

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

17/96

وزارة التربية الوطنية  
MINISTRE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT: GENIE - ELECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة - BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

SIMULATION DU FONCTIONNEMENT  
DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE  
EN REGIME STATIQUE  
ET DYNAMIQUE

Proposé par :

S. MEKHTOUB

A. NESBA

Etudié par :

H. GHERAÏA

B. BOUSSAHOUA

Dirigé par :

A. NESBA

S. MEKHTOUB

PROMOTION  
JUN - 95 - 96

## DEDICACE

Je dédie ce travail à:

- Mes chers parents et mon grand frère qui m'ont offert toutes les conditions de la réussite.
- Mes frères,mes soeurs et tout ma famille.
- Tous mes amis.

**B. BOUSSAHOUA**

Je dédie ce travail :

- A mes chers parents sans qui ce travail n'aurait pas existé.
- A mes frères ,mes soeurs,et toute ma famille.
- A tous ceux qui me sont chers .

**H. GHERAIA**

## SOMMAIRE

Introduction Générale: .....	2
 chapitre I: Généralité sur la génératrice asynchrone.	
Introduction.....	2
1.1 description.....	2
1.1.1 fonctionnement non-autonome.....	2
1.1.2 fonctionnement autonome.....	3
1.2 utilisation pratique de la génératrice asynchrone.....	4
1.2.1 utilisation classique.....	4
1.2.2 freinage hypersynchrone.....	4
1.2.3 utilisation mixte moteur générateur.....	4
1.3 Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone.....	5
1.4 Danger de l'auto-amorçage accidentel.....	5
1.5 conclusion.....	6
 chapitre II: Étude analytique de l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone.	
Introduction.....	7
2.1 Hypthèses.....	7
2.2 Schéma équivalent.....	7
2.3 Modèle mathématique.....	8
2.4 Détermination de la capacité minimale.....	9
2.4.1 Position du problème.....	9
2.4.2 Détermination de $C_{min}$ pour une charge RL.....	9
2.4.3 Détermination de $C_{min}$ à vide.....	11
2.4.4 Détermination de $C_{min}$ pour une charge inductive pure.....	12
2.4.5 Détermination de $C_{min}$ pour charge résistive.....	13
2.5 Conditions d'auto-amorçage.....	13
2.5.1 Equation de fonctionnement.....	14
2.5.2 Solution de l'équation de fonctionnement.....	15
2.5.3 Conditions sur la vitesse.....	16
2.5.4 Conditions sur la capacité.....	16
2.5.5 Détermination de l'inductance cyclique statorique $L_1$ .....	17
2.6 conclusion.....	18
 chapitre III: Simulation de la génératrice asynchrone auto-excitée en régime statique.	
Introduction.....	19
3.1 Modèle mathématique de simulation à vide.....	19
3.2 Modèle mathématique de simulation en charge.....	20
3.3 Modélisation de la courbe $E=f(X_m)$ .....	22
3.4 Simulation de l'auto-amorçage à vide.....	23
3.5 Simulation de l'auto-amorçage en charge.....	24
3.6 Validation du modèle.....	25

3.7 Resultats et interpretation.....	26
3.7.1 Influence de la vitesse sur la tension d'auto-amorçage à vide.....	27
3.7.2 Auto-amorçage en charge.....	28
3.7.3 Influence de la capacité sur la fréquence à $N=cte$ .....	28
3.7.4 Influence de la capacité et de la charge sur la tension à $N=cte$ .....	29
3.7.5 Influence de la charge sur les performances de la génératrice asynchrone.....	30
3.7.6 Caractéristique de réglage de la vitesse à $C=cte$ .....	32
3.7.7 Caractéristique de réglage de la tension à $N=cte$ .....	33
3.8 Conclusion.....	34

#### chapitre IV:Modèle dynamique de la génératrice asynchrone.

A-Modélisation de la génératrice asynchrone sous l'hypothese linéaire.....	35
--	----

Introduction.....	35
4.1 Equation des tensions exprimées en variables de phase.....	35
4.2 Equations des tensions dans le référentiel arbitraire.....	39
4.3 Equations des flux dans le référentiel arbitraire.....	40
4.4 Equations d'auto-éxcitation.....	42
4.5 Auto-amorçage sous l'hypothese linéaire de la génératrice asynchrone.....	44
4.6 Conclusion.....	46

B-Modèle saturé de la génératrice asynchrone.....	47
---	----

Introduction.....	47
4.1 Modélisation de la saturation.....	47
4.2 Construction et modélisation de la fonction "degré de saturation" F.....	48
4.2.1 Construction de la fonction F.....	48
4.2.2 Modélisation de la fonction F.....	51
4.3 Introduction de la saturation dans le modèle de la génératrice asynchrone.....	52
4.3.1 Determination des flux magnétisants linéaire et saturé.....	54
4.4 Simulation de l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone.....	56
4.5 Les résultats de simulation.....	56
4.6 Les résultats pratiques.....	58
4.7 Validation du modèle saturé.....	60
4.8 Conclusion.....	60

Conclusiogénérale.....	62
------------------------	----

#### Bibliographie.

#### Annexe.

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE:

L'utilisation des machines asynchrones comme générateurs est moins courante que celle des alternateurs synchrones. En effet pour un alternateur, le circuit d'excitation est alimenté en continu pour fournir de l'énergie réactive (énergie de magnétisation), tandis que pour une génératrice asynchrone il faut une batterie de condensateurs. Ceci encombre le circuit, d'une part et d'autre part il y a des difficultés de réglage de la tension. Néanmoins, le développement récent des sources autonomes d'énergie et surtout des systèmes de récupération d'énergie a vu l'essor rapide de ce type de générateur qui présente de nombreux avantages par rapport à l'alternateur (robustesse, simplicité de construction, prix bas, etc...) [1].

Une génératrice asynchrone peut fonctionner, d'une façon autonome, il faudra lui fournir de la puissance réactive à partir d'une source extérieure (condensateur).

Comme elle peut être reliée au réseau, dans ce cas l'énergie réactive est directement fournie par celui-ci.

Dans le cas du fonctionnement autonome, les problèmes qui se posent sont les suivants:

- fourniture de l'énergie réactive.
- stabilisation de la tension.

Dans ce mémoire nous allons nous intéresser au fonctionnement autonome d'une génératrice asynchrone en régime statique et dynamique.

Nous avons mené notre étude de la façon suivante:

- dans le premier chapitre, nous faisons un rappel sur la génératrice asynchrone.

- dans le deuxième chapitre, nous développerons les équations analytiques qui permettent de déterminer les conditions nécessaires à l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone.

- dans le troisième chapitre, nous avons élaboré le modèle statique de la génératrice asynchrone que nous allons utiliser pour étudier le fonctionnement de la G.A en régime permanent.

- dans le quatrième chapitre, nous étudierons le modèle dynamique de la génératrice asynchrone [2], [5]. Nous terminerons par une conclusion générale.

# ***CHAPITRE I***

## ***GENERALITE SUR LA GENERATRICE ASYNCHRONE***

## CHAPITRE I

### GENERALITES SUR LA GENERATRICE ASYNCHRONE

#### INTRODUCTION:

L'utilisation des machines asynchrones comme générateurs d'électricité est moins courante que celle des alternateurs synchrones. Néanmoins le développement récent des sources autonomes d'énergie et surtout de système de récupération d'énergie a vu l'essor rapide de ce type de générateurs qui présente de nombreux avantages par rapport à l'alternateur[1].

Ce générateur asynchrone présente deux modes de fonctionnement différents: fonctionnement autonome et non-autonome, que nous allons décrire dans ce chapitre. Dans notre travail, on s'intéresse au fonctionnement autonome, la génératrice débite alors directement sur la charge.

Nous donnerons quelques applications pratiques de la génératrice dans ces deux modes de fonctionnement, puis les avantages et les inconvénients de celle-ci.

#### 1.1 DESCRIPTION:

La génératrice asynchrone est une machine asynchrone utilisée pour produire de l'énergie électrique. on récupère cette énergie sur son stator. Sa construction est fondamentalement la même que celle d'un moteur asynchrone.

Elle est généralement triphasée avec un rotor en cage d'écureuil. Mais elle peut être monophasée, comme elle peut être aussi à rotor bobiné.

La G.A (générateur asynchrone) présente deux modes de fonctionnement différents[1]:

- fonctionnement non autonome (couplée au réseau)
- fonctionnement autonome (isolée, autoexcitée)

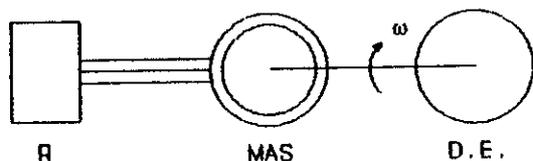
Nous nous intéresserons essentiellement au second mode de fonctionnement.

##### 1.1.1 Fonctionnement non-autonome:

Dans ce mode de fonctionnement, la génératrice est couplée à un réseau assez puissant. Ce dernier impose alors à la génératrice

sa propre tension et sa propre fréquence. Par ailleurs il lui fournit automatiquement l'énergie réactive dont elle a besoin à tous les régimes de fonctionnement.

Le schéma correspondant à ce mode de fonctionnement est donné en figure(1.1) .



avec:

R Réseau.  
 MAS Machine Asynchrone.  
 D.E Dispositif d'entraînement.

**Figure 1.1** Génératrice asynchrone couplée au réseau.

Initialement la MAS fonctionne en moteur alimenté par le réseau, puis et grâce au dispositif d'entraînement(M.C.C), la MAS passe du fonctionnement en moteur à celui en génératrice dès que son glissement devient négatif.(c.a.d qu'elle tourne plus vite que sa vitesse de synchronisme).

### 1.1.2 Fonctionnement Autonome:

Dans ce mode de fonctionnement la G.A est isolée du réseau et entraînée mécaniquement à une vitesse suffisante. Le fonctionnement autonome nécessite encore d'autres conditions, dont nous allons en citer la plus importante.

En effet la MAS, par nature, n'engendre pas sa propre énergie d'excitation, quelque soit son fonctionnement (moteur, générateur). Il faudra alors lui apporter cette énergie.

En fonctionnement autonome (G.A isolée) on monte en parallèle avec le stator de la G.A, une batterie de condensateurs statiques jouant le rôle d'une source d'énergie réactive.

Ce complexe MAS-batterie de condensateurs doit remplir les conditions suivants:

- Existence d'une aimantation rémanente (il suffit pour cela que la machine ait été mise, au moins une fois, sous tension pour conserver une aimantation durable ).

- La batterie de condensateurs doit avoir une valeur

supérieure à une capacité seuil, en dessous de laquelle la MAS ne peut s'autoamorcer en génératrice. Nous montrerons plus tard pourquoi ces deux conditions sont exigées.

## 1.2 UTILISATION PRATIQUE DE LA G.A

### 1.2.1 Utilisation classique.

La génératrice asynchrone est utilisée avantageusement comme générateur classique[1].

Elle est utilisée en mode autonome à proximité des petites chute d'eau, dans les microcentrales,...etc.

La génératrice est généralement équipée de régulateur mais parfois sans régulation. En fait lorsqu'on tolère certaines variations de la tension et de la fréquence il n'est pas nécessaire de prévoir des régulateurs sophistiqués. On trouve aussi des G.A autoexcités autorégulés.

Pour les petits groupes électrogènes de quelques kVA certains constructeurs proposent des G.A sans régulation; Ces G.A ayant des courbes caractéristiques très plates, la tension reste dans une plage de plus ou moins 10% pour une charge active allant de 0 à la pleine charge[5].

Ces groupes sont simples et robustes, ils conviennent bien pour les applications courantes en très faible puissance (éclairage, résistances, petits moteurs universels).

On trouve aussi des G.A avec une régulation simple alimentant des installations de chauffage. Le cas d'application le plus courant concerne l'utilisation des turbines hydrauliques pour le chauffage de maison d'habitation. On admet couramment des variations de tension et/ou fréquence de l'ordre de 20%.

Notons, enfin, que la génératrice asynchrone a en plus de son utilisation classique, d'autres utilisations particulières. En effet certaines types d'installations utilisent des machines asynchrones tantôt en moteur tantôt en génératrice.

Citons deux exemples d'utilisation courante:

### 1.2.2 Freinage hypersynchrone

Dans ce mode de fonctionnement, un moteur asynchrone est utilisé pour entraîner une charge, et aussi pour freiner cette dernière lorsqu'elle devient entraînée[1]. Le moteur est alors autoamorcé en génératrice. On rencontre cette utilisation surtout en levage pour freiner la descente d'une charge.

### 1.2.3 Utilisation mixte moteur générateur.

Ce type d'installation se rencontre en particulier dans certaines minoterie[5],[1].

Lorsque la turbine ne fournit pas assez de puissance par rapport au besoin du moulin, le groupe a tendance à ralentir, la machine asynchrone travail alors en moteur et apporte le complément de puissance nécessaire.

Inversement, lorsque la turbine fournit trop de puissance, le groupe a tendance à accélérer, la MAS fonctionne alors en génératrice et envoie l'excédent de puissance au réseau.

### 1.3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA G.A.

L'emploi de la G.A asynchrone offre plusieurs avantages, dont nous citons:

- 1) construction simple et robuste, aucun bobinage tournant (rotor en cage supportant bien les grandes vitesses, et l'emballement)
- 2) une gamme standard beaucoup plus large qu'en alternateur,
- 3) moins coûteuse que l'alternateur.

En fonctionnement non autonome la G.A présente l'avantage de:

- 4) simplicité et sécurité d'utilisation, couplage plus facile, appareillage plus simple.

En mode autonome la G.A présente un autre avantage à savoir:

- 5) La possibilité d'alimentation d'un réseau isolé surtout lorsqu'il s'agit d'installations simples (besoins ménagers, chauffages, charges résistives).

Cet avantage est très important lorsque ce réseau se trouve dans une région éloignée du réseau principale (Nationale). Ceci évite les problèmes de connections des réseaux, de transport d'électricité,...

La G.A n'exigeant alors qu'un minimum d'entretien et de maintenance.

L'inconvénient le plus important de la G.A est son inaptitude à produire l'énergie réactive dont elle même ainsi que ses charges ont besoin.

Cet inconvénient est généralement décisif lorsque le réseau alimenté devient assez complexe, en particulier lorsque son facteur de puissance varie constamment.

### 1.4 DANGER DE L'AUTO-AMORÇAGE ACCIDENTEL:

Lorsqu'un moteur asynchrone et une batterie de condensateur assez importante (destinée au relèvement du facteur de puissance) sont branchés sur le réseau (fig1.1) ce dernier impose alors sa tension et sa fréquence.

Par contre, à l'ouverture de l'interrupteur k (fig 2.3) monté en amont du complexe moteur-condensateur, on a affaire à un circuit oscillant. Le danger provient du fait que la tension aux bornes de la machine est alors imposée par une condition extérieure non contrôlable, et peut bien être supérieure à la tension nominale.

Cette tension peut atteindre, suivant la valeur de la capacité deux ou bien trois fois la tension nominale et même d'avantage.

### 1.5 CONCLUSION:

les problèmes énergétiques mondiaux soulevés au cours de la décennie écoulée par la crise du pétrole ont provoqués le développement des sources d'énergies alternatives de petites et moyennes puissances.

dans cette gamme, les génératrices asynchrones présentent par rapport aux alternateurs de nombreux avantages, en particulier lorsque l'énergie produite et délivrée au réseau nationale.

pour l'alimentation de réseau isolés, l'alternateur est encore souvent préféré à la génératrice asynchrone parcequ'il s'adapte naturellement aux variations de puissance réactive du réseau à alimenter.

on peut néanmoins penser que dans les prochaines années les développements rapides de l'électronique de puissance permettant l'industrialisation rapides de l'électronique de compensateurs automatique de courant réactif faible et économique.

les génératrices asynchrones associées à ces compensateurs permettant l'alimentation des réseaux isolés au moins en petites et moyennes puissances.

# ***CHAPITRE II***

***ETUDE ANALYTIQUE DE L'AUTO-AMORÇAGE  
DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE***

## CHAPITRE II

### ETUDE ANALYTIQUE DE L'AUTO-AMORCAGE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE.

#### INTRODUCTION:

Nous allons étudier dans cette partie l'auto-amorçage dans le cas d'une génératrice asynchrone autonome en régime établi.

Pour un tel fonctionnement, la machine asynchrone a besoin d'une énergie réactive qui lui sera fournie dans ce cas par une batterie de condensateurs. Nous allons nous intéresser dans ce chapitre aux conditions nécessaires à l'auto-amorçage en se basant sur une étude analytique de ce dernier.

#### 2.1 HYPOTHESES:

a/ On tient compte de la saturation.

b/ On néglige:

- les pertes fer .
- les harmoniques .
- le phénomène d'hystérésis.

c/ On suppose que les résistances sont constantes.

#### 2.2 SCHEMA EQUIVALENT:

En tenant compte des hypothèses précédentes. Le schéma équivalent par phase d'une génératrice asynchrone est illustré par la figure(2.1) où tous les paramètres sont rapportés à la fréquence de base.

$r_s, r_r, r_l$ : sont respectivement les résistances (en p.u) du stator, du rotor ramenée au stator et de la charge.

$x_s, x_r, x_m, x_l$ : sont respectivement les réactances (en p.u) du stator, du rotor ramenée au stator, de magnétisation et de la charge à la fréquence de base.

$x_c$ : réactance des condensateurs d'excitation (en p.u) à la fréquence de base.

$f, v$ : fréquence du courant statorique et vitesse de rotation (en p.u).

$N=1500$ tr/mn: vitesse de base.

$f_b=50$  Hz: fréquence de base.

$V_b=220$  V: tension de base.

$I_b=8$  A: courant de base.

$Z_b=27.5$   $\Omega$ : impédance de base.

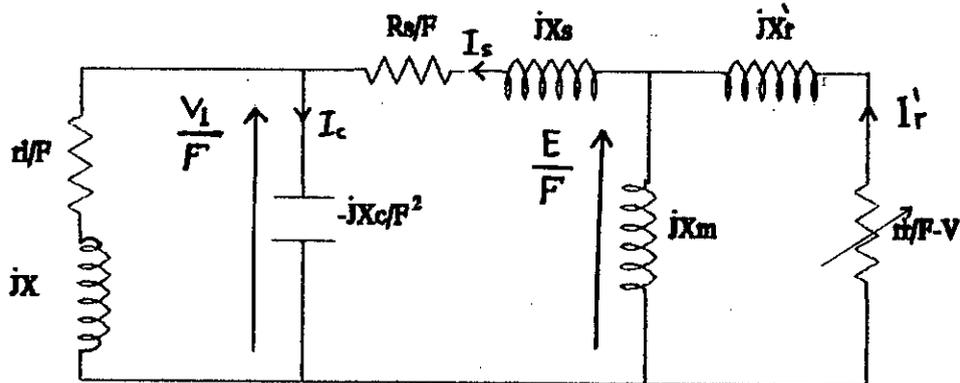


FIG:2.1 schéma équivalent par phase de la G.A.S en grandeur relative.

