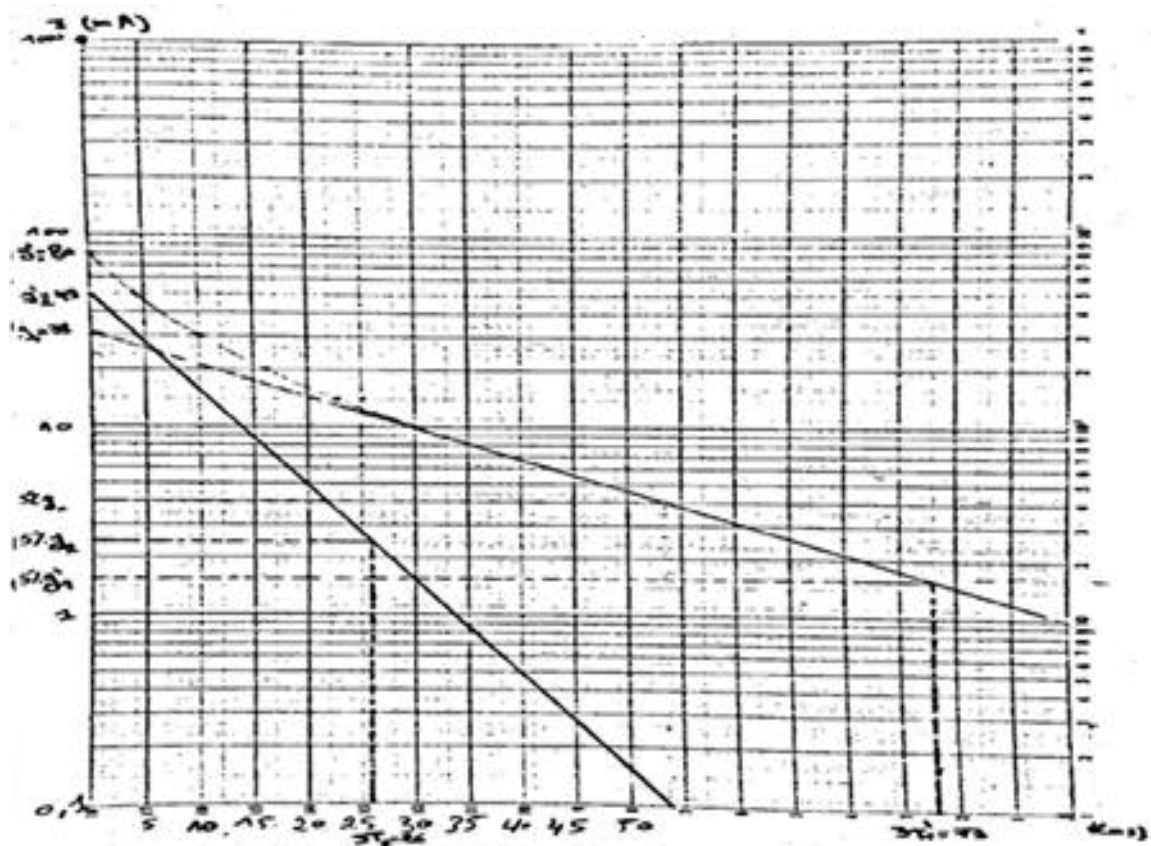


Figure (3-8): Courbe de $i_f(t)$

3- 4- 2- 3 Détermination des paramètres

On appliquant la méthode graphique on obtient les données suivantes :

$$E' = 22V ; \quad y'_0 = 0.08A ; \quad y'_1 = 0.031A ; \quad y'_2 = 0.049A$$

$$T'_1 = 8.6 ms ; \quad T'_2 = 24.33 ms$$

donc :

$$i_f(t) = 0.08 - 0.031 * e^{\frac{-t}{0.008}} - 0.049 * e^{\frac{-t}{0.024}}$$

On utilisant les relations des paramètres trouvés dans l'essai 2 du chapitre 2, on obtient :

