

4/04

Ministère de la recherche scientifique et de l'enseignement supérieur
Ecole Nationale Polytechnique

Département de génie électrique
Spécialité électrotechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études pour l'obtention
Du diplôme d'ingénieur d'état
En Electrotechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Thème

Etude des performances d'un générateur asynchrone

Proposé et dirigé par:
Mr. S.MEKHTOUB
Mr. A.NESBA

Présenté par:
Mr. BENKHELLAT Naïm
Mr. BOUCHEMAL Rachid

Promotion 2004

Résumé:

La machine asynchrone peut fonctionner en générateur autonome. Dans ce fonctionnement le générateur fournit de la puissance active et reçoit du réactif à partir d'une batterie de condensateurs. Dans ce travail on s'intéresse à l'étude des performances du générateur asynchrone en spécifiant les paramètres qui influent sur la tension et la fréquence et la durée de rétablissement de la tension.

ملخص
التشغيل الذاتي للمولد الثلاثي الطور اللامتزامن الذي ينتج استطاعة فعالة يحتاج الى استطاعة مترددة توفرها له مكثفات. نهتم بدراسة العوامل التي تؤثر على الاهتزاز وعلى مدة التشغيل الانتقالي للمولد الثلاثي الطور اللامتزامن.

Abstract:

Induction machine can be used as autonomous generator under some conditions. Asynchronous generator is fed of reactive energy by capacitors, and gives active energy. We are interested to study asynchronous generator performances, by specifying influent parameters on voltage, frequency and transient state.

Mots clés:

Générateur asynchrone, autoéxcité, fonctionnement autonome, autoamorçage, paramètres.

Key words:

Induction generator, autoexcited, autonomous, transient state, frequency.

الكلمات المفتاحية:
مولد الثلاثي الطور اللامتزامن، ذاتي التحريض، تشغيل ذاتي.

DEDICACES

Je dédie ce travail aux deux femmes qui de l'enfant que j'étais ont fait l'homme que je suis :

Ma mère et ma soeur.

Je dédie ce travail aussi à la femme qui de l'homme que je suis fera l'homme comblé que je serai.

Ce travail est aussi dédié à mon père, mes frères

A, mes amis : Amara, Azzedine, Farouk, Soufiane, Ravah... Et tous ceux que je ne citerai pas

A, mes amies : Rym, Farah, Fatiha.

A tous mes collègues de promotion.

A la terre et les oliviers qui m'ont vu naître.

Naim

Je dédie ce travail, à mes parents, à mes frères, à ma sœur, à tout mes amies d'enfance, à tous mes collègues de promotion, et à tous ceux qu'ont contribué à ma formation de près ou de loin.

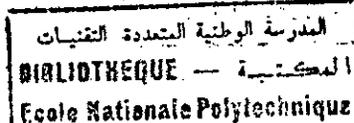
Rachid

REMERCIEMENTS

Nous tenons exprimer nos plus vifs remerciements et notre profonde gratitude à M^r Said MEKHTOUB et M^r Ali NESBA pour leur disponibilité, leur soutien constant et conseils ainsi que les moyens qu'ils ont mis à notre disposition pour la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi M^r O.TOUHAMI pour sa présence permanente au laboratoire de machines électriques, et sa précieuse aide, qui a permis de surmonter certaines difficultés au cours de ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qu'ont contribué à ce travail, en le sachant ou non.



| | | |
|-------------|---|-----------|
| I | Introduction | 7 |
| I.1 | Description | 7 |
| I.1.1 | Fonctionnement non autonome | 7 |
| I.1.2 | Fonctionnement autonome : | 8 |
| I.2 | Utilisation pratique de la générateur asynchrone | 8 |
| I.2.1 | Utilisation classique | 8 |
| I.2.2 | Freinage hyper synchrone | 9 |
| I.2.3 | Utilisation mixte moteur générateur | 9 |
| I.3 | Danger de l'autoamorçage accidentel | 9 |
| II | Introduction | 12 |
| II.1 | Transformation des variables d'un référentiel stationnaire au référentiel arbitraire | 12 |
| II.2 | Transformation des variables d'un circuit tournant au référentiel arbitraire | 14 |
| II.3 | Transformation d'un système triphasé équilibré de tension au référentiel arbitraire | 16 |
| II.4 | Les systèmes de référence les plus utilisés | 17 |
| II.5 | Modélisation de la machine asynchrone sous l'hypothèse de la linéarité du flux | 17 |
| II.5.1 | Equation des tensions exprimées en variables de phase : | 17 |
| II.5.2 | Equations des tensions dans le référentiel arbitraire | 20 |
| II.5.3 | Equations des flux dans le référentiel arbitraire : | 22 |
| II.6 | Equations d'auto excitation | 25 |
| III | Modèle saturé du générateur asynchrone | 29 |
| IV | Modélisation de la saturation | 31 |
| IV.1 | Modélisation de fonction de degré de saturation F | 32 |
| IV.1.1 | Introduction de la saturation dans le modèle dynamique de la machine asynchrone | 33 |
| IV.1.2 | Détermination des flux magnétisants linéaire et saturés | 34 |
| IV.2 | Mise en équation de l'auto excitation à vide : | 36 |
| IV.2.1 | Condition sur la vitesse : | 38 |
| IV.2.2 | Condition sur la capacité : | 38 |
| IV.3 | Interprétation physique de l'autoamorçage : | 38 |
| IV.4 | Paramètres qui conditionnent l'évolution de la tension | 39 |
| IV.4.1 | Influence de la vitesse sur la tension générée par le générateur en régime statique | 39 |
| IV.4.2 | Influence de la capacité sur la tension générée par le générateur en régime statique | 41 |
| V | Introduction | 44 |
| V.1 | Modélisation de la charge | 44 |
| V.2 | Mode opératoire | 45 |
| V.3 | Influence de la résistance rotorique sur la durée de rétablissement de la tension | 46 |
| V.3.1 | Variation de la durée transitoire en fonction de la résistance rotorique à vide | 46 |
| V.3.2 | Variation de la durée transitoire en fonction de la résistance rotorique en charge | 47 |
| V.4 | Paramètres qui influent sur la variation de la résistance critique | 48 |
| V.4.1 | Variation de la résistance critique en fonction de la résistance rotorique | 48 |
| V.4.2 | Variation de la résistance critique en fonction de la capacité | 49 |
| V.5 | Influence de la charge | 50 |
| V.5.1 | Variation de la tension en fonction de la résistance de la charge | 50 |
| V.5.2 | Variation de la tension en fonction de la charge | 51 |
| V.6 | Variation de la durée transitoire en fonction de la charge | 52 |

| | | |
|-------|---|----|
| IV.7 | Variation de la durée transitoire en fonction de la charge | 52 |
| IV.8 | Variation de la fréquence en fonction de la charge | 53 |
| IV.9 | Variation du glissement en fonction de la charge | 54 |
| IV.10 | Variation de la durée de rétablissement de la tension en fonction de la résistance de la charge | 55 |
| IV.11 | Variation du glissement en fonction de la résistance de la charge | 56 |

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation des machines asynchrones comme générateurs est moins courante que celle des alternateurs synchrones. En effet, l'emploi des moteurs asynchrones comme générateurs présente plusieurs avantages, c'est une machine peu coûteuse et simple.

C'est une machine robuste c.à.d elle peut supporter une survitesse sans danger.

Le moteur asynchrone utilisé comme alternateur rencontre le problème de son excitation. Pour le générateur synchrone l'excitation est assurée séparément par des enroulements particuliers prévus pour cela. Dans le cas d'un générateur asynchrone « accroché » à un réseau existant celui ci lui fournit son énergie réactive.

On peut améliorer le facteur de puissance par l'utilisation de capacités. Certains disposent de batteries de capacité qui seront enclenchées suivant la charge du générateur.

Dans le cas d'un réseau isolé il faudra fournir le courant d'excitation par des capacités. La tension aux bornes du générateur asynchrone chute rapidement avec l'augmentation de la charge. La tension est plus dépendante de la vitesse que dans un alternateur synchrone [1]. Une faible chute de vitesse engendre une chute importante de tension.

A ce niveau l'utilisation d'alternateurs asynchrones couplés avec des condensateurs n'est envisageable que lorsque la charge est principalement résistive

Les avantages principaux par rapport à d'autres systèmes (alternateur synchrone avec régulateur mécanique ou électronique) sont sa fiabilité et le fait que la protection contre les surcharges est inhérente au système de contrôle [2].

Le prix est de moitié par rapport aux autres systèmes mais il faut tenir compte du coût relatif dans le prix global de la centrale. Cet avantage est de taille quand il faut renouveler les machines

Les inconvénients sont la variation importante de la fréquence (5à10%) et la difficulté d'alimenter des charges inductives importantes tels que des moteurs électriques. Dans ce cas des modules importants de condensateurs devront être ajoutés.

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier la variation de la tension de sortie en amplitude et en fréquence en fonction de certains paramètres. Pour ce faire, nous avons adopté le plan suivant :

Des notions générales concernant le générateur asynchrone sont données dans le chapitre des *Généralités*, puis nous exposons dans le premier chapitre la modélisation de la machine asynchrone dans la théorie des deux axes. Le chapitre deux est consacré à la transformation triphasé-biphasé.

Ceci fait, nous ne pouvons étudier le générateur asynchrone, sans parler de la saturation, qui représente un phénomène important en fonctionnement générateur, il nous a donc semblé impératif de détailler la modélisation du flux et ce en régime dynamique et qui correspond au troisième chapitre.

La dernière partie du présent travail, est consacrée à l'étude de la variation de la tension de sortie du générateur en amplitude et fréquence ainsi que la variation de la durée transitoire du rétablissement de la tension.

Généralités

Générateur asynchrone et son fonctionnement

I Introduction

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

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

Nous donnerons quelques applications pratiques du générateur dans ces deux modes de fonctionnement, puis les avantages et les inconvénients de celui-ci.

I.1 Description

Le générateur asynchrone est une machine utilisée pour produire de l'énergie électrique. On récupère cette énergie sur son stator. Elle est généralement triphasée avec un rotor en cage d'écureuil. Mais elle peut être monophasée, comme elle peut être aussi à rotor bobiné [3].

Le générateur asynchrone présente deux modes de fonctionnement différents :

- Fonctionnement non autonome (couplée au réseau).
- Fonctionnement autonome (isolée, auto excitée).

Nous nous intéressons essentiellement au second mode de fonctionnement.

I.1.1 Fonctionnement non autonome

Dans ce mode de fonctionnement, le générateur est couplé à un réseau assez puissant. Ce dernier impose alors au générateur sa tension et la fréquence. Par ailleurs il lui fournit automatiquement l'énergie réactive dont il a besoin pour son fonctionnement.

Initialement la MAS fonctionne en moteur alimenté par le réseau puis et grâce au dispositif d'entraînement (MCC). La MAS passe du fonctionnement en moteur à celui en générateur dès que son glissement devient négatif.

Le schéma correspondant à ce mode de fonctionnement est donné sur la figure ci dessous

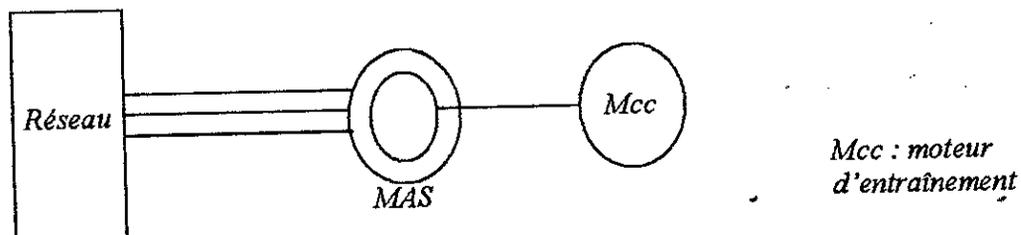


Figure (1.1) : Générateur asynchrone couplé au réseau

1.1.2 Fonctionnement autonome :

Dans ce mode de fonctionnement le GA est isolé du réseau et entraîné à une vitesse suffisante. Le fonctionnement autonome nécessite l'apport de l'énergie réactive qui dans ce cas est fournie par les condensateurs.

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

En fonctionnement autonome (GA isolé.) on monte en parallèle avec le stator du GA une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive nécessaire.

La machine doit remplir les conditions suivantes :

- 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'auto amorcer en générateur. Nous montrerons plus tard pourquoi ces deux conditions sont nécessaires [4]

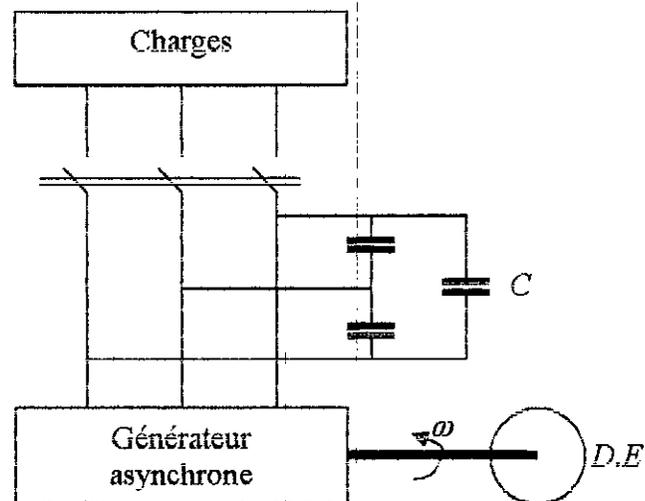


Figure (1.2) schéma de fonctionnement du générateur asynchrone autonome

1.2 Utilisation pratique de la générateur asynchrone

1.2.1 Utilisation classique

Il est utilisé en mode autonome à proximité des petites chutes d'eau, dans les microcentrales.

Du fait qu'on tolère certaines variations de la tension et de la fréquence il n'est pas nécessaire de prévoir des régulateurs, comme il existe aussi des GA autorégulés.

Pour les petits groupes électrogènes de quelques kVA certains constructeurs proposent des GA sans régulation ; ces GA ayant des courbes caractéristique très plates. La tension reste dans une plage de plus ou moins 10% pour une charge active allant de 0 à la pleine charge.

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

On trouve aussi des GA 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 domestique. On admet couramment des variations de tension et ou de fréquence de l'ordre de 20% [1].

Notons, enfin, que le générateur asynchrone a en plus de son utilisation classique, d'autre utilisation particulières. En effet certains types d'installations utilisent des machines asynchrones tantôt en moteur tantôt en génératrice.

Citons deux exemples d'utilisation courante :

1.2.2 Freinage hyper synchrone

Dans ce mode de fonctionnement, un moteur asynchrone est utilisé pour entraîner une charge, et aussi pour freiner cette dernière lorsqu'elle devient entraînée. Le moteur est alors autoamorçé en générateur. 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 minoteries. 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 générateur et envoie l'excédent de puissance au réseau autonome le GA présente l'avantage de :

- Simplicité et sécurité d'utilisation, couplage plus facile, appareillage plus simple
En mode autonome le GA présente un autre avantage à savoir :
- La possibilité d'alimentation d'un réseau isolé surtout lorsqu'il s'agit d'installations simple (besoins ménagers, chauffage, charges résistives).
Cet avantage est très important lorsque ce réseau se trouve dans une région éloignée du réseau principal.