### 2.3 MODELE MATHEMATIQUE:

Désignons par  $Z$  l'impédance de ce système. A partir du schéma équivalent donné dans la figure (2.1),  $Z$  est donnée par:

$$Z = \left[ \left( \frac{rX}{F-v} + jXr \right) \parallel (jXm) \right] + \left[ \frac{r_s}{F} + jXs \right] + \left[ \left( -j \frac{Xc}{F^2} \right) \parallel \left( \frac{r_l}{F} + jXl \right) \right] \quad (2.1)$$

L'équation d'équilibre du système peut s'écrire:

$$\bar{Z} \cdot \bar{I}_s = \bar{0} \quad (2.2)$$

Puisque  $I_s$  est différent de zéro alors:

$$\bar{Z} = \bar{0} \quad (2.3)$$

En regroupant les termes réels et imaginaires et égalant chacun à zéro on obtient le modèle mathématique en charge du complexe machine asynchrone-condensateurs:

$$-a_1 \cdot F^3 + a_2 \cdot F^2 + (a_3 \cdot Xc + b_4) \cdot F - a_5 \cdot Xc = 0 \quad (2.4)$$

$$-b_1 \cdot F^4 + b_2 \cdot F^3 + (b_3 \cdot Xc + b_4) \cdot F^2 - (b_5 \cdot Xc + b_6) \cdot F - b_7 = 0 \quad (2.5)$$

où:

$$T = Xs + Xr = Xr' + Xm$$

$$W = Xs + (Xs \cdot Xm / (Xs + Xm))$$

$$a_1 = r_l \cdot T \cdot W + Xl \cdot T \cdot (r_s + r_r)$$

$$a_2 = v \cdot T \cdot r_l \cdot W + r_s \cdot Xl$$

$$a_3 = r_r \cdot (Xl + T) + T \cdot (r_r + r_l)$$

$$a_4 = r_l \cdot r_s \cdot r_r$$

$a_5 = v \cdot T \cdot (r_r + r_s)$   
 $b_1 = x_l \cdot T \cdot W$   
 $b_2 = v \cdot b_1$   
 $b_3 = T \cdot (x_l + W)$   
 $b_4 = r_l \cdot T \cdot (r_s + r_r) + r_s \cdot r_l \cdot x_m$   
 $b_5 = v \cdot b_3$   
 $b_6 = v \cdot r_l \cdot r_s \cdot T$   
 $b_7 = r_r \cdot (r_l + r_s)$

où les  $a_i, i=1,5$  et les  $b_i, i=1,7$  sont des réels qui dépendent des paramètres de la machine et de la charge .

## 2.4 DETERMINATION DE LA CAPACITE MINIMALE $C_{min}$ :

### 2.4.1 POSITION DU PROBLEME:

Pour avoir un fonctionnement stable de la génératrice asynchrone auto-excitée, il faut que le point de fonctionnement soit dans la région de saturation [9]. D'autre part pour une vitesse et une charge données, la valeur de la capacité des condensateurs d'excitation doit être choisie en prenant en considération la diminution de la réactance de magnétisation avec la saturation.

Par cette analyse, on cherche à déterminer la valeur de la capacité minimale  $C_{min}$  pour laquelle l'auto-amorçage aura lieu.

Cette valeur dépend de la caractéristique de magnétisation de la machine. Pour cela, on peut se limiter à prendre la réactance maximale de magnétisation ( $X_{max}$ ) qui peut se déterminer expérimentalement en prenant la pente de la droite de la partie linéaire.

Le problème maintenant est de connaître les paramètres de la machine, la vitesse de rotation et la réactance maximale  $X_{max}$  pour déterminer ensuite la capacité minimale et la fréquence en résolvant les deux équations (2.4) et (2.5).

### 2.4.2 DETERMINATION DE LA CAPACITE MINIMALE POUR UNE CHARGE R.L:

Dans cette section, on va développer une méthode directe pour déterminer  $C_{min}$  (capacité minimale) à partir de laquelle l'auto-amorçage aura lieu. Cette approche va être utilisée ensuite pour établir les expressions exactes de  $C_{min}$  pour une charge inductive et à vide.

En remplaçant dans les équations (2.4) et (2.5)  $x_m$  par  $X_{max}$ , on peut avoir:

$$X_C = \frac{A_1 \cdot F^3 - A_2 \cdot F^2 - A_4 \cdot F}{A_3 \cdot F - A_5} \quad (2.6)$$

$$X_C = \frac{B_1 \cdot F^4 - B_2 \cdot F^3 - B_4 \cdot F^2 - B_6 \cdot F}{B_3 \cdot F^2 - B_5 \cdot F - B_7} \quad (2.7)$$

où:  $A_i, i=1,5$  et  $B_i, i=1,7$  sont évalués pour  $x_m = X_{max}$  à partir des  $a_i, i=1,5$  et  $b_i, i=1,7$ .

En égalant les deux valeurs de xc on aboutit à:

$$\alpha_4 \cdot F^4 - \alpha_3 \cdot F^3 + \alpha_2 \cdot F^2 - \alpha_1 \cdot F + \alpha_0 = 0 \quad (2.8)$$

où  $\alpha_i, i=0,4$  sont des constantes positives données par.

$$\alpha_0 = A_5 \cdot B_6 + A_4 \cdot B_7$$

$$\alpha_1 = A_3 \cdot B_6 + A_5 \cdot B_4 - A_4 \cdot B_5 - A_2 \cdot B_7$$

$$\alpha_2 = A_2 \cdot B_6 + A_3 \cdot B_4 - A_4 \cdot B_3 - A_1 \cdot B_7 - A_5 \cdot B_2$$

$$\alpha_3 = A_2 \cdot B_3 + A_1 \cdot B_5 - A_3 \cdot B_2 - A_5 \cdot B_1$$

$$\alpha_4 = A_1 \cdot B_3 - A_3 \cdot B_1$$

On peut montrer que l'équation (2.8) n'admet que deux solutions réelles[9]. En effet, la dernière équation peut s'écrire comme suit:

$$\alpha_4 \cdot F^4 + \alpha_2 \cdot F^2 + \alpha_0 = \alpha_3 \cdot F^3 + \alpha_1 \cdot F \quad (2.9)$$

Les solutions de cette équation sont les points d'intersection des deux polynômes:

$$P_1(F) = \alpha_4 \cdot F^4 + \alpha_2 \cdot F^2 + \alpha_0 \quad (2.10)$$

$$P_2(F) = \alpha_3 \cdot F^3 + \alpha_1 \cdot F \quad (2.11)$$

dont leur allures générales sont données par la figure(2.2)[9].

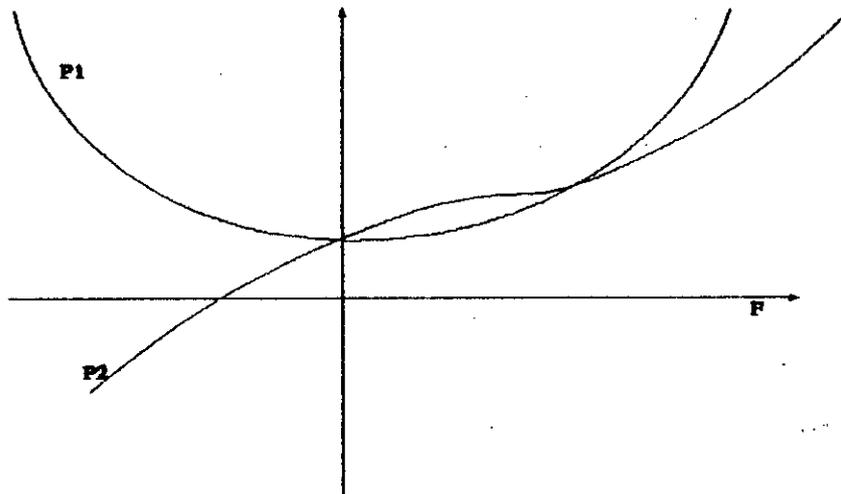


FIG:2.2 résolution graphique de l'équation(2.8).

Rappelons que les  $\alpha_i$  sont fonction de la charge, des paramètres de la machine et de la vitesse. Suivant les valeurs de ces dernières on peut avoir l'intersection comme on ne peut pas l'avoir[9].

Pour la détermination de  $C_{min}$ , on résout l'équation(2.8) par

les méthodes numériques (dans notre cas, on a utilisé la méthode de Newton-Raphson). Dans les bonnes conditions de vitesse et de charge, deux solutions réelles positives sont possibles F1 et F2. on remplaçant dans l'équation (2.6) ou (2.7) par F1 et F2, on obtient Xc1 et Xc2.

Soit  $X_{cmax} = \text{MAX}(X_{c1}, X_{c2})$ .

La capacité minimale est donnée par:

$$C_{min} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_b \cdot Z_b \cdot X_{cmax}} \quad (2.12)$$

### 2.4.3 DETERMINATION DE LA CAPACITE MINIMALE A VIDE:

A partir des équations (2.6) et (2.7) en mettant  $x_l=0$  et en prenant la limite quand  $r_l$  tend vers l'infini, on obtient:

$$X_C = A \cdot F^2 - B \cdot \frac{F}{F-v} \quad (2.13)$$

$$X_C = v + D \cdot F \cdot (F-v) \quad (2.14)$$

$$F^2 + \left(1 + \frac{D}{E+D-A}\right) \cdot v \cdot F + \frac{B+v^2 \cdot D}{E+D-A} = 0 \quad (2.15)$$

où

$$\begin{aligned} A &= (x_s + X_{max}) / x_r' \\ B &= r_s \cdot r_r / (x_r' + X_{max}) \\ D &= (r_s / r_r') \cdot (x_r' + X_{max}) \\ E &= x_s + X_{max} \end{aligned}$$

L'équation (2.15) peut être résolue analytiquement. Les deux solutions sont:

$$F_{1,2} = \frac{v}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{r_s}{r_r'} \cdot \left(1 + x_r' \frac{r}{X_{max}}\right) \pm \sqrt{1 - \left(\frac{v_c}{v}\right)^2}}{1 + \frac{r_s}{r_r'} \cdot \left(1 + \frac{x_r'}{X_{max}}\right)} \right] \quad (2.16)$$

où:

$$v_c = 2 \cdot \frac{r_s}{X_{max}} \cdot \sqrt{\frac{r_r'}{r_s} + \left(1 + \frac{x_r'}{X_{max}}\right)} \quad (2.17)$$

La dérivé de Xc par rapport à F est donnée par:

$$\frac{dX_c}{dF} = 2 \cdot A \cdot F + B \cdot \frac{v}{(F-v)^2} \quad (2.18)$$

On remarque bien que pour n'importe quelle valeur de F comprise entre 0 et v, (dXc/dF) est toujours positive. Cmin est

donnée donc par:

$$C_{\min} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_b \cdot Z_D \cdot X_{\max}} \quad (2.19)$$

$$X_{\max} = A \cdot F_{\max}^2 - B \cdot \frac{F_{\max}}{F_{\max} - V} \quad (2.20)$$

$$F_{\max} = \left(\frac{V}{2}\right) \cdot \left[ \frac{1 + \frac{IS}{II} \cdot \left(1 + \frac{XI}{X_{\max}}\right)^2 + \sqrt{1 - \left(\frac{VC}{V}\right)^2}}{1 + \frac{IS}{II} \cdot \left(1 + \frac{X'_r}{X_{\max}}\right)^2} \right] \quad (2.21)$$

#### 2.4.4 DETERMINATION DE LA CAPACITE MINIMALE POUR UNE CHARGE INDUCTIVE PURE:

Une formule exacte de  $C_{\min}$  peut être obtenue, il suffit de prendre les équations (2.6), (2.7) et (2.8) et remplacer "r1" par "0". On obtient donc:

$$X_c = \frac{A_{11} \cdot F^3 - A_{21} \cdot F^2}{A_{31} \cdot F - A_{51}} \quad (2.21)$$

$$X_c = \frac{B_{11} \cdot F^4 - B_{21} \cdot F^3 - B_{41} \cdot F^2}{B_{31} \cdot F^2 - B_{51} \cdot F - B_{71}} \quad (2.23)$$

Les  $A_{11}$  et  $B_{11}$  sont obtenus en remplaçant dans les  $A_1$  et  $B_1$  "rr" par "0". Notons que  $A_{41} = B_{51} = 0$ .

$$F^2 - v \cdot F \cdot (1 + \alpha) + \alpha \cdot v^2 + \beta = 0 \quad (2.24)$$

où:

$$\alpha = \left[ 1 + \frac{II}{IS} \cdot \left( \frac{X_{\max}}{X_{\max} + X'_r} \right)^2 \right]^{-1} \quad (2.25)$$

$$\beta = \frac{IS \cdot II^2}{II \cdot X_{\max}^2 + IS \cdot X_{\max} + X_r'^2} \quad (2.26)$$

La résolution de l'équation (2.24) donne deux solutions dont

la plus grande est:

$$F_{\max} = \frac{V}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{IS}{IX} \cdot \left(1 + \frac{X'_r}{X_{\max}}\right)^2 + \sqrt{1 - \left(\frac{V_c}{V}\right)^2}}{1 + \frac{IS}{IX} \cdot \left(1 + \frac{X'_r}{X_{\max}}\right)^2} \right] \quad (2.27)$$

$v_c$  est donnée par:

$$v_c = \frac{2 \cdot IS}{X_{\max}} \cdot \sqrt{\frac{IX}{IS} + \left(1 + \frac{X'_r}{X_{\max}}\right)^2} \quad (2.28)$$

La capacité minimale est donnée par:

$$C_{\min} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_b \cdot Z_b \cdot X_{\max}} \quad (2.29)$$

#### 2.4.5 DETERMINATION DE LA CAPACITE MINIMALE POUR UNE CHARGE R:

Pour ce cas, il n'y a pas une grande simplification en remplaçant " $x_l$ " par "0".

Pour déterminer  $C_{\min}$  il suffit de suivre les étapes de la méthode générale développée dans la section (2.5.2).

#### 2.5 CONDITIONS D'AUTO-AMORÇAGE:

Pour rendre le problème moins complexe, on utilise le schéma équivalent qui a été modifié comme illustré à la figure(2.3).

où:

$R_s, R_r', R_l$  : sont respectivement, les résistances d'une phase statorique, d'une phase rotorique ramenée au stator et de la charge.

$L_s, L_r', L_l, M$  : sont respectivement, l'inductance de fuite d'une phase statorique, l'inductance de fuite d'une phase rotorique ramenée au stator, l'inductance de la charge et l'inductance de magnétisation.

$C$  : capacité des condensateurs.

$\omega_s$  : pulsation du courant statorique.

$\omega$  : pulsation de rotation.

$g$  : glissement qui est donné par:

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (3.30)$$

$E$  : f.e.m induite.

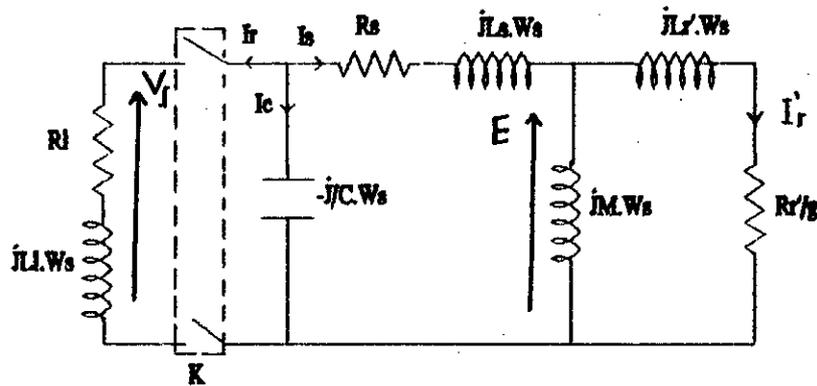


FIG:2.3 schéma équivalent par phase de la G.A.S en grandeurs réelles.

$V_1$  : tension aux bornes de la charge.

K : interrupteur.

on peut définir aussi:

$L_1 = L_s + M$  : inductance cyclique propre du stator.

$L_2 = L_r + M$  : inductance cyclique propre du rotor ramenée au stator.

$\sigma$  : coefficient de dispersion de la machine qui est donné par:

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 \cdot L_2} \quad (2.31)$$

A partir de l'expression de  $\sigma$ , on peut constater que  $\sigma$  est inférieure devant "1".

### 2.5.1 EQUATION DE FONCTIONNEMENT:

La relation fondamentale d'équilibre relative aux courants s'écrit:

$$\bar{I}_c + \bar{I}_p = \bar{0} \quad (2.32)$$

Cette équation signifie que l'énergie réactive cédée par les condensateurs doit être égale à celle consommée par la génératrice.

Au moment où cette condition est vérifiée, il suffit d'une simple impulsion pour amorcer la génératrice asynchrone. Le magnétisme rémanent suffit à créer cette impulsion [12].

En divisant l'équation (2.32) par la tension simple nous faisons apparaître les admittances. Il suffit ensuite d'expliciter celles-ci à partir du schéma de la figure (2.3) pour obtenir les

conditions d'auto-excitation.

En désignant par  $Z_m$  l'impédance de la machine et par  $Z_c$  l'impédance du condensateur, l'équation(2.32) peut s'écrire :

$$\frac{\bar{V}_1}{Z_m} + \frac{\bar{V}_1}{Z_c} = \bar{0} \quad (2.33)$$

puisque  $V_1$  est différent de zéro on a alors :

$$\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_c} = \bar{0} \quad (2.34)$$

exprimons  $Z_m$  à partir des constantes de la machine et portons ces valeurs dans l'équation(2.34), on aura:

$$jC\omega + \frac{jM\omega + \frac{R'_r}{g} + jL_2\omega}{(R_s + jL_s\omega)(jM\omega + \frac{R'_r}{g} + jL_2\omega) + jM\omega(\frac{R'_r}{g} + jL_2\omega)} = \bar{0} \quad (2.35)$$

En regroupant les termes réels et imaginaires et en les égalant à zéro, nous obtenons les deux valeurs suivantes de  $g$ :

$$g = \frac{C.R_s.R'_r}{L_2.(\omega^2.C.L_1.\sigma - 1)} \quad (2.36)$$

$$g = \left(\frac{R'_r.L_1}{R_s.L_2}\right) \cdot \left(\frac{1}{\omega^2.L_1.C} - 1\right) \quad (2.37)$$

il suffit alors d'égaliser (2.36) et (2.37) en éliminant  $g$  pour obtenir finalement l'équation(2.38).

$$\left(\frac{1}{\omega^2.L_1.C} - 1\right) \cdot (\omega^2.L_1.\sigma.C - 1) - \frac{R_s^2.C}{L_1} = 0 \quad (2.38)$$

### 2.5.2 SOLUTION DE L'ÉQUATION DE FONCTIONNEMENT:

L'équation(2.38) est de deuxième degré, elle peut être résolue analytiquement. Les pulsations solutions de cette équation sont :

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2.L_1.\sigma.C} \left(1 + \sigma - \frac{R_s^2.C}{L_2} \pm \sqrt{\left(1 + \sigma - \frac{R_s^2.C}{L_2}\right)^2 - \sigma}\right) \quad (2.39)$$

Pratiquement  $(R_s^2.C/L_2)$  est toujours négligeable et avec une erreur inférieure à la précision de mesure de plate forme. Nous pouvons alors admettre les approximations suivantes[12]:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C}} \quad (2.40)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C \cdot \sigma}} \quad (2.41)$$

Dans la pratique, seule  $\omega_1$  est réalisable. En effet  $\sigma$  est très petit devant l'unité ce qui donne  $\omega_2 \gg \omega_1$ .