$$L_f = 5H ; \quad T_{f0} = 18.185 ms ; \quad T_{1do} = 14.66 ms ; \quad K_{fld} = 0.218$$

$$M_{fld} = 2.227 mH ; \quad L_{11d} = 37.822 mH \quad R_{1d} = 2.58 \Omega$$

$$R_f = 275 \Omega$$

3 - 4 - 3 - Essai 3 : essai d'attaque de l'induit à inducteur en court-circuit

3 - 4 - 3 - 1 Montage

L'essai d'attaque de l'induit à inducteur en court-circuit doit être réalisé aussi bien lorsque le rotor est mis sur la position longitudinale que celle transversale.

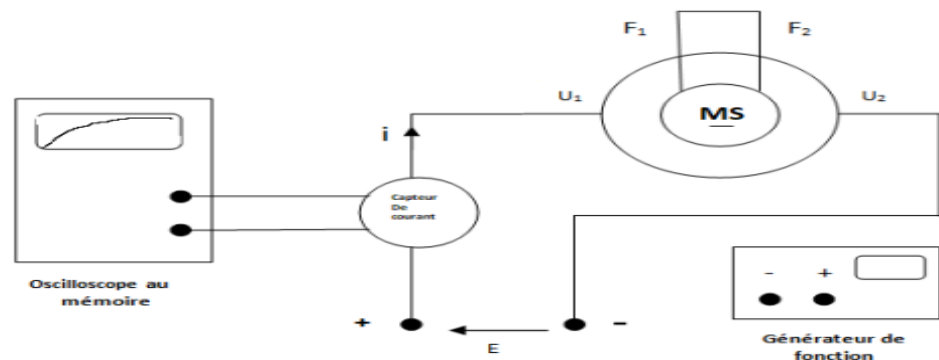


Figure (3 - 9) : montage de l'essai 3

3 - 4 - 3- 2 Courbe

La courbe enregistrée sur l'oscilloscope est la suivante :

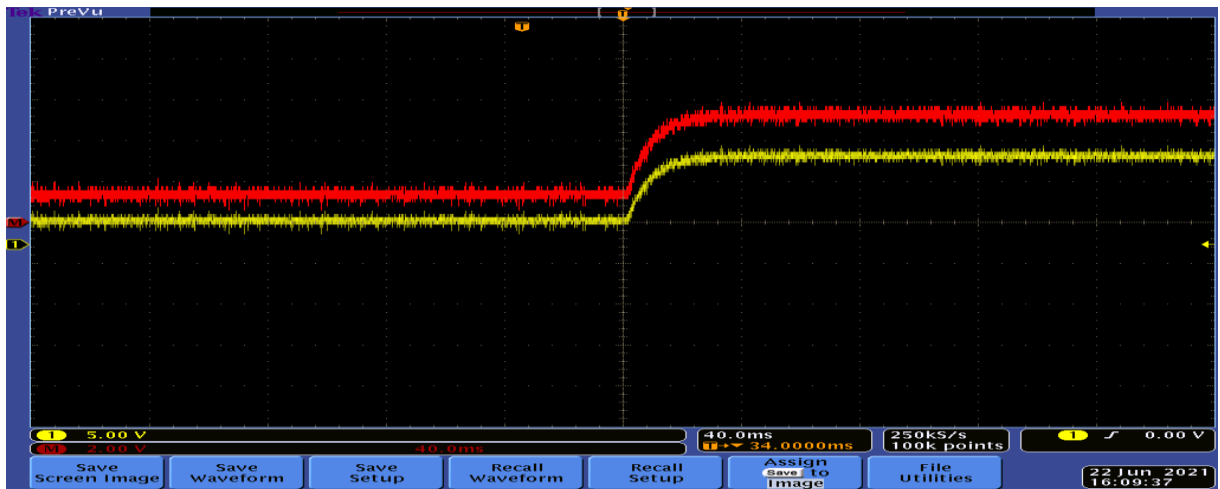


Figure (3 -10) : Courbe de l'essai 3

La courbe de l'essai 3 représente l'équation du courant $i_d(p)$

Son inverse représente le courant $i_d(t)$ qui est

$$i_d(t) = y''_0 - y''_1 * e^{-\frac{t}{T}} - y''_2 * e^{-\frac{t}{T'}} + y''_3 e^{-\frac{t}{T''}} \dots\dots\dots(3. 8)$$

Les relevés nous donnent le tableau suivant qui nous permettent de tracer la courbe de $i_d(t)$

$I_d(t)(A)$	0.4	0.16	0.08	0.06	0.04
T (ms)	0	10	16	23	30

Tableau (3 - 3) : relevés de la courbe $i_d(t)$

En utilisant la méthode graphique on va tracer la courbe du courant $i_d(t)$ sur papier semi-Logarithmique, on obtient la figure (3-10) :

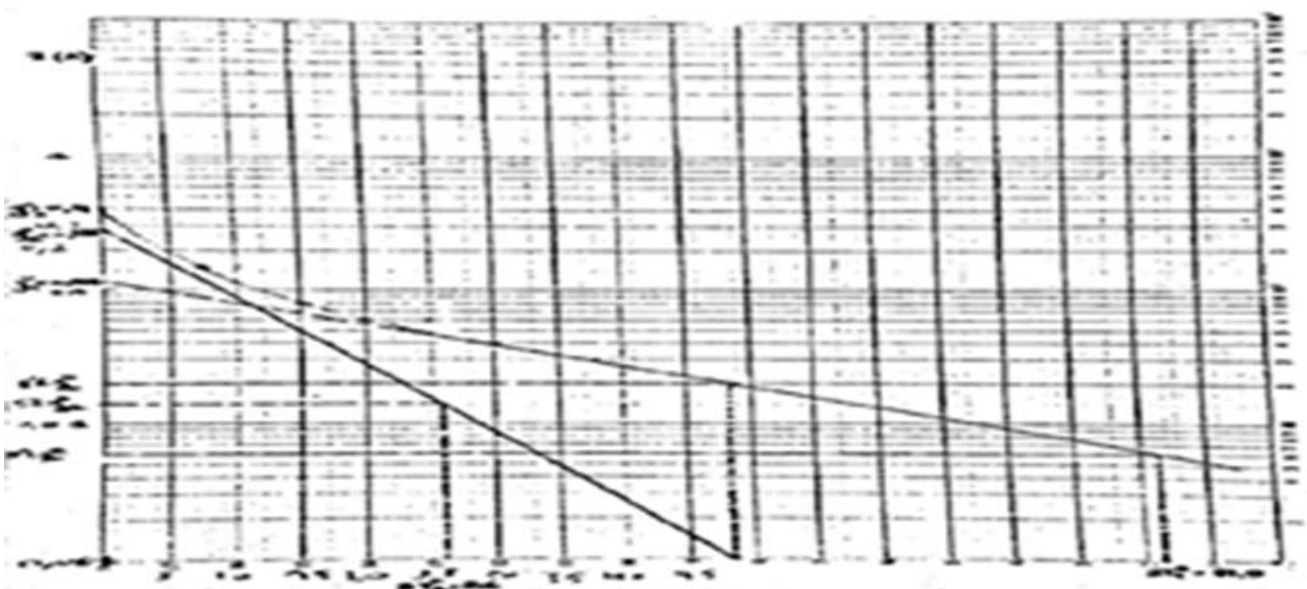


Figure (3-11): Courbe de $i_d(t)$

3- 4- 3- 3 Détermination des paramètres

On appliquant la méthode graphique on obtient les données suivantes :

$$E'' = 8 V; \quad y''_0 = 0.4A; \quad y''_1 = 0.115A$$

$$y''_2 = 0.285 A; \quad T1'' = 27.16ms; \quad T2'' = 8.6ms$$

donc :

$$i_d(t) = 0.4 - 0.115 * e^{\frac{-t}{0.027}} - 0.285 * e^{\frac{-t}{0.008}}$$

On utilisant les relations des paramètres trouvés dans l’essai 3 du chapitre 2, on obtient :

$$K_{af}^2 = 0.0000098 \quad K_{f1d}^2 = 0.000027$$

3 - 4 - 4 – Essai 4 : essai d’attaque de l’induit à inducteur ouvert

3 - 4 - 4 - 1 Montage

L’essai d’attaque de l’inducteur à induit ouvert doit être réalisé aussi bien lorsque le rotor est mis sur la position longitudinale que celle transversale.

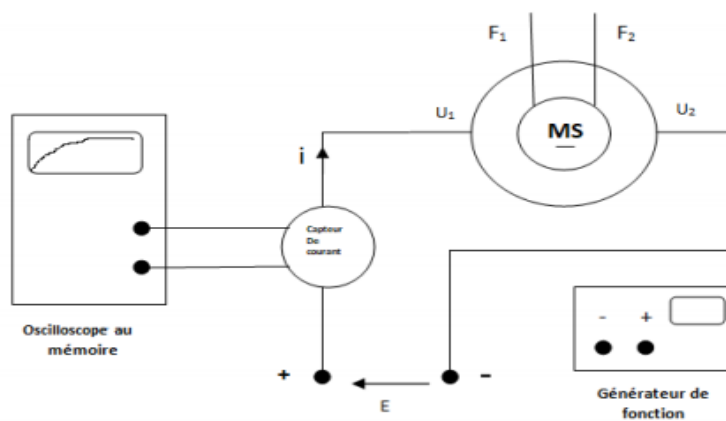


Figure (3 - 12) : montage de l’essai 4

3 - 4 - 4- 2 Courbe

La courbe enregistrée sur l’oscilloscope est la suivante :

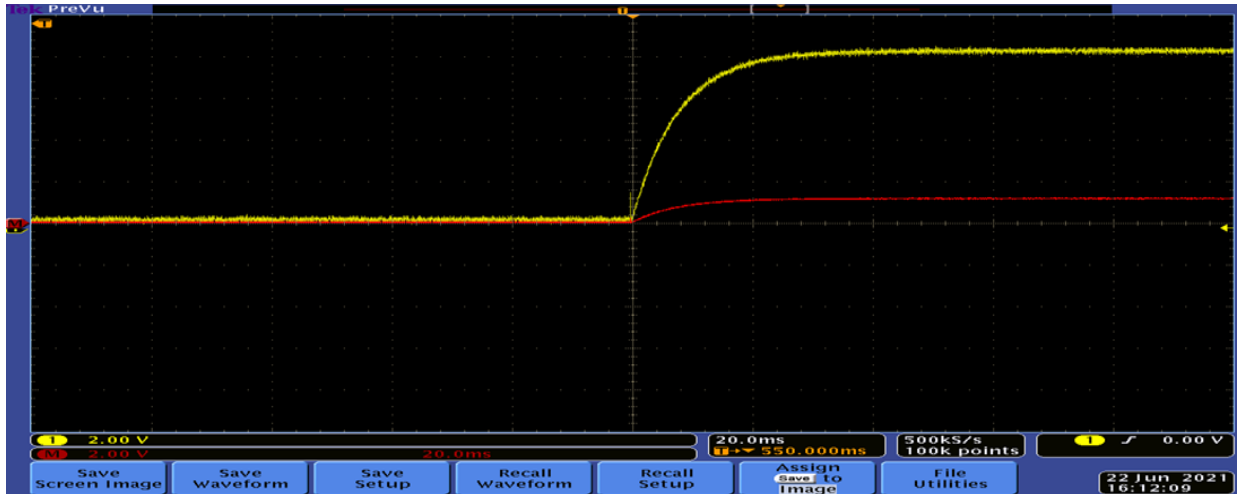


Figure (3 -13) : Courbe de l’essai 4

La courbe de l’essai 4 représente l’équation du courant $I_a(P)$

$$I_a(P) = \frac{K''}{P} \frac{(P+A'')}{(P+B'')(P+C'')} \dots\dots\dots(3 . 9)$$

Son inverse représente le courant $I_a(t)$ qui est

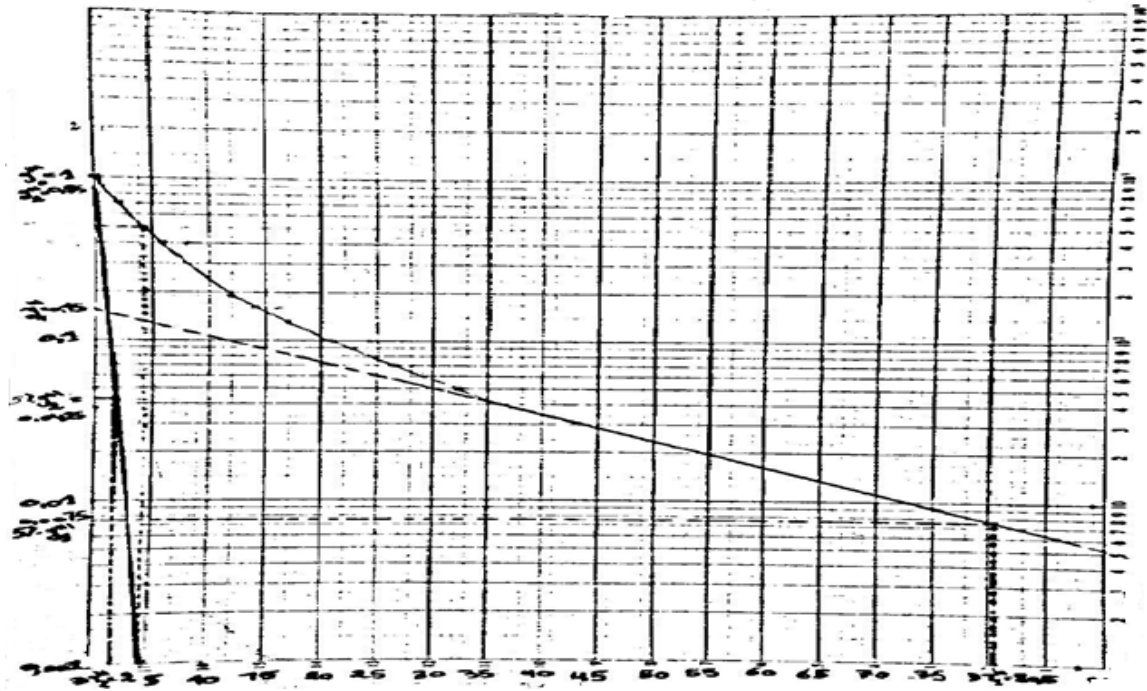
$$i_a(t) = y'''_0 - y'''_1 * e^{\frac{-t}{T'''_1}} - y'''_2 * e^{\frac{-t}{T'''_2}} \dots\dots\dots(3 . 10)$$

Les relevés nous donnent le tableau suivant qui nous permettent de tracer la courbe de $i_a(t)$

$I_a(t)(A)$	1	0.7	0.4	0.19	0.1	0.05
T(ms)	0	14	40	60	100	120

Tableau (3 - 4) : relevés de la courbe $i_a(t)$

En utilisant la méthode graphique on va tracer la courbe du courant $i_a(t)$ sur papier semi-Logarithmique, on obtient la figure (3-12)

Figure (3-14): Courbe de $i_a(t)$

3- 4- 4- 3 Détermination des paramètres

$$E''' = 8 V ; \quad y'''_0 = 1A; \quad y'''_1 = 0.15A$$

$$y'''_2 = 0.85 A; \quad T'''_1 = 0.66ms; \quad T'''_2 = 26.83ms$$

donc :

$$i_a(t) = 1 - 0.15 * e^{\frac{-t}{0.0006}} - 0.85 * e^{\frac{-t}{0.026}}$$

On utilisant les relations des paramètres trouvés dans l'essai 1 du chapitre 2, on obtient :

$$L_{aq} = 183.19 \text{ mH}; \quad T_{aq0} = 22.899 \text{ ms}; \quad T_{1q0} = 0.911 \text{ ms}$$

$$K_{a,1q}^2 = 0.831 ; \quad M_{af} = 0 \text{ mH}; \quad L_{11q} = 30.564 \text{ mH};$$

$$R_{1q} = 6.66 \Omega$$

3 - 5 Détermination des différents paramètres à partir des résultats obtenus

3 - 5 -1 Réactances

$$X_d = 50.11 \Omega ; \quad X''_d = 38.28 \Omega \quad X_q = 86.28 \Omega; \quad X''_q = 14.67 \Omega;$$

$$X_q = 86.28 \Omega; \quad X''_q = 14.67 \Omega; \quad X'_d = 50.11 \Omega;$$

3 – 5 - 2 Constantes de temps

$$T'_{do} = 18.185 \text{ ms} ; \quad T'_d = 18.14 \text{ ms}; \quad T''_d = 11.20 \text{ ms}$$

$$T''_{do} = 14.649 \text{ ms} ; \quad T''_{qo} = 0.459 \text{ s}; \quad T''_d = 0.780 \text{ s} \quad T_{KD} = 37.977 \text{ ms};$$

3 – 5 – 3 Relations entre les réactances et les constantes de temps

$$\frac{T'_{do}}{T'_d} = \frac{X_d}{X'_d} = 0,999940$$

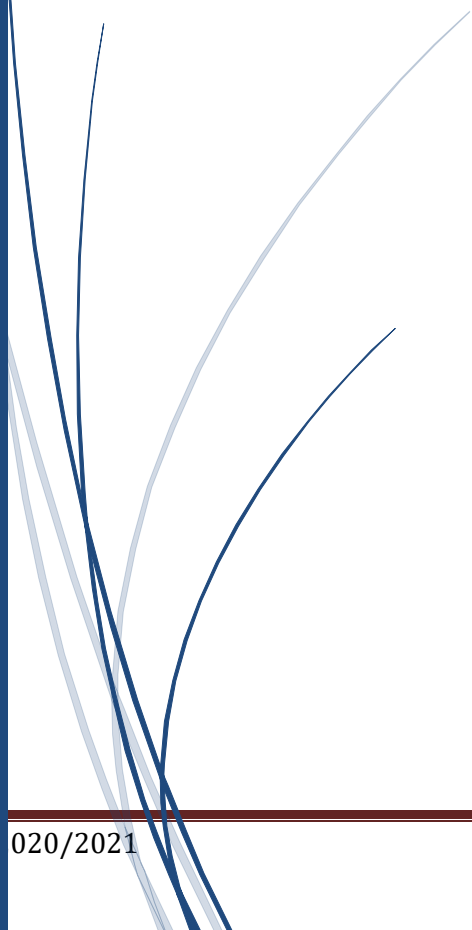
$$\frac{T''_{qo}}{T''_d} = \frac{X''_q}{X_q} = 0,01738$$

$$\frac{T''_{do}}{T''_d} \frac{X'_d}{X''_d} = 1,309$$

$$\frac{X'_d}{X''_d} = \frac{T'_{do} \cdot T''_{do}}{T'_d \cdot T''_d} = 1,3072$$

3-6 -Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons proposé un montage qui nous a permis de déterminer la position de l'inducteur par rapport au bobinage de la phase (a) pour un flux max et un flux nul, pour faire les quatre essais. Ensuite, nous avons proposés les montages des essais indiciaires pour formuler les expressions des courants qui nous permettent d'extraire les différents paramètres tels que les réactances et les constantes de temps de la machine. Enfin on donne une démonstration et une description de la méthode graphique utilisée pour déterminer les courbes inverses $y(t)$ et leurs paramètres. On termine par une application on exploitant les courbes déterminées expérimentalement.



Conclusion générale

Ce projet nous a permis de nous familiariser avec la machine synchrone et de connaître son comportement lors de certains régimes. L'étude faite sur la machine pour la détermination de ses différents paramètres permet de répondre à deux préoccupations : d'une part évaluer l'aptitude de la machine à supporter certains régimes sévères et d'autres parts, estimer ses fonctions de transfert en régimes de petites ou grandes variations en vue d'ajuster au mieux les dispositifs de commande et de protections qui lui sont associés.

Au début, Nous avons évoqué les équations électriques et magnétiques pour une machine synchrone à pôles saillants, et l'utilise les transformations de Park (transformations dqo) qui nous ont permis dans un système triphasé équilibré de transformer trois quantités alternatives en deux quantités continues. Cela simplifie considérablement la résolution d'équations. Une fois la solution calculée, la transformation inverse est utilisée pour retrouver les grandeurs triphasées correspondantes. Après avoir obtenu les équations simplifiées d et q et simplifie la forme matricielle modifiée de PARK, nous en avons déduit les expressions d'impédance opérationnelles. D'où nous avons extrayez les réactances opérationnelles. D'une part, Nous avons défini les étapes par lesquelles une machine synchrone à pôles saillants passe du point de fonctionnement à la stabilité, régimes transitoire et permanent. D'autre part on a déterminé les expressions des réactances et constante de temps à chaque étapes. Dans la partie pratique, Au début nous avons proposé cinq montages, le premier montage pour avoir un flux max et flux un nul, et les autres pour faire les essais indicels.

A partir de ces essais on a formulé les expressions des courants indicels sous la forme de Laplace. A l'aide de la méthode graphique, nous avons dessiné sur papier semi-logarithmique les courbes inverses des courants et calculé les paramètres de la machine synchrone à pôles saillants.

La machine synchrone a été certainement l'une des machines la plus étudiée, En ce sens nous ne pensons avoir fait un travail d'une grande originalité; néanmoins, certaines méthodes que nous avons exposées ne sont pas couramment utilisées si elles ne sont pas ignorées. Nous espérons ainsi avoir mis un outil de travail à ceux qui, par la suite avec un matériel de mesure plus précis et plus performant par exemple simulation de matlab, l'utiliseront avec un plus grand profit. Ces travaux pratiques se rapportant au module identification des machines électriques , nous espérons aussi que les étudiants électrotechniciens faisant ce module, pourront trouver ici un complément pour leurs connaissances.



Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] G . SEGUIER ; Electrotechnique Industrielle.
- [2] G . SEGUIER ; Introduction a l'électrotechnique approfondie.
- [3] GUILLBERT ; Machines synchrones.
- [4] P. BARRET ; Régimes transitoires des machines tournantes électrique.
- [5] M . KOSTENKO et PIOTROVSKI. (Tome II) Machines Electrique.
- [6] F.CAHEM ; Electrotechnique (Tome I) Machines tournantes à courant alternatif.
- [7] Cours d'électricité industrielle de L`E.E.I.M.(Marseille) Théorie et calcul des machines synchrones .
- [8] Techniques de l'ingénieur. (D 512) par .R. DAGUET ; calcul des résistances, réactances et constantes de temps des machine électrique.
- [9] R . Abdessemed et M . Kadjoudj ; Modélisation des machines électrique.