

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

Genie Electrique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Etude de la génératrice
asynchrone.*

Proposé par :

S. MEKHTOUB

Etudié par :

S. HAMDANI

D. HAQJI

Dirigé par

S. MEKHTOUB

PROMOTION

1994 / 1995

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

Genie Electrique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Etude de la génératrice
asynchrone.*

Proposé par :

S. MEKHTOUB

Etudié par :

S. HAMDANI

D. HAQJI

Dirigé par

S. MEKHTOUB

PROMOTION

1994 / 1995

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à:

- *mes chers parents qui m'ont offert toutes les conditions de la réussite,*
- *mes frères et sœurs,*
- *toute ma famille,*
- *tous mes amis.*

S. Hamdani

- *à mes chers parents sans qui ce travail n'aurait pas existé,*
- *à mon frère, mes sœurs, et toute ma famille,*
- *à tous ceux qui me sont chers.*

je dédie ce travail.

D. Hadji

Remerciements

Le présent travail est effectué au sein du laboratoire de machines électriques à l'École Nationale Polytechnique, sous la direction de Monsieur: S.MEKHTOUB, à qui on témoigne notre profonde reconnaissance pour l'aide et les conseils qu'il nous a prodigués pendant toute la durée de ce travail.

On remercie vivement, Messieurs le Président et les membres du jury qui ont consenti à nous honorer par leur présence à la présentation de ce travail.

Nos remerciement vont également à Monsieur: A.NESBA pour sa contribution déterminante.

Puissent tous les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin, trouver ici une part du témoignage de notre gratitude.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: RAPPELS SUR LA MACHINE ASYNCHRONE	4
I.1 Définition	5
I.2 Constitution	5
I.2.1 Stator	5
I.2.2 Rotor	5
I.3 Principe de fonctionnement	6
I.4 Schéma équivalent monophasé	8
I.5 Bilan de puissances	9
I.6 Génératrice asynchrone	10
I.6.1 Principe	10
I.6.2 Propriétés	11
I.6.3 Diagramme et caractéristiques	12
CHAPITRE II: AUTOAMORÇAGE DE LA GENERATRICE SHUNT	14
II.1 Introduction	15
II.2 Autoamorçage à vide	15
II.3 Génératrice shunt en charge	17
II.4 Conclusion	20
CHAPITRE III: AUTOAMORÇAGE A VIDE DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE	21
III.A Etude analytique	22
III.A.1 Equations de fonctionnement	22
III.A.2 Définition des paramètres	25
III.A.3 Méthode graphique	26
III.A.4 Influence de la vitesse	28
III.B Résultats pratiques	29
III.B.1 Détermination expérimentale	29
III.B.2 Prédétermination graphique	30
III.B.2.1 Influence de la capacité	30
III.B.2.2 Influence de la vitesse	31
III.C Conclusion	33

CHAPITRE IV: GENERATRICE ASYNCHRONE EN CHARGE	34
IV.1 Introduction	35
IV.2 Courbes caractéristiques	35
IV.3 Compensation de la puissance réactive	38
IV.3.1 Compensation de la génératrice	38
IV.3.2 Compensation des charges réactives	38
IV.4 conclusion	40
CHAPITRE V: SIMULATION DE L'AUTOAMORCAGE DE LA GENERATRICE	
ASYNCHRONE	41
V.1 Introduction	42
V.2 Hypothèses	42
V.3 Schéma équivalent utilisé pour la simulation	42
V.4 Modélisation de la courbe $E(X_m)$	43
V.5 Autoamorçage à vide	44
V.5.1 Détermination de la capacité minimale	45
V.5.2 détermination de la tension induite	46
V.5.3 Organigramme de calcul	48
V.6 Autoamorçage en charge	49
V.6.1 Détermination de la capacité minimale	50
V.6.2 Caractéristiques de la génératrice asynchrone ..	51
V.6.3 Organigramme de calcul	53
V.7 Interprétation des résultats	54
V.8 Conclusion	58
CONCLUSION GENERALE	59
ANNEXE	62
BIBLIOGRAPHIE	

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction Générale

L'utilisation de machines tournantes asynchrones comme génératrices de l'électricité est moins courante que l'utilisation des alternateurs. Néanmoins le développement récent de sources autonomes d'énergie, et surtout de systèmes de récupération d'énergie a vu l'essor rapide de ce type de génératrices qui présente de nombreux avantages par rapport à l'alternateur: construction plus simple - robustesse - moindre coût - facilité d'entretien - simplicité de mise en marche...etc.

Sans discontinuité de couple ni de courant une machine asynchrone passe du fonctionnement moteur à celui en génératrice dès que son glissement change de sens; c'est-à-dire dès qu'elle tourne plus vite que sa vitesse synchrone.

En pratique il suffit:

- d'une part, de créer le flux magnétique tournant en apportant au stator l'énergie électrique réactive nécessaire.
- d'autre part, d'entraîner mécaniquement la machine au-delà du synchronisme: la génératrice asynchrone se comporte comme un frein.

Une génératrice asynchrone peut être soit utilisée pour alimenter une charge isolée (fonctionnement autonome) surtout lorsqu'il s'agit d'installations simples (besoins ménagers, chauffage, charges résistives...), soit couplée à un réseau (fonctionnement non autonome). Dans ce dernier cas, le stator de la machine est connecté à un réseau électrique puissant, c'est-à-dire un réseau alimenté par des alternateurs avec la régulation à une puissance au moins égale à deux fois celle de la génératrice asynchrone. Dans ces conditions, le réseau impose à la génératrice asynchrone sa propre tension et sa propre fréquence, par ailleurs, il lui fournit automatiquement l'énergie réactive dont elle a besoin à tous ses régimes de fonctionnement.

Dans le cas du fonctionnement autonome le problème est double:

- la génératrice asynchrone, par nature, ne génère pas sa propre énergie d'excitation. Il faudra lui apporter cette énergie.
- comme pour toute source autonome d'énergie, il faudra stabiliser la tension et la fréquence.

Une génératrice asynchrone entraînée à une vitesse suffisante, peut lorsqu'une batterie de condensateurs est connectée à ses bornes, et si certaines conditions sont bien remplies s'autoamorcer et fournir de la puissance (ref: [1],[2],[5],[6]).

Au niveau du présent travail, on s'intéresse à la génératrice asynchrone autonome en régime établi. Notre objectif étant d'étudier, analytiquement et expérimentalement, le phénomène d'autoamorçage et les paramètres qui influent sur celui-ci.

Le premier chapitre est un rappel théorique sur la machine asynchrone fonctionnant soit en moteur soit en génératrice .

Au deuxième chapitre, nous étudions l'autoamorçage de la génératrice à courant continu shunt afin qu'on puisse le comparer à celui de la génératrice asynchrone.

Dans le troisième chapitre nous développons les équations analytiques qui permettent de déterminer les conditions nécessaires à l'autoamorçage de la génératrice asynchrone à vide.

Une méthode graphique pour déterminer la tension d'autoamorçage et voir l'influence de la vitesse et la capacité sur celui-ci est exposée. Les résultats obtenus par l'application de cette méthode sont comparés avec ceux issus des essais expérimentaux sur une machine asynchrone, dont la plaque signalétique et les paramètres sont présentés à l'annexe.

Nous consacrons le quatrième chapitre pour présenter les résultats d'essais en charge réalisés sur la machine asynchrone précitée fonctionnant en génératrice autonome, et nous les comparons avec ceux de la génératrice shunt, et de l'alternateur.

Dans le dernier chapitre, on présente un algorithme de calcul des conditions d'autoamorçage à vide et de prédétermination des caractéristiques de la génératrice en charge quelconque.

CHAPITRE I

Rappels sur la machine asynchrone

I.1 DEFINITION:

On appelle machine asynchrone toute machine électrique ne tournant pas exactement à la vitesse synchrone définie par:

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

f étant la fréquence du réseau d'alimentation.

p le nombre de paires de pôles de la machine.

I.2 CONSTITUTION:

Les moteurs asynchrones, également appelés moteurs d'induction, sont pratiquement tous triphasés. Ils comportent deux armatures coaxiales à champ tournant séparées par un entrefer étroit, l'une est fixe (stator), l'autre est mobile (rotor).

I.2.1 Stator:

On l'appelle également inducteur ou primaire, c'est grâce au champ tournant qu'il développe que sont dûs les courants induits du rotor. Il a la forme d'un anneau en tôles encoché à l'intérieur et portant un enroulement triphasé. (trois phases identiques et décalées entre elles de $2\pi/3$)

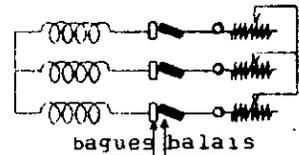
I.2.2 Rotor:

Il est séparé du stator par un entrefer étroit, il n'est lié à aucune source d'énergie électrique, ce qui simplifie beaucoup sa construction. Le courant dans les enroulements (mis en court-circuit), est uniquement induit par le champ tournant statorique, c'est pourquoi l'enroulement rotorique est encore appelé induit ou secondaire.

On distingue deux types de rotor:

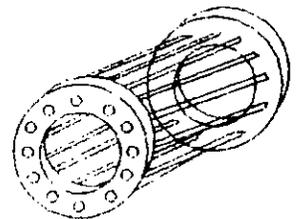
a- rotor à bagues:

C'est un rotor qui comporte dans ses rainures un enroulement identique à celui du stator. Cet enroulement est couplé en étoile, et connecté à trois bagues isolées sur lesquelles frottent des balais en charbon, ce qui permet la mise en série avec les phases du rotor un rhéostat extérieur nécessaire pour l'obtention de meilleures conditions de démarrage.



b- rotor à cage:

Il est muni d'un enroulement constitué par des barres en cuivre ou en aluminium, logées dans des encoches et court-circuitées en permanence à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Un tel rotor est très robuste et économique.



I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT:

L'enroulement statorique, recevant des courants de fréquence f crée une fmm tournante origine d'un flux tournant à la vitesse synchrone $\Omega_s = \omega_s/p = 2\pi f/p$ par rapport au stator, et dont la majeure partie ϕ est commune aux deux enroulements. Le flux ϕ induit dans chaque phase primaire une fem d'auto-induction et dans chaque phase secondaire une fem induite.

Les enroulements rotoriques étant en court-circuit, les fem induites créent un système équilibré de courants secondaires. Le couple est dû à l'action du flux primaire sur les courants secondaires qu'il a lui même induit.

Si le rotor tournait à la vitesse synchrone, le flux à travers ses bobines ne varierait plus, d'où plus de courants secondaires ni de couple.

On appelle glissement l'écart des vitesses angulaires: synchrone Ω_s et rotorique Ω' rapporté à la vitesse angulaire synchrone. D'où:

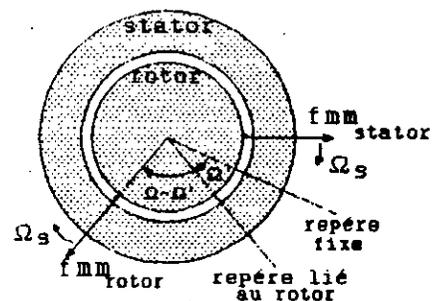
$$g = \frac{\Omega_s - \Omega'}{\Omega_s} = \frac{N_s - N}{N_s}$$

avec:

- $N_s = \Omega_s / 2\pi p$: la vitesse de rotation du champ tournant statorique en [Tr/s] appelée la vitesse synchrone.
- $N = \Omega' / 2\pi p$: la vitesse de rotation mécanique du rotor [tr/s].

Au démarrage ($N = 0$), les fem et les courants rotoriques ont la même fréquence f que les tensions et les courants statoriques. Mais quand la machine accélère, la vitesse relative de la fmm tournante primaire par rapport au rotor diminue ($\Omega_r = \Omega_s - \Omega'$), il en est de même pour la fréquence des grandeurs rotoriques $f_r = (\omega_s - \omega') / 2\pi$, avec $\omega' = p\Omega'$.

les courants rotoriques de pulsation $\omega_r = p(\Omega_s - \Omega') = \omega_s - \omega'$ créent une fmm tournante dont la vitesse par rapport au rotor est: $\Omega_r = \omega_r / p = (\omega_s - \omega') / p = \Omega_s - \Omega'$. Par rapport au stator, cette fmm a une vitesse égale à: $\Omega' + (\Omega_s - \Omega') = \Omega_s$. Donc les deux fmm tournantes l'une due aux courants statoriques de fréquence f , l'autre due aux courants rotoriques de fréquence gf tournent à la même vitesse Ω_s quelque soit le glissement g .



Cette identité des vitesses des fmm des deux armatures est indispensable pour qu'il y ait un couple à n'importe quelle vitesse de rotation, sauf pour $\Omega' = \Omega_s$ pour laquelle le phénomène d'induction au rotor disparaît.

les deux fmm se composent pour donner la fmm réelle. Et c'est elle qui engendre le flux tournant réel. Ce flux balayant le stator y induit la fcem en charge.

I.4 SCHEMA EQUIVALENT MONOPHASE:

Une machine asynchrone est équivalente à un transformateur statique dont le secondaire supposé sans résistance, alimenterait une charge R_r/g . R_r étant la résistance par phase du rotor.