$\omega_2$  correspondre à un glissement négatif voisin de (-1) qu'il ne sera pas possible d'atteindre à cause de la saturation du circuit magnétique et les contraintes mécaniques[12].

Si on arrive à réaliser la pulsation  $\omega_2$ , la tension pourra atteindre une valeur très élevée, soit (8 à 10 fois) la tension nominale[12].

L'équation(2.40) peut s'écrire:

$$C \cdot L_1 \cdot \omega_s^2 = 1 \quad (2.42)$$

qui n'est autre que la condition de résonance. C'est lorsque cette condition est réalisée que l'auto-amorçage se produit.

### 2.5.3 CONDITION SUR LA VITESSE:

Pour qu'une machine asynchrone produise de l'énergie électrique, il faut l'entraîner à une vitesse suffisante, c'est à dire que son glissement soit négatif.

$$g < 0 \quad (2.43)$$

Reprenons les équations (2.40) et (2.41) et tenons compte de l'inégalité (2.43) on peut avoir les deux inégalités suivantes:

$$\omega > \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C}} \quad (2.45)$$

$$\omega < \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C \cdot \sigma}} \quad (2.45)$$

Donc on peut extraire la condition sur la vitesse:

$$\frac{60}{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \sqrt{L_1 \cdot C}} < N < \frac{60}{2 \cdot \pi \cdot p \cdot \sqrt{\sigma \cdot L_1 \cdot C}} \quad (2.46)$$

### 2.5.4 CONDITION SUR LA CAPACITE:

Pour une vitesse fixe, l'auto-amorçage n'aura lieu que pour un intervalle bien précis des valeurs de capacité.

On peut procéder comme précédemment pour déterminer cet intervalle qui est donné par l'inégalité suivante:

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_1} < C < \frac{1}{\omega^2 \cdot L_1 \cdot \sigma} \quad (2.47)$$

### 2.5.5 DETERMINATION DE L'INDUCTANCE CYCLIQUE STATORIQUE $L_1$ :

En réalité, l'inductance de magnétisation  $L_1$  varie avec le flux moyen  $\phi_0$  dans la machine [12].  $L_1$  est la résultante de deux termes:

- 1- L'inductance magnétisante  $M$ .
- 2- L'inductance de fuite primaire  $L_s$ .

Pour tracer les variations de  $L_1$  en fonction de  $\phi_0$  on procède comme suit:

Le flux moyen  $\phi_0$  induit une f.e.m ( $L_1 \cdot \omega \cdot I_0$ ) sensiblement égale à la tension à vide  $V_0$  [12]. En négligeant les chutes de tension, nous pouvons donc écrire :

$$\phi_0 = L_1 \cdot I_0 = \frac{V_0}{\omega} \quad (2.48)$$

Il suffira alors de tracer la courbe de  $L_1 = f(V_0/\omega)$  qui a l'allure générale représentée sur la figure (2.4).

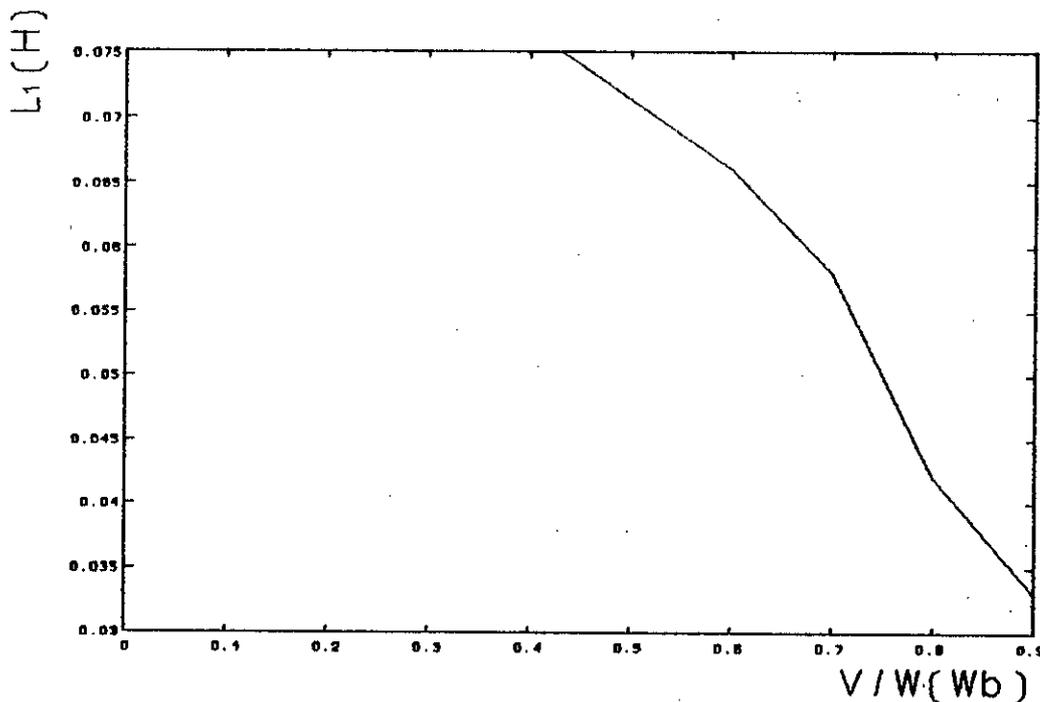


FIG:2.3 variation de  $E$  en fonction du flux moyen  $\phi_0$ .

## 2.6 CONCLUSION:

Pour que l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone soit possible, la valeur de la capacité doit être à l'intérieure d'une certaine marge et ceci pour une vitesse donnée.

Même chose pour la vitesse d'entraînement à une capacité donnée.

Ces intervalles sont influencées par la charge et par les paramètres de la machine.

# ***CHAPITRE III***

***SIMULATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE***

***EN REGIME STATIQUE***

**CHAPITRE III**  
**SIMULATION DE LA GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE AUTO-ÉCITÉE**  
**EN RÉGIME STATIQUE.**

**INTRODUCTION:**

Dans cette partie, on va étudier l'auto-amorçage à vide et en charge de la génératrice asynchrone auto-éxcitée et déterminer ses caractéristiques de fonctionnement pour différents essais en régime statique et cela en se basant sur les résolutions numériques.

Pour cela, on a élaboré un programme de calcul en utilisant le logiciel matlab pour la simulation du phénomène. Afin de valider le programme de calcul, on va comparer quelques résultats de la simulation avec ceux donnés par l'expérience.

**3.1 MODELE MATHEMATIQUE DE SIMULATION A VIDE:**

A partir du schéma équivalent de la génératrice asynchrone auto-éxcitée donné à la figure(2.1), en ouvrant l'interrupteur "K", la relation d'équilibre s'écrit:

$$\bar{I}_c + \bar{I}_m = \bar{0} \quad (3.1)$$

En désignant par  $Z_c$  la réactance du condensateur, et par  $Z_m$  l'impédance de la machine asynchrone.

$$Z_c = -\frac{j}{C \cdot \omega_s} \quad (3.2)$$

$$Z_m = \frac{(R_s + j \cdot L_s \cdot \omega_s) \cdot (j \cdot M \cdot \omega_s + \frac{R'_r}{s} + j \cdot L'_r \cdot \omega_s) + j \cdot M \cdot \omega_s \cdot (\frac{R'_r}{s} + j \cdot L'_r \cdot \omega_s)}{j \cdot M \cdot \omega_s + R'_r + j \cdot L'_r \cdot \omega_s} \quad (3.3)$$

L'équation (3.1) peut s'écrire:

$$\frac{\bar{V}_1}{Z_c} + \frac{\bar{V}_1}{Z_m} = \bar{0} \quad (3.4)$$

Puisque  $V_1$  est différent de zéro, on a donc:

$$\frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_m} = \bar{0} \quad (3.5)$$

Remplaçons dans l'équation  $Z_m$  et  $Z_c$  par leurs expressions.

on peut avoir:

$$jCw_s + \frac{jMw_s + jL'_r w_s + \frac{R'_r}{g}}{(R_s + jL_s w_s) (jMw_s + jL'_r w_s + \frac{R'_r}{g}) + jMw_s (\frac{R'_r}{g} + jL'_r w_s)} = 0 \quad (3.6)$$

En regroupant les termes réels et imaginaires on obtient:

$$\frac{[C_1 \cdot A_2 + D_1 \cdot B_1] + j \cdot [C_1 \cdot B_2 - D_1 \cdot A_2]}{C_1^2 + D_1^2} = 0 \quad (3.7)$$

où:

$A_1, A_2, B_1, B_2, C_1$  et  $D_1$  sont des réels dépendant des paramètres de la machine, la fréquence, la vitesse de rotation du rotor et de la capacité.

$$A_1 = R'_r / g$$

$$B_1 = (M + L'_r) \cdot w_s$$

$$C_1 = (R_s \cdot R'_r / g) - L_s \cdot (M + L'_r) \cdot w_s^2 - M \cdot L_r \cdot w_s^2$$

$$D_1 = (R'_r / g) \cdot (M + L_s) \cdot w_s + R_s \cdot (M + L'_r) \cdot w_s$$

$$A_2 = A_1 - D_1 \cdot C \cdot w_s$$

$$B_2 = B_1 + C_1 \cdot C \cdot w_s$$

De l'équation (3.7), on peut tirer le modèle mathématique à vide de la machine en égalant les termes réels et imaginaires à zéro:

$$F(1) = C_1 \cdot A_2 + D_1 \cdot B_2 = 0 \quad (3.8)$$

$$F(2) = C_1 \cdot B_2 - D_1 \cdot A_2 = 0 \quad (3.9)$$

à une vitesse et une capacité données, les deux inconnues du système sont l'inductance mutuelle  $M$  et la pulsation  $w_s$ .

### 3.2 MODELE MATHEMATIQUE EN CHARGE:

L'interrupteur "K" de la figure (2.3) est fermé, la relation d'équilibre de l'ensemble G.A.S-condensateur-charge s'écrit:

$$\bar{I}_c + \bar{I}_s + \bar{I}_l = \bar{0} \quad (3.10)$$

En désignant par  $\bar{Z}_1$  l'impédance de la charge:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j.L_1.w_e \quad (3.11)$$

En remplaçant dans l'équation (3.9) par les expressions de  $\bar{Z}_1, \bar{Z}_m, \bar{Z}_c$  et  $\bar{V}_1$  on obtient:

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_c} + \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_m} + \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_1} = \bar{0} \quad (3.12)$$

puisque  $\bar{V}_1$  est différent de zéro, on a donc:

$$\frac{1}{\bar{Z}_c} + \frac{1}{\bar{Z}_m} + \frac{1}{\bar{Z}_1} = \bar{0} \quad (3.13)$$

soit:

$$j.C.w_e + \frac{1}{R+j.L_1.w_e} + \frac{\frac{R_1'}{g} + j.(M+L_2').w_e}{j.M.w_e.(\frac{R_1'}{g} + j.L_1'.w_e) + (R_2+j.L_2.w_e).(\frac{R_1'}{g} + j.(M+L_2').w_e)} = \bar{0} \quad (3.14)$$

l'équation (3.14) peut s'arranger comme suit:

$$j.C.w_e + \frac{1}{R_1+j.L_1.w_e} + \frac{A_1+j.B_1}{C_1+j.D_1} = \bar{0} \quad (3.15)$$

$$\frac{-C.C_1.L.w_e^2 - R_1.C.D_1.w_e + C_1 + R_1.M - L_1.B_1.w_e}{(R_1.C_1 - L_1.D_1.w_e) + j.(R_1.D_1 + L_1.C_1.w_e)}$$

$$j. \frac{R_1.C.C_1.w_e - C.L_1.D_1.w_e^2 + D_1 + R_1.B_1 + M.L_1.w_e}{(R_1.C_1 - L_1.D_1.w_e) + j.(R_1.D_1 + L_1.C_1.w_e)} = 0 \quad (3.16)$$

où:

$A_1, B_1, C_1$  et  $D_1$  sont celles définies dans la section (3.2).

L'équation (3.16) peut s'écrire également:

$$\frac{A_2 + j.B_2}{C_2 + j.D_2} = \bar{0} \quad (3.17)$$

Les expressions de  $A_2, B_2, C_2$  et  $D_2$  sont données par:

$$A_2 = -C.C_1.L_1.w_e - R_1.C.D_1.w_e + C_1 + R_1.M - L_1.B_1.w_e$$

$$B_2 = R_1.C.C_1.w_e - C.L_1.w_e^2 + D_1 + R_1.B_1 + A_1.L_1.w_e$$

$$C_2 = R_1.C_1 - L_1.D_1.w_e$$

$$D_2 = R_1.D_1 + R_1.C_1.w_e$$

En multipliant l'équation (3.17) par le conjugué du dénominateur, en regroupant les termes réels et imaginaires et en les égalant à zéro, on obtient le modèle mathématique en charge de la G.A.S auto-excitée:

$$F(1) = A_2 \cdot C_2 + B_2 \cdot D_2 = 0 \quad (3.18)$$

$$F(2) = B_2 \cdot C_2 - A_2 \cdot B_2 = 0 \quad (3.19)$$

pour une capacité et une vitesse données, les deux inconnues du système sont l'inductance mutuelle  $M$  et la pulsation  $\omega_e$ .

### 3.3 MODELISATION DE LA COURBE $E(X_m)$ :

Pour déterminer la valeur de la f.e.m induite en fonction de la réactance de magnétisation, on réalise un essai au synchronisme en entraînant la machine asynchrone par un moteur auxiliaire à la vitesse de synchronisme (1500 tr/mn) et on alimente le stator sous différents niveaux de tension. La f.e.m induite "E" est obtenue en retranchant de la tension d'alimentation les chutes de tension statoriques. La réactance magnétisante est égale au rapport de la f.e.m et du courant statorique [11].

En se basant sur ces résultats pratiques, on peut déterminer la fonction analytique qui modélise la variation de la f.e.m en fonction de la réactance magnétisante  $X_m$ , on a obtenu:

$$E = d_0 + d_1 \cdot X_m + d_2 \cdot X_m^2 + d_3 \cdot X_m^3 + d_4 \cdot X_m^4 + d_5 \cdot X_m^5 + d_6 \cdot X_m^6 + d_7 \cdot X_m^7 \quad (3.20)$$

avec:

$$d_0 = 137.422$$

$$d_1 = 143.252$$

$$d_2 = -42.5472$$

$$d_3 = 6.07481$$

$$d_4 = -0.48219$$

$$d_5 = 0.0215397$$

$$d_6 = -0.0005048$$

$$d_7 = 4.80253e-6$$

La figure (3.1) montre la courbe  $E(X_m)$  expérimentale et modélisée:

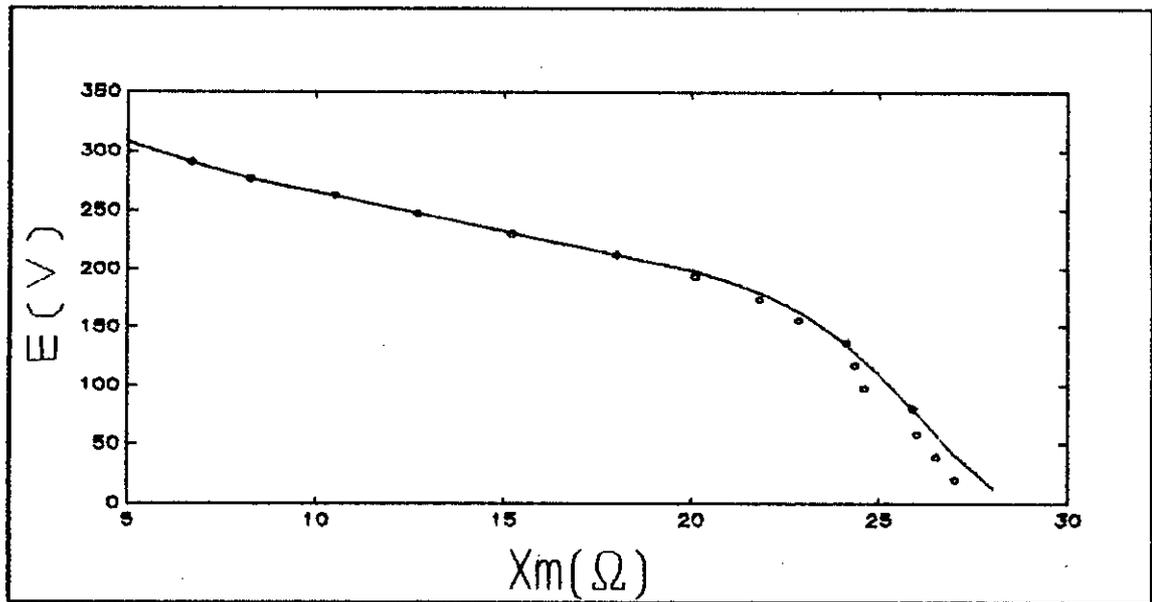


FIG.3.1 variation de E en fonction de  $X_m$ .  $N=1500$  tr/mn  
 ——— courbe modélisée.  
 ooooo courbe pratique.

### 3.4 SIMULATION DE L'AUTO-AMORÇAGE A VIDE:

En réécrivant le modèle mathématique à vide donné par les équations (3.8) et (3.9):

$$F(1) = C_1 \cdot A_2 + D_1 \cdot B_2 = 0 \quad (3.21)$$

$$F(2) = C_1 \cdot B_2 - D_1 \cdot A_2 = 0 \quad (3.22)$$

Le système (3.21)-(3.22) est non linéaire[10], on le résoud en utilisant la méthode de Newton-Raphson[10,11,13].

$$\begin{bmatrix} \omega_s(i+1) \\ M(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_s(i) \\ M(i) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{dF(1)}{d\omega_s} & \frac{dF(2)}{d\omega_s} \\ \frac{dF(1)}{dM} & \frac{dF(2)}{dM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F(1) \\ F(2) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

En utilisant les valeurs de M et  $\omega_s$  obtenues, on peut avoir la f.e.m induite à vide à l'aide de l'expression (3.20).  $X_m$  est donné par:

$$X_m = M \cdot \omega_s \quad (3.24)$$

On peut également calculer les courants statorique  $I_s$ , rotorique  $I_r$  et capacitif  $I_c$  par les formules suivantes:

$$\bar{I}_s = \bar{I}_c = \frac{\bar{E}}{R_s + j \cdot (L_s \cdot \omega_s - \frac{1}{C \cdot \omega_s})} \quad (3.25)$$

$$\bar{I}'_r = \frac{\bar{E}}{\frac{R'_r}{g} + j \cdot L'_r \cdot \omega_s} \quad (3.26)$$

$$\bar{I}_m = \frac{\bar{E}}{j \cdot M \cdot \omega_s} \quad (3.27)$$

### 3.5 SIMULATION DE L'AUTO-AMORÇAGE EN CHARGE:

Le modèle mathématique est le suivant:

$$F(1) = A_2 \cdot C_2 + D_2 \cdot B_2 = 0 \quad (3.28)$$

$$F(2) = B_2 \cdot C_2 - A_2 \cdot D_2 = 0 \quad (3.29)$$

Comme le système (3.21)-(3.22), ce dernier système est non linéaire[10], en le résolvant de la même façon.