Ceci évite les problèmes de connections des réseaux de transport d'électricité, le GA n'exige alors qu'un minimum d'entretien et de maintenance.

L'inconvénient le plus important du GA est son inaptitude à produire de l'énergie réactive dont lui-même a besoin [5].

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

1.3 Danger de l'autoamorçage accidentel

A l'ouverture de l'interrupteur 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.

CHAPITRE I

Modélisation de la machine asynchrone

II Introduction

Pour notre étude nous avons jugé nécessaire de faire un rappel des transformations triphasé-biphasé.

Dans ce chapitre nous présentons la transformation triphasé-biphasé [4] dont l'intérêt principal est de simplifier le système en éliminant les coefficients dépendant du temps, aboutissant ainsi à un système beaucoup plus facile à étudier.

II.1 Transformation des variables d'un référentiel stationnaire au référentiel arbitraire

Pour une machine asynchrone triphasée les enroulements des circuits statoriques réels et transformés sont représentés par la fig. (1.1)

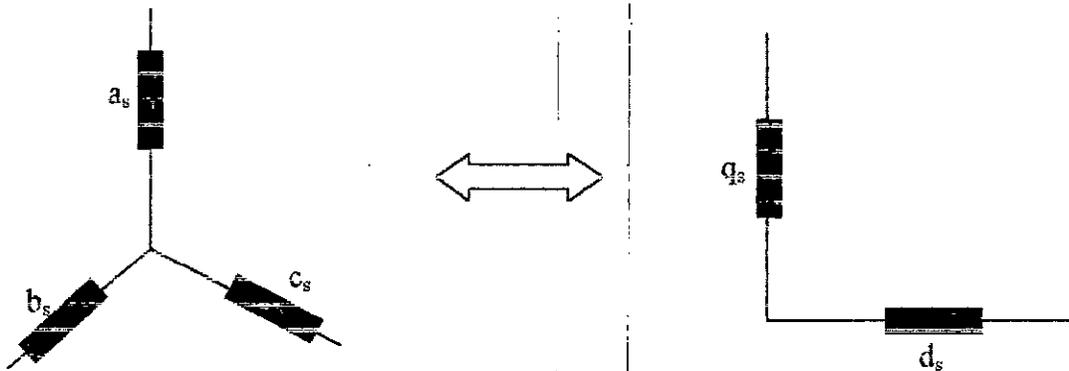


Figure 1.3 : Circuit statorique réel et transformé

Soient V_{ds} , V_{qs} , V_{os} les composantes relatives du système et V_{as} , V_{bs} , V_{cs} les composantes réelles.

Les vecteurs des tensions réelles et des composantes relatives sont données par :

$$V_{abcs} = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^t \quad (1.1)$$

$$V_{qdos} = [V_{qs} \ V_{ds} \ V_{os}]^t \quad (1.2)$$

Les composantes relatives V_{qdos} sont déterminées à partir des grandeurs réelles suivant l'équation (1.3)

$$V_{qdos} = P_s(\theta) V_{abcs} \quad (1.3)$$

Avec

$$P_s(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Et

$$P_s^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$P_s(\theta)$ étant la matrice de transformation de R.H Park et $P_s(\theta)^{-1}$ son inverse.

Le référentiel tourne à une vitesse arbitraire ω , l'angle θ est l'abscisse angulaire du référentiel arbitraire par rapport à l'axe de la phase a qui est donnée par la relation suivante:

$$\theta_s = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (1.7)$$

$\theta(0)$ est la valeur initiale de θ

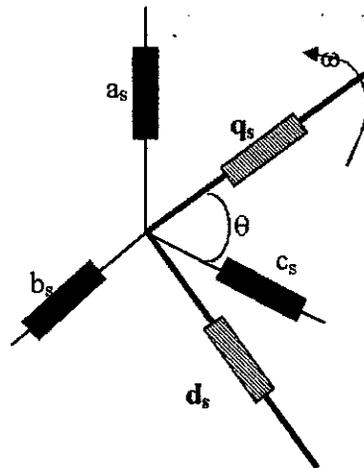


Figure 1.4 : représentation géométrique de la transformation triphasé-biphasé

Où s désigne le stator.

II.2 Transformation des variables d'un circuit tournant au référentiel arbitraire

Le circuit tournant donné par la figure suivante. Représente les bobines rotoriques d'une machine asynchrone. Dans ce cas le circuit à transformer tourne à une pulsation ω_r , par rapport au stator (phase a_s).

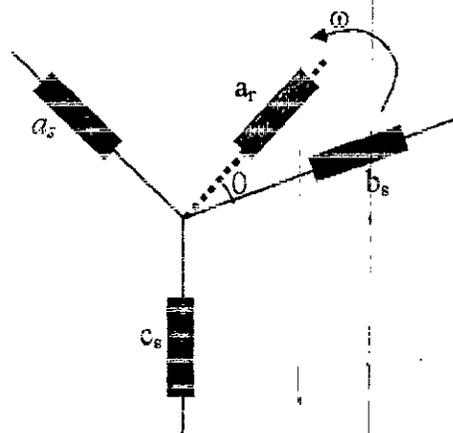


Figure 1.5 : Circuit triphasé tournant

La transformation des variables (V_{ar} , V_{br} , V_{cr} , i_{ar} , i_{br} et i_{cr}) du circuit tournant au référentiel arbitraire revient à déterminer les composantes relatives (V_{qs} , V_{ds} , V_{os} , i_{qs} , i_{ds} et i_{os}) dans le système d'axes q , d , o tournant à une pulsation arbitraire ω_a .

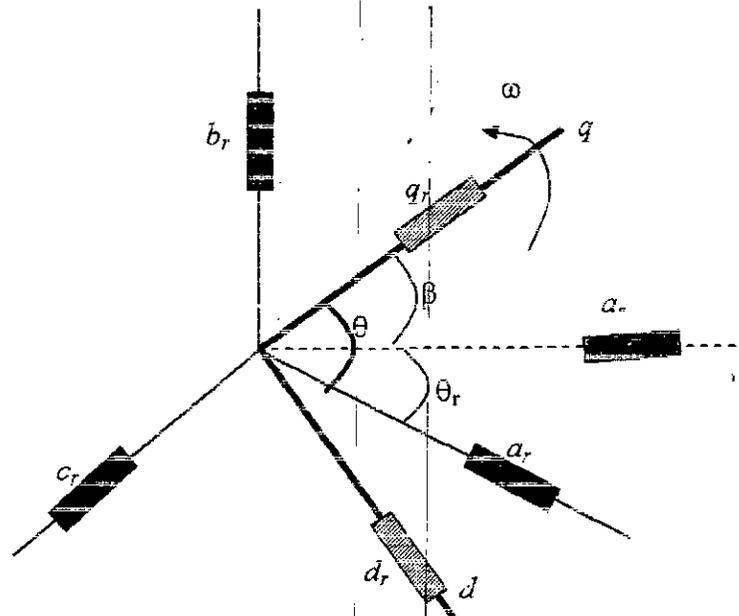


Figure 1.6 : représentation géométrique de la transformation triphasé-biphasé (Circuit tournant)

Posons :

$$\begin{cases} V_{abcr} = \begin{bmatrix} V_{ar} & V_{br} & V_{cr} \end{bmatrix}^t \\ V_{qdor} = \begin{bmatrix} V_{qr} & V_{dr} & V_{or} \end{bmatrix}^t \\ i_{abcr} = \begin{bmatrix} i_{ar} & i_{br} & i_{cr} \end{bmatrix} \\ i_{qdor} = \begin{bmatrix} i_{qr} & i_{dr} & i_{or} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1.8)$$

Les composantes relatives des tensions V_{qdor} sont liées aux tensions par phases V_{abcr} par les deux relations suivantes :

$$V_{qdor} = P_r(\beta) V_{abcr} \quad (1.9)$$

$$V_{abcr} = P_r^{-1} V_{qdor} \quad (1.10)$$

$P_r(\beta)$ représente la matrice de la transformation des circuits tournants au référentiel arbitraire et $P_r^{-1}(\beta)$ sa matrice inverse. Elles sont données par :

$$P_r(\beta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \beta & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \beta & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$$P_r^{-1}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 1 \\ \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Où $\beta = \theta - \theta_r$ représente l'abscisse angulaire du référentiel arbitraire par rapport à l'axe de la phase a_r , du circuit tournant et θ_r est donnée par :

$$\theta_r = \int_0^1 \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad (1.13)$$

Où :

θ : Abscisse angulaire de la phase a_r du circuit par rapport à la phase as

θ_r : Valeur initiale de θ ,

L'indice r est relatif au rotor de la machine asynchrone.

II.3 Transformation d'un système triphasé équilibré de tension au référentiel arbitraire

Dans cette partie nous nous intéressons à l'application de la transformation à un système de tensions triphasées équilibrées qui représentent l'alimentation de la machine.

Ces tensions sont données par :

$$\begin{cases} V_{as} = \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t) \\ V_{bs} = \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cs} = \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1.14)$$

Avec :

ω_s : pulsation des tensions statoriques.

V_s : valeur efficace de la tension statorique.

En injectant les expressions de ces tensions dans l'équation (1.3) et en faisant le produit matriciel, nous aboutissons aux composantes d'axes qdo dans le référentiel arbitraire :

$$\begin{cases} V_{qs} = \sqrt{2}V_s \cos(\omega_s t - \theta) \\ V_{ds} = -\sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t - \theta) \\ V_{os} = 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

Dans le cas de la transformation triphasé-biphasé, aucune condition n'est posée sur la grandeur V_s , cette remarque est d'une grande importance pour le cas de notre étude du générateur asynchrone. En effet, pendant l'auto-amorçage (respectivement le désamorçage) la tension V_s est croissante (respectivement décroissante).

II.4 Les systèmes de référence les plus utilisés

II.4 Les systèmes de référence les plus utilisés

Les systèmes de référence les plus utilisés sont : le référentiel arbitraire, lié au rotor, au stator ou bien au champ tournant. Ces référentiels ne diffèrent que par leurs pulsations de rotation et peuvent donc être tous déduits du référentiel arbitraire d'où l'intérêt particulier de ce dernier.

En fait,

$\omega = 0$, correspond au référentiel stationnaire

$\omega = \omega_r$, correspond au référentiel lié au rotor.

$\omega = \omega_s$, correspond au référentiel lié au champ tournant (ω_s est la pulsation de ce dernier)

Le choix du référentiel dépend essentiellement de l'application dont on veut faire.

II.5 Modélisation de la machine asynchrone sous l'hypothèse de la linéarité du flux

Après ces quelques rappels sur les transformations triphasé-biphasé, nous nous intéressons maintenant à la modélisation de la machine asynchrone, cette dernière est tantôt modélisée par le modèle des flux tantôt par le modèle des courants. Dans le cadre de notre étude notre choix s'est porté sur le modèle des flux.

Nous admettons, tout au long de ce chapitre la linéarité du circuit magnétique de la machine (hypothèse sur laquelle nous reviendrons).

Les hypothèses simplificatrices adoptées dans cette partie seront :

- La f.m.m est supposée à répartition sinusoïdale dans l'entrefer.
- Les pertes fer, effets pelliculaires et thermiques seront négligées.
- La saturation du circuit magnétique sera négligée dans cette partie (il en sera tenu compte ultérieurement), ainsi les inductances et mutuelles des circuits seront supposées constantes.

II.5.1 Equation des tensions exprimées en variables de phase :

Les équations des tensions de la machine asynchrone, sous forme matricielle sont données par :

$$V_{abc} = r i_{abc} + p \phi_{abc} \quad (1.16)$$

$$V_{abcr} = r i_{abcr} + p \phi_{abcr} \quad (1.17)$$

$$V_{abc} = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}] \quad (1.18)$$

$$i_{abc} = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}] \quad (1.19)$$

$$\phi_{abc} = [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}] \quad (1.20)$$

Où $p = d/dt$ représente l'opérateur dérivée par rapport au temps
De la même manière on définit les variables rotoriques.

Les termes r_r et r_s désignent les matrices résistance rotorique et statorique respectivement

$$r_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad r_r = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Les équations des flux s'expriment par :

$$\begin{bmatrix} \phi_{abcs} \\ \phi_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^t & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Où L_s , L_r et L_{sr} désignent les matrices inductances respectivement statorique, rotorique et la mutuelle inductance stator-rotor

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{rr} & M_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & L_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & M_{rr} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{vmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{vmatrix} \quad (1.25)$$

L_{ss} (respectivement L_{rr}) désignent les inductances propres des bobines statoriques (respectivement rotoriques) qui sont égales vu la symétrie de la machine.

M_{ss} (respectivement M_{rr}) désignent les mutuelles inductances entre bobines statoriques (respectivement rotoriques).

L_{sr} désigne l'amplitude de la mutuelle inductance stator-rotor.

Les différentes inductances s'expriment par :

$$L_{ss} = L_{ms} + l_s \quad (1.26)$$

$$L_{rr} = L_{mr} + l_r \quad (1.27)$$

$$M_{ss} = -\frac{1}{2} L_{ms} \quad (1.28)$$

$$M_{rr} = -\frac{1}{2} L_{mr} \quad (1.29)$$

Avec

l_s : Inductance de fuites des enroulements statoriques.

l_r : Inductance de fuites des enroulements rotoriques.

L_{ms} : Inductance de magnétisation statorique.

L_{mr} : Inductance de magnétisation rotorique.

Après avoir établi les équations des tensions, nous ramenons les grandeurs (variables et paramètres) rotoriques au stator dans le but d'aboutir aux équations des tensions ramenées au stator.

Soit alors m le rapport de transformation stator-rotor.

$$m = \frac{E_s}{E_r} \quad (1.30)$$

E_s : tension d'entrefer statorique par phase.

E_r : tension d'entrefer rotorique par phase.