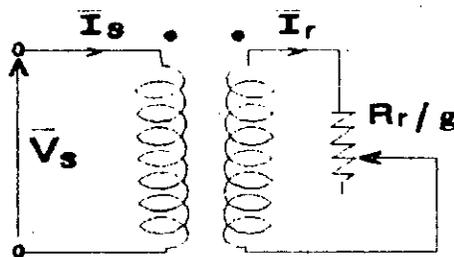


FIG I.1: équivalence entre une MAS et un transformateur

On peut également considérer que l'enroulement secondaire est de résistance R_r la charge qu'il alimente ayant pour expression

$$\frac{R_r}{g} - R_r = R_r \frac{1-g}{g}$$

la machine étant équivalente à un transformateur statique, de rapport de transformation $m = E_1/E_2$, il est alors possible d'utiliser le schéma équivalent général du transformateur en ramenant au primaire (le stator) les éléments du secondaire (le rotor)

$$R'_r = m^2 R_r \quad X'_r = m^2 X_r = m^2 l_r \omega$$

Comme pour le transformateur, le courant à vide I_0 se partage en deux branches:

- l'une (R_f) absorbe la composante active du courant I_0 due aux pertes fer.

- l'autre (X_m) absorbe la composante réactive qui est nécessaire pour entretenir le flux dans l'entrefer.

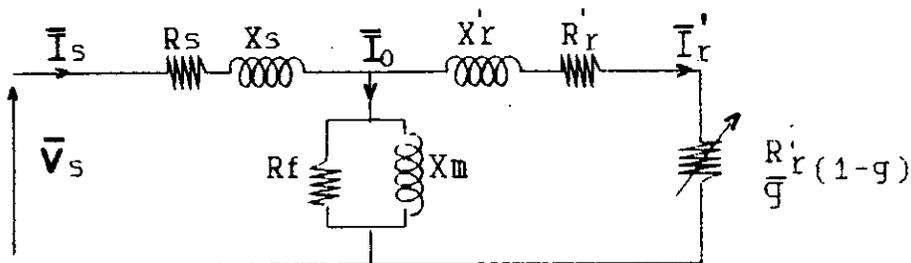


FIG I.2: schéma équivalent monophasé d'une MAS

I.5 BILAN DE PUISSANCES:

Le moteur absorbe au réseau la puissance $P_s = 3V_s I_s \cos \phi_s$. Une faible partie de cette puissance (1 à 2%) est perdue dans le stator sous forme de pertes dans le fer p_{fs} , et des pertes dans le cuivre dues à l'effet Joule p_{Js} .

La puissance restante est alors transmise au rotor par le champ tournant sous la forme de puissance électromagnétique.

$$P_{em} = P_s - (p_{fs} + p_{Js}) = P_s$$

Le rotor utilise cette puissance à deux fins:

- une partie est consommée par effet Joule dans les enroulements du rotor.

$$P_{Jr} = 3R_r' I_r'^2 = gP_{em} = gP_s$$

- l'autre partie se retrouve en puissance mécanique P_{mec} disponible sur l'arbre du moteur.

$$P_{mec} = P_{em} - P_{Jr}$$

Les pertes fer dans le rotor sont négligeables car la fréquence rotorique $f_r = gf$ est très faible en marche normal (1 à 3Hz).

La puissance utile développée P_u par la machine est égale à la puissance mécanique P_{mec} diminuée des pertes mécaniques P_{mec} .

$$P_u = P_{mec} - P_{mec} = P_{mec}$$

Il est facile alors, d'en déduire le rendement:

$$\eta = \frac{P_u}{P_s} = \frac{P_{mec}}{P_s} = \frac{P_{em} - P_{Jr}}{P_s} = \frac{(1-g) P_s}{P_s}$$
$$\rightarrow \eta = 1-g$$

En conséquence:

Le rendement de la machine est d'autant plus faible que son glissement est plus élevé.

1.6 LA GENERATRICE ASYNCHRONE:

1.6.1 Principe:

Comme toute machine électromagnétique, la machine asynchrone est réversible. Si au lieu de prélever de la puissance mécanique sur l'arbre, on en fournit, la machine fonctionne en génératrice si elle est entraînée au-delà du synchronisme.

En effet, d'après la loi de LENZ, en fonctionnement moteur les forces électromagnétiques exercées entre les pôles fictifs du stator et l'enroulement du rotor tendent à s'opposer au déplacement relatif vers l'arrière de cet enroulement, et c'est ainsi que le couple dû à ces forces agit dans le sens de la rotation. C'est un couple moteur.

Supposons qu'à l'aide d'un moteur auxiliaire nous entraînons le rotor au-delà du synchronisme: le déplacement relatif du rotor par rapport aux pôles fictifs du stator change de sens, pour s'opposer à ce déplacement relatif, le couple des forces électromagnétiques s'exerce dans le sens de rotation. Il est devenu résistant. La machine absorbe de la puissance mécanique. Cette puissance devient nécessairement de la puissance électrique.

Nous avons donc une machine qui transforme de la puissance mécanique en puissance électrique: c'est une génératrice asynchrone.

I.6.2 Propriétés:

Cette génératrice a les particularités suivantes:

- 1- elle fournit d'autant plus de puissance qu'elle est, à l'hypersynchronisme, entraînée à une vitesse plus grande. Mais, elle présente un maximum de puissance électrique au-delà de laquelle la génératrice asynchrone oppose à son moteur un couple résistant rapidement décroissant.
- 2- son flux, à l'inverse de la machine synchrone est dû à un courant alternatif. Elle ne peut pas produire elle même le réactif (courant magnétisant) nécessaire à la production de ce flux.
- 3- Quelle que soit sa vitesse hypersynchrone, la fréquence à laquelle elle fournit de la puissance est égale à celle du réseau. Cela est dû au fait que le réseau fournissant le courant magnétisant, et créant le champ de la machine asynchrone, impose dans celle-ci la vitesse de synchronisme au flux glissant. La fem engendrée par ce dernier aura donc toujours pour fréquence celle du réseau.
- 4- La mise en service d'une génératrice asynchrone ne s'effectue pas comme dans le cas des machines synchrones - lancement par un moteur auxiliaire pour synchronisation, puis couplage au réseau - car il n'y a pas de fem induite aux bornes des enroulements

statoriques en l'absence de connexions avec le réseau. La machine est donc démarrée en moteur asynchrone, puis entraînée au-delà du synchronisme.

5- On peut améliorer le facteur de puissance d'une génératrice asynchrone en disposant une batterie de condensateurs en parallèle sur son primaire. Dans ce cas, elle peut s'autoamorcer à cause du faible flux rémanent du rotor et alimenter de façon autonome un réseau ne comportant que des récepteurs. Le fonctionnement se stabiliserait à une tension et une fréquence telles qu'il y ait égalité entre les puissances active créée et absorbée, entre les puissances réactives créée et absorbée.

1.6.3 Diagramme et caractéristiques:

Considérons le diagramme du cercle ci-dessous (figure I.3). Partant de la marche en charge en moteur asynchrone, si nous déchargeons celui-ci, le point de fonctionnement passe de P à P_0 (point de fonctionnement à vide).

Un accroissement de vitesse fait que le point se déplace dans le sens anti-horaire: il passe sur le demi-cercle inférieur (point P').

Nous voyons que :

- la composante active du courant du stator a changé de signe. La puissance était absorbée, elle est fournie.
- La composante réactive du courant du stator n'a pas changé de signe. La puissance réactive est toujours absorbée.

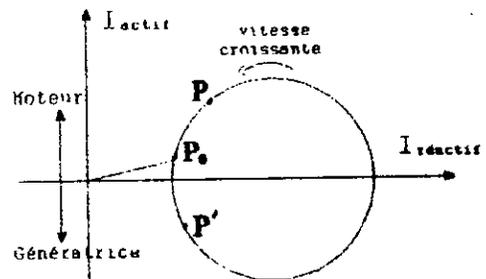


FIG I.3 diagramme du cercle de la MAS

La symétrie qui existe entre les deux fonctionnements de la machine asynchrone de part et d'autre de la vitesse synchrone explique le fait que la caractéristique $\Gamma(N')$ de la génératrice soit sensiblement symétrique à celle du moteur par rapport au point de synchronisme (voir la figure I.4 ci-contre)

Dans le mode génératrice, le couple résistant passe par une valeur maximale, et si le couple d'entraînement la dépasse: la génératrice décroche, ce qui risque de provoquer l'emballement du groupe. C'est pourquoi, seule la partie initiale de la caractéristique est stable.

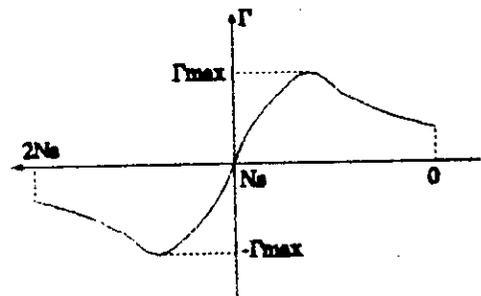


FIG I.4 : caractéristique mécanique de la MAS

CHAPITRE II

Autoamorçage de la génératrice shunt

II.1 INTRODUCTION:

Une machine à courant continu est dite à excitation shunt lorsque son circuit inducteur est monté en parallèle à son induit. Voir la figure II.1 suivante:

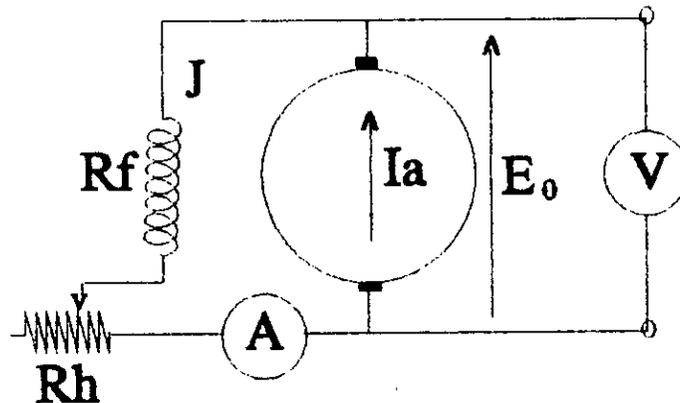


FIG II.1: Génératrice shunt: représentation schématique.

La génératrice shunt a l'avantage d'être autoexcitatrice, c'est-à-dire qu'elle n'exige pas une source auxiliaire pour son excitation. Elle ne peut s'amorcer qu'à l'aide de son magnétisme rémanent.

II.2 AUTOAMORCAGE A VIDE:

Le courant d'excitation J est lié à la force électromotrice à vide E_0 par les deux relations suivantes :

1- la caractéristique à vide $E_0(J)$.

2- la loi d'OHM : $E_0 = R \cdot J$ appelée droite des inducteurs. R étant la résistance totale du circuit d'excitation; $R = R_f + R_h$.

Ce système à deux équations est résolu graphiquement afin de déterminer le point de fonctionnement à vide P de la machine. (Cf. figure II.2 ci après).

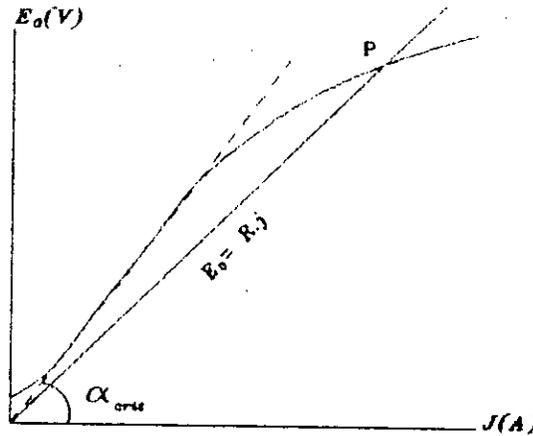


FIG II.2: Détermination graphique du point p

D'après ce qui précède, il est évident que l'existence du point de fonctionnement P, implique que la droite des inducteurs soit au-dessous de la tangente à l'origine de la courbe à vide. Ceci veut dire que la condition d'autoamorçage de la génératrice shunt est que la résistance du circuit d'excitation R soit inférieure à la résistance critique R_{crit} . Cette dernière étant égale à la pente de la courbe à vide;

$$R_{crit} = tg \alpha_{crit}$$

En conséquence, les conditions nécessaires pour obtenir l'amorçage sont:

- le circuit de charge soit ouvert (machine à vide), sinon sa résistance, généralement très inférieure à R, dérive la quasi-totalité du courant dû au rémanent.
- la vitesse de rotation soit suffisante puisque la fem E_o lui est proportionnelle.
- le rhéostat d'excitation R_h soit en majeure partie éliminé, afin que R soit assez faible.

Mais, ces conditions ne sont pas suffisantes. En effet, analysons le mécanisme d'autoamorçage: une fem initiale E_r est produite par le flux rémanent, cette fem engendre un faible courant dans l'inducteur :

$$J = \frac{E_r}{R}$$

Deux cas de figure se présentent:

1- si ce courant engendre une fmm qui renforce le flux rémanent, celui-ci est accru; la fem s'élève, le courant inducteur augmente renforçant davantage le flux ... et ainsi de suite, jusqu'à ce que la fem E_0 ait atteint sa valeur définitive correspondant au point de fonctionnement à vide, comme l'illustre la figure II.3 suivante:

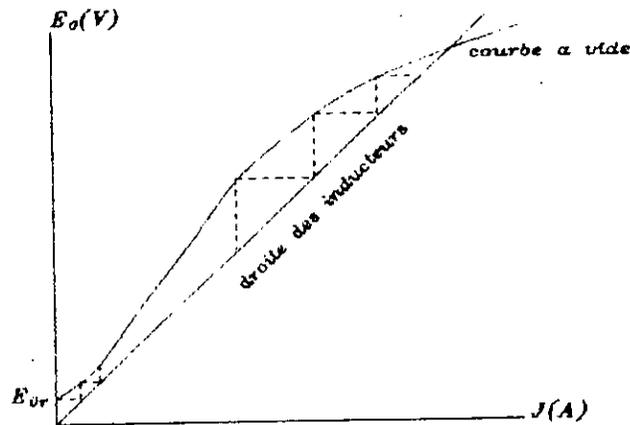


FIG II.3: mécanisme d'autoamorçage d'une génératrice shunt.