A partir de l'inductance mutuelle et  $\omega_s$  on peut déterminer  $X_m$  selon l'équation:

$$X_m = M \cdot \omega_s \quad (3.30)$$

et à l'aide de l'équation (3.20) on peut calculer la f.e.m. on peut également calculer les courants dans le stator  $I_s$ , dans la capacité  $I_c$ , dans le rotor  $I'_r$ , dans la charge  $I_1$ , la tension aux bornes de la charge  $V_1$ , la puissance active débitée et la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ) par les expressions suivantes:

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{E}}{(R_s + j \cdot L_s \cdot \omega_s) + \frac{(-j)}{C \cdot \omega_s} \cdot (R_1 + j \cdot L_1 \cdot \omega_s) \cdot \frac{1}{R_1 + j \cdot (L_1 \cdot \omega_s - \frac{1}{C \cdot \omega_s})}} \quad (3.31)$$

$$\bar{V}_1 = \bar{E} - (R_s + j \cdot L_s \cdot \omega_s) \cdot \bar{I}_s \quad (3.32)$$

$$P_{out} = 3 \cdot R_1 \cdot |\bar{I}_1|^2 \quad (3.36)$$

$$P_{em} = 3 \cdot \frac{R'_r}{g} \cdot |\bar{I}'_r|^2 \quad (3.37)$$

$$\bar{I}_c = j \cdot \bar{V}_1 \cdot C \cdot \omega_s \quad (3.39)$$

$$\bar{I}'_r = \frac{E}{\frac{R'_r}{g} + j \cdot L'_r \cdot \omega_s} \quad (3.40)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_1}{R_1 + j \cdot L_1 \cdot \omega_s} \quad (3.41)$$

### 3.6 VALIDATION DU MODELE:

Afin de valider le programme élaboré, on a réalisé quelques essais pratiques.

Les figures ci-dessous représentent les courbes de simulation et celles obtenues par l'expérience.

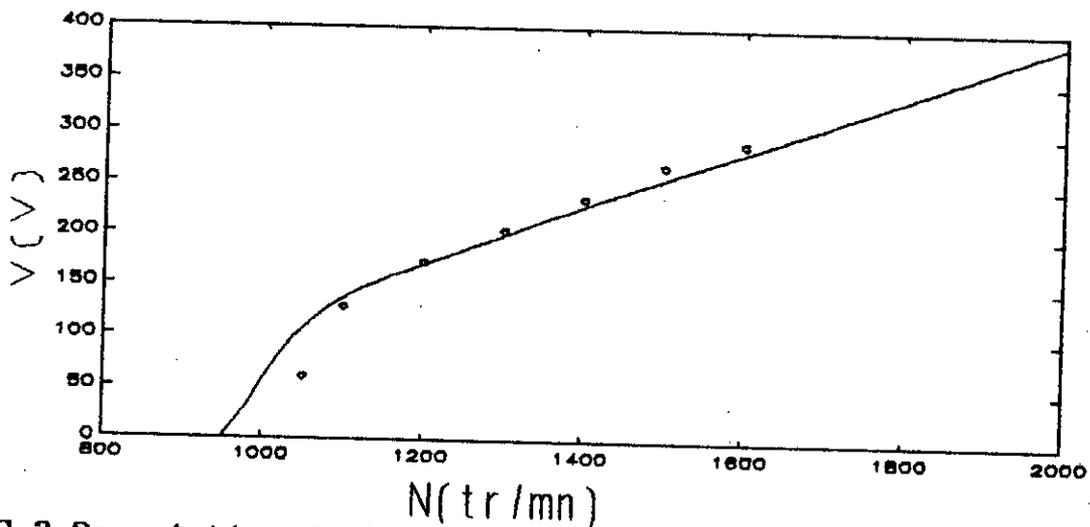


FIG.3.2: variation de la tension en fonction de la vitesse à vide, C=120uF.

----- courbe simulée  
 oooooooooo courbe pratique

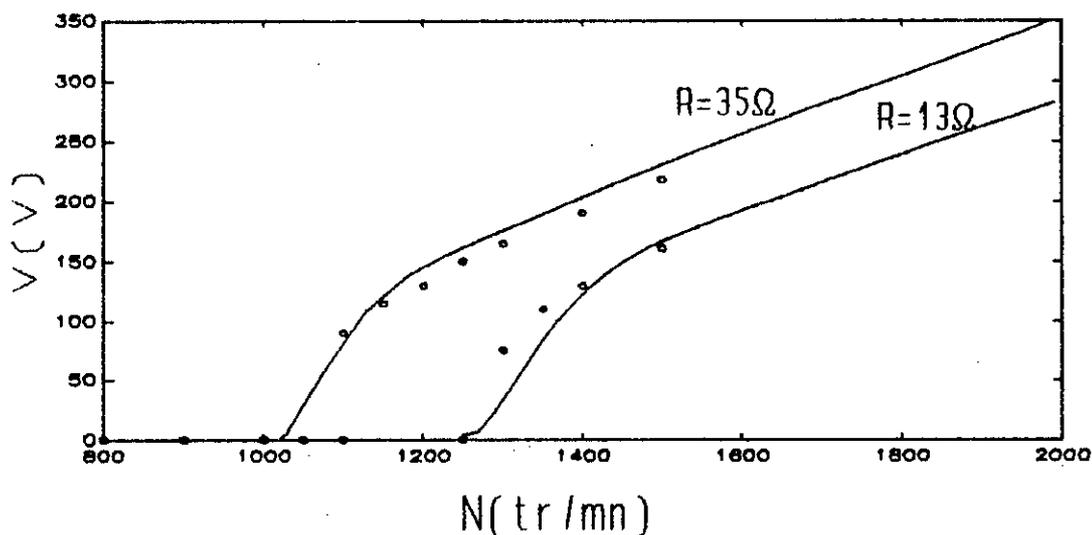


FIG.3.3: variation de la tension en fonction de la vitesse en charge.  $C=90\mu F$   
 ----- courbe simulée  
 oooooooooo courbe pratique

On voit clairement sur les figures (3.2) et (3.3) la concordance entre les courbes obtenues par simulation et celle relevées expérimentalement ce qui valide le programme élaboré.

### 3.7 RESULTATS ET INTERPRETATIONS:

La variation de la capacité et de la vitesse ainsi que la variation de la charge ont une grande influence sur les performances de la G.A.S auto-éxcitée[10].

En se basant sur les résultats de simulation, on va étudier dans cette partie ces influences et leur causes afin d'arriver à donner les meilleures conditions de fonctionnement de la G.A.S auto-éxcitée en régime statique.

### 3.7.1 INFLUENCE DE LA VITESSE SUR LA TENSION D'AUTO-AMORÇAGE A VIDE:

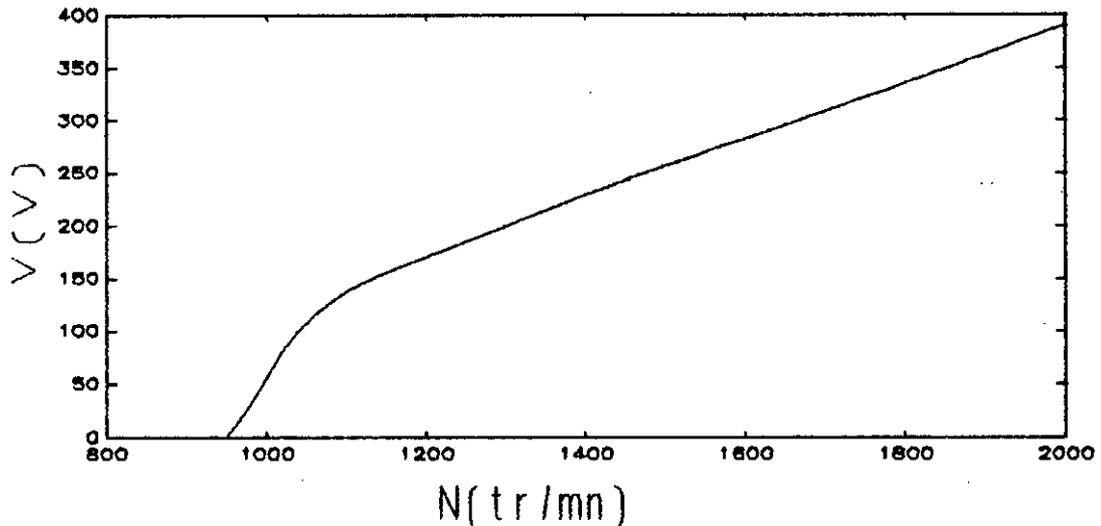


FIG.3.4 variation de la tension à vide en fonction de la vitesse.  $C=90\mu F$ .

La détermination par simulation de la tension d'auto-amorçage à vide nous a permis de tracer la courbe représentée dans la figure (3.4) qui traduit l'influence de la vitesse d'entraînement sur la tension d'auto-amorçage.

Il existe une vitesse critique " $N_c$ " à partir de laquelle la tension d'autoamorçage augmente rapidement. Ensuite, et à cause de la saturation du circuit magnétique de la machine, la tension continue à augmenter mais d'une manière moins rapide.

Pour avoir une tension fixe en charge, on peut agir sur la vitesse d'entraînement. Cette alternative est très simple mais on est malheureusement limité par la marge de variation de la fréquence.

### 3.7.2 AUTO-AMORÇAGE EN CHARGE:

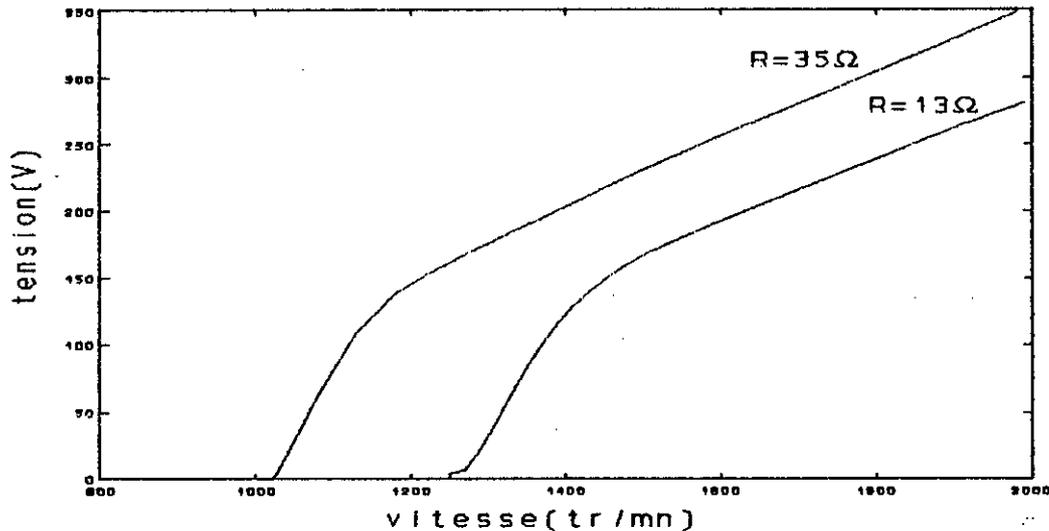


FIG.3.5 variation de la tension en charge en fonction de la vitesse. C=90μF.

La figure(3.5) montre l'influence de la charge sur la vitesse critique et la tension d'auto-amorçage.

On constate que l'augmentation de la charge entraîne une augmentation de la vitesse critique .

L'allure générale de la tension en fonction de la vitesse ne diffère pas de celle obtenue à vide,mais en chargeant la machine,la valeur de la tension diminue pour une même vitesse.

### 3.7.3 INFLUENCE DE LA CAPACITE SUR LA FREQUENCE A VITESSE FIXE:

On voit sur la figure (3.6) la variation de la fréquence statorique en fonction de la capacité à vide et en charge.

A vide la fréquence f est égale à celle de synchronisme pour la capacité minimale,puis elle diminue avec l'augmentation de cette dernière .

Pour une capacité fixe,la fréquence diminue en augmentant la charge[10].

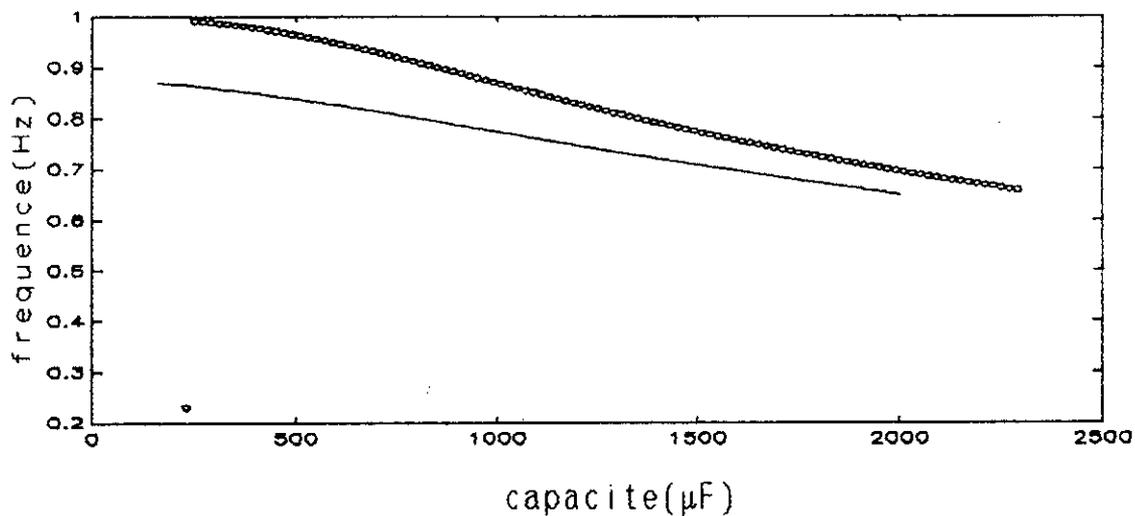


FIG 3.6: variation de la fréquence en fonction de la capacité.  $N=1500$  tr/mn.

### 3.7.4 INFLUENCES DE LA CAPACITE ET DE LA CHARGE SUR LA TENSION $V_1$ A $N=Cte$ :

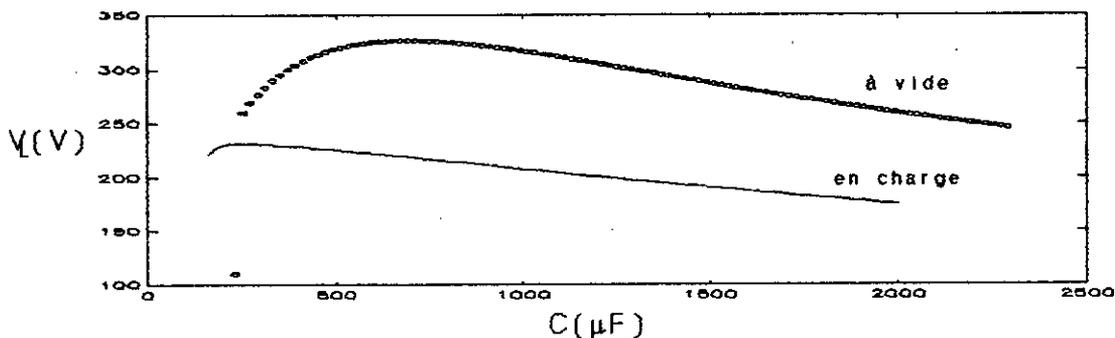


FIG 3.7: variation de la tension en fonction de la capacité  $N=1500$  tr/mn.

Pour une capacité inférieure à la capacité minimale ( $C_{min}$ ), l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone n'est pas possible.

Si on augmente d'avantage la capacité la tension atteindra des valeurs élevées voir même dangereuse.

A partir d'une certaine valeur de la capacité, la tension commence à diminuer.

Ces résultats sont dus à plusieurs causes:  
 La réactance de la capacité d'auto-amorçage ( $1/C.w_0$ ) diminue au début quand la capacité augmente et par conséquent l'énergie réactive de magnétisation augmente et donc la tension augmente, ensuite ( $1/C.w$ ) devient indépendante de la valeur de la capacité puisque l'augmentation de cette dernière est compensée par la diminution de la fréquence, mais d'autre part l'impédance rotorique devient très petite c'est à dire que le courant magnétisant diminue et par conséquent la tension diminue considérablement et la machine risque de se désamorcer si on continue à augmenter la capacité[10].

L'influence de la charge est similaire à celle de la capacité, ajoutons que, si la charge augmente, le courant statorique augmente ce qui entraîne des chutes de tension au niveau de l'impédance statorique. La tension aux bornes du condensateur chute et par conséquent l'énergie réactive fournie par les condensateurs diminue ce qui entraîne la diminution de la tension.

### 3.7.5 INFLUENCE DE LA CHARGE SUR LES PERFORMANCES DE LA G.A.S:

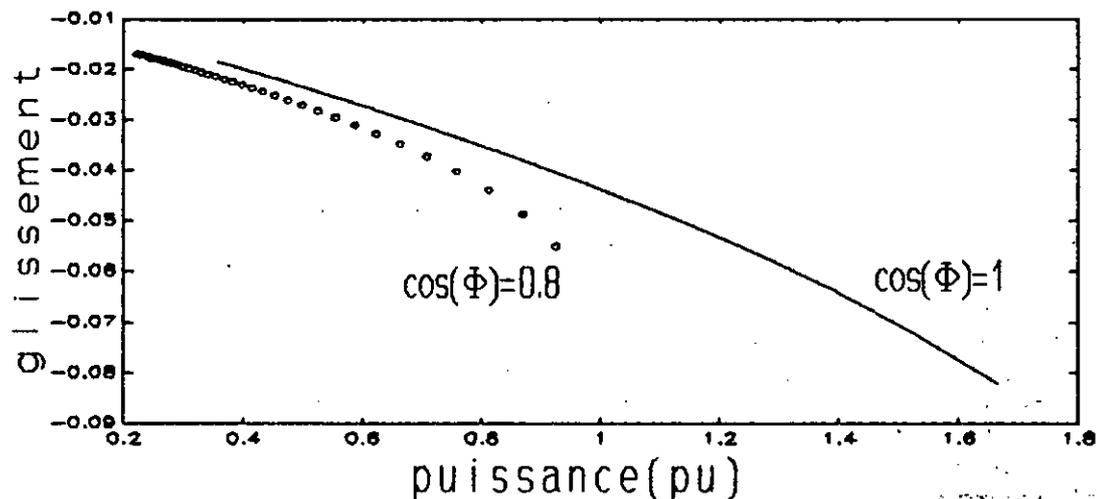


FIG 3.8: Variation du glissement en fonction de la charge.  
 $C=90\mu F, N=1500$  tr/mn.