Nous ramenons les variables rotoriques au stator telles que :

$$i'_{abcr} = i_{abcr}/m \quad (1.31)$$

$$V'_{abcr} = mV_{abcr} \quad (1.32)$$

$$\phi'_{abcr} = m\phi_{abcr} \quad (1.33)$$

Les inductances de magnétisation statoriques et rotoriques ainsi que les mutuelles inductances sont liées par les équations ci-dessous :

$$L_{ms} = mL_{sr} \quad (1.34)$$

$$L_{sr} = \frac{L_{ms}}{m} \quad (1.35)$$

$$L_{wr} = \frac{L_{ms}}{m^2} \quad (1.36)$$

Nous définissons les deux matrices inductances L'_{sr} et L'_r comme suit :

$$L'_{sr} = mL_{sr} \quad (1.37)$$

$$L'_r = m^2 L_r \quad (1.38)$$

Compte tenu des équations (1.34) et (1.36), les matrices L'_{sr} et L'_r s'expriment par :

$$L_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (1.39)$$

Et :

$$L_r' = \begin{bmatrix} l_r' + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & l_r' + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & l_r' + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

Avec :

$$l_r' = m^2 l_r \quad (1.41)$$

En utilisant les équations (1.31), (1.33), (1.37) et (1.38) les flux et les tensions en terme de variables de phases peuvent s'écrire comme suit :

$$\phi_{abcr} = \begin{bmatrix} (L_{sr}') & L_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

$$r_s = r_s I_3 \quad (1.54)$$

$$r_r' = r_r' I_3 \quad (1.55)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{abcs} \\ \phi_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr}' \\ (L_{sr}') & L_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (1.43)$$

Avec

$$r_r = m^r r_r \quad (1.45)$$

Le système (1.44) exprime le modèle de la machine asynchrone exprimé par phase, il est un système différentiel dont les équations sont à coefficients variables.

La résolution du système devient plus aisée en appliquant la transformation triphasé-biphasé. En effet, cette transformation rendra les coefficients des équations différentielles constants.

II.5.2 Equations des tensions dans le référentiel arbitraire

Le modèle de la machine dans le référentiel arbitraire est obtenu par transformation de chacune des variables du système (1.44)

La matrice $P_s(\theta)$ transforme les variables statorique, et la matrice $P_r(\theta)$ les variables rotoriques.

$$f_{abcs} = P_s^{-1} f_{qdos} \quad (1.46)$$

$$f_{abcr} = P_r^{-1} f_{qdor} \quad (1.47)$$

Les équations (1.44) deviennent alors :

$$P_s^{-1} V_{qdos} = r_s P_s^{-1} i_{qdos} + p(P_s^{-1} \phi_{qdos}) \quad (1.48)$$

$$P_r^{-1} V_{qdor} = r_r P_r^{-1} i_{qdor} + p(P_r^{-1} \phi_{qdor}) \quad (1.49)$$

$$V_{qdos} = P_s r_s P_s^{-1} i_{qdos} + P_s (pP_s^{-1}) \dot{\phi}_{qdos} + P_s P_s^{-1} p \phi_{qdos} \quad (1.50)$$

$$V_{qdor} = P_r r_r P_r^{-1} i_{qdor} + P_r (pP_r^{-1}) \dot{\phi}_{qdor} + P_r P_r^{-1} p \phi_{qdor} \quad (1.51)$$

D'où :

Il est montré en annexe 1 que :

$$P_s (pP_s^{-1}) \dot{\phi}_{qdos} = \omega [\dot{\phi}_{ds} \quad -\dot{\phi}_{qs} \quad 0] = \omega \dot{\phi}_{qdos} \quad (1.52)$$

Comme la construction de la machine est de manière symétrique, les matrices r_s et r_r sont diagonales et à termes égaux, et nous pouvons donc écrire :

$$P_r (pP_r^{-1}) \dot{\phi}_{qdor} = (\omega - \omega_r) [\dot{\phi}_{dr} \quad -\dot{\phi}_{qr} \quad 0] = (\omega - \omega_r) \dot{\phi}_{qdor} \quad (1.53)$$

Où :

$$r_s = r_s I_3 \quad (1.54)$$

$$r_r = r_r I_3 \quad (1.55)$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

r_r et r_s sont respectivement les résistances du rotor et du stator par phase.

Les équations (1.50) et (1.51) deviennent alors :

$$V_{qdos} = r_s i_{qds} + \omega \dot{\phi}_{qdos} \quad (1.56)$$

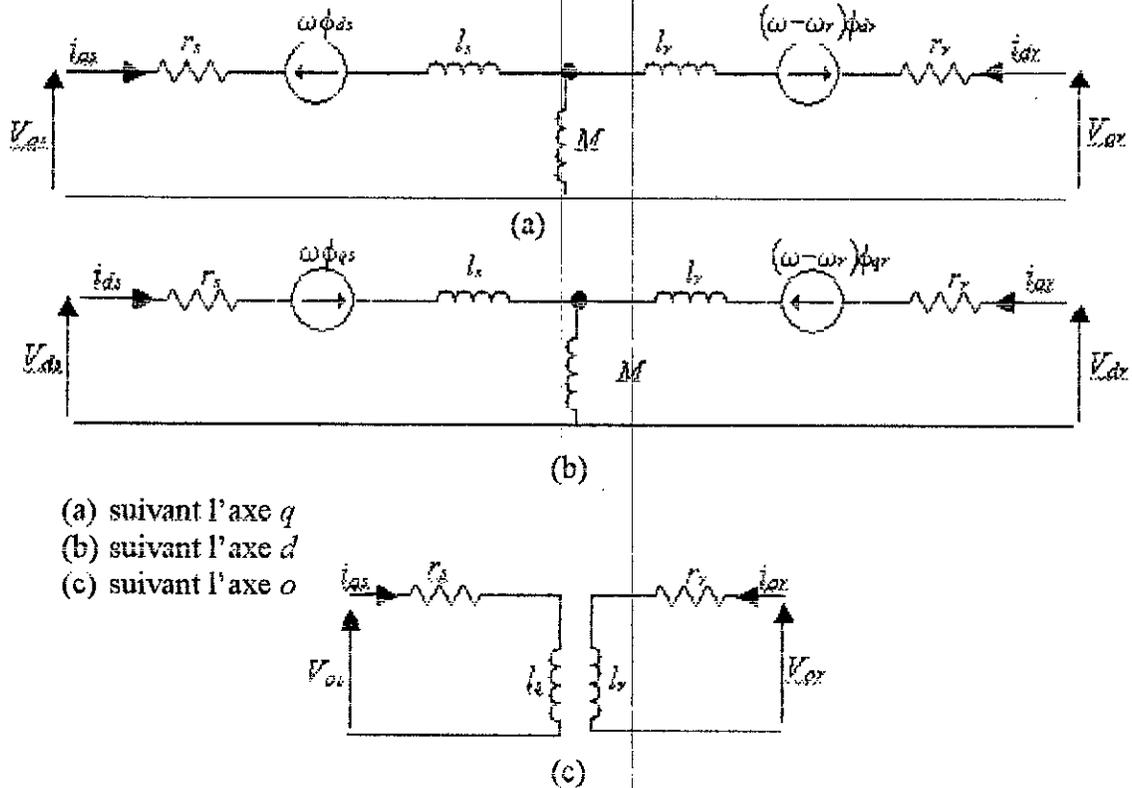
$$V_{qdor} = r_r i_{qdr} + (\omega - \omega_r) \dot{\phi}_{qdr} + p \phi_{qdr} \quad (1.57)$$

Ces deux dernières expressions présentent les équations des tensions exprimées dans le référentiel arbitraire.

La déduction des schémas équivalents en régime dynamique de la machine asynchrone se fait à partir de ce système (figure 1.5).

II.5.3 Equations des flux dans le référentiel arbitraire :

A partir des équations des flux par phase et des équations de transformation on aboutit aux schémas équivalents suivants.



- (a) suivant l'axe q
- (b) suivant l'axe d
- (c) suivant l'axe o

Figure (1.7) : Schéma équivalent en régime dynamique de la machine asynchrone dans le référentiel arbitraire

Les équations des flux dans le référentiel arbitraire deviennent alors :

$$\phi_{qdos} = P_s L_s P_s^{-1} i_{qdos} + P_s L_{sr} P_r^{-1} i_{qdor} \tag{1.58}$$

$$\phi'_{qdor} = P_r (L'_{sr})^t P_s^{-1} i_{qdos} + P_r L_r P_r^{-1} i_{qdor} \tag{1.59}$$

Et sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} \phi_{qdos} \\ \phi'_{qdor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s L_s P_s^{-1} & P_s L_{sr} P_r^{-1} \\ P_r (L'_{sr})^t P_s^{-1} & P_r L_r P_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qdos} \\ i_{qdor} \end{bmatrix} \tag{1.60}$$

On montre que:

$$P_s L_s P_s^{-1} = \begin{bmatrix} l_s + M & 0 & 0 \\ 0 & l_s + M & 0 \\ 0 & 0 & l_s \end{bmatrix} \tag{1.61}$$

Où :

$$M = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (1.62)$$

L_r , étant de même forme que L_s donc :

$$P_r L_r P_r^{-1} = \begin{bmatrix} l_r' + M & 0 & 0 \\ 0 & l_r' + M & 0 \\ 0 & 0 & l_r' \end{bmatrix} \quad (1.63)$$

$$P_s L_{sr} P_r^{-1} = P_r (L_{sr}') P_s^{-1} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.64)$$

Ainsi nous aboutissons aux équations des flux sous leur forme explicite :

$$\phi_{qs} = l_s i_{qs} + M(i_{qs} + i_{qr}') \quad (1.65)$$

$$\phi_{ds} = l_s i_{ds} + M(i_{ds} + i_{dr}') \quad (1.66)$$

$$\phi_{0s} = l_s i_{0s} \quad (1.67)$$

$$\phi_{qr}' = l_r i_{qr}' + M(i_{qs} + i_{qr}') \quad (1.68)$$

$$\phi_{dr}' = l_r i_{dr}' + M(i_{ds} + i_{dr}') \quad (1.69)$$

$$\phi_{0r}' = l_r i_{0r}' \quad (1.70)$$

Les expressions $M(i_{qs} + i_{qr}')$ et $M(i_{ds} + i_{dr}')$ représentent les composantes d'axe q et d du flux magnétisant. On les notera respectivement ϕ_{md} ; ϕ_{mq} . Cette notation nous sera très utile lors de l'introduction de la saturation.

Les courants déduits des équations (1.64)..... (1.69) ont les expressions:

$$i_{qs} = \frac{1}{l_s} (\phi_{qs} - \phi_{mq}) \quad (1.71)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{l_s} (\phi_{ds} - \phi_{md}) \quad (1.72)$$

$$i_{0s} = \frac{1}{l_s} \phi_{0s} \quad (1.73)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{l_r} (\phi'_{qr} - \phi_{mq}) \quad (1.74)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{l_r} (\phi'_{dr} - \phi_{md}) \quad (1.75)$$

$$i'_{0r} = \frac{1}{l_r} \phi'_{0r} \quad (1.76)$$

En remplaçant enfin, ces courants par leurs expressions ci-dessus dans les équations des tensions (1.56) et (1.57), nous aboutissons au système d'équations différentielles suivant :

$$p\phi_{qs} = V_{qs} - \omega\phi_{ds} + \frac{r_s}{l_s} (\phi_{mq} - \phi_{qs}) \quad (1.77)$$

$$p\phi_{ds} = V_{ds} - \omega\phi_{qs} + \frac{r_s}{l_s} (\phi_{md} - \phi_{ds}) \quad (1.78)$$

$$p\phi_{0s} = V_{0s} - \frac{r_s}{l_s} \phi_{0s} \quad (1.79)$$

$$p\phi'_{qr} = V'_{qr} - (\omega - \omega_s)\phi'_{dr} + \frac{r_r}{l_r} (\phi_{mq} - \phi'_{qr}) \quad (1.80)$$

$$p\phi'_{dr} = V'_{dr} - (\omega - \omega_r)\phi'_{qr} + \frac{r_r}{l_r} (\phi_{md} - \phi'_{dr}) \quad (1.81)$$

$$p\phi'_{0r} = V'_{0r} - \frac{r_r}{l_r} \phi'_{0r} \quad (1.82)$$

Avec

$$\phi_{mq} = L_{\sigma q} \left(\frac{\phi_{qs}}{l_s} + \frac{\phi'_{qr}}{l_r} \right) \quad (1.83)$$

$$\phi_{md} = L_{\sigma d} \left(\frac{\phi_{ds}}{l_s} + \frac{\phi'_{dr}}{l_r} \right) \quad (1.84)$$

$$L_{\sigma} = L_{\sigma d} = \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{l_s} + \frac{1}{l_r} \right)^{-1} \quad (1.85)$$

Il suffit d'associer aux équations (1.77)... (1.85) les équations d'auto-excitation pour aboutir au modèle dynamique du générateur asynchrone.

II.6 Equations d'auto excitation

L'excitation du générateur asynchrone est assurée par une batterie de condensateurs montés aux bornes du stator.

Les équations d'auto excitation de la machine correspondent en réalité aux équations électriques des condensateurs.

Pour un système triphasées équilibrées de condensateurs les équations des courants s'expriment sous forme matricielle par :

$$i_{cdqo} = P Q_{cabc} \quad (1.86)$$

Où Q_{cabc} et i_{cabc} sont respectivement les charges des condensateurs et les courants qui les traversent.

L'équation (1.86) devient dans le référentiel arbitraire :

$$i_{cdqo} = P_s p (P_s^{-1} Q_{cqdo}) \quad (1.87)$$

$$i_{cqdo} = P_s (p P_s^{-1}) Q_{cqdo} + P_s P_s^{-1} p Q_{cqdo} \quad (1.88)$$

En se référant, comme pour les flux, à l'annexe 1, l'équation (1.88) devient :

$$i_{cqdo} = \omega Q_{cqdo} + p Q_{cqdo} \quad (1.89)$$

$$Q_{cqdo} = \begin{bmatrix} Q_{cd} & -Q_{cq} & 0 \end{bmatrix} \quad (1.90)$$

La charge peut s'écrire en fonction de la tension dans le cas d'un système linéaire de condensateurs ainsi :

$$Q_{cabc} = C V_{cabc} \quad (1.91)$$

Et dans le référentiel arbitraire comme :

$$Q_{cdqo} = P_s C P_s^{-1} V_{cqdo} \quad (1.92)$$

Dans notre étude on s'intéresse au cas de linéarité du système des condensateurs triphasés et équilibré, on peut donc écrire la matrice C comme suit :

$$C = C I_s \quad (1.93)$$

Où C désigne la capacité des condensateurs et donc :

$$Q_{cqdo} = C V_{cqdo} \quad (1.94)$$

En injectant l'équation (1.94) dans l'expression (1.89) on aboutit à :

$$i_{cqdo} = C \omega V_{cqdo} + C p V_{cqdo} \quad (1.95)$$

Ou bien:

$$pV_{cdq} = \frac{1}{C} i_{cdq} - \omega V_{cdq} \quad (1.96)$$

En explicitant l'expression ci-dessus on aura :

$$\begin{cases} pV_{cq} = \frac{1}{C} i_{cq} - \omega V_{cd} \\ pV_{cd} = \frac{1}{C} i_{cd} - \omega V_{cq} \\ pV_{co} = \frac{1}{C} i_c \end{cases} \quad (1.97)$$

Le système (1.96) (ou (1.97)) représente le système d'auto-excitation du générateur asynchrone.

Le système constitue le modèle linéaire du générateur asynchrone. Ce modèle sera appelé modèle dynamique des flux en régime linéaire du générateur asynchrone.

Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de la machine asynchrone, nous avons en premier lieu exposé les transformations triphasé-biphasé, le grand soin a été donné à la transformation selon le référentiel arbitraire.