2- par contre, si le courant initial crée une fmm de sens opposé au flux rémanent celui-ci sera réduit et la fem rémanente ne pourra s'accroître. Dans ce cas précis, il faut inverser soit le sens de rotation, soit le branchement de l'inducteur aux bornes de l'induit.

II.3 GÉNÉRATRICE SHUNT EN CHARGE:

On appelle la caractéristique externe ou en charge d'une génératrice shunt la courbe $U(I)$, représentant la tension U aux bornes de la charge en fonction du courant I consommé par celle-ci, à vitesse et à résistance du circuit d'excitation constantes. On peut l'obtenir de deux façons:

1- soit par un relevé direct: l'essai en charge. A cet effet, on réalise le montage ci-dessous (figure II.4). On entraîne la machine à sa vitesse normale que l'on maintiendra constante. On règle le rhéostat R_h , et on agit sur le charge R_L de manière à ce que la machine fonctionne aux environs de son point nominal. Là-dessus, on ne touche plus au circuit d'excitation; et par action sur la charge on fait varier le courant débité de I_n à zéro. On note les valeurs correspondantes de la tension U aux bornes en s'assurant que la vitesse d'entraînement n'a pas varié.

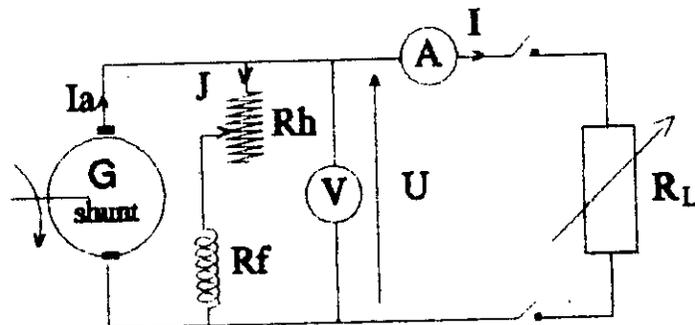


FIG II.4: Génératrice shunt en charge.

2- soit graphiquement, par la construction de PICOU à partir de la courbe à vide $E_0(J)$ et la courbe de chute de tension interne $u(I)$ de la machine déterminées toutes les deux en excitation séparée. On présente ces deux courbes respectivement dans les cadrants de droite et de gauche (figure II.5). On trace la droite d'inducteurs RJ . On a:

$$E_0 = U + u = RJ + u$$

si l'on se donne une valeur I_1 du courant induit on en déduit la chute de tension $(u)_{I_1}$ puis, par translation de la droite des inducteurs la fem $(E_0)_{I_1}$, en retranchant $(u)_{I_1}$ la tension U correspondante. On reporte U dans le cadran gauche. A l'aide de quelques points on obtient ainsi $U(I_a)$.

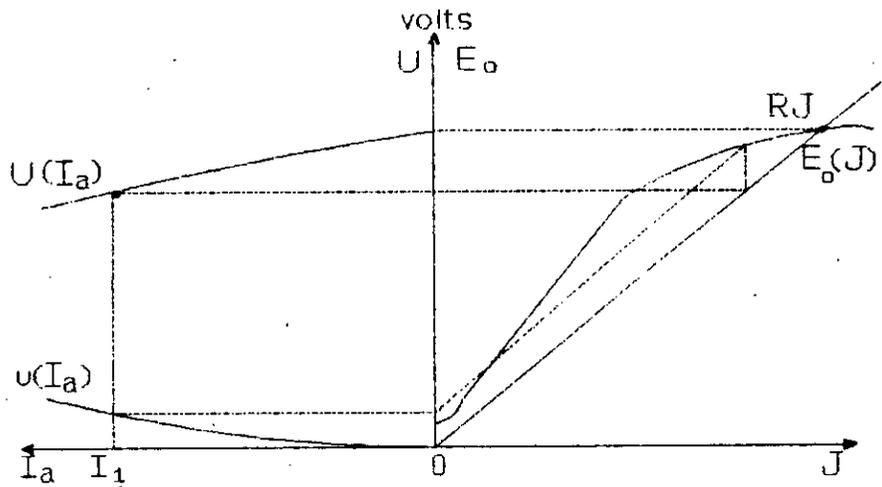


FIG II.5 construction de PICOU

La caractéristique en charge $U(I)$ obtenue expérimentalement, et représentée à la figure II.6, a une allure descendante: la tension U aux bornes du récepteur diminue, assez vite, en fonction du courant débité I car en plus de la chute de tension interne $u=U-E_0$, il y a une diminution de la fem E_0 , étant donné que le courant d'excitation égal à U/R diminue à cause des chutes de tension.

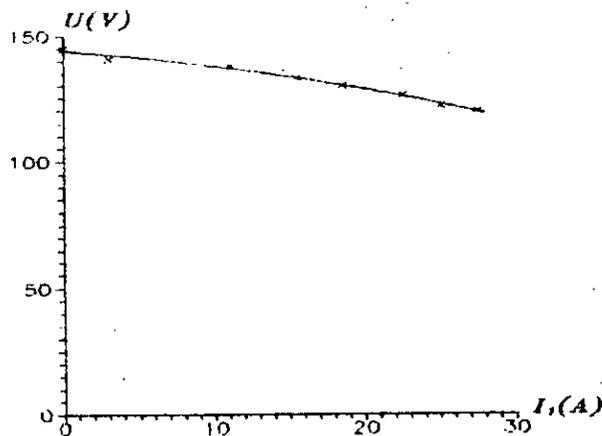


FIG II.6: caractéristique en charge de la génératrice shunt.

II.4 CONCLUSION:

Une génératrice à courant continu shunt est par nature autoexcitatrice, car c'est la machine elle même qui fournit son propre courant d'excitation.

La machine ne peut s'amorcer qu'en raison de l'aimantation rémanente, et les conditions suivantes sont indispensables:

- vitesse de rotation suffisante,
- résistance d'excitation inférieure à la résistance critique,
- sens de rotation et connexion des deux circuits de la machine convenables.

CHAPITRE III

Autoamorçage à vide de la génératrice asynchrone

III-A ETUDE ANALYTIQUE

III-A.1 EQUATIONS DE FONCTIONNEMENT:

On a vu qu'une génératrice asynchrone a besoin d'énergie réactive pour créer son champ magnétique tournant. Donc, on peut espérer amorcer une machine asynchrone dont les enroulements statoriques sont connectés à une batterie de condensateurs à ses bornes, comme le schématise le circuit de la figure III-A.1.

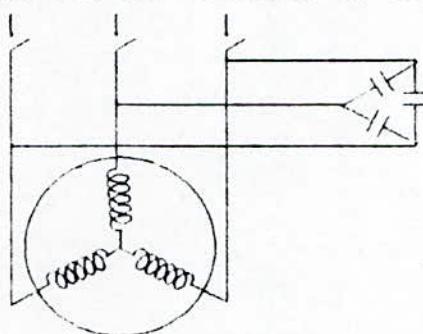


FIG III-A.1: circuit d'autoamorçage d'une MAS à vide

On peut le remplacer par le schéma équivalent de la figure III-A.2 relatif à une phase, en négligeant la branche R_r .

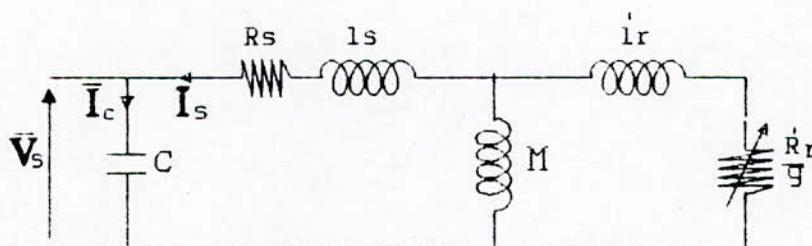


FIG III-A.2: schéma équivalent par phase au circuit de la figure III-A.1

Avec les notations suivantes:

- R_s : résistance d'une phase statorique.
- R_r' : résistance d'une phase rotorique ramenée au stator.
- g : glissement .
- l_s : inductance cyclique de fuites statorique.
- l_r' : inductance cyclique de fuites rotorique ramenée au stator.
- M : inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.

On définit les paramètres suivants:

- $L_s = l_s + M$: inductance cyclique propre du stator.
- $L_r = l_r' + M$: inductance cyclique propre du rotor ramenée au stator.
- $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$: coefficient de dispersion de Blondel .

La relation d'équilibre s'écrit comme suit:

$$\bar{I}_c = \bar{I}_s$$

Cette équation signifie que l'énergie réactive absorbée par la machine doit être égale à l'énergie réactive fournie par les condensateurs.

On désigne par Z_c la réactance du condensateur, et par Z_m l'impédance totale de la machine asynchrone.

$$Z_c = \frac{1}{jC\omega}$$

$$Z_m = \frac{(R_s + j l_s \omega) \cdot \left(\frac{R_r'}{g} + j(M + l_r') \omega \right) + j M \omega \left(\frac{R_r'}{g} + j l_r' \omega \right)}{\frac{R_r'}{g} + j(M + l_r') \omega}$$

On a:

$$\bar{I}_c = \bar{I}_s \rightarrow \frac{\bar{V}_s}{Z_c} = - \frac{\bar{V}_s}{Z_m} \text{ , soit : } \frac{1}{Z_c} = - \frac{1}{Z_m}$$

donc:

$$jC\omega + \frac{\frac{R_r}{g} + jL_r\omega}{(R_s + jL_s\omega) (\frac{R_r}{g} + jL_r\omega) + jM\omega (\frac{R_r}{g} + jL_r\omega)} = \bar{0}$$

$$\rightarrow jC\omega [(R_s + jL_s\omega) (\frac{R_r}{g} + jL_r\omega) + jM\omega (\frac{R_r}{g} + jL_r\omega)] + \frac{R_r}{g} + jL_r\omega = \bar{0}$$

En regroupant les termes réels et les termes imaginaires, on obtient:

$$[\frac{R_r}{g} (1 - L_s C \omega^2) - R_s L_r C \omega^2] + j\omega [L_r - L_r M C \omega^2 + C (R_s \frac{R_r}{g} - L_s L_r \omega^2)] = \bar{0}$$

En égalant chacun des deux termes à zéro, on obtient les deux expressions suivantes du glissement g:

$$g = \frac{R_r}{R_s} \cdot \frac{L_s}{L_r} \left(\frac{1}{L_s C \omega^2} - 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$g = \frac{C R_s R_r}{L_r (CL_s \sigma \omega^2 - 1)} \dots \dots \dots (2)$$

Il suffit alors d'égaliser (1) à (2) pour éliminer g et obtenir finalement l'équation:

$$\left(\frac{1}{L_s C \omega^2} - 1 \right) (CL_s \sigma \omega^2) - C \frac{R_s^2}{L_s} = 0$$

Pratiquement, le terme $R_s^2 C / L_s$ est toujours négligeable; alors nous pourrions admettre les solutions approchées suivantes:

$$\omega_1^2 = \frac{1}{L_s C} \dots \dots \dots (3)$$

$$\omega_2^2 = \frac{1}{\sigma L_s C} \dots \dots \dots (4)$$

- Dans la pratique, seule la pulsation ω_1 sera retenue. En effet, σ est très petit devant l'unité et ainsi ω_2 correspond à une vitesse excessive qu'il est dangereux voir même impossible d'atteindre.

- D'après l'équation (3) on a $L_e \cdot C_1^2 = 1$, qui n'est autre que la condition de résonance. C'est lorsque cette condition sera réalisée que l'autoamorçage aura lieu, si le magnétisme rémanent est suffisant. Nous pouvons déterminer la vitesse critique minimale de la machine à partir de laquelle il y aura autoamorçage.

$$N_{\min} = \frac{60}{P} f = \frac{60}{P} \frac{1}{2\pi \sqrt{L_e C}} \quad [Tr/mn]$$

Une application trop hâtive des équations de fonctionnement démontrées ci-dessous, avec la valeur de L_e déterminée à partir de l'essai à vide, conduirait à des résultats complètement erronés. Ces équations ne sont exactes que si l'on précise certains paramètres.

III-A.2 DEFINITION DES PARAMETRES:

a) Précédemment, on a supposé que la réactance totale du stator L_e était constante. Or, en réalité, L_e varie avec le flux moyen Φ_0 dans la machine.

En effet, le coefficient L_e est la résultante de deux termes:

1- L'inductance commune M , dépendant du champ principal commun au stator et au rotor. Les ampères-tours qui engendrent ce champ dans le fer croissent beaucoup plus vite que l'induction; donc M diminue lorsque la saturation augmente.