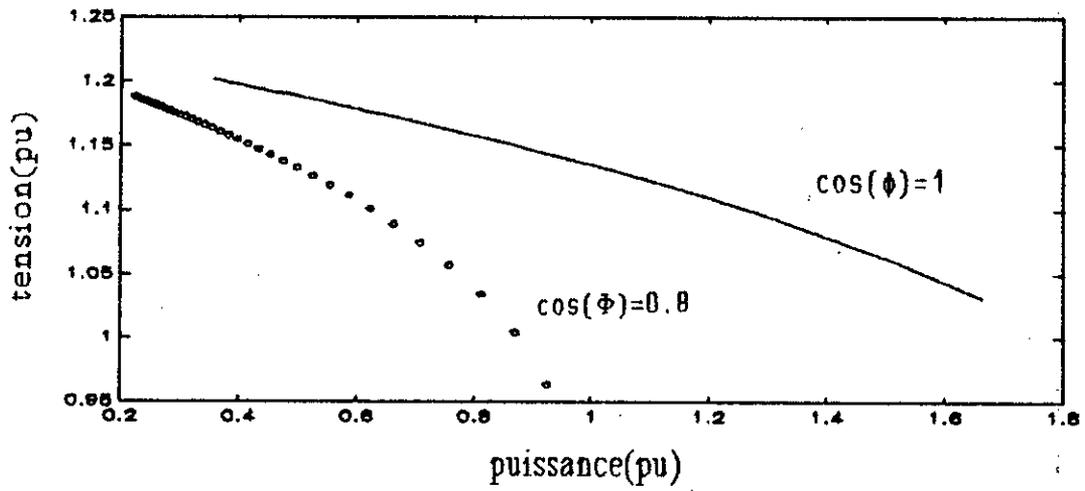


FIG.3.9:Variation de la tension en fonction de la charge, C=90 $\mu$ F, N=1500 tr/mn

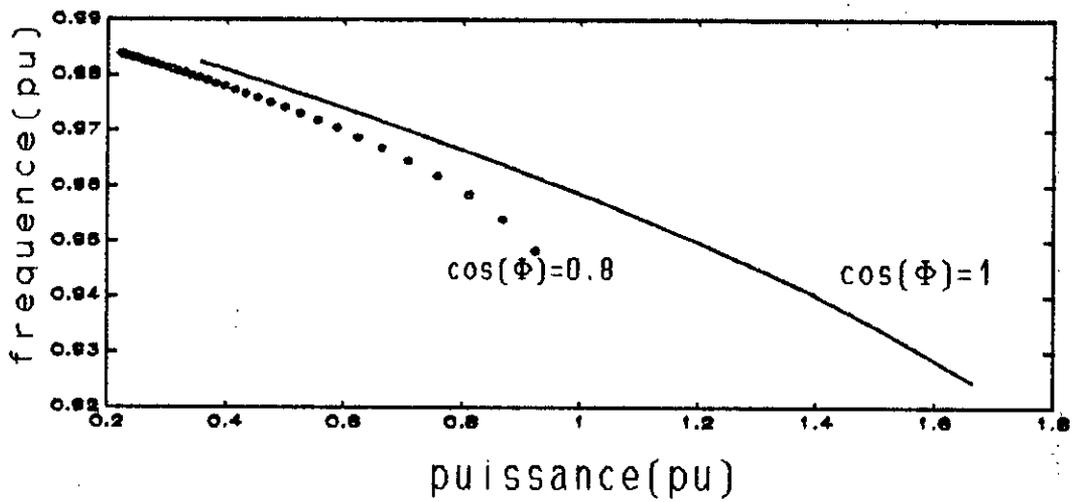


FIG 3.10:Variation de la fréquence statorique en fonction de la charge, C=90 $\mu$ F, N=1500 tr/mn.

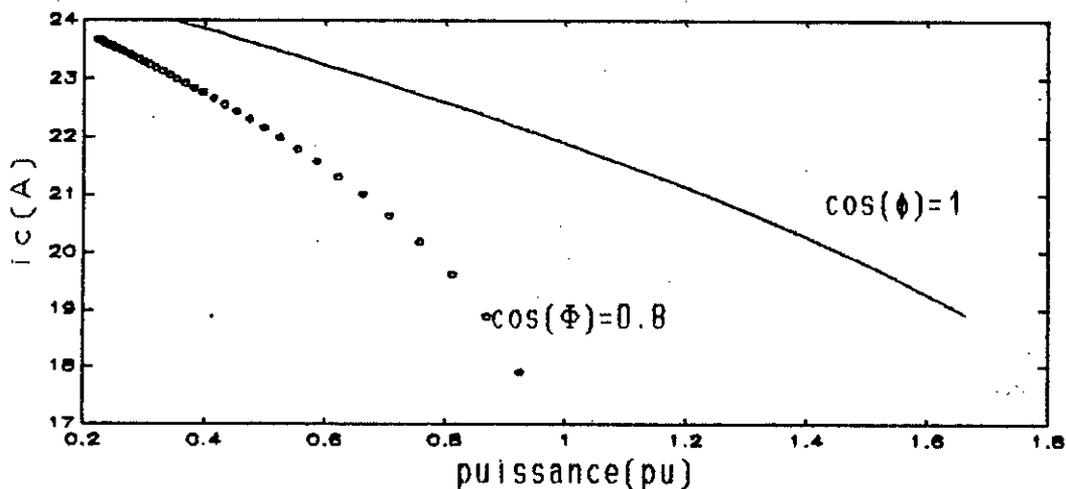


FIG3.11:variation du courant capacitif en fonction de la charge,  $C=90\mu F$ ,  $N=1500$  tr/mn.

Comme pour toute machine électrique la caractéristique  $U=F(P)$  a une allure descendante, mais dans le cas de la génératrice asynchrone la chute de tension est très importante.

Les courbes  $I_c=F(P)$ ,  $f=F(P)$  et  $g=F(P)$  ont également des allures descendantes.

La diminution du courant capacitif est due à la diminution de la tension aux bornes du condensateur et à la diminution de la fréquence. Ceci entraîne la diminution de l'énergie réactive fournie.

La chute de tension est beaucoup plus importante dans le cas d'une charge inductive. En effet, pour une charge inductive la batterie de condensateurs doit fournir également de l'énergie réactive à la charge et l'énergie nécessaire pour la magnétisation. Par contre pour une charge résistive, les condensateurs ne fournissent de l'énergie réactive que pour la génératrice asynchrone.

Si on continue à charger la machine en maintenant la capacité des condensateurs et la vitesse du rotor constante, la caractéristique externe va s'incurver brutalement et de façon plus importante dans le cas d'une charge inductive. La génératrice asynchrone se désamorçait rapidement, ce qui nécessite un réglage pour maintenir la tension et la fréquence constantes [10, 11, 13].

### 3.7.6 CARACTERISTIQUE DE REGLAGE DE LA TENSION A $C=Cte$ :

On remarque sur la figure ci-dessus qu'on peut maintenir la tension de sortie constante en agissant sur la vitesse d'entraînement du rotor et ceci pour une capacité fixe.

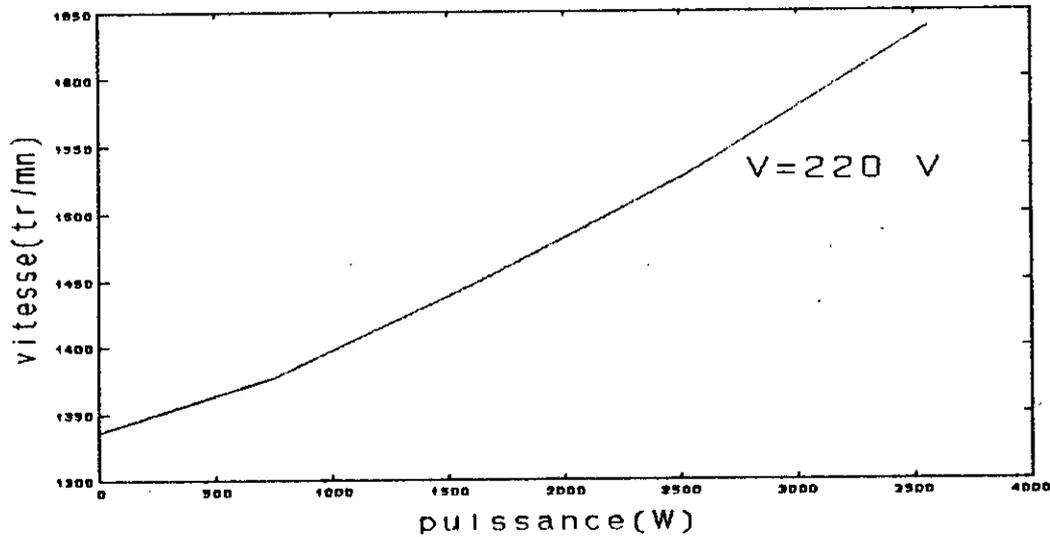


FIG:3.12 caractéristique de réglage de la tension  
 $C=90\mu\text{F}, V_1=220\text{V}$ .

### 3.7.7 CARACTERISTIQUE DE REGLAGE DE LA TENSION A $N=Cte$ :

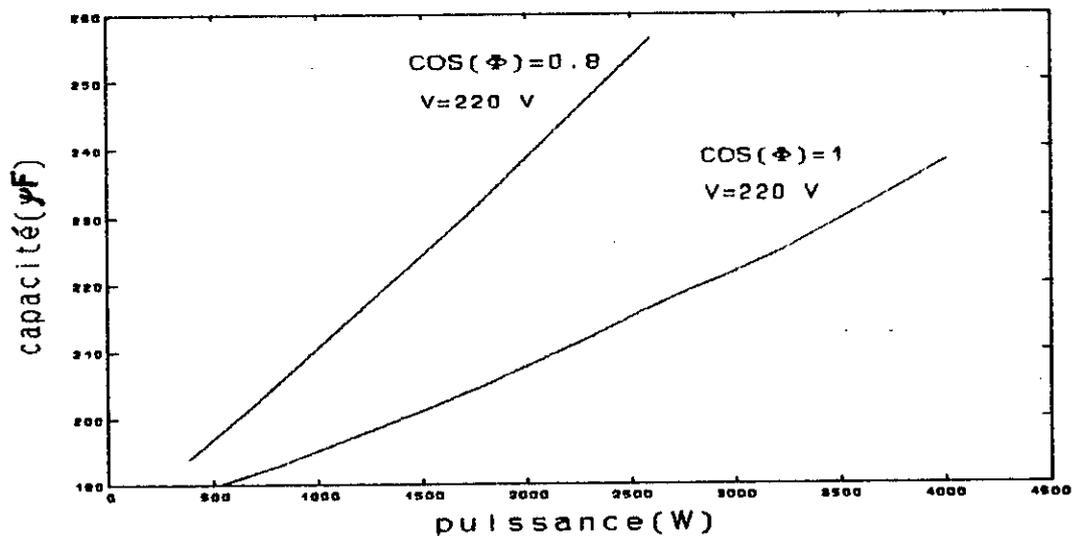


FIG3.13:caractéristique de réglage de la tension.  
 $V_1=220\text{V}, N=1500\text{tr/mn}$ .

La figure (3.13) montre qu'il faut augmenter la valeur de la capacité avec l'augmentation de la charge pour avoir une tension

constante. La capacité est plus importante pour une charge inductive que pour une charge résistive. En effet, l'énergie réactive fournie par les condensateurs est donnée par:

$$Q = V_1^2 / X_c = V_1^2 \cdot C \cdot \omega_e$$

Pour une charge inductive, la demande de l'énergie réactive est plus importante et pour la satisfaire, il faut augmenter suffisamment la valeur de la capacité.

Pour une vitesse fixe, on peut maintenir la tension de sortie constante en agissant sur la valeur de la capacité, mais ceci est suivi par une diminution de la fréquence (section 3.8.4).

On ne peut maintenir la tension de sortie et la fréquence des courants statoriques constantes en agissant seulement sur la vitesse ou la capacité des condensateurs [10, 11].

### 3.8 CONCLUSION:

Pour avoir l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone auto-éxcitée, la valeur de la capacité doit être prise dans une marge bien définie.

Pour une capacité donnée, la vitesse du rotor doit être supérieure à une certaine valeur dite vitesse critique pour que l'auto-amorçage soit possible.

La valeur de la capacité influe beaucoup sur les performances de la génératrice asynchrone.

On peut maintenir la tension d'auto-amorçage de la génératrice asynchrone en agissant, soit sur la capacité, soit sur la vitesse d'entraînement.

les caractéristiques de réglage dépendent des paramètres de la machine, de la vitesse d'entraînements, de la puissance débité et du  $\cos(\phi)$ .

Pour une vitesse constante ou une capacité fixe la fréquence diminue quand la charge augmente.

On ne peut maintenir la tension et la fréquence constantes en agissant seulement sur la valeur de la capacité ou sur la vitesse d'entraînement .

# ***CHAPITRE IV***

## ***MODELE DYNAMIQUE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE***

## CHAPITRE IV

### MODELE DYNAMIQUE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE

#### A-MODELISATION DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE SOUS L'HYPOTHESE LINEAIRE:

##### INTRODUCTION:

dans cette partie on va présenter la modélisation de la machine asynchrone. Cette dernière est tantôt modélisée par le modèle de flux tantôt par le modèle des courants. Nous avons choisi pour notre étude le premier modèle.

Nous admettons tout au long de cette partie l'hypothèse de linéarité du circuit magnétique.

Enfin, nous discuterons la possibilité d'utilisation de ce modèle pour le fonctionnement en génératrice asynchrone.

Nous considérons les hypothèses simplificatrices classiques, [2],[3],[4]:

- 1- La f.m.m est supposée à répartition sinusoïdale dans l'entrefer.
- 2- Les pertes fer, les effets pelliculaires et thermiques sont négligés.
- 3- La saturation du circuit magnétique est négligée dans cette partie, nous en tiendrons compte ultérieurement. Les inductances propres et mutuelles des circuits sont donc constantes.

#### 4.1 EQUATIONS DES TENSIONS EXPRIMEES EN VARIABLES DE PHASES:

Nous adopterons la convention de signe correspondant au fonctionnement du générateur [2],[5].

Les équations de tensions de la G.A. sous forme matricielle sont données par:

$$\mathbf{v}_{abcS} = -r_s \cdot \mathbf{i}_{abcS} + p\Phi_{abcS} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{v}_{abcR} = r_r \cdot \mathbf{i}_{abcR} + p\Phi_{abcR} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{v}_{abcS} = [v_{aS} \ v_{bS} \ v_{cS}]^t \quad (4.3)$$

$$\mathbf{i}_{abcS} = [i_{aS} \ i_{bS} \ i_{cS}]^t \quad (4.4)$$

$$\Phi_{abcS} = [\phi_{aS} \ \phi_{bS} \ \phi_{cS}]^t \quad (4.5)$$

Les variables rotoriques sont définies d'une manière analogue.

$r_s$  et  $r_r$  sont les matrices résistances statoriques et rotoriques.

$$\mathbf{r}_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad \mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Les équations des flux s'expriment par:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{abcS} \\ \Phi_{abcR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^t & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abcS} \\ \mathbf{i}_{abcR} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

avec  $L_s$  et  $L_r$  représentant les sous matrices inductances des bobines statoriques et rotoriques,  $L_{sr}$  la matrice mutuelle inductance stator-rotor.

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{rr} & M_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & L_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & M_{rr} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} (\cos\theta_r) & \cos(\theta_r+\varepsilon) & \cos(\theta_r-\varepsilon) \\ \cos(\theta_r-\varepsilon) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r+\varepsilon) \\ \cos(\theta_r+\varepsilon) & \cos(\theta_r-\varepsilon) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

avec:  $\varepsilon = 2 \cdot \frac{\pi}{3}$

$L_{ss}$  (resp.  $L_{rr}$ ): désigne l'inductance propre d'une bobine statorique (resp. rotorique), qui sont toutes égales, vue la symétrie de la machine.

$M_{ss}$  (resp.  $M_{rr}$ ): désigne l'une quelconque des mutuelles inductances entre deux bobines statoriques (resp. rotoriques).

$L_{sr}$ : amplitude de la mutuelle inductance stator-rotor.

On sait que :

$$L_{ss} = L_{ms} + l_s \quad (4.11)$$

$$L_{rr} = L_{ms} + l_r \quad (4.12)$$

$$M_{ss} = -1/2 L_{ms} \quad (4.13)$$

$$M_{rr} = -1/2 L_{mr} \quad (4.14)$$

avec  $l_s$ : inductance de fuite des enroulements statoriques.

$l_r$ : inductance de fuite des enroulements rotoriques.

$L_{ms}$ : inductance de magnétisation du stator.

$L_{mr}$ : inductance de magnétisation du rotor.

Après avoir établi les équations des tensions, nous ramenons les grandeurs rotoriques au stator. Ceci étant dans le but d'aboutir aux équations de tensions ramenées au stator.

Soit alors  $m$ , le rapport de transformation stator-rotor

$$m = \frac{E_s}{E_r} \quad (4.15)$$

avec:  $E_s$ : tension d'entrefer statorique par phase.

$E_r$ : tension induite par phase rotorique.

Nous ramenons les variables rotoriques au stator suivent les équations suivantes:

$$i'_{abc} = i_{abc} / m \quad (4.16)$$

$$v_{abc} = v_{abc} \cdot m \quad (4.17)$$

$$\varphi'_{abc} = \varphi_{abc} \cdot m \quad (4.18)$$

Les inductances de magnétisation statoriques, rotoriques ainsi que la mutuelle inductance ayant le même circuit magnétique

sont liées par les équations ci-dessous :

$$L_{ms} = m \cdot L_{sr} \quad (4.19)$$

$$L_{sr} = L_{ms} / m \quad (4.20)$$

$$L_{mx} = L_{ms} / m^2 \quad (4.21)$$

Nous définissons les deux matrices inductances  $L'_{sr}$  et  $L'_r$  par:

$$L'_{sr} = m L_{sr} \quad (4.22)$$

$$L'_r = m^2 \cdot L_r \quad (4.23)$$

compte tenu de (4.19), (4.21) les matrices  $L'_{sr}$  et  $L'_r$  peuvent être exprimées par:

$$L'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r+\epsilon) & \cos(\theta_r-\epsilon) \\ \cos(\theta_r-\epsilon) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r+\epsilon) \\ \cos(\theta_r+\epsilon) & \cos(\theta_r-\epsilon) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

avec  $\epsilon = 2 \cdot \frac{\pi}{3}$

et

$$L'_r = \begin{bmatrix} l'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & l'_r + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & l'_r + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$L'_r = m^2 \cdot L_r \quad (4.26)$$

En utilisant les équations (4.16), (4.18), (4.22) et (4.23).