Ensuite, nous avons établi les équations propres du générateur asynchrone et les équations de son auto-excitation et ce selon les deux axes.

Ainsi, le modèle du générateur asynchrone a été établi et ce dans le régime linéaire. Ce modèle étant incomplet, en effet l'hypothèse adoptée concernant la linéarité du flux, rend le modèle obtenu divergeant par rapport à l'expérience.

D'où la nécessité de la modélisation du flux en régime dynamique, qui fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE II

Modélisation du flux en régime dynamique

III Modèle saturé du générateur asynchrone

Le fonctionnement de la machine asynchrone en moteur permet une certaine simplicité quant à la prise en compte ou non de la saturation du circuit magnétique de la machine, cela n'est pas de même pour le fonctionnement en génératrice. En effet, la saturation devient un facteur indispensable pour l'auto-amorçage du générateur asynchrone, et l'étude du phénomène d'auto-amorçage sous l'hypothèse de la linéarité du flux confirme cette importance. Ainsi, les deux figures ci-dessous montrent bien une divergence importante des valeurs des tensions et courants générées par la machine sous l'hypothèse de linéarité du flux par rapport aux valeurs nominales. Le point de fonctionnement est alors indéfini.

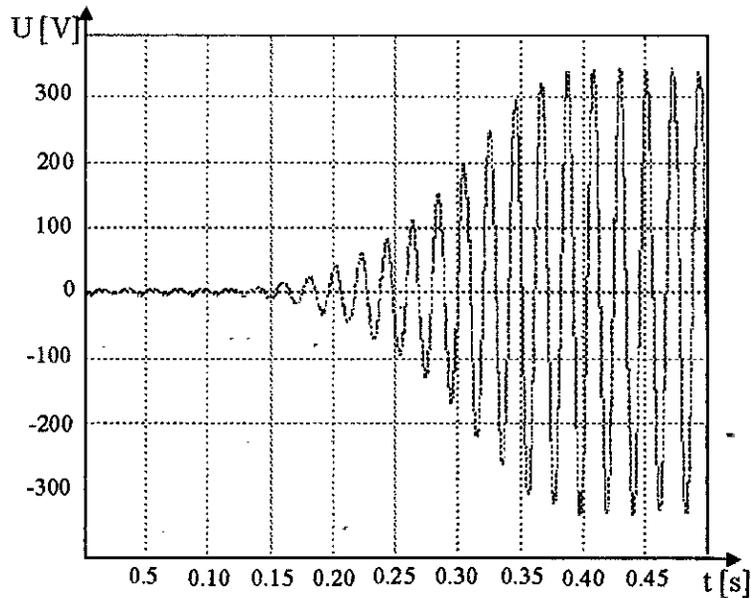


Figure (2.1): Tension de l'auto-amorçage à vide avec capacités déchargées

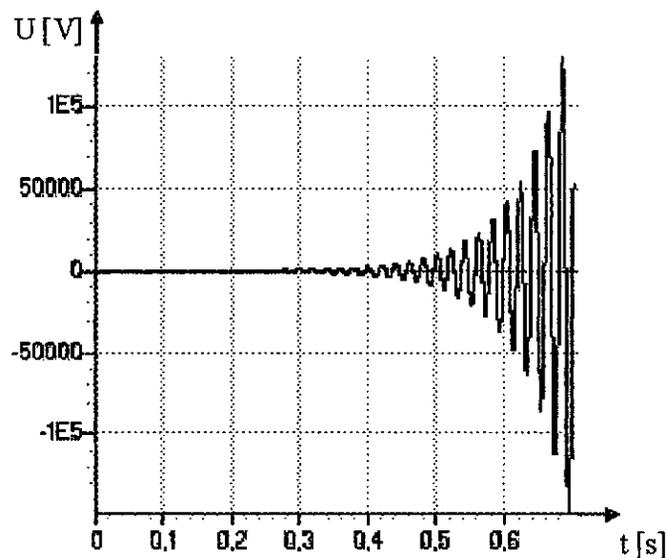


Figure 2.2 : Tension d'auto-amorçage obtenue par simulation pour $r_r=0,88 \Omega$ et $C=90\mu F$

Auto-amorçage avec condensateurs chargés

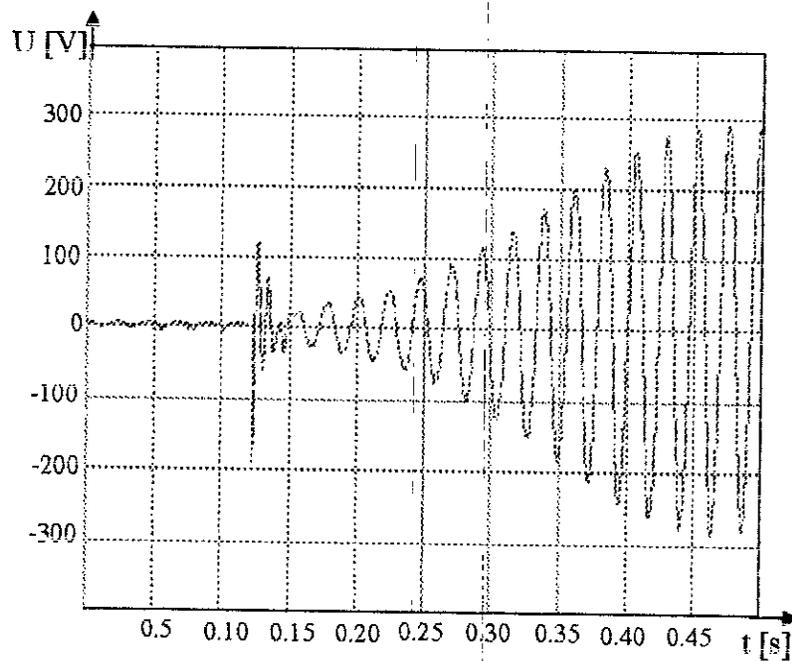


Figure (2.3) : Tension de l'auto-amorçage à vide avec capacités chargées

La figure ci-dessus montre l'autoamorçage du générateur asynchrone, dans le cas où les condensateurs sont déjà chargés. On observe bien des pics de tensions à la naissance du signal, ces derniers peuvent être interprétés par le fait que les condensateurs chargés portent une tension qui est appliquée au stator, au démarrage et puis cette tension disparaît avec la décharge des condensateurs.

IV Modélisation de la saturation

La prise en compte de la saturation devenue donc impérative, notre choix pour la modélisation de la caractéristique magnétique s'est porté sur une approche dite méthode de *la fonction degré de saturation (F.D.S)*, l'approximation de cette fonction est faite par une fonction exponentielle [4]. Dans la suite, la fonction degré de saturation sera notée F .

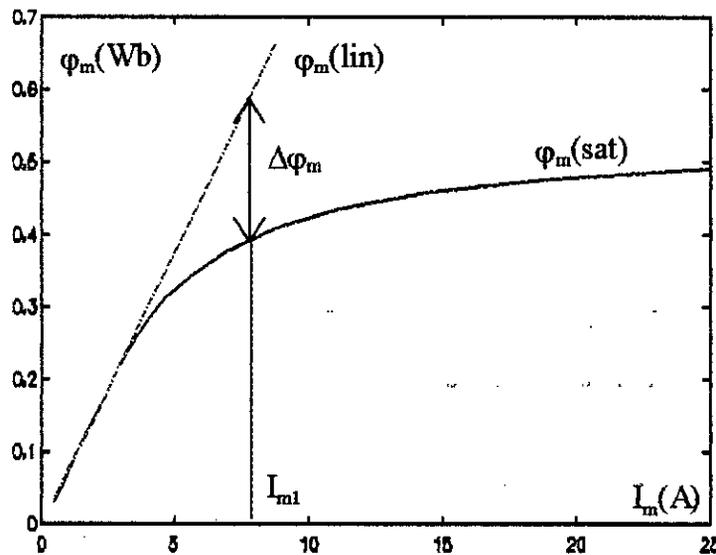


Figure (2.4) Courbe de magnétisation de la machine

La construction de la F.D.S est menée ainsi :

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

$$\Delta\phi_m = \phi_m(lin) - \phi_m(sat) \quad (2.1)$$

Où :

$\phi_m(sat)$: est la valeur réelle (saturée) du flux magnétisant.

$\phi_m(lin)$: est sa valeur sous l'hypothèse de la linéarité.

$\Delta\phi_m$: est l'atténuation du flux magnétisant par rapport à la valeur qu'il aurait sous l'hypothèse de linéarité.

La fonction *degré de saturation* F est donnée par :

$$F(\phi_m(lin)) = \frac{\Delta\phi_m}{\phi_m(lin)} \quad (2.2)$$

La variation de cette fonction est donnée par la figure suivante :

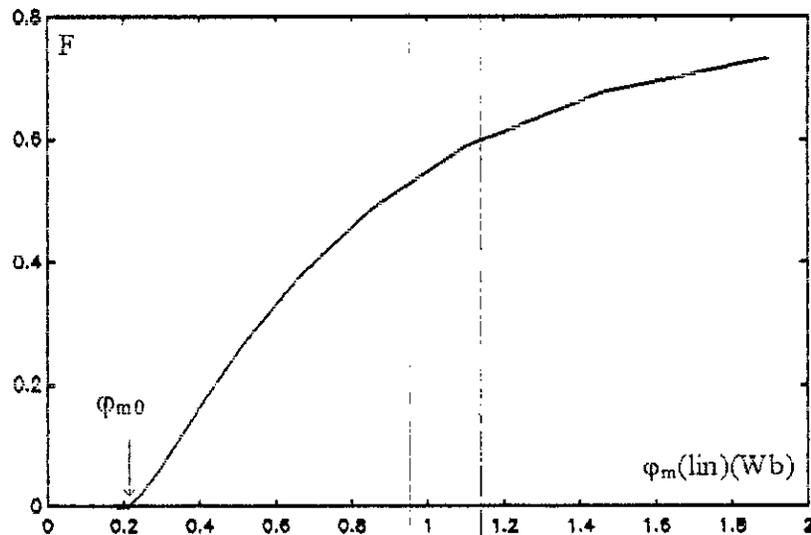


Figure (2.5) Fonction degré de saturation en fonction du flux linéaire

La fonction F reste constamment nulle jusqu'à ce que le flux ϕ_m atteigne une valeur ϕ_{m0} , cette valeur représente la limite de la zone linéaire de la caractéristique magnétique.

En effet, pour des valeurs $\phi_m < \phi_{m0}$ on a $\phi_m(lin) = \phi_m(sat)$, et donc $F = 0$.

On peut distinguer deux zones distinctes :

Une zone à degré de saturation nul, pour $\phi_m \leq \phi_{m0}$.

Une zone à degré de saturation croissant pour $\phi_m > \phi_{m0}$.

Ainsi la fonction degré de saturation sera définie comme suit :

$$F = \begin{cases} F_0 = 0 & \text{si } \phi_m \leq \phi_{m0} \\ F_1 \neq 0 & \text{si } \phi_m > \phi_{m0} \end{cases} \quad (2.3)$$

IV.1 Modélisation de fonction de degré de saturation F

Comme mentionné précédemment, la fonction F est modélisée par une série d'exponentielles avec l'utilisation d'une méthode d'optimisation (méthode des moindres carrés). Cette manière de faire permet de disposer d'une expression analytique continue pour la fonction F , ce qui présente un avantage non négligeable par rapport à une forme discrète limitée à certaines valeurs.

La forme adoptée pour la fonction F , est une forme non linéaire dont l'expression est donnée par :

$$F_1 = C_1 [1 - \exp(-\lambda_1(\phi_m(lin) - \phi_{m0}))] + C_2 [\exp(\lambda_2(\phi_m(lin) - \phi_{m0}) / (\phi_m(lin) + \phi_{m0})) - 1] \quad (2.4)$$

F_0 étant identiquement nulle, $F_0 = 0$.

Un développement en série d'exponentielles au deuxième degré est adopté pour ce modèle, l'identification des coefficients $\lambda_i, C_i, \phi_{mi}$ ($i = 1, 2$) [4] est donné en annexe 2.

IV.1.1 Introduction de la saturation dans le modèle dynamique de la machine asynchrone

Dans le modèle linéaire précédemment établi, nous avons fait apparaître deux grandeurs d'une importance capitale : les composantes du flux magnétisant suivant les deux axes ϕ_{mq} et ϕ_{md} .

L'introduction de la saturation dans le modèle de la machine asynchrone repose essentiellement sur la connaissance en chaque point de fonctionnement, des deux grandeurs ϕ_{mq} et ϕ_{md} .

Les composantes ϕ_{mq} et ϕ_{md} s'expriment par :

$$\begin{cases} \phi_{mq}(sat) = \phi_{mq}(lin) - \Delta\phi_{mq} \\ \phi_{md}(sat) = \phi_{md}(lin) - \Delta\phi_{md} \end{cases} \quad (2.5)$$

Le flux magnétisant $\phi_m(lin)$ est lié à ses composantes par :

$$\phi_m(lin) = \sqrt{\phi_{mq}^2(lin) + \phi_{md}^2(lin)} \quad (2.6)$$

Les variations du flux sont données par :

$$\Delta\phi_{mq} = \frac{\Delta\phi_{mq}(lin)}{\phi_m(lin)} \Delta\phi_m \quad (2.7)$$

$$\Delta\phi_{md} = \frac{\Delta\phi_{md}(lin)}{\phi_m(lin)} \Delta\phi_m \quad (2.8)$$

$$\text{Et } \begin{cases} \frac{\phi_{mq}(lin)}{\phi_m(lin)} \Delta\phi_m = \phi_{mq}(lin) \frac{\Delta\phi_m}{\phi_m(lin)} = \phi_{mq}(lin) F(\phi_m(lin)) \\ \frac{\phi_{md}(lin)}{\phi_m(lin)} \Delta\phi_m = \phi_{md}(lin) \frac{\Delta\phi_m}{\phi_m(lin)} = \phi_{md}(lin) F(\phi_m(lin)) \end{cases} \quad (2.9)$$

Avec :

$$\Delta\phi_{mq} = \phi_{mq}(lin) F(\phi_m(lin)) \quad (2.10)$$

$$\Delta\phi_{md} = \phi_{md}(lin) F(\phi_m(lin))$$

Les équations (2.6) et (2.10) associées aux équations du système (2.5), nous permettent d'obtenir les deux composantes saturées du flux magnétisant.

Ainsi :

$$\begin{aligned} \phi_{mq}(sat) &= \phi_{mq}(lin)[1 - F(\phi_m(lin))] \\ \phi_{md}(sat) &= \phi_{md}(lin)[1 - F(\phi_m(lin))] \end{aligned} \quad (2.11)$$

IV.1.2 Détermination des flux magnétisants linéaire et saturés

Nous allons en premier lieu déterminer les composantes linéaires $\phi_{mq}(lin)$ et $\phi_{md}(lin)$. Pour ce faire, réécrivons leurs expressions en fonction des courants :

$$\phi_{mq} = M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.12)$$

$$\phi_{md} = M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.13)$$

Les équations des courants en fonction des flux réels saturés sont :

$$i_{qs} = \frac{\phi_{qs}(sat) - \phi_{mq}(sat)}{l_s} \quad (2.14)$$

$$i_{ds} = \frac{\phi_{ds}(sat) - \phi_{md}(sat)}{l_s} \quad (2.15)$$

$$i_{qr} = \frac{\phi_{qr}(sat) - \phi_{mq}(sat)}{l'_r} \quad (2.16)$$

$$i_{dr} = \frac{\phi_{dr}(sat) - \phi_{md}(sat)}{l'_r} \quad (2.17)$$

En injectant les équations de courants obtenues ci-dessus, dans les équations (2.12) et (2.13) nous obtenons :

$$\frac{\phi_{mq}(lin)}{M} + \phi_{mq}(sat) \left(\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l'_r} \right) = \left(\frac{\phi_{qs}(sat)}{l_s} + \frac{\phi_{qr}(sat)}{l'_r} \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{\phi_{md}(lin)}{M} + \phi_{md}(sat) \left(\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l'_r} \right) = \left(\frac{\phi_{ds}(sat)}{l_s} + \frac{\phi_{dr}(sat)}{l'_r} \right) \quad (2.19)$$

Ainsi,

$$\phi_{mq}(lin) = L_q \left[\Delta\phi_{mq} \left(\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l'_r} \right) + \left(\frac{\phi_{qs}}{l_s} + \frac{\phi_{qr}}{l'_r} \right) \right] \quad (2.20)$$

$$\phi_{md}(lin) = L_d \left[\Delta\phi_{md} \left(\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l'_r} \right) + \left(\frac{\phi_{ds}}{l_s} + \frac{\phi_{dr}}{l'_r} \right) \right] \quad (2.21)$$

L_q et L_d étant définie dans le chapitre 1.

En utilisant de nouveau les équation du système (2.5), on aura :

$$\phi_{mq}(sat) = \Delta\phi_m \left[L_q \left(\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l'_r} \right) - 1 \right] + L_q \left(\frac{\phi_{qs}}{l_s} + \frac{\phi_{qr}}{l'_r} \right) \quad (2.22)$$

Or :

$$L_q \left(\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l_r'} \right) - 1 = L_q \left(\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l_r'} - \frac{1}{L_q} \right) = -\frac{L_q}{M} \quad (2.23)$$

On obtient finalement :

$$\phi_{mq}(sat) = L_q \left(\frac{\phi_{qs}}{l_s} + \frac{\phi_{qr}}{l_r'} \right) - \frac{L_q}{M} \Delta \phi_{mq} \quad (2.24)$$

En procédant de la même manière, nous obtenons l'expression de $\phi_{md}(sat)$:

$$\phi_{md}(sat) = L_d \left(\frac{\phi_{ds}}{l_s} + \frac{\phi_{dr}}{l_r'} \right) - \frac{L_d}{M} \Delta \phi_d \quad (2.25)$$

L'ensemble de ces équations permet de définir complètement le modèle saturé de la machine asynchrone. Ces équations associées à celles de l'auto excitation permettent de simuler le fonctionnement en régime saturé.

Des travaux précédemment faits [4] [5] [6], ont pu valider le modèle obtenu et ainsi montrer que l'approche adoptée était cohérente avec l'expérience à quelques légères différences imputées à la non prise en compte de certains phénomènes.

IV.2 Mise en équation de l'auto excitation à vide :

Le schéma équivalent par phase en régime permanent du générateur asynchrone à vide est représenté à la figure ci-dessous en tenant compte des hypothèses suivantes :

- La f.m.m est supposé à répartition sinusoïdale,
- Les pertes fer sont négligées,
- La saturation n'apparaît qu'au niveau de la branche magnétisante.

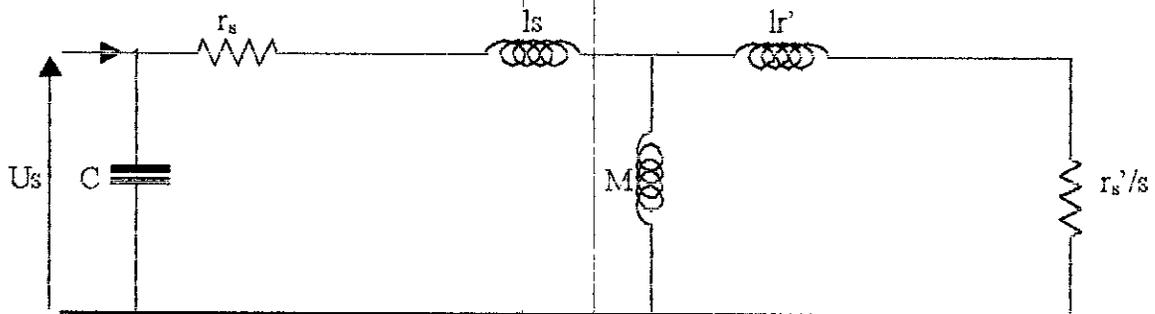


Figure (2.6) : schéma équivalent par phase au régime permanent

Le fonctionnement autonome (auto excité) en régime établi du générateur asynchrone

$$I_s + I_c = 0 \tag{2.26}$$

$$Y_c + Y_m = 0 \tag{2.27}$$

à vide est décrit par l'équation d'équilibre suivante :

Qui se traduit par :

Où

$$Y_c = 1/Z_c, \quad Y_m = 1/Z_m \tag{2.28}$$

Z_m : Impédance de la machine.

Z_c : Impédance de du condensateur.

L'expression de l'impédance Z_m en fonction des paramètres de la machine est donnée par :

$$Z_m = \frac{(r_s + j l_s \omega_s) (j M \omega_s + \frac{r_r'}{g} + j l_r' \omega_s) + j M \omega_s (\frac{r_r'}{g} + j l_r' \omega_s)}{j M \omega_s + \frac{r_r'}{g} + j l_r' \omega_s} \tag{2.29}$$

L'impédance Z_c s'exprime par :

$$Z_c = \frac{j}{C \omega_s} \tag{2.30}$$

En reportant les expressions (2.4) et (2.5) dans l'équation (2.2) on obtient :

$$\frac{jM\omega_s + \frac{r_r'}{g} + jl_r\omega_s}{(r_s + jl_s\omega_s)(jM\omega_s + \frac{r_r'}{g} + jl_r\omega_s) + jM\omega_s(\frac{r_r'}{g} + jl_r\omega_s)} - jC\omega_s = 0 \quad (2.31)$$

En reportant les termes réel et les termes imaginaires, et en les égalisant chacun à zéro, nous obtenons les valeurs suivantes du glissement g :

$$g = \frac{Cr_s r_r'}{l_r'(\omega_s^2 Cl_s \sigma - 1)} \quad (2.32)$$

$$g = \frac{r_r' L_s}{r_s L_r} \left(\frac{1}{\omega_s^2 L_s C} - 1 \right) \quad (2.33)$$

Avec :

$L_s = M + l_s$: Inductance cyclique d'une phase du stator.

$L_r = M + l_r$: Inductance cyclique d'une phase du rotor.

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: Coefficient de dispersion de la machine.

En égalisant les deux expressions (1.31) et (1.32) de g on obtient :

On remarque que le terme $r_s^2 C / L_s$ est toujours négligeable. En fait, r_s est négligeable devant $L_s \omega_s$ (à fréquence non négligeable), et devant $1/C\omega_s$ ce qui rend le terme $r_s^2 C / L_s$ négligeable.

L'équation (1.8) devient alors :

$$\left(\frac{1}{\omega_s^2 CL_s} - 1 \right) (\omega_s^2 L_s \sigma - 1) = 0 \quad (2.34)$$

Les pulsations solutions de cette équation sont :

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_s C}} \quad (2.35)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_s \sigma C}} \quad (2.36)$$

Pratiquement, la pulsation ω_2 est très grande du fait de la valeur toujours inférieure à l'unité de σ , et correspond ainsi à une vitesse excessive.

Cette vitesse ne peut être atteinte à cause des contraintes mécaniques et électriques sévères auxquelles la machine serait soumise. Ainsi seule la valeur de ω_1 est à retenir.

IV.2.1 Condition sur la vitesse :

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

Donc :

$$g < 0 \quad \omega > \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{et} \quad \omega < \frac{1}{\sqrt{LC\sigma}} \quad (2.37)$$

$$\frac{60}{2\pi p \sqrt{LC}} < N < \frac{60}{2\pi p \sqrt{\sigma LC}} \quad (2.38)$$

Donc on peut extraire la condition sur la vitesse :

IV.2.2 Condition sur la capacité :

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 [7] :

$$\frac{1}{\omega^2 L} < C < \frac{1}{\omega^2 L\sigma} \quad (2.39)$$

IV.3 Interprétation physique de l'autoamorçage :

Le fonctionnement à vide du générateur asynchrone autonome, explique bien la nature du phénomène d'auto excitation.

La méthode de détermination du point de fonctionnement à vide du générateur asynchrone conduit facilement à une interprétation physique de l'auto excitation. Elle permet en outre de mettre en évidence une analogie entre la génératrice asynchrone, et le générateur à courant continu shunt [8].

En effet, nous remarquons que l'équation (2.11) est équivalente à :

$$L_s C \omega_s^2 = 1 \quad (2.40)$$

Qui est classiquement connue sous le nom de « condition de résonance du circuit oscillant RLC ». Elle correspond ici à la résonance entre L_s et C .

L'équation d'équilibre réactif dont nous avons déjà parlé, est aussi équivalente à la résonance entre les inductances de la machine (consommateurs de réactif), et les condensateurs d'excitation (fournisseurs de réactif) [9].

Nous reproduisons sur la figure ci-dessous le point de fonctionnement du générateur asynchrone par analogie avec une génératrice shunt.

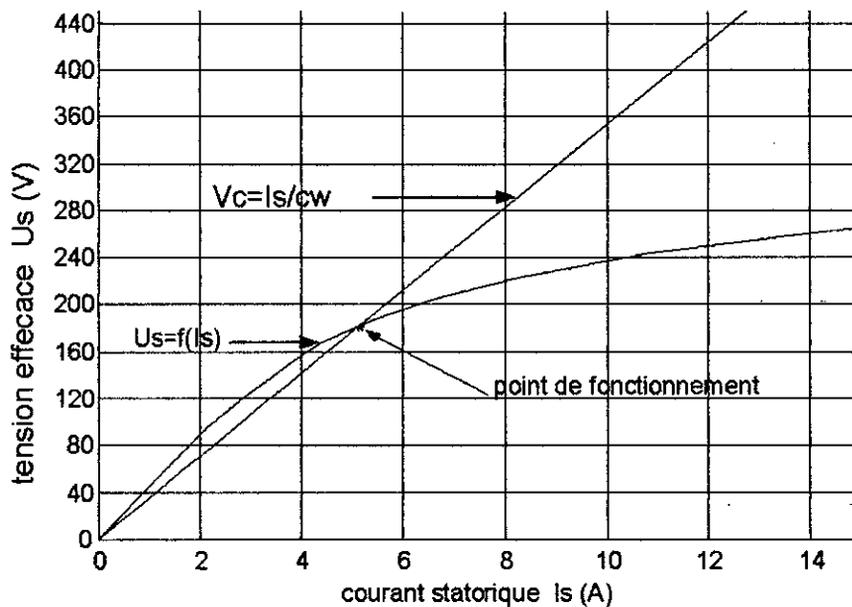


Figure 2.7 : Détermination du point de fonctionnement

IV.4 Paramètres qui conditionnent l'évolution de la tension

Les paramètres susceptibles sur l'évolution de la tension proviennent de la condition de la résonance, à savoir R, C, ω et L [10].

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'évolution de la tension suite à une variation de l'un des paramètres sus cités.

IV.4.1 Influence de la vitesse sur la tension générée par le générateur en régime statique

En fait, on confirme ici le résultat donné par l'équation (2.38) concernant la vitesse de rotation. En effet, en prenant les valeurs des tensions obtenues lors du montage d'une batterie de condensateurs, et en faisant varier la vitesse de rotation du générateur asynchrone, on obtient les courbes montrées en figure (2.8)

On remarque bien, qu'il existe une vitesse de rotation limite pour laquelle il ne peut y avoir un auto-amorçage, et ceci pour chaque capacité des condensateurs utilisés, on remarque aussi que cette valeur de la vitesse de rotation est inversement proportionnelle à la valeur de la capacité. Ceci peut être déduit du fait que pour les grandes valeurs de la capacité la vitesse prend des valeurs assez faibles, et que pour de faibles valeurs de capacité, elle est plutôt importante [4].

Il est aussi à remarquer, qu'il existe une valeur bien particulière de la vitesse de rotation pour laquelle la tension prend une valeur excessive, et dépasse la valeur nominale,

cette vitesse représente en effet la vitesse maximale d'auto-amorçage, elle correspond à une valeur assez faible.

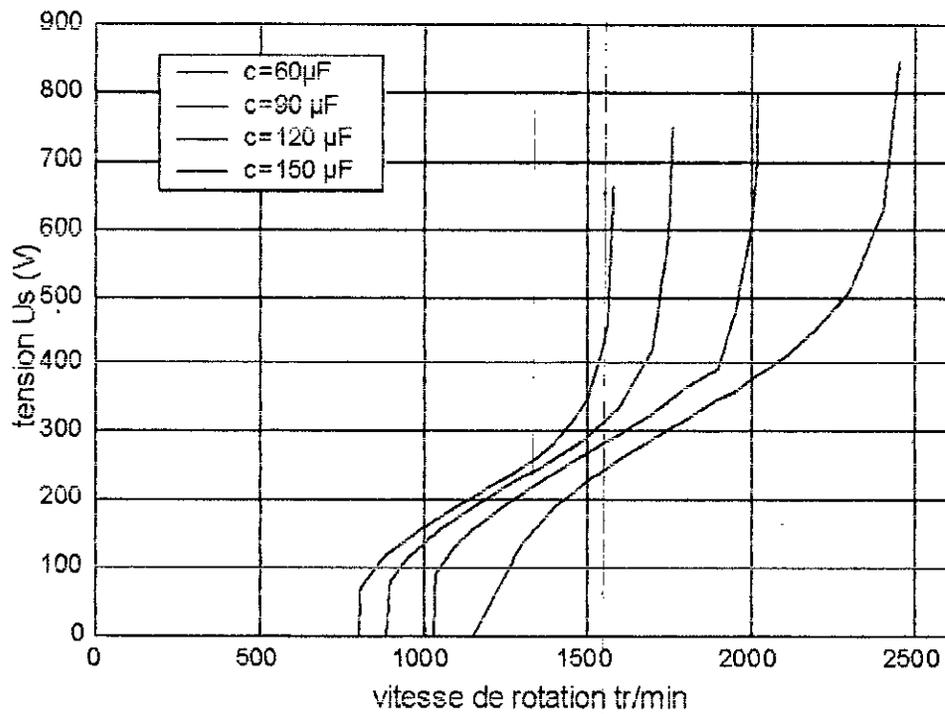


Figure 2.8 : Variation de tension U_s de la machine en fonction de la vitesse de rotation pour différentes capacités

IV.4.2 Influence de la capacité sur la tension générée par le générateur en régime statique

En faisant la simulation du fonctionnement de la machine à 1400tr/min et 1500 tr/min et pour des valeurs de capacités données, on trace les courbes de la figure (2.9).

On remarque que les allures obtenues par [6] sont les mêmes que celles de la variation en fonction de la vitesse, les mêmes remarques sont aussi à faire concernant les valeurs minimales et maximales nécessaires pour l'auto-amorçage à vide. En effet, les deux valeurs de la capacité obtenues traduisent l'équation (2.39). Il existe ici aussi une valeur de la capacité maximale qui donne des tensions trop excessives.

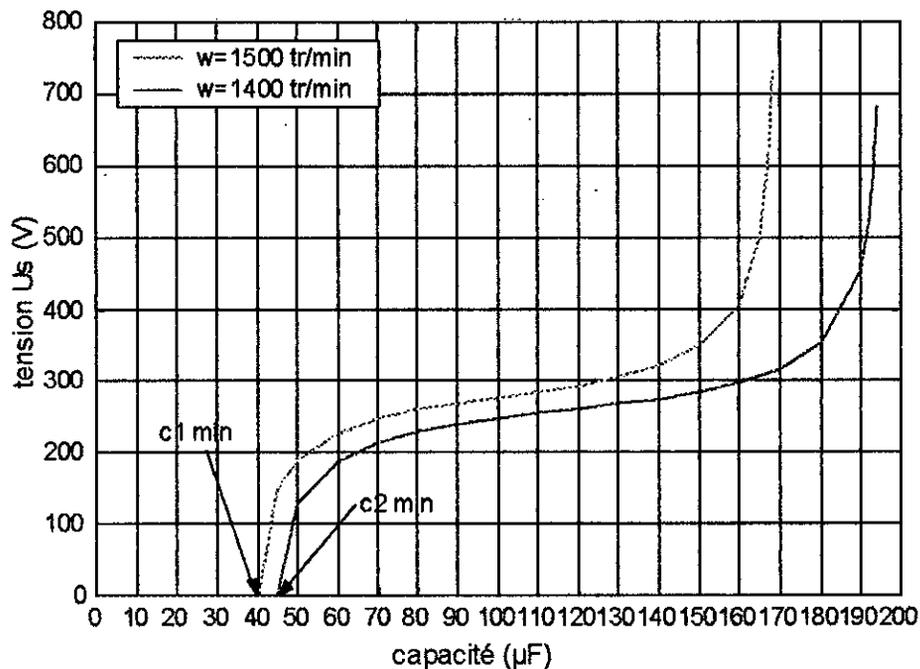


Figure (2.9) : Variation de la tension U_s en fonction de la capacité pour deux vitesses 1500tr/min et 1400 tr/min

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la nécessité de l'introduction de la saturation lors du fonctionnement de la machine asynchrone en générateur, et donc la nécessité de sa modélisation. Cette dernière a été faite selon la méthode de la fonction *degré de saturation*, que nous avons détaillée.

L'auto-amorçage comme phénomène physique a été lui aussi introduit dans ce chapitre et nous avons donné l'interprétation de l'auto-amorçage et ce en termes de puissance active et réactive. Nous avons aussi expliqué l'obtention du point de fonctionnement du générateur asynchrone et montré une analogie avec la génératrice shunt.

Enfin nous avons aussi pu dans ce chapitre, établir certaines conditions sur la capacité des condensateurs ainsi que la vitesse de rotation, qui ne peuvent être ignorées pour avoir l'auto-amorçage à vide. Ces conditions ont d'ailleurs été vérifiées par simulation, en observant la variation de la tension en fonction de la vitesse de rotation ou de la capacité.

CHAPITRE III

Paramètres influants sur la tension et la fréquence

IV Introduction

Même si l'auto amorçage à vide présente un intérêt pratique considérable (auto-amorçage accidentel, freinage hyper synchrone [1]), il est cependant à noter que c'est lors du fonctionnement en charge que le générateur asynchrone présente le plus d'intérêt.

Dans ce chapitre on s'intéresse de près à l'influence de la charge sur l'amplitude de la tension de sortie, sa fréquence et la durée de son régime transitoire. Notre choix de la charge s'est porté sur la charge purement résistive. En effet, le générateur fournit une tension dépendant de la vitesse de rotation, il en résulte une fluctuation de son amplitude et de sa fréquence de l'ordre de 10% à 20%, par contre les charges résistives ne subissent pas de contraintes majeures quant à la fluctuation de la tension, et semblent les plus appropriées pour être fournies en énergie par le générateur asynchrone. Il nous a donc semblé impératif de présenter le modèle de la charge résistive triphasée adopté dans notre étude avant de présenter les résultats obtenus par simulations.

IV.1 Modélisation de la charge

La modélisation de la charge résistive triphasée, se fait comme au chapitre II c.à.d dans le référentiel $q d o$.

Il est fait appel dans cette partie aux notions données au chapitre 2 concernant la transformation des variables d'un circuit stationnaire au référentiel arbitraire.

Pour cela, considérons le circuit triphasé équilibré de la figure (3.1)

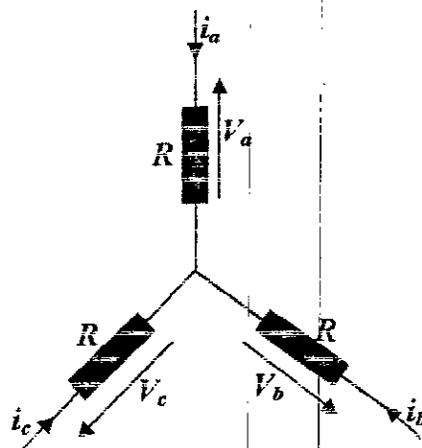


Figure (3.1) Charge résistive triphasée équilibrée

R : résistance par phase de la charge.

$V_a V_b V_c$: tensions par phases appliquées à la charge.

$i_a i_b i_c$: courants de lignes circulant dans la charge

La matrice résistance de ce circuit est donnée par :

$$R = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Les courants i_{abc} circulant dans le circuit, et les tensions qui lui sont appliquées V_{abc} par phase sont liés par :

$$V_{abc} = R i_{abc} \quad (3.2)$$

Pour passer des variables de phases i_{abc} et V_{abc} aux variables relatives i_{qdo} et V_{qdo} , il suffit d'utiliser les matrices de transformation inverse des circuits stationnaire P_s^{-1} (3.2) ainsi :

$$P_s^{-1} V_{qdo} = R P_s^{-1} i_{qdo} \quad (3.3)$$

D'où :

$$V_{qdo} = P_s R P_s^{-1} i_{qdo} \quad (3.4)$$

Or, la charge étant supposée équilibrée on aura :

$$R = R I_3 \quad (3.5)$$

Où I_3 désigne la matrice identité d'ordre 3.

En utilisant la propriété de commutativité de la matrice identité on obtient :

$$V_{qdo} = R i_{qdo} \quad (3.6)$$

C'est-à-dire :

$$\begin{cases} V_q = R i_q \\ V_d = R i_d \\ V_o = R i_o \end{cases} \quad (3.7)$$

Il est à observer que dans notre cas (cas de la charge résistive) la matrice associée aux variables relatives est la même que celle associée aux variables de phases.

V.2 Mode opératoire

Le générateur est entraîné à une vitesse de 1500 tr/min, une batterie de condensateurs est montée en triangle à ses bornes, la charge résistive est montée en étoile aux bornes du générateur.

Le dispositif pratique est explicité dans la figure (3.2)

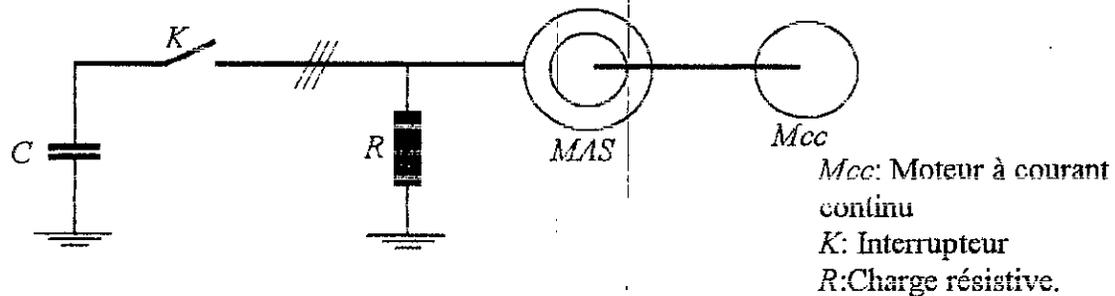


Figure (3.2) : Dispositif expérimental du fonctionnement en charge

IV.3 Influence de la résistance rotorique sur la durée de rétablissement de la tension

IV.3.1 Variation de la durée transitoire en fonction de la résistance rotorique à vide

Pour observer l'influence de la charge rotorique sur le générateur asynchrone, il nous a semblé utile de voir la variation des durées transitoires du rétablissement de la tension à vide et en charge :

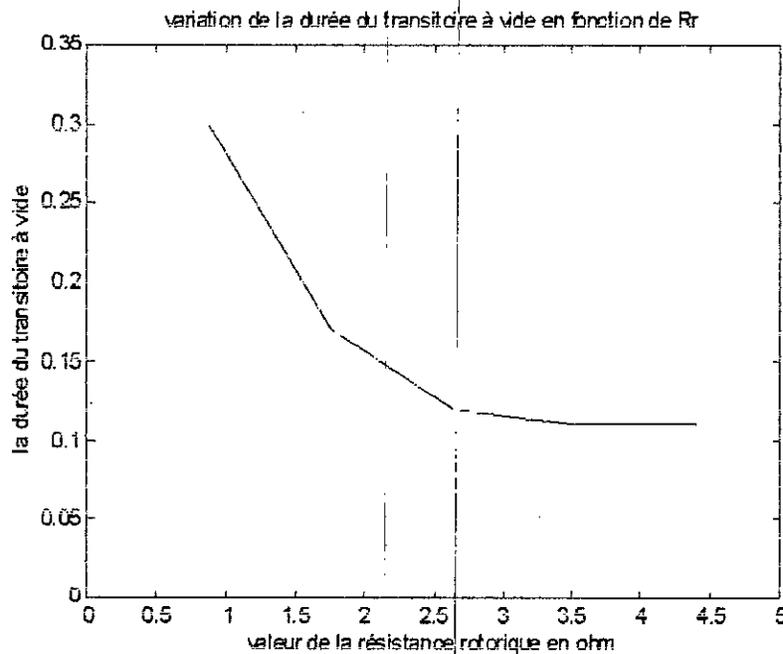


Figure (3.3): Variation de la durée transitoire en fonction de Rr à vide à 1500tr/min et 90µF.

La figure ci-dessus montre la variation de la durée transitoire de rétablissement de la tension à vide. En fait, la résistance rotorique R_r n'a pas d'influence sur le régime permanent

influe considérablement sur la durée de rétablissement de la tension, en d'autres termes R_r n'influe ni sur l'amplitude ni sur la fréquence du régime permanent.

Ceci est en fait du à l'apparition de la résistance rotorique dans les expressions des constantes de temps du système.

V.3.2 Variation de la durée transitoire en fonction de la résistance rotorique en charge

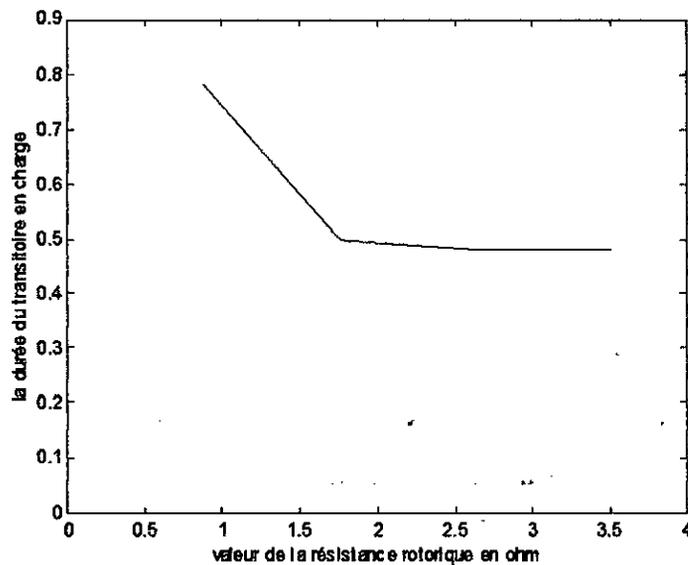


Figure (3.4) : Variation de la durée du transitoire en fonction de R_r en charge à 1500tr/min

La figure ci-dessus montre la variation de la durée de rétablissement de la tension en fonction de la résistance rotorique dans la cas d'une charge résistive, on constate le même effet de la résistance rotorique sur la durée du transitoire que dans le cas à vide, néanmoins il est à observer que la durée du transitoire dans le cas du fonctionnement en charge est plus grand que celui à vide. On constate que si R_r augmente du double alors la durée du transitoire diminue du tiers.

IV.4 Paramètres qui influent sur la variation de la résistance critique

IV.4.1 Variation de la résistance critique en fonction de la résistance rotorique

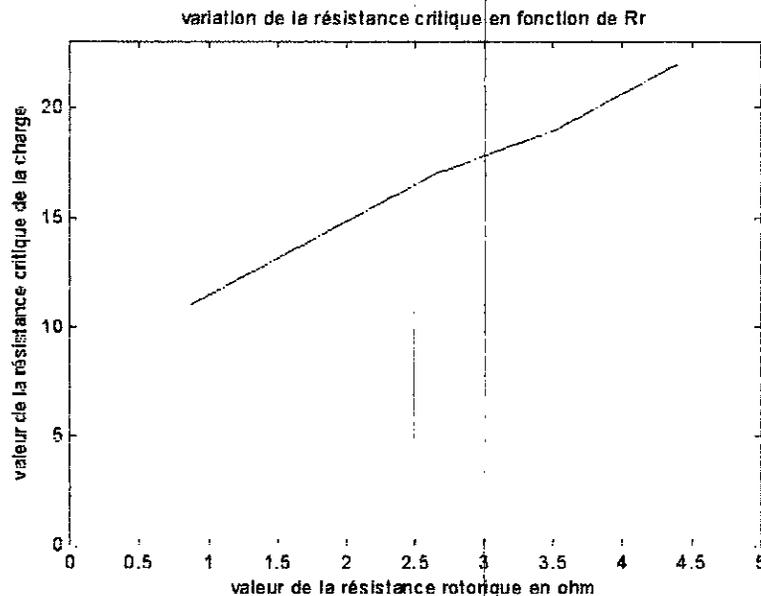


Figure (3.5) : Variation de la résistance critique en fonction de R_r .

La figure ci-dessus montre la variation de la résistance critique en fonction de la résistance rotorique R_r . On remarque que pour une valeur de la capacité C et une vitesse donnée N , une augmentation de la résistance rotorique entraîne une augmentation de la résistance critique R_{crit} . Ainsi, pour une augmentation de $5R_r$, entraîne une augmentation de la résistance critique du double.

Cet effet peut être interprété de la manière suivante :

L'augmentation de R_r entraîne une diminution de l'énergie active absorbée par la charge résistive, en effet, une quantité de l'énergie active est déjà dissipée dans la résistance rotorique qui a été augmentée, et comme le générateur asynchrone fonctionne en un point où l'énergie active produite doit être dissipée dans les résistances rotorique, statoriques ainsi que dans la charge, alors si R_r augmente la partie de l'énergie active consommée par les résistances rotoriques augmente, il cause la diminution de l'énergie active fournie à la charge résistive d'où l'augmentation de la résistance critique.

V.4.2 Variation de la résistance critique en fonction de la capacité

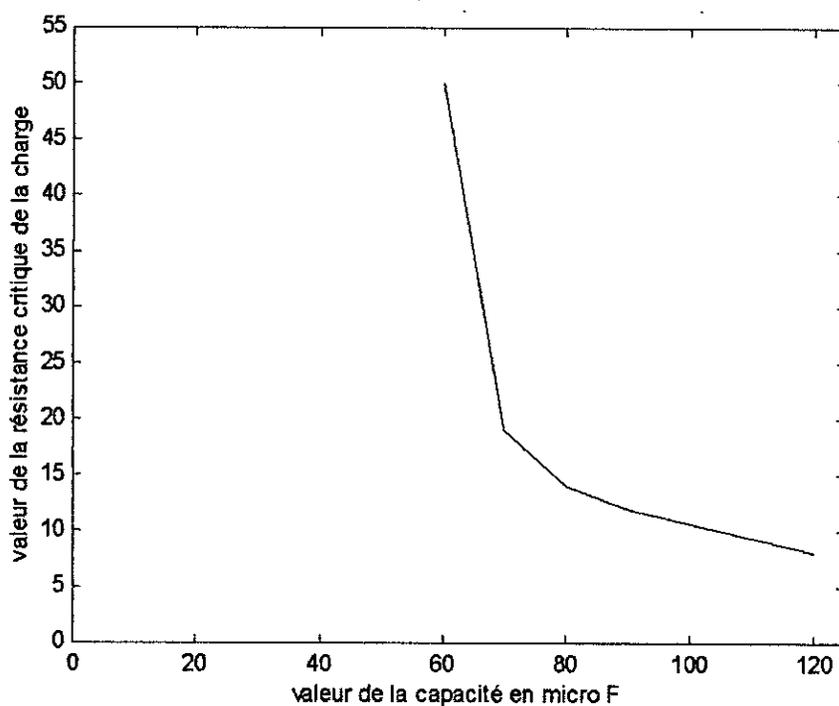


Figure (3.6) : Variation de la résistance critique en fonction de la capacité.

La figure ci-dessus nous montre la variation de la résistance critique et ce en fonction de la capacité des condensateurs. On constate bien que l'augmentation de la valeur de la capacité entraîne une diminution de la valeur de la résistance critique.

Ceci peut être expliqué de la sorte :

En fait, l'augmentation de la valeur de la capacité C correspond à une augmentation de l'énergie réactive consommée par la machine elle-même, or on sait bien que le point de fonctionnement du générateur asynchrone correspond à un équilibre entre l'énergie réactive et l'énergie active, alors il y a donc augmentation de l'énergie active et donc une diminution de la résistance critique.

IV.5 Influence de la charge

IV.5.1 Variation de la tension en fonction de la résistance de la charge :

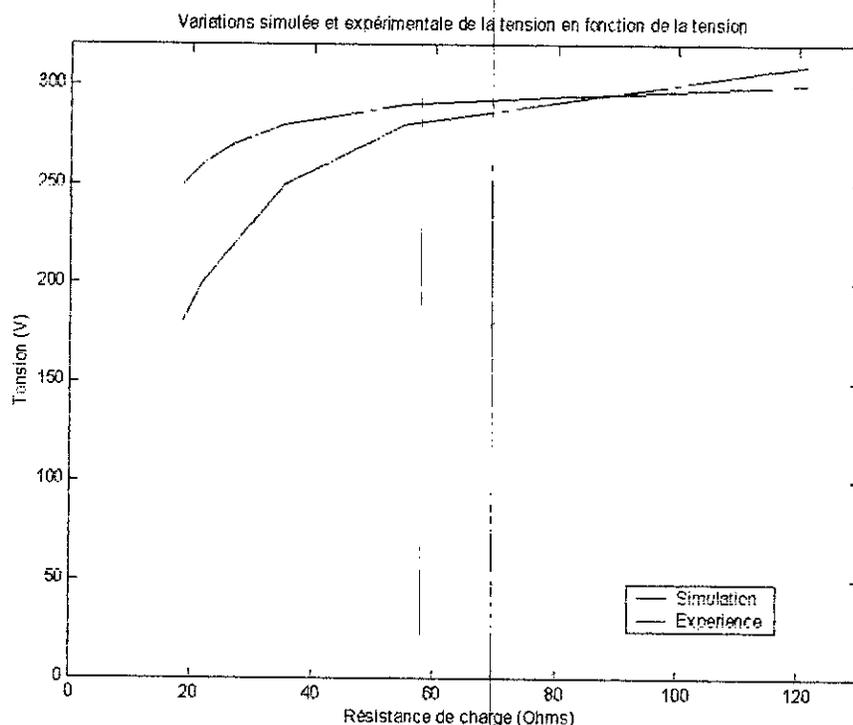


Figure (3.7) : Variation de la tension en fonction de la résistance de la charge.

La figure ci dessus montre la variation de la tension en fonction de la résistance de la charge .On constate bien que la diminution de la résistance de la charge entraine une chute de la tension ceci est du à l'augmentation du courant qui circule dans la résistance donc de la puissance consommée de la charge. En effet, à chaque fois que la puissance consommée par la charge augmente la tension chute.

V.5.2 Variation de la tension en fonction de la charge

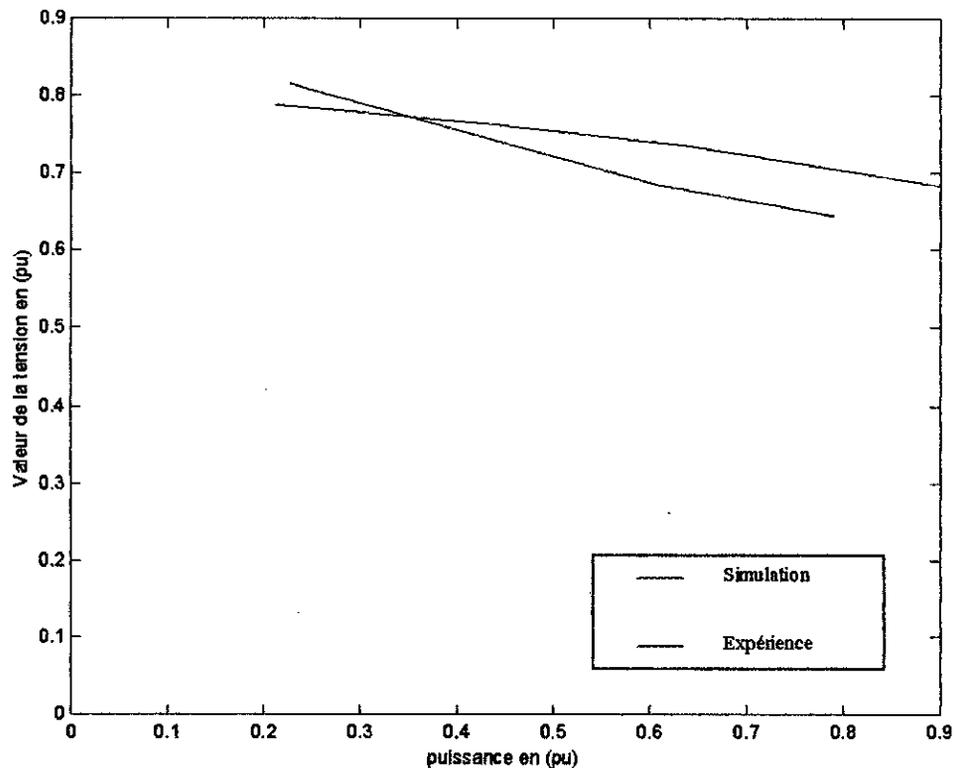


Figure (3.8) : Variation de la tension en fonction de la charge.

La figure ci dessus montre bien la variation de la tension en fonction de la puissance .On constate que cette allure est descendante, à chaque fois que la charge augmente la tension chute. En effet, comme tout générateur d'électricité la tension chute en le chargeant d'avantage, mais dans le cas du générateur asynchrone cette chute est importante. Si on continu à charger la machine, la tension chute brutalement.

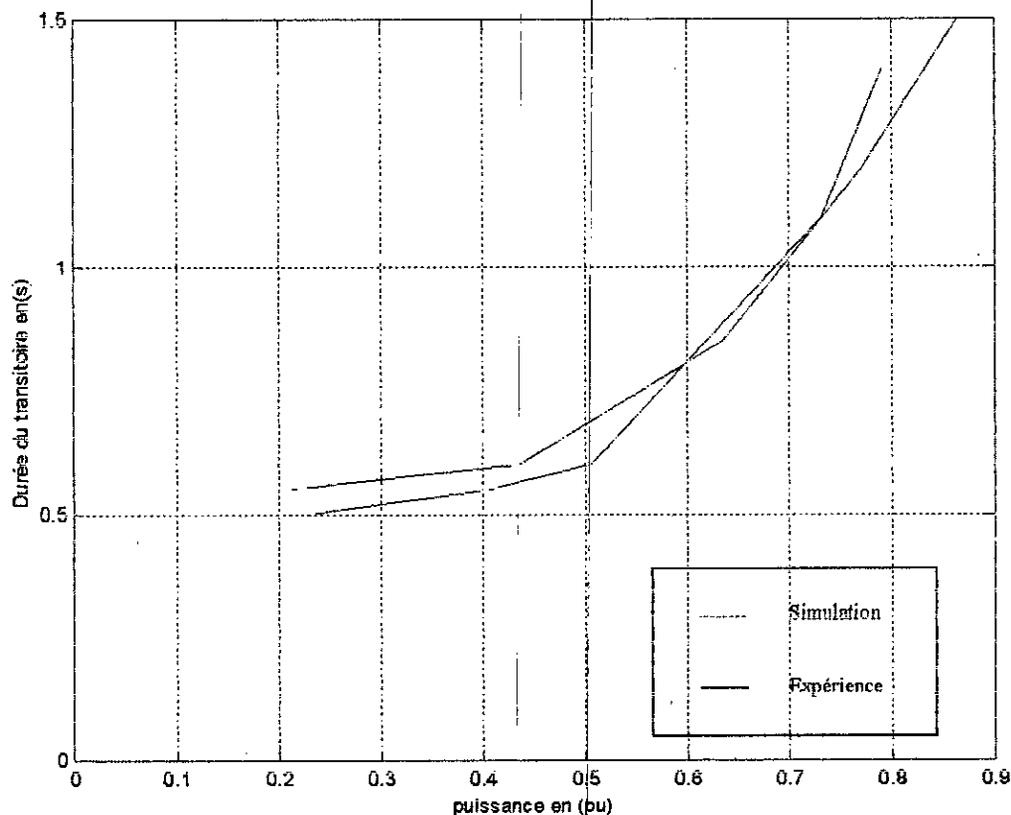
IV.7 Variation de la durée transitoire en fonction de la charge

Figure (3.9): Variation de la durée de rétablissement de la tension en fonction de la charge.

La figure ci-dessus montre bien la variation de la durée de rétablissement de la tension en fonction de la charge. On constate qu'à chaque fois que la puissance consommée par la charge augmente la durée de rétablissement de la tension augmente aussi.

En effet la durée du transitoire est comprise entre une valeur maximale et une valeur minimale, la valeur minimale correspond au fonctionnement à vide et la valeur maximale correspond au fonctionnement en pleine charge (charge maximale pour qu'il ait autoamorçage)

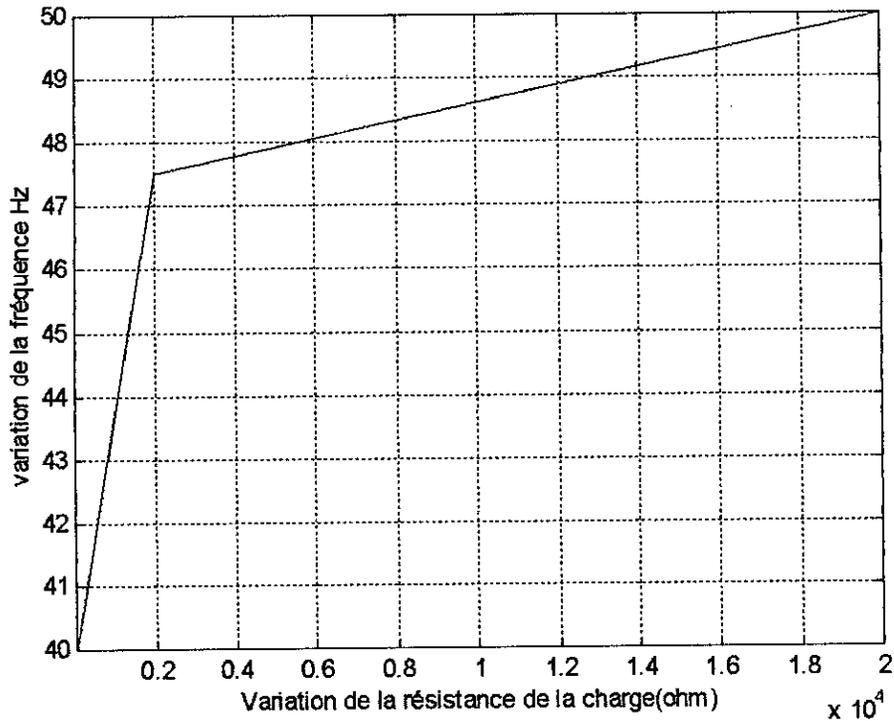
V.7 Variation de la fréquence en fonction de la charge

Figure (3.10): Variation de la fréquence en fonction de la résistance de la charge.

La figure ci-dessus montre bien la variation de la fréquence en fonction de la résistance de la charge. On constate qu'à chaque fois que la résistance de la charge augmente, alors la fréquence des grandeurs statoriques tend à la fréquence du synchronisme.

Dans le cas d'une charge de grande résistance ou bien dans le fonctionnement à vide, la fréquence est au voisinage du synchronisme

IV.9 Variation du glissement en fonction de la charge

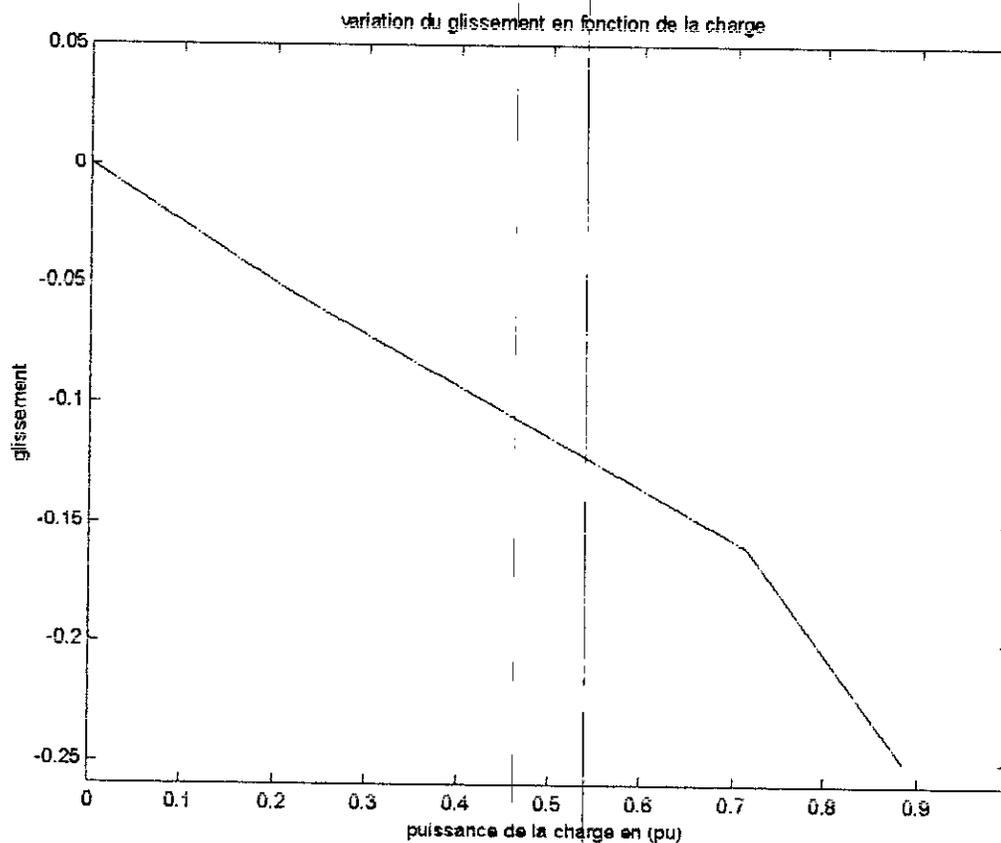


Figure (3.11) : Variation du glissement en fonction de la charge.

La figure ci-dessus montre bien la variation du glissement en fonction de la charge. On constate bien que l'augmentation de la puissance consommée par la charge entraîne la diminution du glissement.

Dans les centrales hydrauliques et les éoliennes on utilise des générateurs asynchrones équipés par des régulateurs pour garder la fréquence proche du synchronisme, donc le glissement au voisinage de zéro.

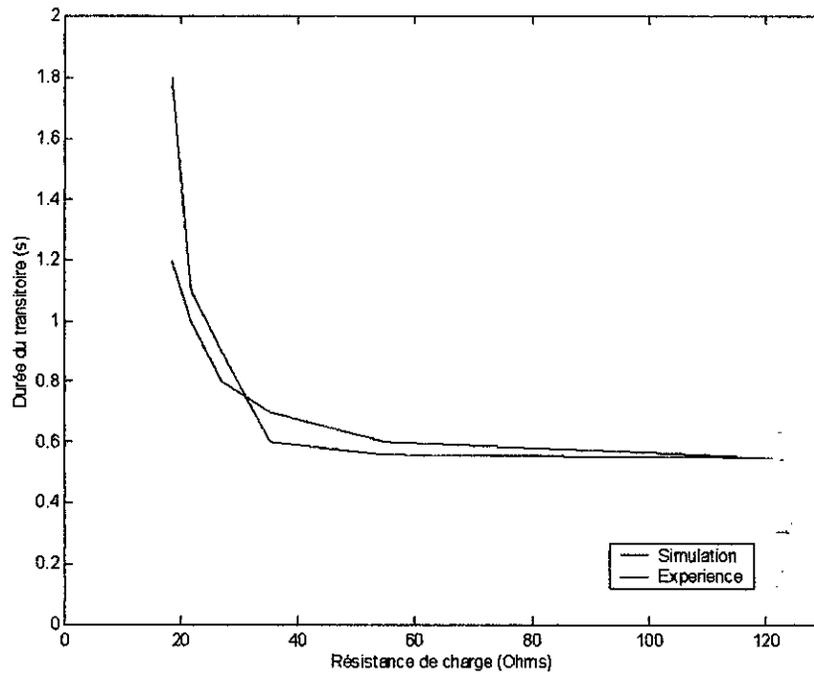
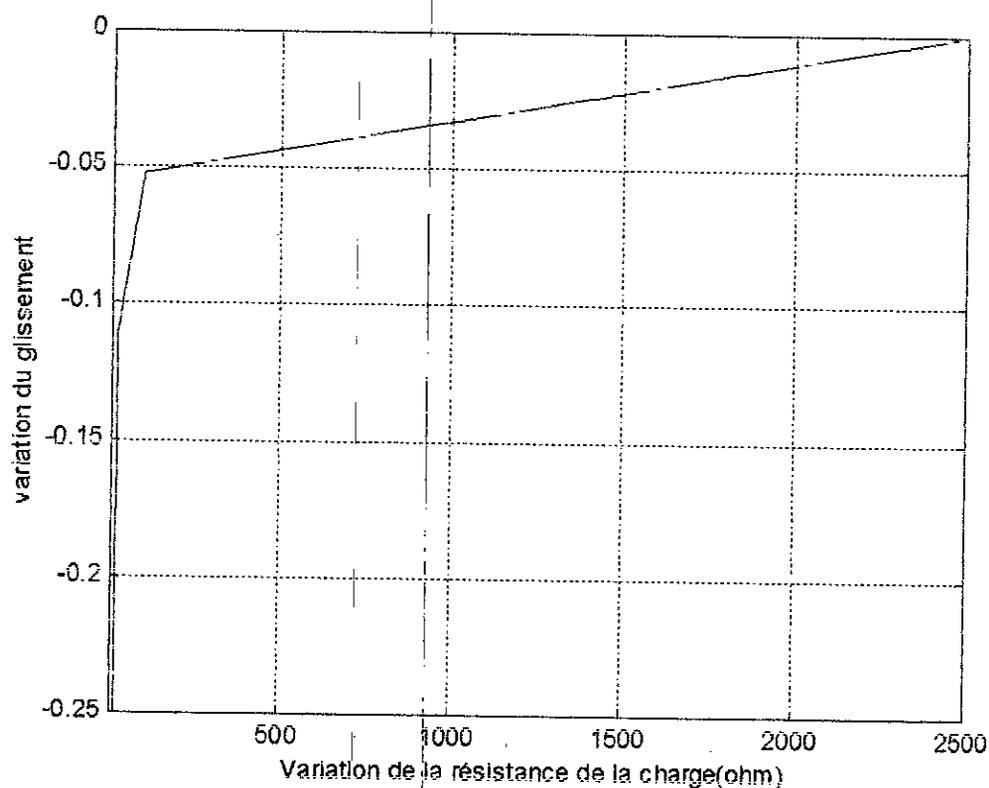
V.9 Variation de la durée de rétablissement de la tension en fonction de la résistance de la charge

Figure (3.12) : Variation de la durée de rétablissement de la tension en fonction de la résistance.

La figure ci-dessus montre la variation du temps de rétablissement de la tension en fonction de la résistance de la charge. On constate bien que l'augmentation de la résistance de la charge entraîne une diminution de la durée du transitoire donc à chaque fois que la charge augmente, la durée de rétablissement de la tension augmente.

IV.11 Variation du glissement en fonction de la résistance de la charge

Figure(3.13) : Variation du glissement en fonction de la résistance de la charge

La figure ci-dessus montre bien la variation du glissement en fonction de la résistance de la charge. On constate qu'à chaque fois que la résistance de la charge augmente, alors le glissement tend vers zéro.

VI Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les paramètres qui influent sur la tension et la fréquence.

Nous avons montré que la résistance rotorique n'influe pas sur le régime permanent (amplitude de la tension et la fréquence en régime permanent), mais elle influe considérablement sur la durée de rétablissement de la tension.

A chaque fois que la résistance rotorique augmente alors la durée de rétablissement de la tension diminue.

Nous avons étudié l'influence de la résistance rotorique et de la capacité sur la variation de la résistance critique, l'augmentation de la résistance rotorique entraîne une augmentation de la résistance critique.

L'augmentation de la capacité des condensateurs entraîne une diminution de la résistance critique, ceci est dû à l'augmentation de l'énergie réactive consommée par la machine.

Après, nous avons étudié l'influence de la charge sur l'amplitude de la tension, la durée du transitoire et la fréquence. Nous avons vu que l'augmentation de la charge entraîne une chute de tension et une diminution de la fréquence et une augmentation de la durée de rétablissement de la tension.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons étudié tout au long de notre travail le phénomène d'auto amorçage et l'influence des différents paramètres d'une machine asynchrone. L'existence du rémanent est indispensable pour ce mode de fonctionnement.

Le point de fonctionnement est déterminé par la résonance du circuit (R,C,l) . Le fonctionnement en auto excitation de la machine asynchrone pour une vitesse donnée n'est possible qu'entre deux valeurs limites pour les capacités, dépendant des paramètres électriques de la machine et de sa caractéristique de magnétisation.

Le fonctionnement en régime établi du générateur asynchrone dépend de plusieurs paramètres : la vitesse d'entraînement, le condensateur d'excitation, la caractéristique de magnétisation.

Dans le cas de la charge résistive, le comportement du générateur dépend de la charge.

La résistance critique dépend de la capacité des condensateurs d'excitation et de la valeur de la résistance rotorique, ainsi plus la capacité est importante plus la résistance critique diminue et plus la résistance rotorique est importante plus la résistance critique augmente

ANNEXE 1

1- Développement du produit $P_s(pP_s^{-1})f_{qdos}$

Avec f_{qdos} vecteur des composantes relatives.

La matrice de transformation est donnée par :

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

Son inverse par :

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

Le développement du produit repose sur la connaissance des formules trigonométriques suivantes :

$$\cos(\theta)\sin(\theta) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3})\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) = 0$$

$$\cos^2(\theta) + \cos^2(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos^2(\theta + \frac{2\pi}{3}) = \frac{2}{3}$$

$$\sin^2(\theta) + \sin^2(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin^2(\theta + \frac{2\pi}{3}) = \frac{3}{2}$$

$$\sin(\theta) + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) = 0$$

$$\cos(\theta) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) = 0$$

Calculons le produit $pP_s^{-1}(\theta)$

$$pP_s^{-1}(\theta) = \omega \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

En utilisant les formules trigonométriques donnée ci dessus nous aboutissons aux résultats suivants :

$$P_s pP_s^{-1}(\theta) = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_s p P_s^{-1}(0) - \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_o \end{bmatrix} - \omega \begin{bmatrix} f_d \\ -f_q \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nous notons le vecteur $[f_d \quad -f_q \quad 0]$ par f_{dq} ce qui donne :

$$P_s p P_s^{-1}(0) f_{dq} - \omega f_{dq}$$

Le raisonnement pour les grandeurs rotoriques.

2-Developpement du produit $P_s p^2 P_s^{-1}(0) f_{qdo}$

D'après l'expression de $P_s^{-1}(\theta)$, on a :

$$p^2(P_s^{-1}) = \omega^2 \begin{bmatrix} -\cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix}$$

$$= -\omega^2 [P_s^{-1} - A]$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En multipliant par $P_s(\theta)$, on aura :

$$P_s p^2(P_s^{-1}) = -\omega^2 [I_3 - B]$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$- \omega^2 D, \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

En multipliant encore par f_{qdo} on obtient :

$$P_s p^2(P_s^{-1}) f_{qdo} = -\omega^2 \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ainsi il vient que :

$$P_s p(P_s^{-1}) f_{qdo} = -\omega^2 f_{qd}$$

ANNEXE 2

La machine asynchrone utilisée est conçue en moteur, porte la plaque signalétique suivante :

Tension nominale : 220/380 volts

Courant nominal : 14/8 A

Fréquence nominale : 50Hz

Puissance nominale 3.5 kW

Nombre de paires de pôles : 2

Les paramètres de la machine mesurés en utilisant la méthode classique sont :

$$r_s = 1.2\Omega$$

$$r_r = 0.88\Omega$$

$$X_s = X_r = 3.11\Omega$$

$$X_m = 71.4\Omega \text{ (dans la zone linéaire)}$$

Les résultats de l'identification des paramètres du modèle de la fonction « degré de saturation » sont les suivants :

$$\lambda_1 : 5.3666882E - 003 \text{ Wb}^{-1}$$

$$\lambda_2 : -2.1995180E + 000 \text{ Wb}^{-1}$$

$$c_1 : 9.6578608E - 001$$

$$c_2 : 2.0872764E - 001$$

$$\phi_{m0} : 0.175 \text{ Wb}$$

$$\phi_{m1} : 0.0318 \text{ Wb}$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Boussahoua, " Simulation du fonctionnement de la génératrice asynchrone en régime dynamique", Thèse d'ingénieur, ENP 1996.
- [2] « <http://www.codeart.org> ».
- [5] M.Kostenko et L.Piotrovski "Machines à Courant Alternatif Tome II " Edition Mir.
Moscou, 1979
- [6] A. Abdelli, «Etude des régime statique et dynamique d'un générateur asynchrone amorcé», thèse d'ingénieur, ENP
- [7] Li Wang, MIEEE et Ching -Huei Lee "A Novel Analysis on The Performance of an Isolated Self -Excited Induction Generator" IEEE Transactions on Conversion, Vol.12 No.2 June 1997
- [8] T.F. Chan et L .Lei Lai " Capacitance Requirements of a Three - Phase Induction Generator Self -Excitation With a single Capacitance and Supplying a Single Phase Load" IEEE Transactions on Energy. Vol.17; N.1, pp 90-96 March 2002.
- [9] T. Khaldi, S.Mekhtoub et R. Ibtouen "Transitoires des courants et Tension suite à un auto - amorçage accidentel d'une Machine Asynchrone." International Conference on E lectrotechnics, ICEL200, Novembre 13-15, 2000, U.S.T Oran "M.B".Algerie
- [10] Voltage-Frequency Control of a Self -Excited Induction Generator " IEEE Transaction Conversion, Vol.14 No.3, pp 394 - 401 September 1999.