2- L'inductance de fuite statorique l_e , qui correspond à des lignes de champ dans l'air pour les têtes de bobines et l'entrefer et dans le fer pour la denture; donc l_e varie très peu avec la saturation.

Finalement, L_e diminue avec la saturation.

b) Pour tracer les variations de L_e en fonction de Φ_0 on procède comme suit:

Le flux moyen Φ_0 induit une fem $L_e \omega I_0$ sensiblement égale à la tension à vide V_g en négligeant les chutes résistives de tension. Nous pourrions donc écrire:

$$\Phi_0 = L_e \cdot I_0 = \frac{V_g}{\omega}$$

Il suffira alors de tracer la courbe de $L_e = f(V_g/\omega)$ qui a l'allure générale représentée sur la figure III-A.3 sur laquelle M représente le point de fonctionnement normal de la machine.

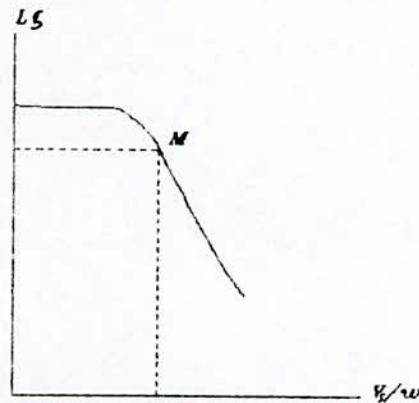


FIG-III.A.3: variation de l'inductance L_g en fonction du flux moyen

III-A.3 METHODE GRAPHIQUE :

La méthode graphique permet de déterminer très simplement si, pour une capacité donnée, la machine peut s'autoamorcer à vide, et si cette condition est satisfaite, la valeur de la tension correspondante.

Pour cela on utilise la courbe d'aimantation de la machine $V_g(I_m)$; I_m étant le courant réactif (magnétisant). Cette courbe devrait être tracée pour la vitesse synchrone, mais en moteur à vide g est sensiblement nul.

Le moteur étant alimenté à fréquence normale, on relève le courant à vide I_0 en fonction de la tension d'alimentation V_s . On élimine la composante active pour ne conserver que la composante réactive I_m . La figure III-A.4 donne l'allure d'une telle courbe.

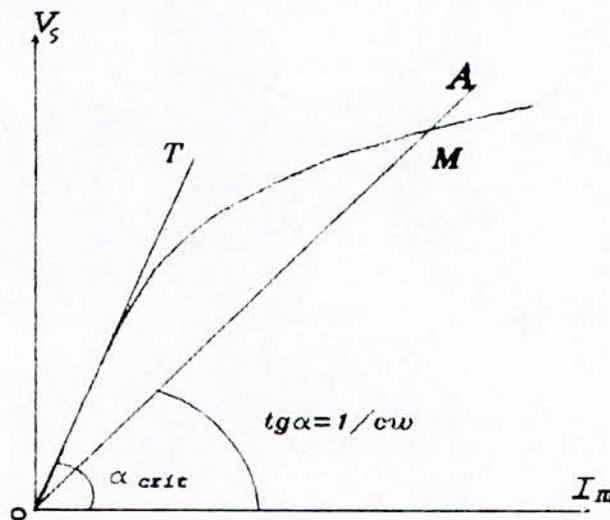


FIG III-A.4: courbe d'aimantation d'un moteur asynchrone

La tension de fonctionnement de la génératrice autonome est déterminée par la condition: le courant magnétisant nécessaire à l'aimantation du circuit magnétique I_m est égal au courant fourni par les condensateurs. D'où la condition graphique d'autoamorçage: La droite OA de pente égale à $1/C\omega$ doit couper la courbe $V_s(I_m)$, donc doit être au dessous de sa tangente à l'origine OT.

$$\frac{1}{C\omega} \leq L_{scrit} \omega \rightarrow C \geq \frac{1}{L_{scrit} \omega^2}$$

avec:

L_{scrit} : inductance totale du stator en absence de saturation donnée par la pente de la partie linéaire de la courbe d'aimantation.

$$L_{scrit} \omega = \text{tg}(\alpha_{crit})$$

L'ordonnée du point M (intersection de la droite OA et la courbe $V(I_m)$) sera la tension induite dans ce fonctionnement.

III-A.4 INFLUENCE DE LA VITESSE:

Le problème qui se pose couramment est le calcul de la tension induite V_g à vide en fonction de la vitesse de rotation N de la machine pour une capacité C donnée à ses bornes. Nous procédons ainsi:

- 1-En connaissant ω et C , on calcule $L_{\omega} = 1/C\omega^2$.
- 2-En reportant cette valeur sur la figure III-A.3 ci-dessus, représentant la courbe $L_{\omega} = f(V_g/\omega)$, nous obtenons le rapport V_g/ω donc la tension V_g . Les variations de la tension V_g en fonction de la vitesse N sont représentées à la figure III-A.5, où le point A correspond à la pulsation ω_1 .

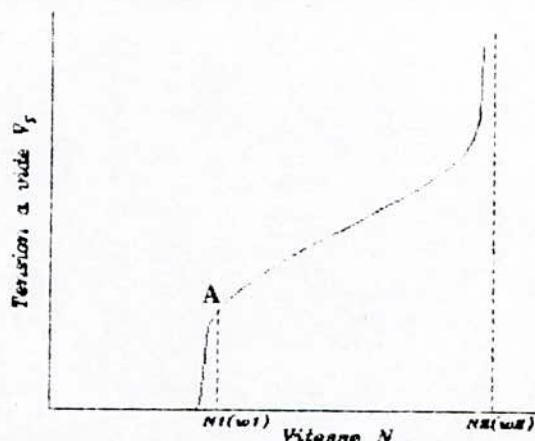


FIG III-A.5 : influence de la vitesse sur la tension à vide pour une capacité C fixe

Si l'on continue le tracé de la courbe vers les vitesses croissantes, on obtiendrait le point correspondant à ω_2 de la formule (4). Ce point de fonctionnement est instable.

Notons en outre, qu'il faut atteindre la vitesse N_1 pour que la machine s'amorce. Dans les quelques cas particuliers -capacité C très grande - où la pulsation ω_2 peut être réalisée, la tension qui en résultera est toujours dangereuse (8 à 10 fois la tension nominale), et peut provoquer des avaries à l'isolation de la machine.

III-B RESULTATS PRATIQUES:

III-B.1 DETERMINATION EXPERIMENTALE:

La détermination expérimentale de la tension d'autoamorçage d'une génératrice asynchrone, de faible puissance, à vide, nous a permis de tracer les courbes $V_s(N)$ représentées à la figure III-B.1. Ces dernières traduisent l'influence de la vitesse d'entraînement de la machine sur la tension d'auto-amorçage, et ceci pour deux valeurs de la capacité des condensateurs en parallèle: $C_1 = 90 \mu F$ et $C_2 = 120 \mu F$.

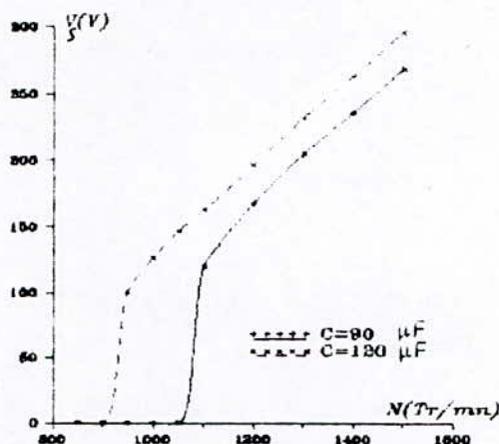


FIG III-B.1: influence de la vitesse sur la tension d'autoamorçage

On remarque que:

- Il existe une vitesse minimale ou critique qu'il faut dépasser pour avoir l'autoamorçage. Puis la tension augmente rapidement lorsque la vitesse croît. Ainsi une vitesse excessive peut provoquer des dangers pour l'isolation de la machine.
- Pour une vitesse fixe, la tension d'auto-amorçage augmente avec la capacité des condensateurs.

En conclusion, pour avoir une tension donnée on peut agir soit sur la vitesse d'entraînement, soit sur la capacité des condensateurs. La première alternative est plus facile à réaliser, mais on est malheureusement limité par la marge permise de variation de fréquence, par contre l'action sur la capacité est plus complexe et ne peut se faire que par gradins (manuellement ou automatiquement).

III-B.2 PREDETERMINATION GRAPHIQUE:

Dans cette partie, on se base sur la courbe à vide afin de déterminer la tension d'autoamorçage à différentes capacités et plusieurs vitesses.

III-B.2.1 INFLUENCE DE LA CAPACITE:

La courbe à vide $V_g(I_0)$ à 1500 tr/mn de la machine asynchrone est représentée à la figure III-B.2

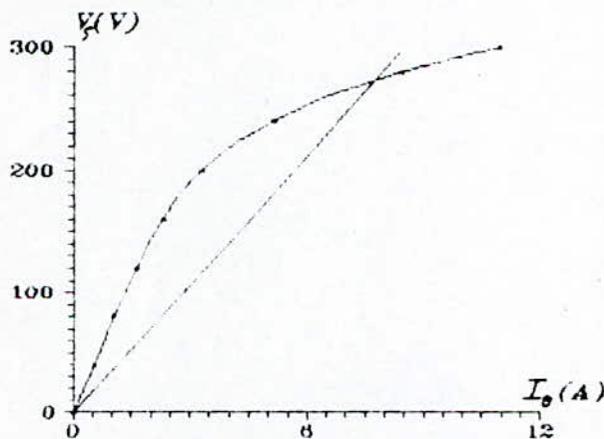


FIG III-B.2: caractéristique à vide de la GAS

- La capacité minimale d'autoamorçage à 1500 tr/mn est obtenue en calculant la pente de la tangente à l'origine OT de la courbe à vide $V_g(I_0)$. On a :

$$tg(\alpha_{crit}) = \frac{1}{C_{min}\omega} = 74 \rightarrow C_{min} = 43.03 \mu F$$

La condition d'autoamorçage à vide de la génératrice asynchrone entraînée à 1500 tr/mn est $C > C_{min}$.

- Pour déterminer le point de fonctionnement de la génératrice à 1500 tr/mn pour n'importe quelle capacité C supérieure à C_{min} , il suffit de tracer sur la figure III-B.2 une droite de pente égale à $1/C\omega$. L'ordonnée du point d'intersection de cette droite et la courbe à vide sera la tension induite pour ce fonctionnement.

Les résultats obtenus graphiquement sont comparés aux résultats expérimentaux, et une bonne précision a été notée.

En se référant à la figure III-B.2, on remarque que:

- La tension à vide est limitée par la saturation.
- Il existe une capacité limite (maximale) pour laquelle la tension correspondante est très élevée, qu'il est très dangereux d'atteindre.

III-B.2.2 INFLUENCE DE LA VITESSE:

On veut déterminer la tension à vide en fonction de la vitesse d'entraînement de la génératrice pour une capacité fixe à ses bornes. On procède de la manière développée au paragraphe III-A.4

- A partir d'une vitesse N , on calcule l'inductance L_s correspondante par l'expression:

$$L_s = \frac{1}{C\omega^2} \quad \text{tel que: } \omega = 2\pi \frac{pN}{60}$$

- On reporte cette valeur sur la courbe $L_s(V/\omega)$ pour obtenir le rapport V/ω et par suite la tension à vide V_s correspondante.

La courbe $L_s(V/\omega)$ représentant les variations de l'inductance statorique totale L_s en fonction du flux moyen ϕ_0 est déterminée à partir de l'essai à vide et représentée à la figure III-B.3 ci-après:

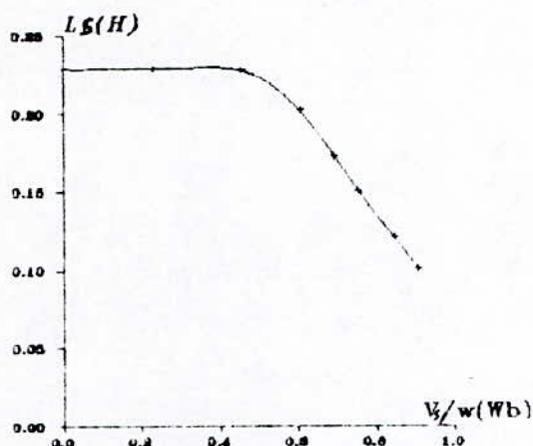


FIG III-B.3: variations de l'inductance L_s en fonction du flux moyen $\phi_0 = V_s/\omega$

- On a appliqué la procédure précédente pour deux capacités distinctes $C_1=90 \mu F$, $C_2=120 \mu F$. Les résultats de calcul obtenus sont représentés sur les figures III-B.4 et III-B.5. Les courbes obtenues expérimentalement y sont également représentées. On y voit clairement la convergence entre les deux résultats.

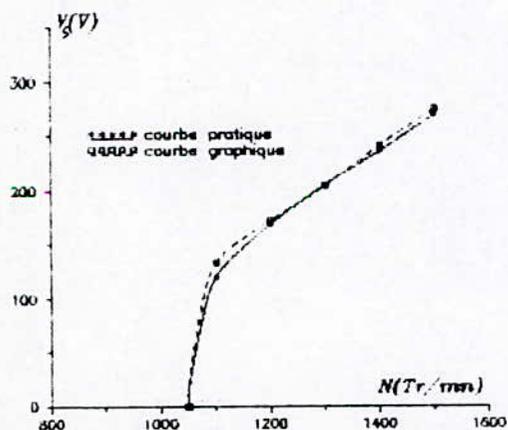


FIG III-B.4: $V_s(N)$ pour $C=90 \mu F$

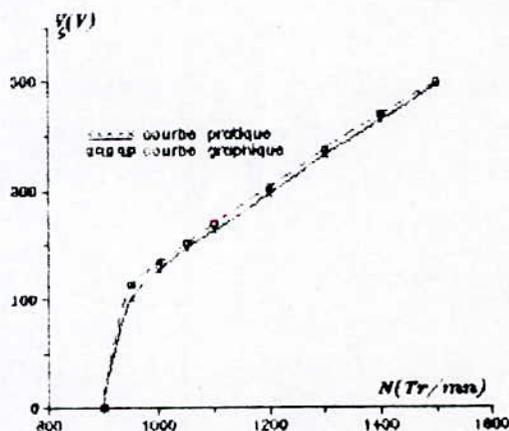


FIG III-B.5: $V_s(N)$ pour $C=120 \mu F$

III-C CONCLUSION:

Nous avons montré qu'une machine asynchrone peut fonctionner en génératrice et s'autoamorcer en lui branchant une batterie de condensateurs et en l'entraînant à une vitesse suffisante.

La tension d'autoamorçage est limitée par la saturation du circuit magnétique qui permet à la machine de diminuer sa réactance statorique L_s pour réaliser la résonance avec la capacité C à la pulsation ω_s .

on retiendra surtout que c'est en agissant sur la vitesse d'entraînement et sur la capacité des condensateurs que l'on fixe la pulsation et la tension de la génératrice asynchrone.

En outre l'autoamorçage de la génératrice asynchrone est similaire à celui de la dynamo shunt, excepté que pour cette dernière une condition supplémentaire est exigée: il faut que les deux flux: rémanent et inducteur, soient additifs.

La prédétermination graphique du point de fonctionnement de la génératrice asynchrone à vide nous a permis d'obtenir des résultats compatibles avec l'expérience, ce qui valide la procédure utilisée. Mais cette méthode, étant dépassée par les méthodes numériques, est délaissée.

CHAPITRE IV

Génératrice asynchrone en charge

IV.1 INTRODUCTION:

Pour qu'une génératrice asynchrone alimente une charge isolée dans de bonnes conditions, il faut que les égalités suivantes se réalisent, à tension et à fréquence nominales :

- puissance active consommée = puissance active produite,
- puissance réactive consommée = puissance réactive produite.

Pour obtenir ce résultat, on jouera sur les facteurs suivants:

- la puissance mécanique fournie par la machine d'entraînement,
- la puissance active et/ou réactive consommée, en modifiant la charge,
- la capacité mise en parallèle, donc la puissance réactive fournie par la batterie de condensateurs.

IV.2 COURBES CARACTERISTIQUES:

A fréquence nominale, une génératrice asynchrone délivre une tension qui varie en fonction de la puissance active fournie et de la valeur des condensateurs d'autoamorçage.

Dans le but d'étudier la caractéristique externe d'une génératrice asynchrone nous avons effectué des essais selon le schéma suivant:

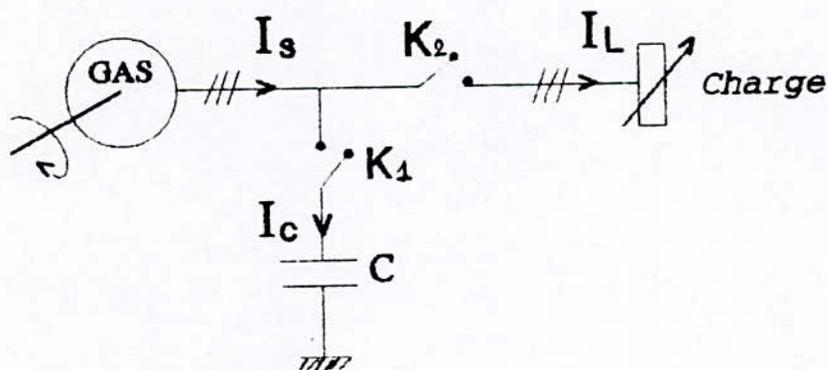


FIG IV.1 : génératrice asynchrone autonome en charge

Pour une valeur fixe des condensateurs:

1- on amorce la génératrice asynchrone à vide en fermant l'interrupteur K_1 et en l'entraînant à la vitesse nominale.

2- ensuite, on charge la machine en fermant l'interrupteur K_2 . On règle la machine d'entraînement - moteur à courant continu dans notre cas - de façon à maintenir la vitesse **synchrone**.

Les caractéristiques en charge $V_g(I_L)$ à $C=90 \mu\text{F}$, $N=1500 \text{ tr/mn}$ obtenues expérimentalement, pour deux facteurs de puissance ($\cos\phi=1$ et $\cos\phi=0.8$) sont représentées à la figure IV.2 suivante;

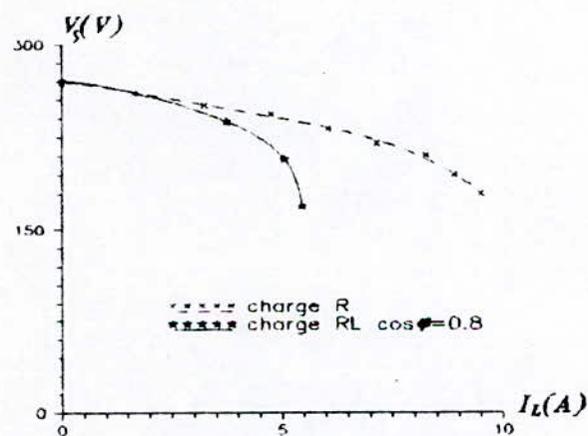


FIG IV.2: caractéristiques en charge de la GAS pour: $C=90\mu\text{F}$, $N=1500 \text{ tr/mn}$.

Comme pour toute machine électrique, cette caractéristique a une allure descendante. Mais dans le présent cas, la chute de tension est très importante par rapport à l'alternateur et la génératrice à courant continu shunt. Les figures IV.3 et IV.4, où les courbes $V_g(I_L)$ (pour $C=90 \mu\text{F}$, $N=1500 \text{ tr/mn}$) sont représentées en grandeurs relatives, illustre ceci clairement. On a pris comme grandeurs de base, pour chaque machine, le courant nominal et la tension nominale correspondants.

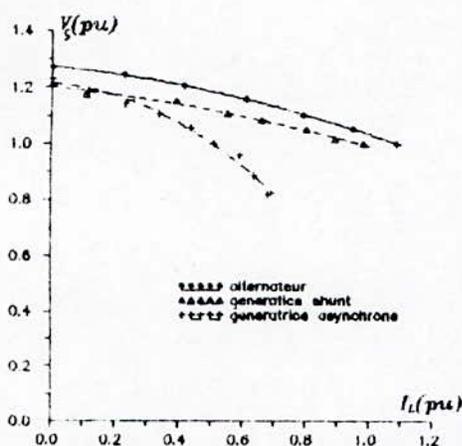
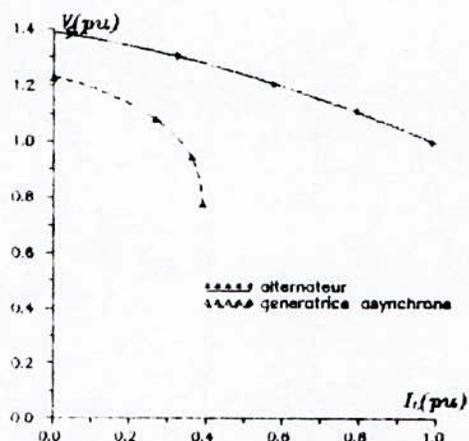


FIG IV.3: charge R

FIG IV.4: charge RL $\cos\phi=0.8$

On retrouve également ici le même raisonnement fait au chapitre II pour une génératrice à courant continu shunt; en plus de la chute de tension interne à la génératrice asynchrone, la fem induite diminue avec le courant débité. Ceci à cause de la décroissance de l'énergie réactive ou magnétisante fournie par la batterie de condensateurs due à la diminution de la tension à ses bornes V_s .

Notons en plus que la chute de tension est beaucoup plus importante en charge inductive qu'en charge résistive. en effet, dans le premier cas, la batterie de condensateurs doit fournir également de l'énergie réactive à la charge en plus à la machine. Par contre, pour une charge résistive les condensateurs ne sont utilisés que pour l'excitation de la génératrice asynchrone.

Si on surcharge la machine pour une excitation (capacité) donnée, on constate que la caractéristique externe s'incurve brutalement, et de façon particulière dans le cas d'une charge inductive: la génératrice asynchrone se désamorce rapidement.

IV.3 COMPENSATION DE LA PUISSANCE REACTIVE:

Comme on vient de le voir, lorsque la puissance demandée par la charge varie la tension produite par la génératrice asynchrone autonome varie d'une manière assez notable. Si l'on souhaite néanmoins maintenir la tension dans des tolérances réduites, il faut effectuer une compensation de la puissance réactive.

Dans le cas le plus général, il faut fournir de la puissance réactive: - à la génératrice asynchrone,
- aux charges qui en consomment.

Pour alimenter en énergie réactive ces deux types de consommation, on dispose, en parallèle sur le circuit, une source d'énergie réactive de puissance convenable. C'est généralement une batterie de condensateurs qui selon le cas, sera fixe ou ajustable manuellement (par crans) ou automatiquement.

IV.3.1 Compensation de la génératrice:

Les courbes caractéristiques $V_s(I_L)$ à différentes capacités donnent la valeur de l'énergie d'excitation en fonction de la charge de la machine:

- si la charge varie peu, on peut se contenter d'une batterie de condensateurs fixe; la tension qui en résultera varie peu.
- si la charge varie trop , les variations de tension peuvent devenir trop fortes et il faut alors un système réglable.

IV.3.2 Compensation des charges réactives:

Le cas le plus courant concerne les moteurs électriques asynchrones. Suivant leur puissance et leur nombre, on utilisera l'un, l'autre ou les deux procédés suivants:

- compensation individuelle des moteurs par branchement de condensateurs permanents directement à leurs bornes.
- compensation générale du circuit, fixe ou ajustable manuellement ou automatiquement.

Le problème de compensation complique l'installation par rapport à un alternateur qui fournit automatiquement le courant réactif appelé par la charge. C'est l'avantage important des alternateurs sur les génératrices asynchrones, et cet avantage est décisif lorsque le circuit de charge a un $\cos\phi$ très variable.

IV.4 CONCLUSION:

- A fréquence nominale, une génératrice asynchrone autonome délivre une tension qui varie notablement avec la puissance fournie et la valeur des condensateurs d'excitation. Pour maintenir la tension constante, il faut adapter la puissance réactive fournie par les condensateurs à la demande de puissance par la charge.

- Comme nous l'avons vu, les génératrices asynchrones peuvent être utilisées pour alimenter un réseau isolé, notamment lorsqu'il s'agit d'installations simples: besoins ménagers, chauffage, charges résistives... etc.

En revanche, lorsque le réseau à alimenter devient plus complexe, en particulier lorsque son facteur de puissance est faible ou change constamment, l'alternateur est mieux adapté. En effet, il fournit à tout moment l'énergie réactive dont le réseau a besoin, alors que dans les mêmes conditions, il faut associer à une génératrice asynchrone un système complexe de compensation de courant réactif. Donc le choix entre les deux types de génératrices: alternateur, génératrice asynchrone dépend des caractéristiques de la charge à alimenter.

- On peut néanmoins penser que, dans les prochaines années, les développements rapides de l'électronique de puissance permettront l'industrialisation de compensateurs automatiques de courant réactif fiables et économiques. Les génératrices asynchrones associées à ces compensateurs pourrait alors remplacer les alternateurs pour l'alimentation de réseaux isolés, au moins en petites et moyennes puissances.

CHAPITRE V

**Simulation de l'autoamorçage de
la génératrice asynchrone**

V.1 INTRODUCTION:

Nous allons traiter une technique numérique, afin de vérifier les conditions d'autoexcitation à vide, et de prédéterminer les caractéristiques de la génératrice asynchrone en charge pour différentes conditions de travail. La procédure suivie et les équations utilisées sont présentées ci-dessous. A la fin on résume tout ça dans un organigramme général. Les résultats obtenus sont comparés à ceux trouvés expérimentalement.

V.2 HYPOTHESES:

Dans l'analyse qui suivra, les hypothèses ci-dessous sont considérées:

- seulement la réactance de magnétisation est considérée dépendante du niveau de saturation, tous les autres paramètres étant constants.
- On néglige les pertes fer dans la machine (R_f infini).
- On néglige les harmoniques d'espace de la fmm et les harmoniques du temps des ondes du courant et tension induits sont ignorées.

V.3 SCHEMA EQUIVALENT UTILISE POUR LA SIMULATION:

L'analyse du fonctionnement en régime permanent de la génératrice asynchrone autonome peut être faite en utilisant le schéma équivalent conventionnel de la machine asynchrone.

Cependant, puisque la fréquence de fonctionnement de la génératrice varie avec la vitesse de rotation et la charge, le schéma équivalent a été modifié comme illustré à la figure V.1, où tous les paramètres sont rapportés à la fréquence de base (fréquence synchrone).