Les équations des flux rotoriques (4.17), deviennent, en ramenant au stator:

$$\Phi'_{abor} = [(L'_{sr})^t \quad L'_r] [-i_{abor} \quad i'_{abor}]^t \quad (4.27)$$

Enfin les équations des flux et des tensions en terme de variables de phases peuvent s'écrire:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{abcs} \\ \Psi'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr} \\ (L'_{sr})^t & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL'_{sr} \\ p(L'_{sr})^t & r_r + pL'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

avec

$$r'_r = m^2 \cdot r_r \quad (4.30)$$

Le système d'équations (4.29) représente le modèle de la M.A.S exprimé en grandeurs de phase. C'est un système d'équations différentielles à coefficients variables, et dont la résolution est très délicate. Pour simplifier le système d'équations ainsi obtenu nous utilisons la transformation triphasée-biphasée. Cette dernière nous offre la possibilité de passer de ce système à coefficients variables exprimé en grandeurs de phases à son système homologue exprimé en composantes relatives. Ce dernier est alors à coefficients constants et sa résolution est beaucoup plus simple.

#### 4.2 EQUATIONS DES TENSIONS DANS LE REFERENTIEL ARBITRAIRE

Pour aboutir aux équations des tensions exprimées dans le référentiel arbitraire (référentiel lié au stator), nous exprimons chaque variable de phase dans les équations (4.29) en utilisant la transformation de Park.

Cette transformation est obtenue en utilisant les matrices  $[A_s]$  et  $[A_r]$ , données en annexe, de la manière suivante:

$$f_{abcs} = A_s^{-1} f_{dqos} \quad (4.31)$$

$$f'_{abcr} = A_r^{-1} \cdot f'_{dqor} \quad (4.32)$$

avec:

$f$ : est une fonction qui peut être soit la tension, soit le flux ou le courant.

Les équations (4.29) deviennent alors:

$$A_s^{-1} v_{dqos} = -r_s A_s^{-1} i_{dqos} + p A_s^{-1} \Psi_{dqos} \quad (4.33)$$

$$A_r^{-1} v'_{dqor} = -r'_r A_r^{-1} i'_{dqor} + p A_r^{-1} \Psi'_{dqor} \quad (4.34)$$

d'où

$$v_{dqos} = A_s (-r_s A_s^{-1}) i_{dqos} + A_s (p A_s^{-1}) \Psi_{dqos} + A_s A_s^{-1} p \Psi_{dqos} \quad (4.35)$$

$$\mathbf{v}'_{dqor} = \mathbf{A}_r \mathbf{r}'_r \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{i}'_{dqor} + \mathbf{A}_r (p \mathbf{A}_r^{-1}) \boldsymbol{\psi}'_{dqor} + \mathbf{A}_r \mathbf{A}_r^{-1} p \boldsymbol{\psi}'_{dqor} \quad (4.36)$$

On montre que:

$$\mathbf{A}_s (p \mathbf{A}_s^{-1}) \boldsymbol{\psi}'_{dqos} = \omega [\psi'_{os} \quad -\psi'_{ds} \quad 0]^t = \omega \boldsymbol{\psi}'_{qds} \quad (4.37)$$

$$\mathbf{A}_r (p \mathbf{A}_r^{-1}) \boldsymbol{\psi}'_{dqor} = (\omega - \omega_r) [\psi'_{or} \quad -\psi'_{dr} \quad 0]^t = (\omega - \omega_r) \boldsymbol{\psi}'_{dqr} \quad (4.38)$$

Du faite de la symétrie de la machine les matrices  $\mathbf{r}_s$  et  $\mathbf{r}'_r$  sont diagonales et à élément diagonaux égaux (équations 2.6.)

Nous pouvons alors écrire.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_s &= r_s \mathbf{I} \\ \mathbf{r}'_r &= r'_r \mathbf{I} \end{aligned} \quad (4.39)$$

[I] étant la matrice identité,  $r_s$  et  $r'_r$  les résistances par phase au stator et au rotor.

Les équations (4.35) et (4.36) deviennent alors:

$$\mathbf{v}_{dqos} = -\mathbf{r}_s \cdot \mathbf{i}_{dqos} + \omega \boldsymbol{\psi}_{dqs} + p \boldsymbol{\psi}_{dqos} \quad (4.40)$$

$$\mathbf{v}'_{dqor} = -\mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{dqor} + \omega \boldsymbol{\psi}'_{dqr} + p \boldsymbol{\psi}'_{dqor} \quad (4.41)$$

Le système (4.40) et (4.41) représente les équations des tensions exprimées dans le référentiel arbitraire.

### 4.3 EQUATIONS DES FLUX DANS LE REFERENTIEL ARBITRAIRE

A partir des équations des flux par phase et des équations de transformation des circuits stationnaires et tournants, on peut déduire la représentation dans le référentiel arbitraire des équations des flux:

$$\boldsymbol{\psi}_{dqos} = \mathbf{A}_s \mathbf{L}_s \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{i}_{dqos} + \mathbf{A}_s \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{i}'_{dqor} \quad (4.42)$$

$$\boldsymbol{\psi}'_{dqor} = \mathbf{A}_r (\mathbf{L}'_{sr})^t \mathbf{A}_s^{-1} \mathbf{i}_{dqos} + \mathbf{A}_r \mathbf{L}'_r \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{i}'_{dqor} \quad (4.43)$$

et sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{dqos} \\ \boldsymbol{\psi}'_{dqor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s \mathbf{L}_s \mathbf{A}_s^{-1} & \mathbf{A}_s \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{A}_r^{-1} \\ \mathbf{A}_r (\mathbf{L}'_{sr})^t \mathbf{A}_s^{-1} & \mathbf{A}_r (\mathbf{L}'_r) \mathbf{A}_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{dqos} \\ \mathbf{i}'_{dqor} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

On montre que:

$$\mathbf{A}_s \mathbf{L}_s \mathbf{A}_s^{-1} = \begin{bmatrix} l_s + M & 0 & 0 \\ 0 & l_s + M & 0 \\ 0 & 0 & l_s \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

ou

$$M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (4.46)$$

L'<sub>r</sub> étant de même forme que L<sub>s</sub> , donc:

$$\mathbf{A}_r \mathbf{L}'_r \mathbf{A}_r^{-1} = \begin{bmatrix} l'_r + M & 0 & 0 \\ 0 & l'_r + M & 0 \\ 0 & 0 & l'_r \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

$$\mathbf{A}_s \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{A}_r^{-1} = \mathbf{A}_r (\mathbf{L}'_{sr})^t \mathbf{A}_s^{-1} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Et ainsi, nous aboutissons aux équations des flux sous leur forme explicite:

$$\Phi_{qs} = l_s i_{qs} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4.49)$$

$$\Phi_{ds} = l_s i_{ds} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4.50)$$

$$\Phi_{0s} = l_s i_{0s} \quad (4.51)$$

$$\Phi'_{qr} = l'_r i'_{qr} + M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4.52)$$

$$\Phi'_{dr} = l'_r i'_{dr} + M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4.53)$$

$$\Phi'_{0r} = l'_r i'_{0r} \quad (4.54)$$

Les expressions  $M(i_{ds} + i'_{dr})$  et  $M(i_{qs} + i'_{qr})$  représentant les composantes d'axes d et q du flux magnétisant, on les notera respectivement  $\Phi_{nd}$  et  $\Phi_{nq}$

les courants déduits des équations (4.49)-(4.54) auront les expressions suivantes:

$$i_{qs} = \frac{1}{l_s} (\Phi_{qs} - \Phi_{nq}) \quad (4.55)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{l_s} (\Phi_{ds} - \Phi_{nd}) \quad (4.56)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{l_s} \Phi_{0s} \quad (4.57)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{l'_r} (\Phi'_{qr} - \Phi_{nq}) \quad (4.58)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{l'_r} (\Phi'_{dr} - \Phi_{nd}) \quad (4.59)$$

$$i'_{or} = \frac{1}{L'_r} \varphi'_{or} \quad (4.60)$$

En remplaçant enfin ces courants par leurs expressions ci-dessus dans les équations des tensions (4.40) et (4.41), nous aboutissons au système différentiel suivant:

$$p\varphi_{ds} = v_{ds} - \omega\varphi_{qs} + \frac{I_s}{L_s} (\varphi_{md} - \varphi_{ds}) \quad (4.61)$$

$$p\varphi_{qs} = v_{qs} - \omega\varphi_{ds} + \frac{I_s}{L_s} (\varphi_{mq} - \varphi_{qs}) \quad (4.62)$$

$$p\varphi_{os} = v_{os} - \frac{I_s}{L_s} \varphi_{os} \quad (4.63)$$

$$p\varphi'_{dr} = v'_{dr} - (\omega - \omega_r)\varphi'_{qr} + \frac{I'_r}{L'_r} (\varphi_{md} - \varphi'_{dr}) \quad (4.64)$$

$$p\varphi'_{qr} = v'_{qr} - (\omega - \omega_r)\varphi'_{dr} + \frac{I'_r}{L'_r} (\varphi_{mq} - \varphi'_{qr}) \quad (4.65)$$

$$p\varphi'_{or} = v'_{or} - \frac{I'_r}{L'_r} \varphi'_{or} \quad (4.66)$$

avec

$$\varphi_{md} = L_{aq} \left( \frac{\varphi_{ds}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{dr}}{L'_{1r}} \right) \quad (4.67)$$

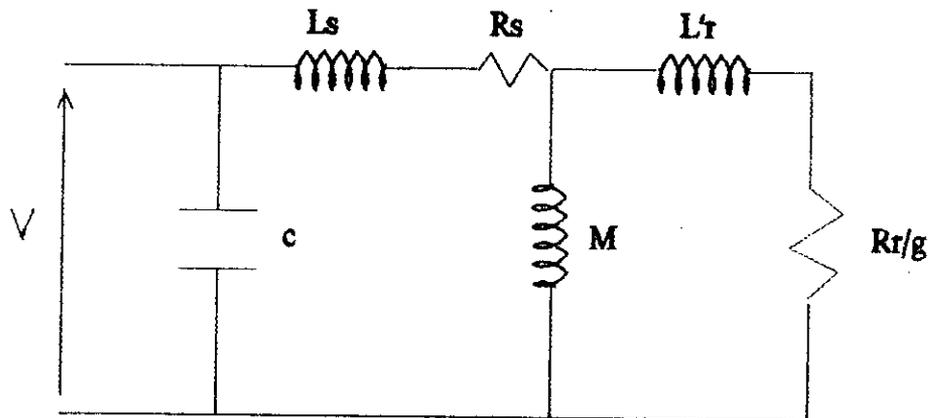
$$\varphi_{mq} = L_{ad} \left( \frac{\varphi_{qs}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{qr}}{L'_{1r}} \right) \quad (4.68)$$

$$L_{ad} = L_{ad} = \left( \frac{1}{M} + \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right)^{-1} \quad (4.69)$$

Il suffit d'associer aux équations (4.61)-(4.69), les équations d'auto-excitation pour aboutir au modèle dynamique de la génératrice asynchrone.

#### 4.4 EQUATIONS D'AUTO-EXCITATION

Le dispositif assurant l'excitation de la génératrice asynchrone autonome étant une batterie de condensateurs montée aux bornes du stator de cette dernière. Les équations d'auto-excitation correspondent donc aux équations des tensions aux bornes de ces condensateurs[5].



figure(4.5): schéma équivalent du complexe  
génératrice asynchrone-condensateur.

Dans le cas d'un système triphasé équilibré de condensateurs (figure 4.5) les équations des courants s'expriment sous forme matricielle par :

$$i_{cabc} = p \cdot Q_{cabc} \quad (4.70)$$

où  $Q_{cabc}$  représente les charges des condensateurs et  $i_{cabc}$  les courants les traversant.

L'équation (4.70) devient dans le référentiel arbitraire :

$$i_{cdq0} = A_s \cdot p \cdot [A_s^{-1} \cdot Q_{cdq0}] \quad (4.71)$$

$$i_{cdq0} = A_s \cdot (p \cdot A_s^{-1}) Q_{cdq0} + A_s \cdot A_s^{-1} \cdot p \cdot Q_{cdq0} \quad (4.72)$$

On montre, comme dans le cas des flux, que l'équation (4.72) peut être arrangée comme suit:

$$i_{cdq0} = \omega \cdot Q_{cdq0} + p \cdot Q_{cdq0} \quad (4.73)$$

avec

$$Q_{cdq0} = [Q_{cq} \quad -Q_{cs} \quad 0]^t \quad (4.74)$$

la charge d'un condensateur s'écrit en fonction de la tension aux bornes de ces derniers:

$$Q_{cabc} = C v_{cabc} \quad (4.75)$$

et dans le référentiel arbitraire :

$$Q_{cdq0} = \Lambda_g \cdot C \cdot \Lambda_g^{-1} \cdot v_{cdq0} \quad (4.76)$$

La matrice C s'écrit donc :  $[C] = C \cdot I$  (4.77)

où C est la capacité d'un des condensateurs et donc

$$Q_{cdq0} = C \cdot v_{cdq0} \quad (4.78)$$

En remplaçant L'équation (4.77) dans (4.73) on obtient:

$$i_{cdq0} = C \cdot \omega \cdot v_{cdq0} + C \cdot p \cdot v_{cdq0} \quad (4.79)$$

où bien

$$p \cdot v_{cdq0} = \frac{1}{C} \cdot i_{cdq0} - \omega \cdot v_{cdq0} \quad (4.80)$$

et que nous écrivons sous forme explicite:

$$p \cdot v_{cd} = \frac{1}{C} \cdot i_{cd} - \omega \cdot v_{cd} \quad (4.81)$$

$$p \cdot v_{cq} = \frac{1}{C} \cdot i_{cq} - \omega \cdot v_{cd} \quad (4.82)$$

$$p \cdot v_{co} = \frac{1}{C} \cdot i_{co} \quad (4.83)$$

Le système (4.81)(4.82)(4.83) représente le système d'équations d'auto-excitation de la G.A.

Nous pouvons maintenant établir le modèle " linéaire " de la génératrice asynchrone.

En effet les équations (4.61)-(4.69) associées aux équations (4.81)(4.82)(4.83) forment le modèle dynamique des flux en régime linéaire de la génératrice asynchrone.

#### 4.5 AUTO-AMORÇAGE SOUS L'HYPOTHESE LINÉAIRE DE LA G.A.

La simulation du fonctionnement de la génératrice asynchrone [5], basée sur le modèle linéaire conduit à une divergence des caractéristiques (tensions, courants...). De ce fait, on voit la tension par exemple, atteindre des milliers de volts en quelques dixièmes de seconde (figure 4.6). Nous remarquons la même chose pour le courant (figure 4.7).

Cependant, sur les relevés expérimentaux, nous ne voyons pas cette divergence.

Une telle différence est due au fait de négliger un phénomène très important, voire fondamentale dans le fonctionnement en génératrice, à savoir la saturation. Nous devons alors écarter l'hypothèse simplificatrice de linéarité du circuit magnétique.

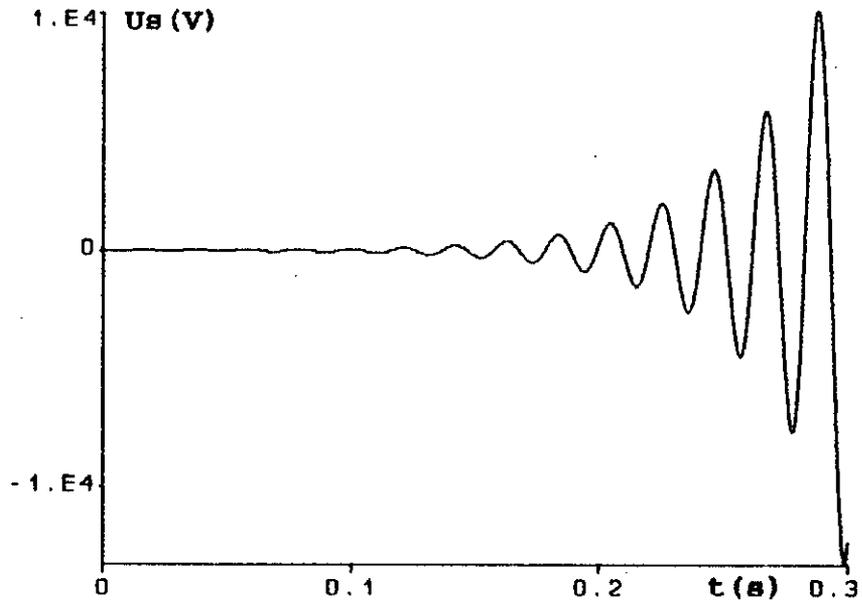


Figure 4.6 Tension de l'auto-amorçage à vide en régime linéaire.

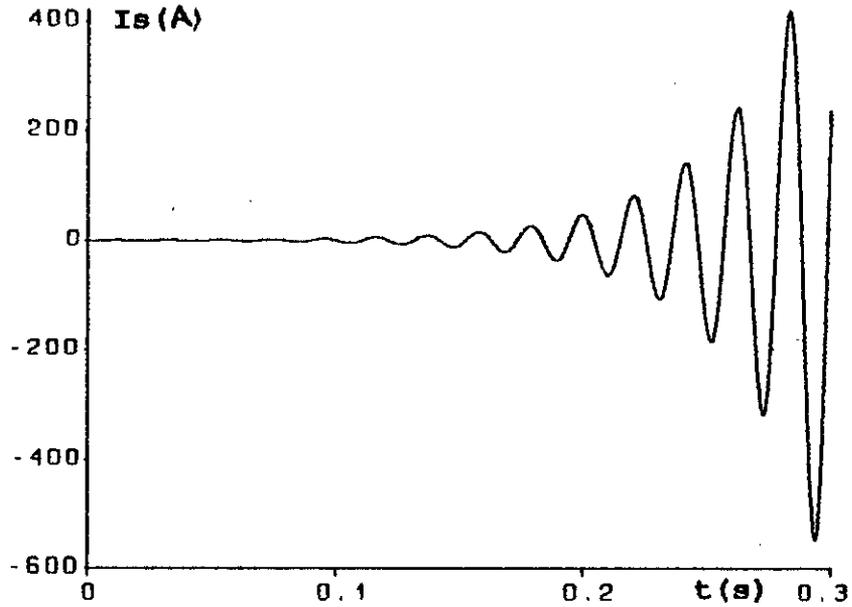


Figure 4.7 Courant de l'auto-amorçage à vide en régime linéaire.

#### 4.6 CONCLUSION:

Lors de cette étude nous avons négligé l'effet de la saturation du circuit magnétique. Le modèle du flux développé sur la base de cette hypothèse est assez simple. Cependant, l'utilisation de ce modèle pour simuler le fonctionnement en génératrice asynchrone, conduit à des résultats divergents. Ceci est dû au fait de négliger l'effet de la saturation qui constitue un phénomène indispensable au fonctionnement autonome de la génératrice asynchrone.