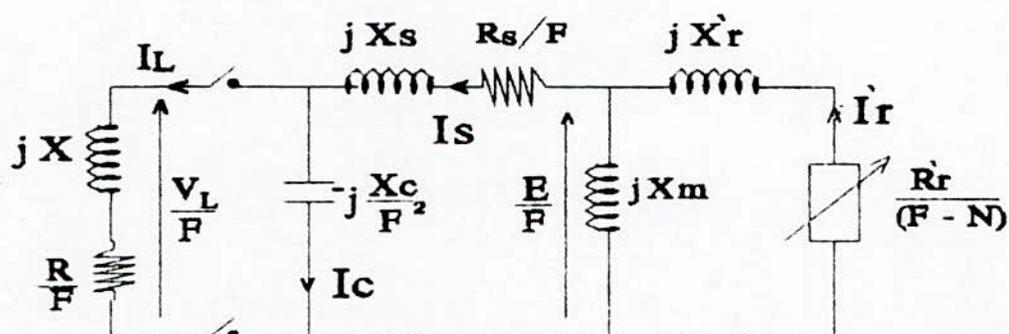


FIG V.1: schéma équivalent par phase de la génératrice asynchrone.

- R_s , R'_r , R : résistance (en pu) respectivement du stator, du rotor, et de la charge.
- X_s , X'_r , X_m , X : réactance (en pu) respectivement du stator, du rotor, de magnétisation, et de la charge à la fréquence de base ($f_b=50$ Hz).
- C : capacité d'autoamorçage, X_c sa réactance (en pu) à la fréquence de base.
- F , N : fréquence du courant statorique, et vitesse de rotation (en pu).
- E , V_L : la fem induite, et la tension aux bornes de la charge.

On considère la variation de X_m avec la saturation comme la base de calcul.[8],[12]

V.4 MODELISATION DE LA COURBE $E(X_m)$:

Pour déterminer la réactance magnétisante, en fonction de la fem induite, on réalise un essai au synchronisme. On entraîne la machine asynchrone par un moteur auxiliaire à la vitesse de synchronisme (1500 tr/min) et on alimente le stator sous différents niveaux de tension. La fem induite E est obtenue en retranchant de la tension d'alimentation la chute de tension due à l'impédance statorique. La réactance magnétisante X_m est égale au rapport de la fem et la composante réactive du courant dans le stator [10].

En se basant sur les résultats pratiques, on peut déterminer la fonction analytique qui modélise la variation de E avec X_m dans la partie de saturation: on a obtenu :

$$E = 299.378 - 0.26 X_m \sqrt{X_m} \quad (V.1)$$

La figure V.2 montre la courbe $E(X_m)$ expérimentale et modélisée

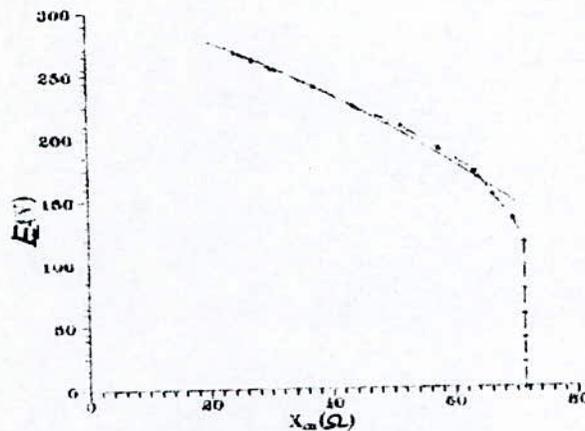


FIG V.2: $E(X_m)$ pour $N=1500$ tr/min
 ----- pratique
 ————— modélisée

V.5 AUTOAMORÇAGE A VIDE:

Déconnectons la charge, et écrivons l'équation électrique de la maille équivalente par rapport au courant I_s .

$$\bar{Z}_0 \bar{I}_s = 0 \quad (V.2)$$

tel que Z_0 est l'impédance de la maille équivalente (à vide)

$$\bar{Z}_0 = \frac{\left(\frac{R'_r}{(F-N)} + jX'_r \right) jX_m}{\frac{R'_r}{(F-N)} + j(X'_r + X_m)} + \frac{R_s}{F} + jX_s - \frac{jX_c}{F^2}$$

Comme I_s n'est pas nul, alors $Z_0=0$.

Regroupons les termes réel et imaginaire et égalons chacun à zéro, on obtient le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} -\alpha_1 F^3 + \alpha_2 N F^2 + \alpha_3 F - \alpha_4 N = 0 \\ \beta_1 F^2 - \beta_2 N F - \beta_3 = 0 \end{cases} \quad (V.3)$$

tel que:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_2 = X'_r X_m + X_s (X'_r + X_m) \\ \alpha_3 &= R'_r R_s + X_c (X'_r + X_m) \\ \alpha_4 &= X_c (X'_r + X_m) \\ \beta_1 &= R'_r X_m + R_s (X'_r + X_m) + R'_r R_s \\ \beta_2 &= R_s (X'_r + X_m) \\ \beta_3 &= R'_r X_c \end{aligned}$$

V.5.1 DETERMINATION DE LA CAPACITE MINIMALE D'AUTOAMORÇAGE:

Pour $X_m = X_{mmax}$ ou X_{mmax} est la réactance magnétisante maximale (égale à la pente de la partie linéaire de la courbe à vide), et à partir du système (V.3) on peut tirer l'expression de X_c de chaque équation on obtient:

$$\begin{cases} X_c = A F^2 - B \frac{F}{F-N} \\ X_c = D (F-N) F + T F^2 \end{cases} \quad (V.4)$$

tel que:

$$\begin{aligned} A &= X_s + \frac{X_m X'_r}{X_m + X'_r} \\ B &= \frac{R_s R'_r}{X'_r + X_m} \\ D &= \frac{R_s}{R'_r} (X'_r + X_m) \\ T &= X'_r + X_m \end{aligned}$$

Egalons ces deux expressions de X_c , on obtient le polynôme:

$$F^2 - \left(1 + \frac{D}{T+D-A}\right) NF + \frac{DF^2+B}{T+D-A} = 0 \quad (V.5)$$

L'équation V.5 peut être résolue pour aboutir à deux valeurs de F :

$$F = \frac{N}{2} \left[1 + \frac{D \pm \sqrt{1 - \left(\frac{N_c}{N}\right)^2}}{T+D-A} \right]$$

N_c est la vitesse critique pour laquelle l'autoamorçage n'aura pas lieu quelque soit la capacité. [9]

$$N_c = \frac{2}{A-T} \sqrt{B(T+D-A)}$$

A partir de la deuxième équation du système (V.4) on tire l'expression de la capacité minimale:

$$C_{\min} = \frac{1}{2\pi f_b Z_b (X'_r + X_m) \left(\frac{R_s}{R'_r} F_{\max} (F_{\max} - N) + F_{\max}^2 \right)} \quad (V.8)$$

où Z_b est l'impédance de base de la machine et :

$$F_{\max} = \frac{N}{2} \left[1 + \frac{D + (T-A) \sqrt{1 - \left(\frac{N_c}{N}\right)^2}}{T+D-A} \right]$$

V-5-2 DETERMINATION DE LA TENSION D'AUTOAMORCAGE:

En se basant sur le système d'équations (V.3) on peut écrire:

$$\begin{cases} G_1(X_m, F) = -\alpha_1 F^3 + \alpha_2 NF^2 + \alpha_3 F - \alpha_4 N = 0 \\ G_2(X_m, F) = \beta_1 F^2 - \beta_2 NF - \beta_3 = 0 \end{cases} \quad (V.7)$$

Pour une capacité C donnée et une vitesse N fixe le système (V.7) de variables X_m et F est non linéaire, sa résolution peut se faire par les méthodes itératives classiques (Gauss-Seidel, Newton-Raphson...etc.)

On utilise la méthode de Newton-Raphson, pour déterminer les inconnues: F et X_m .

$$[X^{(i+1)}] = [X^{(i)}] - [J]^{(-1)} [G] \quad (V.8)$$

tel que:

$$[X] = \begin{bmatrix} X_m \\ F \end{bmatrix}$$

$$[G] = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}$$

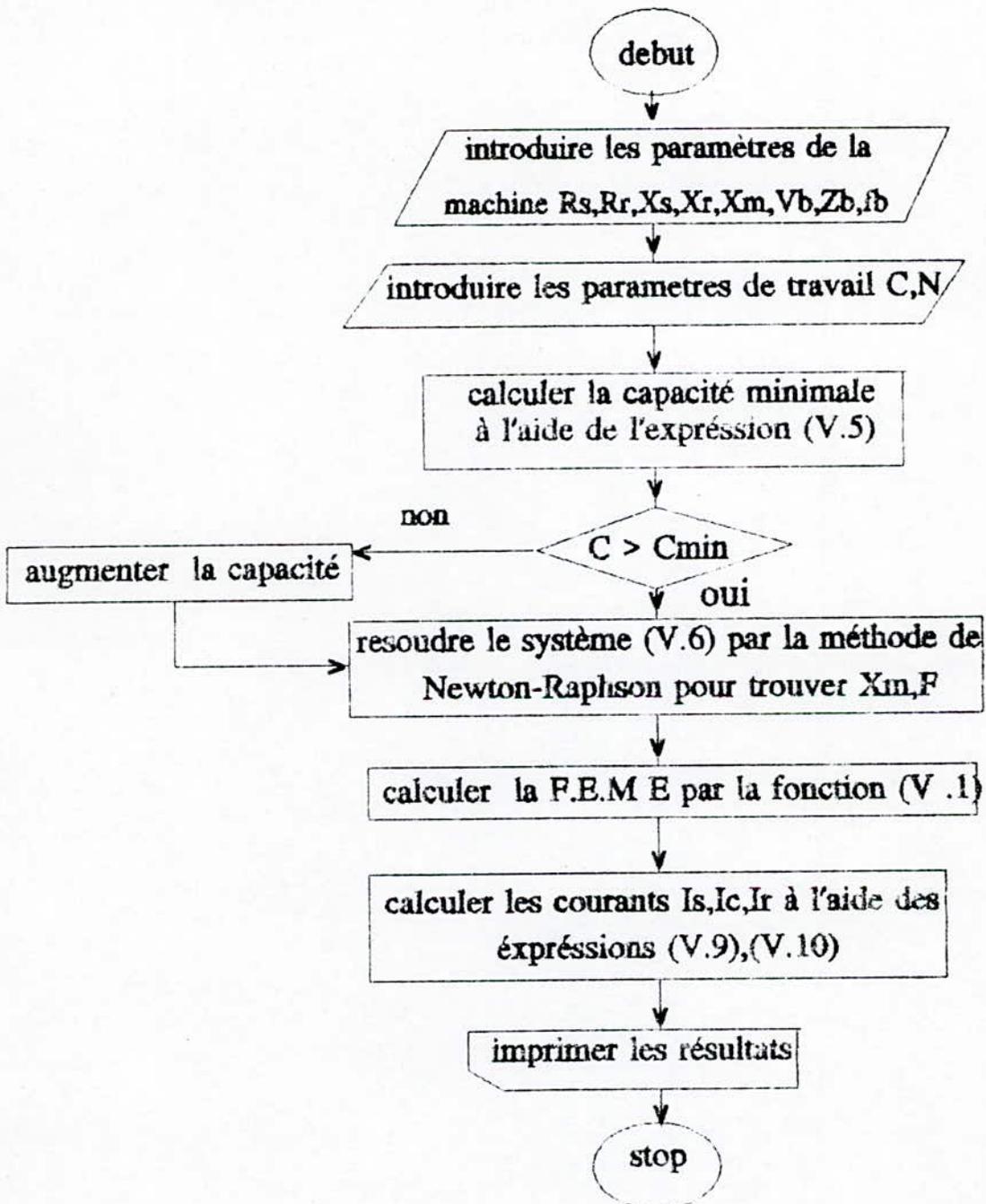
$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\delta G_1}{\delta X_m} & \frac{\delta G_1}{\delta F} \\ \frac{\delta G_2}{\delta X_m} & \frac{\delta G_2}{\delta F} \end{bmatrix}$$

En utilisant les valeurs de X_m et F obtenues, on peut avoir facilement la tension induite à vide à l'aide de la fonction donnant la variation de E en fonction de X_m (voir l'équation V.1), et ensuite calculer les courants I_s , I'_r par les expressions suivantes:

$$I_s = I_c = \frac{E/F}{\frac{R_s}{F} + j(X_s - \frac{X_c}{F^2})} \quad (V.9)$$

$$I'_r = \frac{-E/F}{\frac{R'_r}{F-N} + jX'_r} \quad (V.10)$$

V.5.3 ORGANIGRAMME DE CALCUL:



V.6 AUTOAMORÇAGE EN CHARGE:

Les caractéristiques de la génératrice asynchrone en charge peuvent être obtenues en connaissant les conditions de travail: la capacité, la vitesse et la charge.

En fermant l'interrupteur, l'équation électrique relative à la maille équivalente par rapport au courant I_s est:

$$\overline{ZI_s} = \overline{0} \quad (V.11)$$

où Z est l'impédance de la maille équivalente

$$\overline{Z} = \frac{(\frac{R'_r}{F-N} + jX'_r) jX_m}{\frac{R'_r}{F-N} + j(X'_r + X_m)} + \frac{R_s}{F} + jX_s + \frac{(-\frac{jX_c}{F^2})(\frac{R}{F} + jX)}{\frac{R}{F} + j(X - \frac{X_c}{F^2})}$$

Etant donné que le courant I_s est différent de zéro, alors $Z=0$. En développant l'expression de Z, et en égalant ses termes, réel et imaginaire, à zéro on obtient le système d'équations:

$$\begin{cases} -a_1 F^3 + a_2 F^2 + (a_3 X_c + a_4) F - a_5 X_c = 0 \\ -b_1 F^4 + b_2 F^3 + (b_3 X_c + b_4) F^2 - (b_5 X_c + b_6) F - b_7 X_c = 0 \end{cases} \quad (V.12)$$

tel que:

$$a_1 = R(X_m X'_r + X_s(X_m + X'_r)) + X(R'_r(X_m + X_s) + R_s(X_m + X'_r))$$

$$a_2 = N(R(X_m X'_r + X_s(X_m + X'_r)) + R_s X(X_m + X'_r))$$

$$a_3 = R'_r(X_m + X_s + X) + (R_s + R)(X_m + X'_r)$$

$$a_4 = R R_s R'_r$$

$$a_5 = N(R + R_s)(X_m + X'_r)$$

$$b_1 = X(X_m X'_r + X_s(X_m + X'_r))$$

$$b_2 = N b_1$$

$$b_3 = X_m X_s + (X_s + X)(X_m + X'_r)$$

$$b_4 = R(R'_r(X_m + X_s) + R_s(X_m + X'_r)) + R'_r R_s X$$

$$b_5 = Nb_3$$

$$b_6 = RR_s (X_m + X'_r) N$$

$$b_7 = R'_r (R + R_s)$$

V.6.1 DETERMINATION DE LA CAPACITE MINIMALE D'AUTOAMORÇAGE EN CHARGE:

A partir du système (V.12) on tire l'expression de X_c de chaque équation:

$$\begin{cases} X_c = \frac{a_1 F^3 - a_2 F^2 - a_4 F}{a_3 F - a_5} \\ X_c = \frac{b_1 F^4 - b_2 F^3 - b_4 F^2 + b_6 F}{b_3 F^2 - b_5 F - b_7} \end{cases} \quad (V.13)$$

En égalant ces deux équation, on obtient le polynome :

$$\lambda_4 F^4 - \lambda_3 F^3 + \lambda_2 F^2 - \lambda_1 F + \lambda_0 = 0 \quad (V.14)$$

tel que:

$$\lambda_4 = a_1 b_3 - a_3 b_1$$

$$\lambda_3 = a_2 b_3 + a_1 b_5 - a_3 b_2 - a_5 b_1$$

$$\lambda_2 = a_2 b_5 + a_3 b_4 - a_4 b_3 - a_1 b_7 - a_5 b_2$$

$$\lambda_1 = a_3 b_6 + a_5 b_4 - a_4 b_5 - a_2 b_7$$

$$\lambda_0 = a_5 b_6 + a_4 b_7$$

L'équation (V.14) peut être résolue par les méthodes numériques classiques (bissection, Gauss-Seidel, Newton-Raphson, point fixe...etc). La résolution de cette équation a montré qu'il existe toujours deux solutions réelles positives F_1 , F_2 . [9]
La capacité minimale est celle qui correspond à la fréquence maximale F_{max} tel que $F_{max} = \text{MAX}(F_1, F_2)$

$$C_{min} = \frac{1}{2 \pi f_b Z_b X_{cmax}} \quad (V.15)$$

avec:

$$X_{c\max} = \frac{a_1 F_{\max}^3 - a_2 F_{\max}^2 - a_4 F_{\max}}{a_3 F_{\max} - a_5}$$

V.6.2 CARACTERISTIQUES DE LA GENERATRICE ASYNCHRONE:

En se basant sur le système (V.12) on peut écrire:

$$\begin{cases} H_1(X_m, F) = -a_1 F^3 + a_2 F^2 + (a_3 X_c + a_4) F - a_5 X_c = 0 \\ H_2(X_m, F) = -b_1 F^4 + b_2 F^3 + (b_3 X_c + b_4) F^2 - (b_5 X_c + b_6) F - b_7 X_c = 0 \end{cases} \quad (V.16)$$

Pour une capacité donnée C et une vitesse de rotation fixe N le système (V.16) est non linéaire de variables X_m , et F. Ce système est résolu numériquement en utilisant la méthode de **Newton-Raphson** (voir équation (V.8)), pour déterminer la fréquence des courants statoriques F, et la réactance magnétisante X_m pour une charge donnée (R, X).

Ensuite, grâce à la fonction $E(X_m)$ on peut calculer la fem induite E, le courant dans le stator I_s , dans la capacité I_c , dans le rotor I_r , et dans la charge I_l , ainsi que la tension aux bornes de la charge V_l , la puissance active débitée P_{out} , et la puissance électromagnétique transmise P_{em} . [10],[13]

$$I_s = \frac{E/F}{\left(\frac{R_s}{F} + jX_s\right) + \left(\frac{-\frac{jX_c}{F^2} \left(\frac{R}{F} + jX\right)}{\frac{R}{F} + j\left(X - \frac{X_c}{F^2}\right)}\right)} \quad (V.17)$$

$$I_c = \frac{(E/F) - I_s \left(\frac{R_s}{F} + jX_s\right)}{-\frac{jX_c}{F^2}} \quad (V.18)$$

$$I'_r = \frac{-E/F}{\frac{R'_r}{F-N} + jX'_r} \quad (\text{V.19})$$

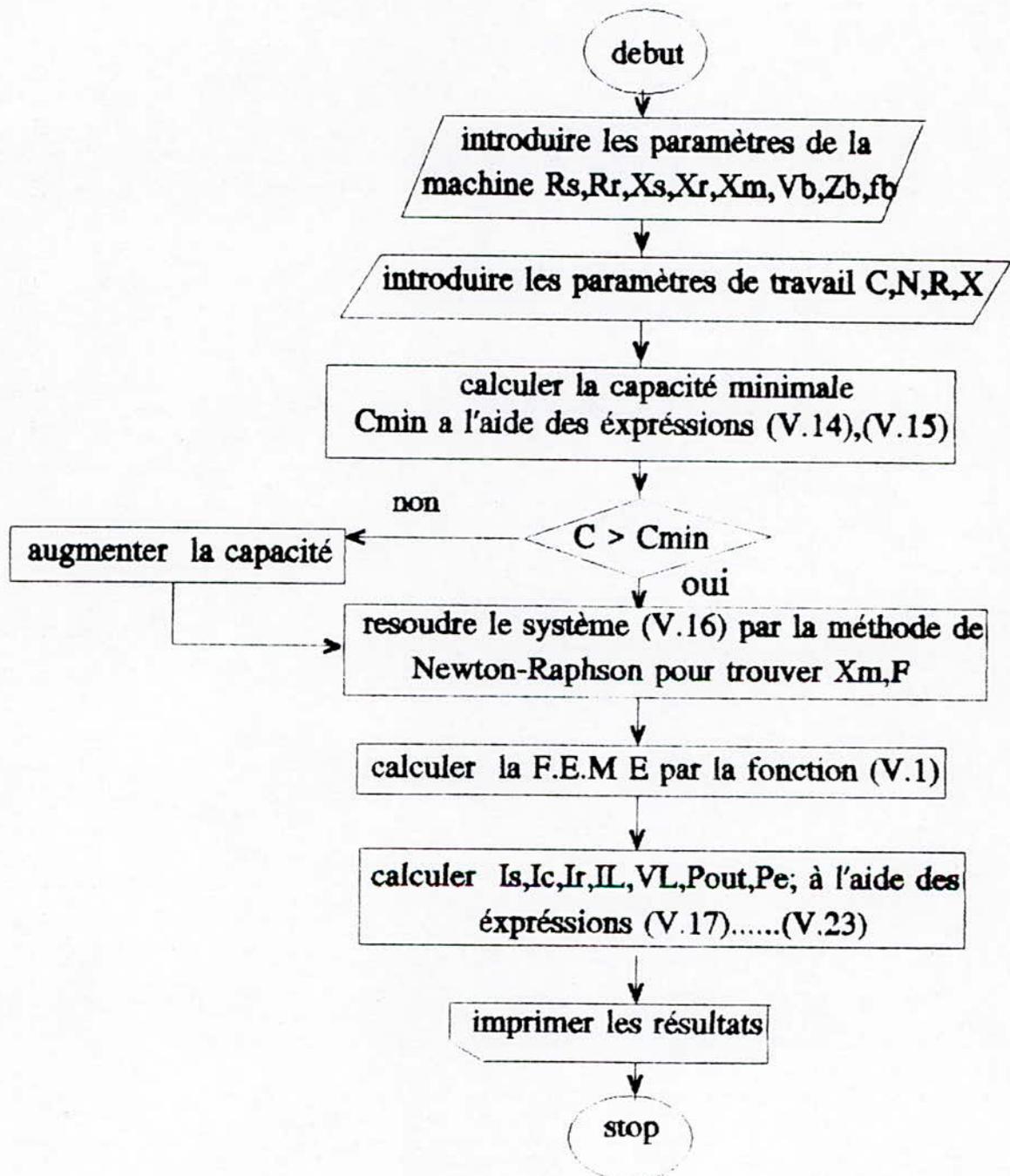
$$I_1 = \frac{(E/F) - I_s \left(\frac{R_s}{F} + jX_s \right)}{\frac{R}{F} + jX} \quad (\text{V.20})$$

$$V_1 = \left(\frac{R}{F} + jX \right) I_1 \quad (\text{V.21})$$

$$P_{\text{out}} = 3 \frac{R}{F} |I_1|^2 \quad (\text{V.22})$$

$$P_{\text{em}} = -3 \frac{R'_r}{F-N} |I'_r|^2 \quad (\text{V.23})$$

V.6.3 ORGANIGRAMME DE CALCUL:



V.7 INTERPRETATION DES RESULTATS:

Afin de tester la validité des résultats trouvés par simulation, nous les avons comparés avec ceux mesurés en pratique. Pour cela nous avons fait des essais sur une génératrice dont les paramètres son représentés à l'annexe.

- La figure V.3 montre l'influence de la capacité sur la tension d'autoamorçage à vide pour la vitesse de synchronisme. Il est claire que les résultats simulés et pratiques sont très proches. Pour $C < C_{crit}$ l'autoamorçage n'est pas possible, au fur et à mesure que la capacité augmente la tension induite varie d'une manière linéaire, mais lorsque la capacité augmente de plus en plus cette variation devient non linéaire sous l'influence de la saturation. Pour la vitesse de synchronisme la capacité critique de l'autoamorçage est de $42.8 \mu F$

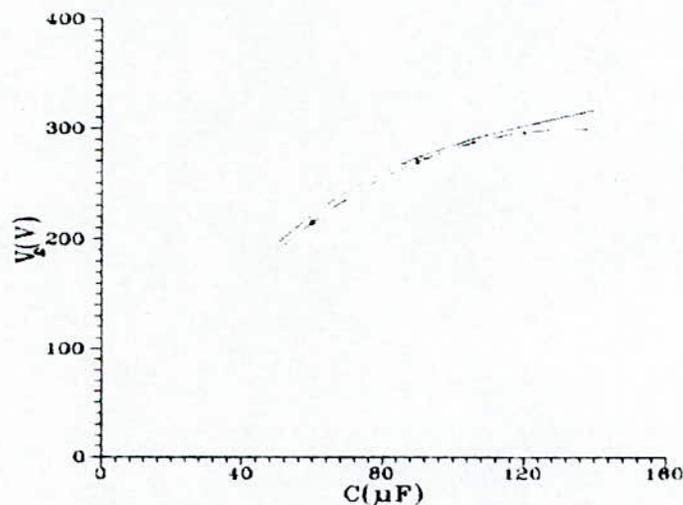


FIG V.3: $V_s(c)$ pour $N=1500$ tr/min
----- pratique
————— théorique

- La figure V.4 illustre la variation de la tension d'autoamorçage à vide en fonction de la vitesse pour une capacité fixe aux bornes de la machine, égale à $90 \mu F$.

Cette figure montre nettement une variation linéaire de la tension avec la vitesse pour une capacité donnée. On voit qu'il existe une bonne corrélation entre les résultats mesurés et simulés. La vitesse minimale d'autoamorçage pour une capacité de $90 \mu\text{F}$ est de 1017 tr/min , et la vitesse critique pour laquelle l'autoamorçage n'aura pas lieu quelque soit la capacité est de 86.5 tr/min .

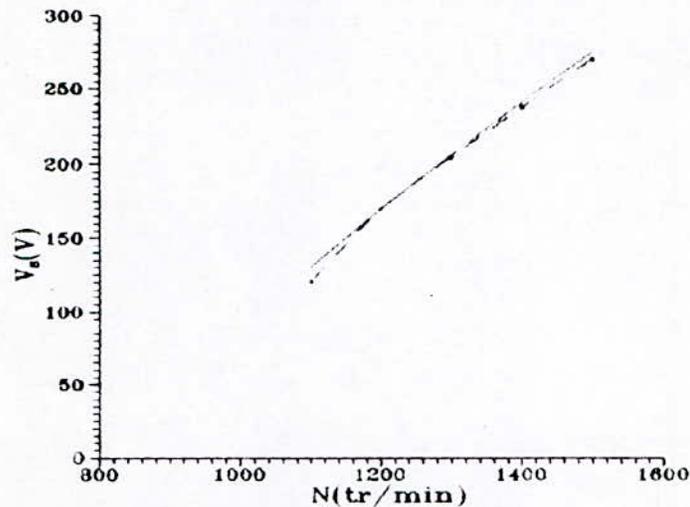


Figure V.4 $V_a(N)$ pour $C=90 \mu\text{F}$
----- pratique.
..... théorique.

- Pour la vitesse de synchronisme et une capacité de $90 \mu\text{F}$, les figures V.5 et V.6 montrent la caractéristique en charge de la génératrice asynchrone, pour un facteur de puissance égal à 1, et 0.8 respectivement.

Pour $\cos\phi=1$ la chute de tension est moins importante que pour un $\cos\phi=0.8$. Cela peut être expliqué par le fait que la capacité fournit de la puissance réactive à la charge en plus de sa fourniture à la machine.

On remarque aussi que les résultats mesurés et simulés sont beaucoup plus proches pour $\cos\phi=0.8$ que pour $\cos\phi=1$.

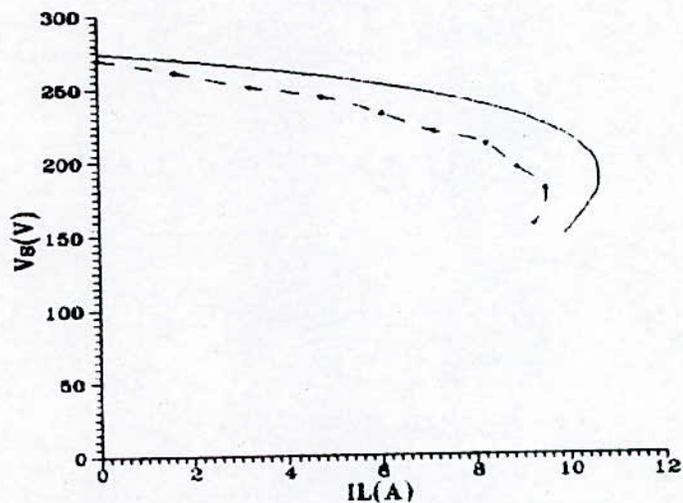


FIG V.5: $V_s(IL)$ pour $\cos\phi=1$, $C=90 \mu F$, $N=1500$ tr/min
 - - - - - pratique
 ——— théorique

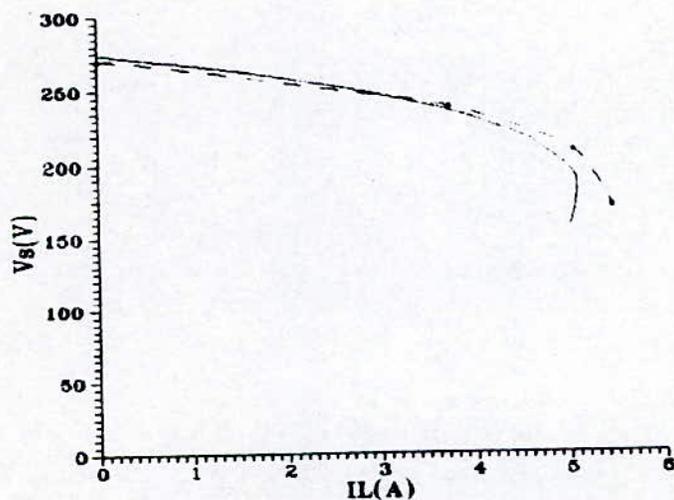


FIG V.6: $V_s(IL)$ pour $\cos\phi=0.8$, $C=90 \mu F$, $N=1500$ tr/min.
 - - - - - pratique
 ——— théorique

- Le plus important dans cette simulation, est son utilisation pour la détermination de la caractéristique de réglage de la tension aux bornes de machine; $C=f(I_L)$.

Pour maintenir la tension aux bornes de la machine constante, on doit augmenter la capacité pour une vitesse et une charge données. La capacité de maintien dépend non seulement du débit, mais aussi de facteur de puissance de la charge.

Généralement, pour les charges inductives la capacité prend des valeurs importantes, et elle augmente si le facteur de puissance diminue. Pour les charges capacitatives, la capacité diminue lorsque le facteur de puissance diminue. [11]

La figure V.7 montre la caractéristique de réglage $C(I_L)$ pour la vitesse de synchronisme et la tension nominale 220 V. Pour le même débit, la capacité de réglage est nettement supérieure pour un $\cos\phi=0.8$ que pour un $\cos\phi=1$.

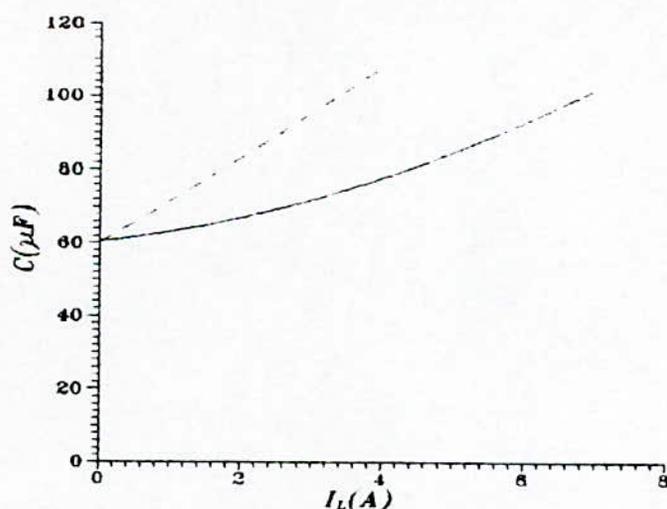


FIG V.7: $C(I_L)$ pour $V_s=220$ V, $N=1500$ tr/min.
----- $\cos\phi=0.8$
————— $\cos\phi=1$

V.8 CONCLUSION:

Nous avons développé une méthode numérique simple et directe, afin de prédéterminer les caractéristiques de la génératrice asynchrone à vide et en charge.

Cette méthode est basée essentiellement sur la modélisation de la variation de la fem induite en fonction de la réactance magnétisante dans la partie saturée, et le schéma équivalent de la machine asynchrone ramené à la fréquence nominale.

Les caractéristiques de la génératrice ont été prédéterminées en résolvant les systèmes d'équations non linéaires par la méthode de **Newton-Raphson**. Les résultats obtenus sont très proches de ceux mesurés, ce qui confirme la fidélité de la méthode.

Conclusion générale

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

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

Dans ce cas précis, la génératrice s'autoamorce et délivre une tension dont la valeur dépend essentiellement des facteurs suivants:

- la capacité des condensateurs mis en parallèle, en d'autres termes la puissance réactive fournie.
- la vitesse d'entraînement de la machine (la puissance mécanique fournie à la génératrice).
- La charge alimentée par la génératrice (puissance active consommée).

L'autoamorçage de la génératrice asynchrone est analogue à celui de la génératrice shunt, le mécanisme d'autoamorçage se réalise d'une façon similaire, excepté que pour cette dernière une condition en plus est exigée: le sens convenable du flux créé par le courant inducteur initial à cause de la nature de la machine (à courant continu)

Dans cette optique, on suggère que la naissance du phénomène d'autoamorçage et l'influence des différents paramètres (internes et externes) sur celui-ci soient étudiés de plus près.

Les essais réalisés au laboratoire sur une machine asynchrone de faible puissance (3.5 kW) nous ont permis de conclure que la génératrice asynchrone autonome présente des performances assez faibles - particulièrement en charge inductive - comparativement à d'autres génératrices électriques, notamment l'alternateur qui est souvent préféré pour ce type de fonctionnement, parcequ'il s'adapte par nature aux variations de puissance réactive de l'installation. Ceci est essentiellement dû à l'appel important de puissance réactive par la génératrice asynchrone. Les condensateurs dérivent la quasi totalité du courant fourni par la génératrice.

Toutefois, on suppose que l'association de la génératrice asynchrone avec des compensateurs automatiques de l'énergie réactive ainsi que des dispositifs statiques de régulation de tension et de fréquence, basés sur l'électronique de puissance, pourrait constituer une source d'énergie alternative très avantageuse et économique. Une étude approfondie de tels dispositifs constitue un thème de recherche intéressant et d'actualité.

Une procédure numérique simple pour l'étude de l'influence de la capacité et de la vitesse sur la tension d'autoamorçage et l'analyse en régime permanent d'une génératrice asynchrone autonome alimentant une charge quelconque, se basant sur la modélisation de la courbe à vide et utilisant la méthode de **Newton-Raphson** a été développée au dernier chapitre de cet ouvrage.

On a noté une bonne corrélation entre les résultats calculés et expérimentaux, validant ainsi l'analyse présentée. L'avantage de l'algorithme de calcul développé réside dans sa souplesse, sa précision, et sa rapidité. Cet algorithme est un moyen approprié pour l'examen et l'étude des effets de variation des paramètres de la machine et de la charge sur les caractéristique de la génératrice.

Annexe

PLAQUE SIGNALETIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

- MAS triphasée 4 pôles , stator en triangle.
- Puissance nominale: 3.5 kW.
- Tension nominale: 220/380 V.
- Courant nominal: 8/14 A.
- Fréquence: 50 Hz.
- Facteur de puissance nominal: 0.8.
- Vitesse nominale: 1410 tr/mn.

L'identification de cette machine a donné les résultats suivants:

- Résistance statorique $R_s=1.2 \Omega$, (0.043 pu) .
- Résistance rotorique (ramenée) $R'_r=2.15 \Omega$, (0.078 pu).
- Réactance de fuite statorique $X_s=3 \Omega$, (0.11 pu).
- Réactance de fuite rotorique (ramenée) $X'_r=3 \Omega$, (0.11 pu).
- Réactance de magnétisation non saturée $X_m=72 \Omega$, (2.61 pu).
- Rapport de transformation stator/rotor $m=1.6$.

PLAQUE SIGNALÉTIQUE DE LA GÉNÉRATRICE SHUNT

- Puissance nominale: 2kW
- Tension nominale: - Induit: 120 V.
 - Inducteur: 120 V.
- Courant nominal: - Induit: 28 A.
 - Inducteur: 0.8 A.
- Vitesse nominale: 1425 tr/mn.

PLAQUE SIGNALÉTIQUE DE L'ALTERNATEUR

- Puissance nominale: 3kW.
- Stator: - Tension nominale: 127/220 V.
 - Courant nominal: 8 A.
- Excitation: - Tension nominale: 120 V.
 - Courant nominal: 3 A.
- Vitesse nominale: 1500 tr/mn.
- Facteur de puissance nominal: 0.8 Ar.

Bibliographie

- [1]- F.Milsant
" Machines électriques.
- Tome II: machine à courant continu, asservissement linéaire. pp: 29-33
- Tome III: machine synchrone et asynchrone. commande électronique. pp: 71-81
Editions BERTI, 1993
- [2]- A.Fouillé
" Electrotechnique à l'usage des ingénieurs, TII: Machines électriques à courant alternatif " .
Editions DUNOD, pp: 310-314 et 353-374
- [3]- G.Séguier, F.Notelet
" Electrotechnique industrielle " .
Technique et documentation (Lavoisier), 1977,
pp: 311,324 et 371-374
- [4]- M.Kostenko, L.Piotrovski
" Machines électriques. T II: Machine à courant alternatif " .
Editions MIR, 1979 pp: 437-474
- [5]- M.Moullé, C.Petit
" Génératrice asynchrone " .
Technique de l'ingénieur, D 452, 1985, pp: 2-12
- [6]- S.Mekhtoub, M.Ivanov
" Naissance de l'autoamorçage d'une machine asynchrone " .
Journal technologique de l'ENP, vol 10, 1994, pp: 183-195
- [7]- P.Mathivet
" Comportement du complexe machine asynchrone-condensateur " .
Revue générale de l'électricité, Tome 66, No 10, 1957,
pp: 479-487.

- [8]- S.S.Murthy , HS.Nagaraj , Annie Kuriyan.
 " Design-based computational procedure for performance prediction and analysis of S.E.I.G using motor design packages ".
 IEE proc B ,Vol 135 ,No.1, 1988, pp: 8-16.
- [9]- A.K.Al Jabri , A.I.Alolah.
 " Capacitance requirement for isolated self-excited induction generator ".
 IEE proc B ,Vol 137 ,No.3, 1990, pp: 154-159.
- [10]- A.K.Tandon ,S.S.Murthy , G.J.Berg.
 " Steady state analysis of capacitor self-excited induction generator ".
 IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.Pas-103, No.3 1984, pp: 612-618.
- [11]- N.H.Malik , A.H.Al-Bahrani.
 " Influence of the terminal capacitor on the performance characteristics of a self-excited induction generator ".
 IEE proc C, Vol 137, No.2 1990, pp: 168-173.
- [12]- S.S.Murthy, C.Nagamani, K.V.V.Satyanarayana
 " Studies on the use of conventional induction motors as self-excited induction generators ".
 IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol:3, No:4, 1988, pp: 842-848
- [13]- N.H.Malik, S.E.Haque
 " Steady state analysis and performance of an isolated self-excited induction generator ".
 IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.EC-1, 1986, pp: 134-139