## B-MODELE SATURE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE

### INTRODUCTION:

L'effet de la saturation des machines électriques a pris une importance considérable.

pour améliorer leur modélisation, beaucoup de chercheurs y sont intéressés.

Ce phénomène de saturation joue un rôle important du fait que le point de fonctionnement, et l'évolution de la machine au régime permanent dépendent de la saturation du circuit magnétique.

Dans le cas de la génératrice asynchrone, le rôle de la saturation devient fondamental, et on ne peut le négliger.

En pratique, le problème n'est pas posé, puisque les circuits magnétiques généralement utilisés en électrotechnique sont saturables.

En simulation, nous devons tenir compte cette non-linéarité, par la modélisation de la caractéristique de magnétisation.

### 4.1 MODELISATION DE LA SATURATION:

Dès que l'hypothèse de linéarité du circuit magnétique est écartée, on ne peut plus utiliser des inductances constantes. L'idée utilisée pour modéliser la caractéristique de magnétisation est la décomposition de cette fonction non linéaire en une série de segments de droites est, par défaut de précision, de moins en moins acceptable[8].

De nombreux chercheurs ont alors abordé ce problème de manière à modéliser la caractéristique magnétique par des fonctions analytiques, telles que les polynômes, les fonctions hyperboliques, exponentielles.

Dans notre travail nous avons utilisé les fonctions

exponentielles, car d'après plusieurs auteurs telles fonctions semblent donner les résultats les plus précis[8].

Nous notons aussi que pour modéliser la saturation, il existe plusieurs méthodes, autre que la méthode directe utilisant la caractéristique magnétique. Nous en citons par exemple la modélisation des inductances statiques et dynamiques[6],[14] (dans le cas du modèle des courants de la MAS), est celle utilisant la fonction " degré de saturation "[5].

C'est cette dernière que nous avons utilisée. Elle est , comme les autres méthodes, basée sur la caractéristique magnétique et renseigne indirectement sur l'état magnétique de la machine. Nous la noterons F.

#### 4.2 CONSTRUCTION ET MODELISATION DE LA FONCTION F " DEGRE DE SATURATION "

##### 4.2.1 CONSTRUCTION DE LA FONCTION F:

La figure (4.1) représente la caractéristique de magnétisation réelle de la machine utilisée[5]. Nous l'avons relevée par un essai au synchronisme.

La même figure représente aussi une caractéristique linéaire que nous construisons en supposant que la machine ne sature pas quelque soit le courant magnétisant absorbé.

M est la valeur non saturée de l'inductance magnétisante.

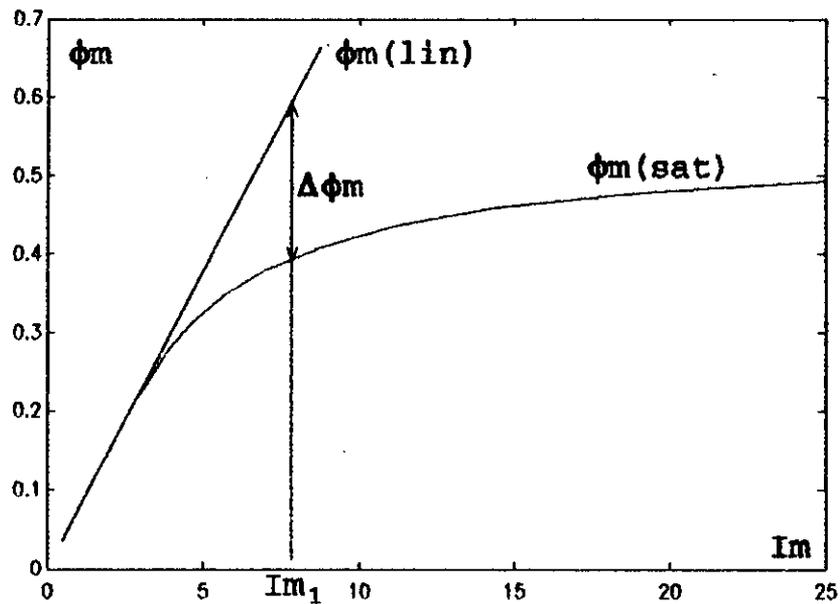


Figure 4.1 Caractéristiques de magnétisation en linéaire et saturé

Pour tout point de fonctionnement, nous définissons la variation  $\Delta\phi_m$  entre les flux  $\phi_m(sat)$  et  $\phi_m(lin)$

$$\Delta\phi_m = \phi_m(lin) - \phi_m(sat) \quad (4.1)$$

$\Delta\phi_m$  : représente l'atténuation du flux magnétisant par rapport à la valeur qu'il aurait sous l'hypothèse linéaire.  
La figure(4.2) montre les variations de  $\Delta\phi_m$  en fonction de  $\phi_m(lin)$ .

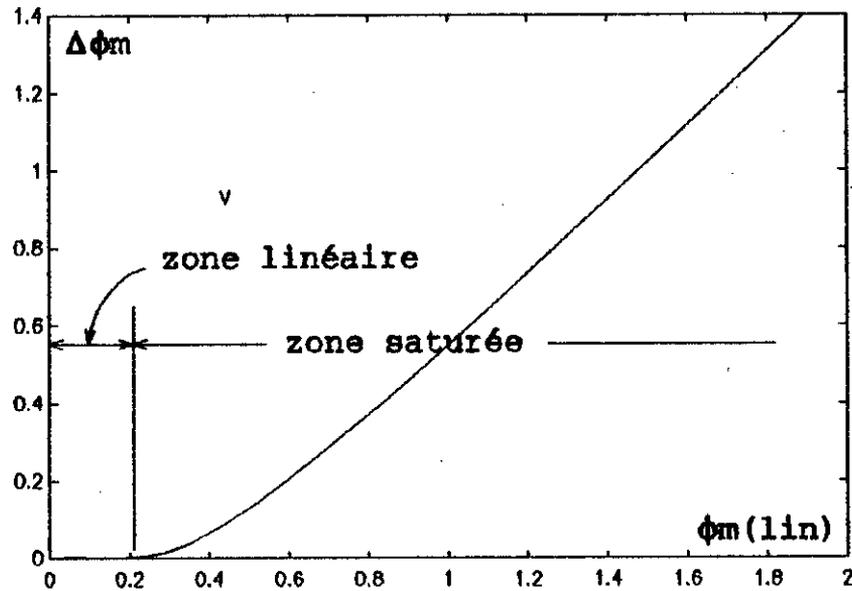


Figure 4.2 Variations de la fonction  $\Delta\phi_m$

Il serait plus convenable de rapporter  $\Delta\phi_m$  au flux  $\phi_m(lin)$  cela aide à mieux représenter l'effet de la saturation, et aussi à gagner en matière temps de calcul durant la simulation.

Nous définissons la fonction "degré de saturation"  $F$  de la manière suivante:

$$F(\phi_m(lin)) = \frac{\Delta\phi_m}{\phi_m(lin)} \quad (4.2)$$

Les variations de cette fonction sont données à la figure(4.3).

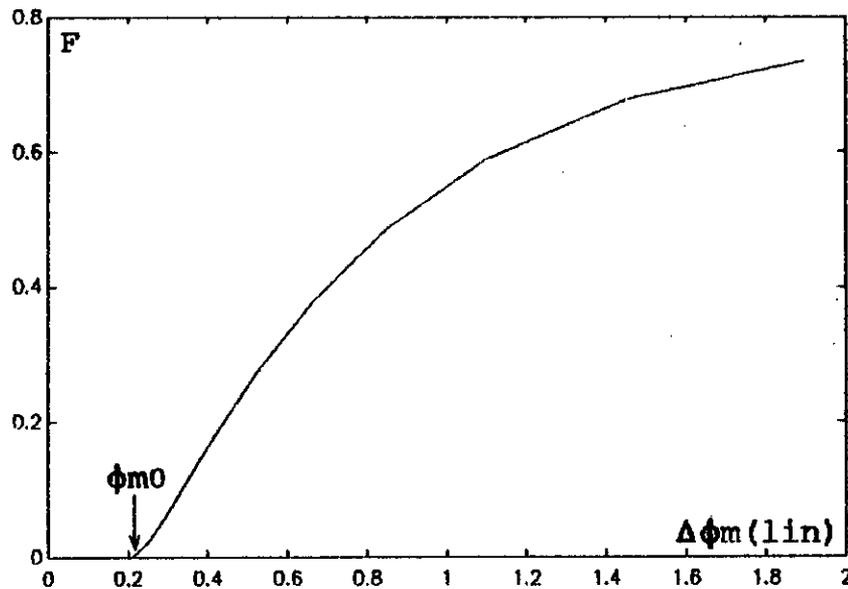


Figure 4.3 Variations de la fonction 'degré de saturation'

Nous remarquons, d'après la figure(4.3) que la fonction  $F$  reste constamment nulle tant que le flux  $\phi_m$  est inférieur à une valeur que nous notons  $\phi_{m0}$ . Cette valeur se trouve à la fin de la zone linéaire sur la caractéristique magnétique.

Sur cette zone linéaire  $\phi_m(\text{lin}) = \phi_m(\text{sat})$  et c'est alors normal que  $F$  y soit nulle.

En se basant sur cette dernière remarque, nous avons décomposé la courbe de  $F$  en deux branches:

- la branche à degré de saturation nul. pour  $\phi_m \leq \phi_{m0}$
- la branche à degré de saturation croissant pour  $\phi_m > \phi_{m0}$

Nous notons alors:

$$F = \begin{cases} F_0 = 0 & \text{Si } \phi_m \leq \phi_{m0} \\ F_1 \neq 0 & \text{Si } \phi_m > \phi_{m0} \end{cases} \quad (4.3)$$

#### 4.2.2 MODELISATION DE LA FONCTION F:

La définition que nous avons donnée à  $F$  (équation 4.1) repose sur des relevés expérimentaux, à partir desquels et au moyen de la méthode des moindres carrés[7] le modèle non-linéaire

de la fonction "degré de saturation" a été élaboré sous la forme suivante:

$$F_1 = C_1 [1 - \exp(-\lambda_1 (\varphi_m(\text{lin}) - \varphi_{m0}))] + C_2 [\exp(\lambda_2 (\varphi_m(\text{lin}) - \varphi_{m0}) / (\varphi_m(\text{lin}) + \varphi_{m1})) - 1] \quad (4.4)$$

$F_0$  étant identiquement nulle,  $F_0 = 0$ .

Ce modèle est limité à une série de deux exponentielles, mais il est tout à fait possible d'augmenter ce nombre pour avoir une meilleure approximation[8].

Le résultat d'identification des coefficients  $\lambda_1$ ,  $C_1$ ,  $\varphi_{mi}$   $i=1,2$  est donnée en annexe .

#### 4.3 INTRODUCTION DE LA SATURATION DANS LE MODELE DYNAMIQUE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE:

Dans le modèle linéaire déjà établi[2], nous avons fait apparaître deux grandeurs très importantes quand à la modélisation de la saturation.

Ces deux grandeurs sont les composantes d'axes d et q du flux magnétisant  $\varphi_{md}$  et  $\varphi_{mq}$ .

L'introduction de la saturation dans le modèle de la génératrice asynchrone repose essentiellement sur la connaissance en chaque point de fonctionnement, de ces deux grandeurs.  $\varphi_{md}$  et  $\varphi_{mq}$  s'expriment par:

$$\varphi_{md}(\text{sat}) = \varphi_{md}(\text{lin}) - \Delta\varphi_{md} \quad (4.5)$$

$$\varphi_{mq}(\text{sat}) = \varphi_{mq}(\text{lin}) - \Delta\varphi_{mq} \quad (4.6)$$

D'après le diagramme de la figure (4.4) le flux magnétisant  $\varphi_m(\text{lin})$  est lié à ses composantes  $\varphi_{md}(\text{lin})$  et  $\varphi_{mq}(\text{lin})$  par:

$$\varphi_m(\text{lin}) = \sqrt{\varphi_{mq}^2(\text{lin}) + \varphi_{md}^2(\text{lin})} \quad (4.7)$$

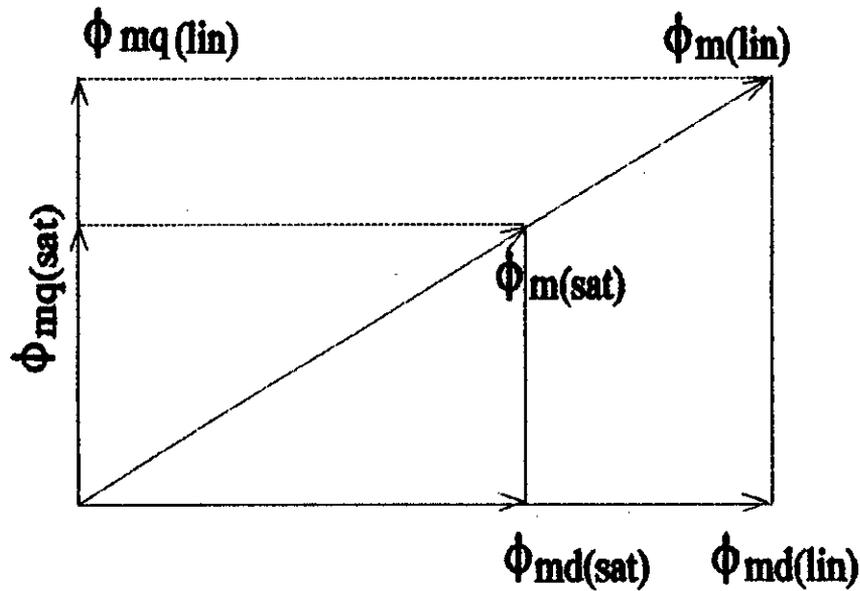


Figure 4.4 Diagramme des vecteurs flux montrant l'effet de la saturation suivant les deux axes q et d.

D'une autre part les variations  $\Delta\varphi_{md}$  et  $\Delta\varphi_{mq}$  vérifient:

$$\Delta\varphi_{md} = \frac{\varphi_{md}(lin)}{\varphi_n(lin)} \Delta\varphi_n \quad (4.8)$$

$$\Delta\varphi_{mq} = \frac{\varphi_{mq}(lin)}{\varphi_n(lin)} \Delta\varphi_n \quad (4.9)$$

or

$$\frac{\varphi_{md}(lin)}{\varphi_n(lin)} \Delta\varphi_n = \varphi_{md}(lin) \frac{\Delta\varphi_n}{\varphi_n(lin)} = \varphi_{md}(lin) \cdot F(\varphi_n(lin)) \quad (4.10)$$

et

$$\frac{\varphi_{mq}(lin)}{\varphi_n(lin)} \Delta\varphi_n = \varphi_{mq}(lin) \frac{\Delta\varphi_n}{\varphi_n(lin)} = \varphi_{mq}(lin) \cdot F(\varphi_n(lin)) \quad (4.11)$$

$$\Delta\varphi_{md} = \varphi_{md}(lin) F(\varphi_n(lin)) \quad (4.12)$$

$$\Delta\varphi_{mq} = \varphi_{mq}(lin) F(\varphi_n(lin)) \quad (4.13)$$

Etant donné  $\varphi_{md}(lin)$  et  $\varphi_{mq}(lin)$ , il est possible de déterminer  $\Delta\varphi_{md}$  et  $\Delta\varphi_{mq}$  (équations 4.7, 4.12 - 4.13).

Ayant déterminé  $\Delta\varphi_{md}$  et  $\Delta\varphi_{mq}$ , il suffit de se reporter aux équations (4.5) et (4.6) pour déduire les deux composantes saturées du flux magnétisant.

$$\varphi_{md}(sat) = \varphi_{md}(lin) [1 - F(\varphi_m(lin))] \quad (4.14)$$

$$\varphi_{mq}(sat) = \varphi_{mq}(lin) [1 - F(\varphi_m(lin))] \quad (4.15)$$

#### 4.3.1 DETERMINATION DES FLUX MAGNETISANTS LINEAIRE ET SATURE

Nous commençons par déterminer les composantes non saturées  $\varphi_{md}(lin)$  et  $\varphi_{mq}(lin)$ . Pour cela, réécrivons leurs expressions en fonction des courants[2]:

$$\varphi_{md}(lin) = M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4.16)$$

$$\varphi_{mq}(lin) = M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4.17)$$

Récrivons aussi les équations des courants en fonction des flux réels (saturés):

$$i_{ds} = \frac{\varphi_{ds}(sat) - \varphi_{md}(sat)}{L_s} \quad (4.18)$$

$$i_{qs} = \frac{\varphi_{qs}(sat) - \varphi_{mq}(sat)}{L_s} \quad (4.19)$$

$$i'_{dr} = \frac{\varphi'_{dr}(sat) - \varphi_{md}(sat)}{L'_r} \quad (4.20)$$

$$i'_{qr} = \frac{\varphi'_{qr}(sat) - \varphi_{mq}(sat)}{L'_r} \quad (4.21)$$

Injectons maintenant les équations (4.18) - (4.21) dans (4.16) et (4.17)

$$\varphi_{md}(lin) = M \left[ \frac{\varphi_{ds}(sat)}{L_s} + \frac{\varphi'_{dr}(sat)}{L'_r} - \varphi_{md}(sat) \left( \frac{1}{L_s} + \frac{1}{L'_r} \right) \right] \quad (4.22)$$

d'où

$$\frac{\varphi_{md}(lin)}{M} + \varphi_{md}(sat) \left( \frac{1}{L_s} + \frac{1}{L'_r} \right) = \left[ \frac{\varphi_{ds}(sat)}{L_s} + \frac{\varphi'_{dr}(sat)}{L'_r} \right] \quad (4.23)$$

En exprimant  $\varphi_{md}(sat)$  en fonction de  $\varphi_{md}(lin)$  D'après (4.5)

et (4.6) nous aurons:

$$\frac{\varphi_{md}(lin)}{M} + \varphi_{md}(lin) \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right) - \Delta\varphi_{md} \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right) = \left[ \frac{\varphi_{ds}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{dr}}{L'_{1r}} \right] \quad (4.24)$$

$$\varphi_{md}(lin) \left[ \frac{1}{M} + \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right] = \Delta\varphi_{md} \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right) + \left( \frac{\varphi_{ds}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{dr}}{L'_{1r}} \right) \quad (4.25)$$

d'où alors,

$$\varphi_{md}(lin) = L_{ad} \left[ \Delta\varphi_{md} \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right) + \left( \frac{\varphi_{ds}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{dr}}{L'_{1r}} \right) \right] \quad (4.26)$$

De la même manière nous trouvons:

$$\varphi_{mq}(lin) = L_{aq} \left[ \Delta\varphi_{mq} \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right) + \left( \frac{\varphi_{qs}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{qr}}{L'_{1r}} \right) \right] \quad (4.27)$$

$L_d$  et  $L_q$  sont déjà définies.

Pour déduire les expressions de  $\varphi_{md}(sat)$  et  $\varphi_{mq}(sat)$  nous utilisons de nouveau les équations (4.5) et (4.6):

$$\varphi_{md}(sat) = \Delta\varphi_{md} \left[ L_{ad} \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} \right) - 1 \right] + L_{aq} \left( \frac{\varphi_{ds}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{dr}}{L'_{1r}} \right) \quad (4.28)$$

or

$$L_{ad} \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} - 1 \right) = L_{ad} \left( \frac{1}{L_{1s}} + \frac{1}{L'_{1r}} - \frac{1}{L_{aq}} \right) = \frac{L_{ad}}{M} \quad (4.29)$$

D'où alors finalement:

$$\varphi_{md}(sat) = L_{ad} \left( \frac{\varphi_{qs}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{qr}}{L'_{1r}} \right) - \frac{L_{ad}}{M} \Delta\varphi_{md} \quad (4.30)$$

De la même manière nous obtenons l'expression de  $\varphi_{mq}(sat)$ :

$$\varphi_{mq}(sat) = L_{aq} \left( \frac{\varphi_{qs}}{L_{1s}} + \frac{\varphi'_{qr}}{L'_{1r}} \right) - \frac{L_{aq}}{M} \Delta\varphi_{mq} \quad (4.31)$$

Par l'établissement de ces quatre équations (4.26), (4.27), (4.30) et (4.31) nous terminons la modélisation de l'effet de la saturation dans les équations de la génératrice asynchrone.

Ainsi nous obtenons le modèle dynamique des flux en régime saturé de la G.A. en associant les équations: (4.61-A)-(4.66-A) des tensions, (4.81-A)-(4.83-A) de l'auto-excitation et (4.26-B), (4.27-B), (4.30-B) et (4.31-B) des flux magnétisants linéaire et saturé.

#### 4.4 SIMULATION DE L'AUTO-AMORÇAGE A VIDE DE LA G.A.

Le modèle dynamique de la G.A. qu'on vient d'établir est essentiellement un système d'équations différentielles non linéaires.

La simulation du fonctionnement en régime transitoire et permanent de la génératrice asynchrone, revient donc à la résolution de ce système d'équations différentielles.

On connaît plusieurs méthodes permettant la résolution de tels systèmes[7]; Euler, Runge-kutta d'ordre 3, d'ordre 4 et bien d'autres.

Nous avons utilisé la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 à pas variables.

Les paramètres de la machine, dont nous avons simulé le fonctionnement, sont donnés en annexe.

Nous présentons à la fin de cette partie des résultats de simulation, ainsi que d'autres obtenus expérimentalement. Ces résultats décrivent le transitoire d'auto-amorçage à vide de la Générateur asynchrone.

#### 4.5 LES RESULTATS DE SIMULATION:

les figures (4.5),(4.6),(4.7) représentent les résultats de la simulation (la tension d'auto-amorçage à vide ,le courant statorique et le courant rotorique) sur une batterie de condensateurs de 90uF et le rotor étant entraîné par un moteur à courant continu[5].

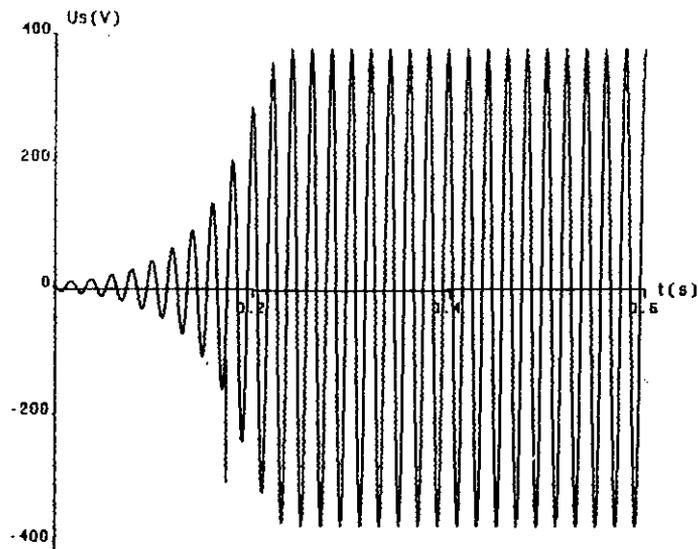


figure 4.5: tension d'auto-amorçage à vide,  $N=1500$ (tr/mn)  
et  $C=90\mu\text{F}$

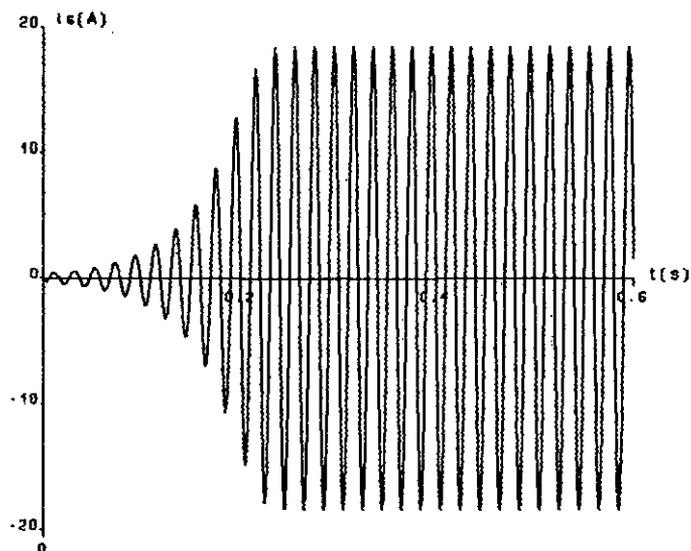


figure 4.6: courant statorique à vide,  $N=1500$ (tr/mn)  
et  $C=90\mu\text{F}$

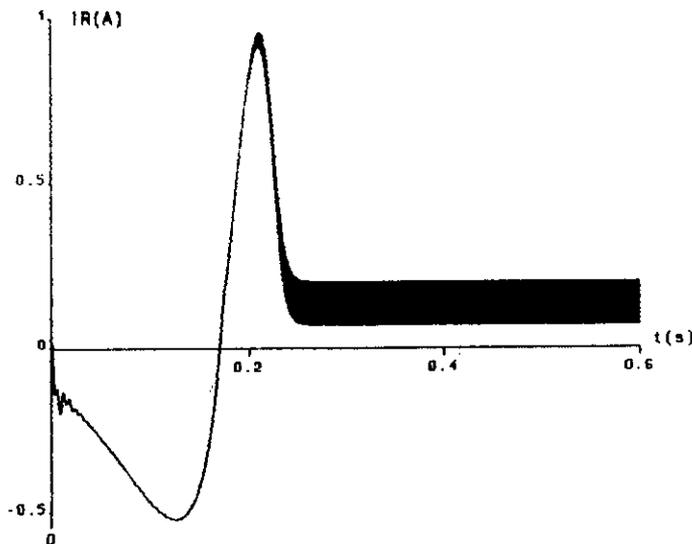


figure 4.7: courant rotorique à vide .N=1500(tr/mn)  
et C=90uF

La première (figure 4.5) représente la tension entre phases qui atteint son régime permanent 376.67 V (valeur maximale), après un transitoire qui dure 0.246 sec.

La seconde (figure 4.6) représente le courant statorique. Son amplitude étant de 18.85 A, son transitoire dure aussi 0.246 sec.

La troisième (figure 4.7) représente le courant rotorique, dont le transitoire dure aussi environ 0.246 sec. Son régime permanent étant sinusoïdale très lent.

#### 4.6 LES RESULTATS PRATIQUE:

les figures ci-dessous représentent les résultats pratique (la tension d'auto-amorçage à vide, le courant statorique, le courant rotorique) qui ont été acquis dans les même conditions de la simulation.

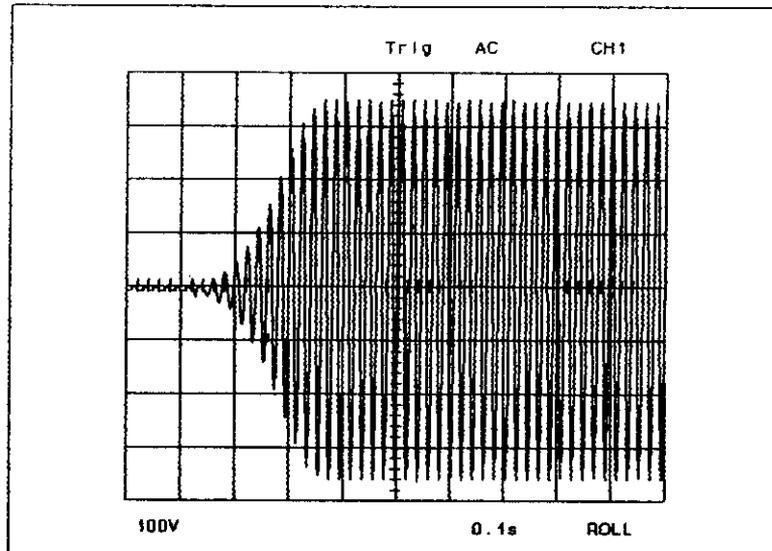


Figure 8: Tension d'auto-amorçage à vide ,à N=1500(tr/mn)  
et C=90uF

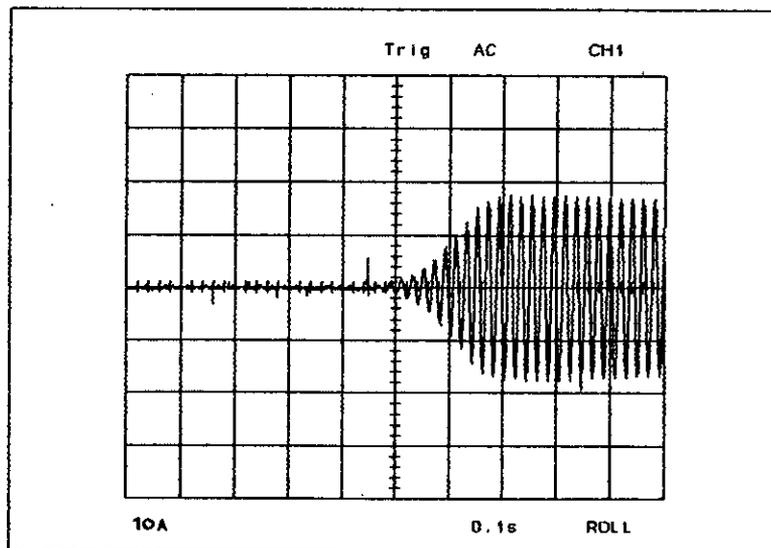


Figure 9: Courant statorique à vide à N=1500(tr/mn)  
et C=90uF

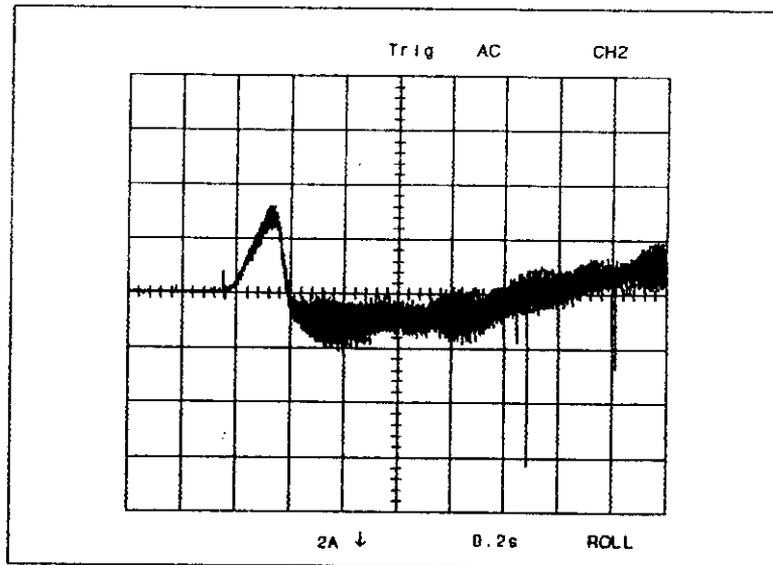


figure 4.10: Courant rotorique d'auto-amorçage à vide.  
à  $N=1500$ (tr/mn) et  $C=90\mu F$

#### 4.7 VALIDATION DU MODELE SATURE:

Les résultats expérimentaux que nous avons exposé ci-dessus ont été relevés dans des conditions analogues à celles de la simulation.

Cette analogie des conditions d'opération en simulation et en pratique laisse prévoir des résultats comparables.

Sur la figure (4.8) la tension statorique présente une amplitude en régime établi de 379 V (écart de 0.6 % avec la simulation), et un transitoire de 0.24 sec ( écart de 2.5 % avec la simulation ).

L'amplitude du courant statorique en régime établi (figure 4.9) étant de 18.1 A (écart de 1.7 % avec la simulation).

Cette première comparaison montre une bonne concordance des résultats expérimentaux et de simulations.

Cette concordance des résultats expérimentaux et de simulation confirme la validité du modèle saturé proposé.

#### 4.8 CONCLUSION :

Le modèle linéaire bien qu'il soit utilisable pour simuler le fonctionnement en moteur de la machine asynchrone, a montré

sa défaillance dans le cas du fonctionnement en génératrice asynchrone auto-excitée.

La saturation du circuit magnétique de la G.A.S est un phénomène indispensable pour son fonctionnement en auto-excitation.

Nous avons alors développé une méthode d'introduction de la saturation dans le modèle dynamique de la génératrice asynchrone.

Un modèle dynamique saturé a été ensuite établi.

Nous avons enfin exposé quelques résultats de simulation et d'expérimentation.

La bonne concordance constatée entre ces résultats a permis de vérifier la validité du modèle dynamique proposé dans les limites des hypothèses qui ont été mentionnées.

# ***CONCLUSION GENERALE***

## CONCLUSION GENERALE:

A travers ce travail, nous avons présentés une certaine contribution à la modélisation de la génératrice asynchrone en régime statique et dynamique.

une machine asynchrone peut fonctionner en génératrice autonome en l'entraînant par un moteur auxiliaire si une capacité est connectée à ces bornes et si certaines conditions sont réalisées à savoir:

- existence du magnétisme rémanent,
- capacité de valeur convenable,
- vitesse de rotation suffisante.

La tension délivrée par la génératrice et la fréquence du courant statorique dépendent des facteurs suivantes:

- la capacité des condensateurs mise en parallèle.
- la vitesse d'entraînement de la machine.
- la puissance débitée.
- le facteur de puissance.

Un programme de calcul basé sur la modélisation de la courbe de magnétisation et la méthode de Newton-Raphson a été développé, donne des résultats précises. L'avantage de ce programme réside dans sa souplesse et sa rapidité. Ce programme est un moyen approprié pour l'examen et l'étude des effets de variation de la capacité, de la vitesse et de la charge sur les caractéristiques de la génératrice en régime établi.

L'association de la génératrice asynchrone avec des compensateurs automatiques de l'énergie réactive ainsi que des dispositifs statique de réglage de la vitesse, pourrait constituer une source d'énergie alternative très avantageuse et économique.

Ainsi nous avons présentés le modèle dynamique en régime linéaire et saturé. L'utilisation du modèle linéaire pour simuler le fonctionnement en génératrice asynchrone conduit à des résultats divergentes et ne reflètent donc aucune réalité pratique.

Lorsqu'en tenant compte de la saturation, le modèle présente une bonne similitude avec la pratique, ce qui montre la nécessité d'introduire la saturation dans le modèle dynamique pour étudier le fonctionnement de la génératrice asynchrone.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

## BIBLIOGRAPHIE:

- [1] MICHEL MOULLE, CHRISTAN PETIT, "génératrice asynchrone, technique de l'ingénieur D452".
- [2]: P.C. KRAUSE, analysis of electric machinery, edition MC-GRAW HILL 1987.
- [3]: J. CHATELAIN, machine électrique, tome 1, edition dunod 1983.
- [4]: PH. BARRET, regimes transitoires des machines électrique tournantes, edition eyrolles 1982.
- [5]: A. NESBA, these de magister à paraitre ENP.
- [6]: VAS, K. E. HALLENIUS, J. E. BROWN, cross-saturation in smooth-air-gap electrical machines, IEEE transaction on energy conversion, vol 1, EC-1, march 1986.
- [7]: M. BOUMAH RAT, A. GOURDIN, methodes numeriques appliquées, edition OPU 10-93.84, NO. 11, novembre 1965.
- [8]: M. BOUSSAK, contribution à la modelisation entrées sortie et l'identification parametrique des machines à induction, thèse de doctorat, soutenue le 21 juin 1989.
- [9]: A. K. ALJABRI, A. L. ALOLAH, capacitance requirement for isolated self excited induction generator, IEEE proc B, vol. 137, No: 3. 1990, pp: 154-159.
- [10]: N. H. MALIK, A. H. BAHRANI, influence of the terminal capacitor on the performance caractéristique of a self-excited induction generator, IEEE proc c, vol. 137, No. 2. 1990, pp: 168-173.
- [11]: A. K. TANDOM, S. S. MURTHY, G. J. BERG, stady state analysis of capacitor self excited induction generator, IEEE 1994.
- [12]: M. P. MATHIVET, revue general de l'électricité, comportement du complexe machine asynchrone-condensateur, octobre 1957.
- [13]: S. S. MURTHY, H. S. NAGARAJ, design-based computational procedure for performance prediction and analysis of self excited induction generators using motor design packages, IEEE, proc. vol. 135, pt. b, No. 1. january 1988.
- [14]: S. MEKHTOUB, M. IVANES, naissance de l'auto-amorçage d'une machine asynchrone journal of technologie de l'ENP, N°10, 1994

***ANNEXE***

plaque signalitique de la machine asynchrone:

- MAS triphase, 4 pôles, stator en triangle.
- puissance nominale : 3.5 kW.
- tension nominale : 220/380 V
- courant nominal : 8/14 A
- frequence : 50 Hz
- facteur de puissance nominale : 0.8
- vitesse nominale 1410 tr/min.

l'identification de la machine asynchrone á donné les resultats suivants:

- resistance statorique:  $R_s=1.4 \Omega$
- resistance rotorique :  $R_r=2.15 \Omega$
- reactance de fuite statorique:  $X_s=3.114 \Omega$
- reactance de fuite rotorique :  $X_r=3.114 \Omega$
- reactance de magnetisation non saturé:  $X_m=71.4 \Omega$
- rapport de transformation stator/rotor:  $m=1.6$

les coefficients de la fonction degré de saturation:

C1=9.6578608E-001.  
C2=2.0872764E-001.  
LAMDA1=5.3666882E-003.  
LAMDA2=-2.1995180E+000  
PHIM0=55mWb.  
PHIM1=10mWb.

les matrices de transformation de parck:

$$[A_p] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[A_p^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

$$[A_r] = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\beta) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$[A_r^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) & 1 \\ \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

avec:

$$\beta = \theta - \theta_r.$$

$\theta$ : abscisse angulaire du référentiel arbitraire par rapport au stator ( $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ).

$\theta_r$ : abscisse angulaire d'une phase rotorique par rapport au stator ( $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ ).