

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master En Électrotechnique

Présenté par :
Islam BOURAY

Intitulé :

Auto-amorçage du générateur asynchrone

Directeur du mémoire :

Said MEKHTOUB
Malika IMADOUCHENE

Professeur
Maitre-Assistant

École Nationale Polytechnique
UMM Tizi-Ouzou

Président :

Ahmed BOUBAKEUR

Professeur

École Nationale Polytechnique

Examineurs :

Redouane TAHMI
Lazhari NEZLI

Docteur
Professeur

École Nationale Polytechnique
École Nationale Polytechnique

ENP 2013

ملخص

هذا العمل ينص على دراسة الاشتعال الذاتي للمولد الكهربائي اللامتزامن ذو قفص السنجاب و محاكاة المولد في النظامين الخطي والمشبع , نقوم بعدها بالتحقق من قيم التوتر و التيار الخاصين بالاشتعال الذاتي للمولد بالتجارب, في الأخير ننهي عملنا بمحاكاة لمعرفة تأثير الخصائص الكهربائية للمولد على النتائج السابقة.

الكلمات المفتاحية

المولد اللامتزامن, قفص السنجاب, المحاكاة,, نظام خطي , نظام مشبع, الاشتعال الذاتي, التأثير.

Résumé

Ce travail consiste à étudier le fonctionnement en générateur autonome de la machine asynchrone à rotor à cage d'écureuil avec simulations sur pour deux régimes de fonctionnement (linéaire et saturé). Nous validerons par la suite par un essai pratique la tension et le courant d'auto-amorçage. Enfin nous terminerons notre travail par des simulations pour voir l'influence des paramètres électriques de la machine sur les résultats obtenus précédemment.

Mots clés

Générateur asynchrone, cage d'écureuil, simulation, régime linéaire, régime saturé, auto-amorçage, influence.

Abstract

This thesis consist to study the of the autonomous running of the squirrel cage asynchronous machine by simulating the model in two regimes (linear and saturated), after that we validate the tension and the current of the bootstrap by a practice test, finally, we achieve our work by a simulation to discuss the influence of the electrical parameteres of the machine on the results obtained previously.

Key words

Asynchronous generator, squirrel cage, simulation, linear regime, saturated regime, bootstrap, influence.

Remerciements

Je remercie en premier lieu notre Dieu de me donner la santé et la patience pour pouvoir terminer ce travail.

Je remercie particulièrement mon promoteur Pr.Saïd MEKHTOUB pour m'avoir suivi et soutenu pour réaliser ce travail. Je lui exprime ma gratitude pour sa disponibilité, ses précieux conseils et pour le soutien qu'il m'a apporté tout au long de la durée de préparation de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur le Président, pour l'honneur qu'il me fait et aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens également à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que tous les professeurs ayant contribué à ma formation trouvent ici ma profonde reconnaissance.

Dédicaces

A celle qui m'a donné la vie, symbole de tendresse, celle qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.

A mon père, échole de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à m'aider et à me protéger.

A mes adorables sœurs.

A mes amis.

A tous ceux qui me sont chers.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

Islam.BOURAY

SOMMAIRE

Introduction	6
Chapitre I : Auto-excitation du générateur à vide	8
I.1 Conditions d’amorçage de la machine asynchrone :	9
I.2. Détermination de la capacité d’auto-amorçage.....	9
I.3 Prise en compte du phénomène de saturation	14
I.4 Simulation et résultats expérimentaux	15
• Modèle linéaire	16
• Modèle saturé	18
I.5 Interprétation des résultats	20
Conclusion.....	21
Chapitre II : Influence des paramètres de la machine	22
II.1 Résultats de simulations	23
• L’inductance magnétisante :	23
• La résistance rotorique.....	24
• La capacité d’auto-amorçage :	24
II.2 Interprétation des résultats :	25
Conclusion générale	26
Références bibliographiques	28

INTRODUCTION

En l'absence de réseau pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. [1] [2] [3]

Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par des capacités directement connectées sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées.

Ce travail consiste à étudier le fonctionnement en générateur autonome du générateur asynchrone, on s'intéresse d'abord à calculer la capacité minimale d'auto-excitation de la machine, puis on étudie l'auto-amorçage de la machine asynchrone par simulation pour deux régimes (linéaire et saturé) sur Matlab, après cela, on valide ces résultats par un essai pratique.

La dernière partie de ce travail on la consacre pour l'étude de l'influence des différents paramètres électriques de la machine sur l'auto-amorçage.

CHAPITRE I : AUTO-EXCITATION DU GENERATEUR A VIDE

I.1 Conditions d'amorçage de la machine asynchrone :

La machine asynchrone peut fonctionner en mode isolée du réseau (autonome) si :

- Il y a présence d'une induction rémanente dans le fer du rotor.
- Un système qui peut fournir la puissance réactive nécessaire à la magnétisation du générateur asynchrone. Ce, peut être une batterie de condensateurs correctement dimensionnés pour réaliser les conditions de l'auto-amorçage, ou le réseau lui-même en mode raccordé.

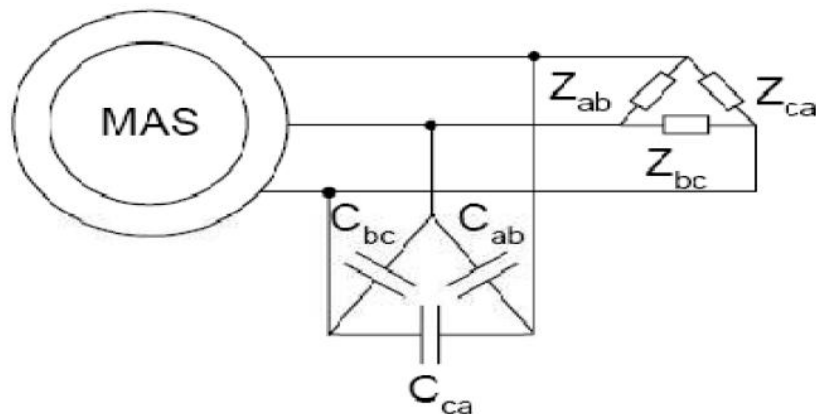


Fig I.1: Schéma de principe

I.2. Détermination de la capacité d'auto-amorçage

Considérons un générateur asynchrone débitant sur un réseau d'impédance Z_{ch}

$$V_s = Z_{tot} I_s = -Z_{ch} I_s \quad (I.1)$$

Où Z_{tot} représente l'impédance résultante vue des bornes du générateur.

$Q_c = 3V_s^2 C \omega$: Lorsque les condensateurs sont connectés en étoile.

$Q_c = 3U_s^2 C \omega$: lorsque les condensateurs sont connectés en triangle.

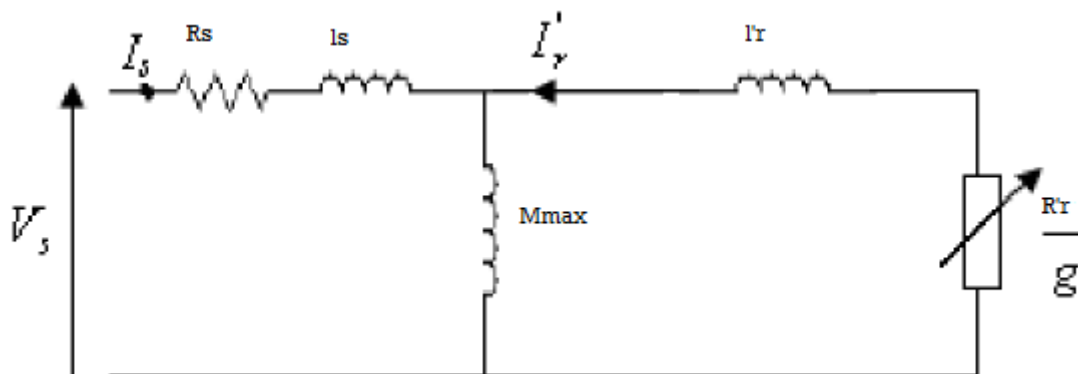


Fig.I.2 Schéma équivalent

$$Z_{\text{tot}} = R_s + j\omega l_s + \frac{j\omega M_{\text{max}}(\frac{R_r'}{g} + j\omega l_r')}{\frac{R_r'}{g} + j\omega(l_r' + M_{\text{max}})} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

l_s et l_r' : Inductances de fuites au stator et au rotor.

M_{max} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une autre rotorique.

ω : pulsation statorique en régime d'auto-excitation.

En simplifiant l'équation (I.1) on trouve :

$$Z_{\text{res}} = Z_{\text{tot}} + Z_{\text{ch}} \quad (\text{I.3})$$

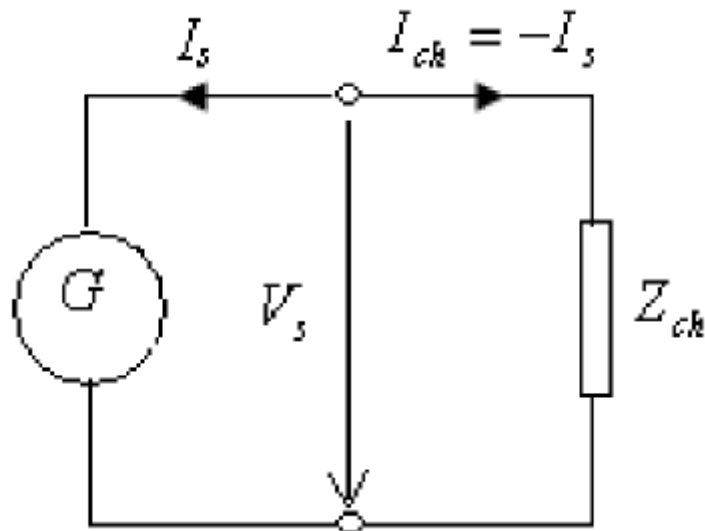


Fig.I.3 Fonctionnement en générateur auto-excité.

Si le générateur est déconnecté du réseau et chargé sur des condensateurs tels que :

$$Z_{\text{ch}} = - \frac{j}{C\omega}$$

Le fonctionnement stable du générateur asynchrone auto-excité sera assuré si l'équation (I.3) est satisfaite, c'est-à-dire si l'impédance résultante du circuit de la figure (I.4) selon l'expression (I.3) est telle que :

$$\begin{cases} \text{Re}(Z_{\text{res}}) = 0 \\ \text{Im}(Z_{\text{res}}) = 0 \end{cases} \quad (\text{I.4})$$

Le phénomène d'amorçage de l'auto-excitation correspond au passage d'un état d'équilibre instable (début de l'amorçage) à un état d'équilibre stable (point de fonctionnement final) défini par les conditions (I.4).

Par conséquent l'amorçage ne peut se produire que si l'énergie fournie au système par l'organe d'entraînement (la machine à courant continu dans notre cas) est supérieure à l'énergie consommée dans les résistances R'_r et R_s . La puissance fournie au système correspond à la puissance dissipée dans la résistance $R'_r \frac{1-g}{g}$

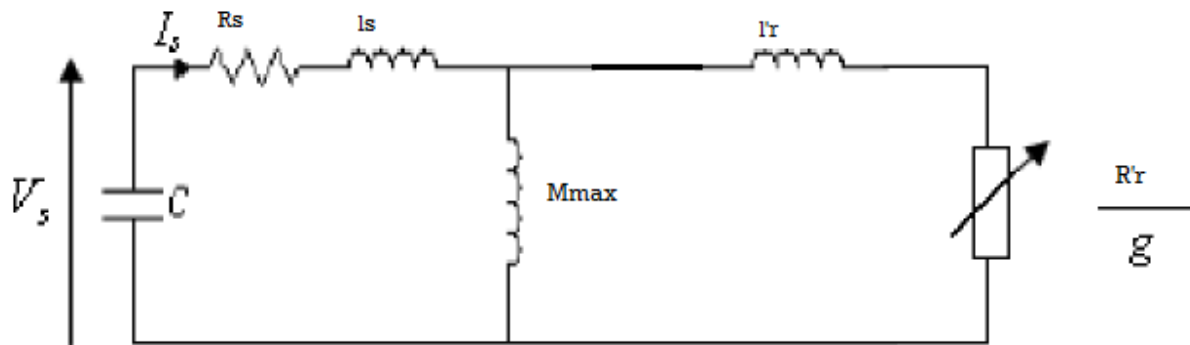


Fig.I.4 schéma équivalent d'un générateur asynchrone auto-excité.

La condition d'autoamorçage peut, dès lors, s'exprimer sous la forme simple : $\text{Re}(Z_{\text{res}}) < 0$

On a :

$$Z_{\text{res}} = R_s + j\omega l_s - \frac{j}{C\omega} + \frac{j\omega M_{\text{max}} \left(\frac{R'_r}{g} + j\omega l'_r \right)}{\frac{R'_r}{g} + j\omega (l'_r + M_{\text{max}})}$$

Avec :

$$L'_r = l'_r + M_{\text{max}}$$

La partie réelle est égale à

$$\text{Re}(Z_{\text{res}}) = R_s + \frac{\omega^2 M_{\text{max}}^2 \frac{R'_r}{g}}{\omega^2 l_r'^2 + \frac{R'_r}{g}} \quad (\text{I.5})$$

La figure (I.5) représente la variation de Z_{res} en fonction de g .

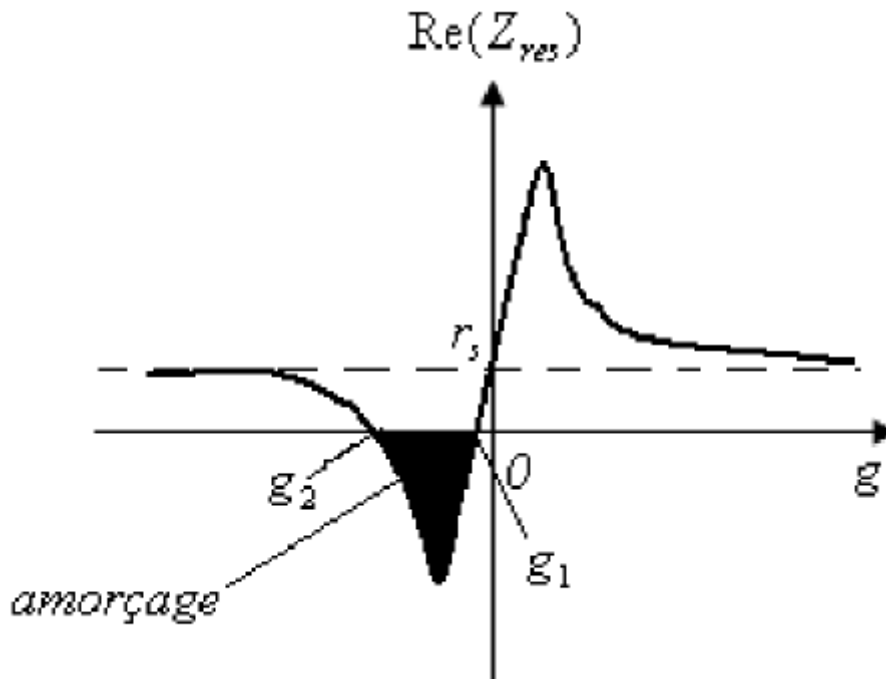


Fig.I.5 Détermination du domaine d'amorçage.

Cette fonction a pour asymptote r_s et ne peut être négative que pour des valeurs de g comprises entre g_1 et g_2 . La condition d'amorçage s'exprime par conséquent comme : $g_2 < g < g_1$.

Pour des valeurs très faibles de g , on peut négliger le terme $\omega^2 L_r^2 r$ et on trouve :

$$\text{Re}(Z_{res}) = R_s + \frac{\omega^2 M_{max}^2 g}{R_r'} \quad (\text{I.6})$$

D'ou, pour $\text{Re}(Z_{res}) = 0$:

$$g_1 \cong \frac{R_s R_r'}{\omega^2 M_{max}^2} \quad (\text{I.7})$$

La machine tourne pratiquement à sa vitesse de synchronisme.

Pour des grandes valeurs de g , on a :

$$\text{Re}(Z_{res}) \cong R_s + \frac{\omega^2 M_{max}^2 R_r'}{\omega^2 L_r'^2 + g} \cong R_s + \frac{R_r'}{g} \quad (\text{I.8})$$

D'ou :

$$g_2 = \frac{-R_s}{R'_r} \quad (\text{I.9})$$

Connaissant les glissements limites g_1 et g_2 , on déduit les valeurs extrêmes de la capacité C, qui définissent le domaine dans lequel l'amorçage peut avoir lieu. Le générateur asynchrone ne recevant d'autre énergie réactive que celle provenant de la capacité C, on a selon (I.4)

$$\text{Im}(Z_{res}) = \omega l_s - \frac{1}{\omega C} + \frac{\omega M_{\max} [\omega^2 L'_r l'_r + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2]}{\omega^2 L'_r + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} \quad (\text{I.10})$$

Pour $g = g_1 \approx 0$, on a $\omega_1 = \omega_r$, d'où :

$$\omega_r l_s - \frac{1}{\omega_r C_1} + \omega_r M_{\max} \cong 0$$

$$\omega_r l_s - \frac{1}{\omega_r C_1} \cong 0$$

Et donc :

$$C_1 = \frac{1}{\omega_r^2 L_s} \quad (\text{I.11})$$

Avec

$$L_s = M_{\max} + l_s \quad (\text{I.12})$$

La capacité C_1 correspond à la résonance avec l'inductance propre statorique L_s . Comme $g = g_1 \approx 0$, la machine génère la fréquence nominale en tournant pratiquement à la vitesse de synchronisme définie par son nombre de paires de pôles.

Pour $g = g_2 \approx -1$, on a :

$$\omega_r = (1 - g_2)\omega_2 \cong 2\omega_2 \quad (\text{I.13})$$

En négligeant le terme $(R'_r/g_2)^2$ dans l'équation (I.10) on obtient :

$$\text{Im}(Z_{res}) = \omega_2 l_s - \frac{1}{\omega_2 C_2} + \omega_2 M_{\max} \frac{l'_r}{L'_r} \cong 0 \quad (\text{I.14})$$

D'où :

$$C_2 = \frac{1}{\omega_2^2(l_s+l_r')} = \frac{1}{\omega_2^2(l_s+l_r')} \left(\frac{R_s+R_r'}{R_r'} \right)^2 \quad (I.15)$$

La capacité C_2 correspond à la résonance avec l'inductance de court-circuit de la machine. Cette solution n'est pas intéressante car, pour générer la fréquence nominale, la machine doit tourner pratiquement au double de sa vitesse de synchronisme.

I.3 Prise en compte du phénomène de saturation

Le modèle de la machine asynchrone établi précédemment est, dans la plupart des cas, suffisant pour obtenir de bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage, impact de charge. . .) [3] [4]. Néanmoins, ce modèle utilise une inductance magnétisante M_{\max} constante, ce qui sous-entend que le matériau magnétique utilisé pour la conception de la machine est linéaire. La simulation du phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone par un banc de capacités ne peut se satisfaire de ce modèle puisque c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. En effet lorsque la machine est entraînée par un dispositif externe, la présence d'un champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée un couple électromagnétique engendrant une force électromotrice sur les enroulements statoriques. La connexion de capacités sur les phases du stator entraîne alors la création d'un courant réactif qui augmente le champ magnétique de la machine et par conséquent les forces électromotrices. C'est cette réaction cyclique qui permet à la machine d'arriver à un régime permanent situé dans la zone saturée.

La figure (I.6) représente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe du condensateur ($V_c = \frac{I_m}{C\omega}$) en fonction du courant I_m pour un fonctionnement à vide de la machine.

L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent. L'observation de ces courbes montre aisément que deux phénomènes peuvent modifier l'emplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique de magnétisation :

- La variation de la capacité d'auto-amorçage qui entraîne une modification de la pente de la droite de charge de la capacité
- La variation de la charge connectée sur la machine qui provoque une variation du glissement. Ceci rend la résistance R_r'/g non négligeable et le courant est alors partagé entre l'inductance magnétisante et la résistance rotorique.

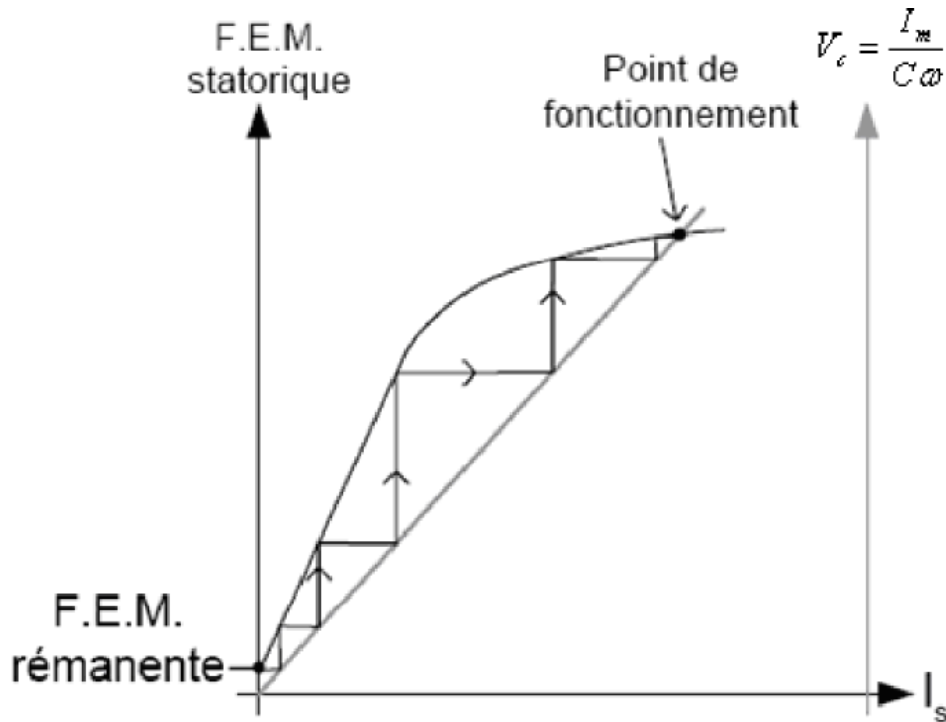


Fig.I.6 Phénomène d'auto-amorçage

Lorsque le point de fonctionnement est atteint, la machine délivre une tension au stator dont la valeur efficace est constante. Si l'inductance magnétisante est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non-saturé, la caractéristique de magnétisation ne présente alors pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. L'auto-amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie. Cette partie sera interprétée dans la partie simulation et expérimentation avec comparaison des courbes à l'appui.

I.4 Simulation et résultats expérimentaux

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire tiennent compte de la saturation du circuit magnétique et sont effectués en régime équilibré.

Ces essais consistent à valider le modèle du générateur asynchrone autonome.

Pour cela on étudie d'abord l'auto-amorçage en simulation pour les deux régimes (saturé et linéaire) puis expérimentalement dans le but de valider le modèle après comparaisons des résultats ainsi obtenus.

La machine à vide est entraînée à la vitesse de synchronisme (1500tr/mn). Les capacités d'auto-excitation sont fixées à 90 μ F. La simulation de l'auto-amorçage du générateur a été effectuée à l'aide du logiciel Matlab, ayant identifié les différents paramètres de la machine, nous avons essayé d'approcher le plus possible les résultats expérimentaux tout en sachant que certains phénomènes perturbateurs (frottements, effet de la température, perturbations causées par la sonde de la gs2020, l'entraînement pas vraiment synchrone etc.) que nous n'avons pas

pris en considération peuvent bien intervenir. La simulation a été validée expérimentalement dans les conditions réelles de la machine.

- **Modèle linéaire**

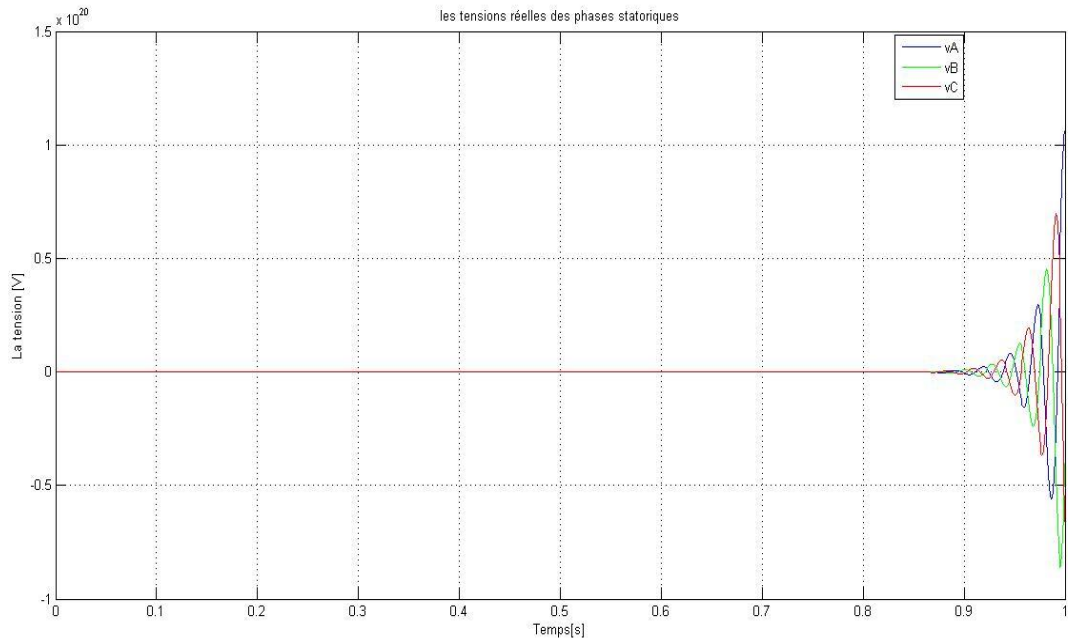
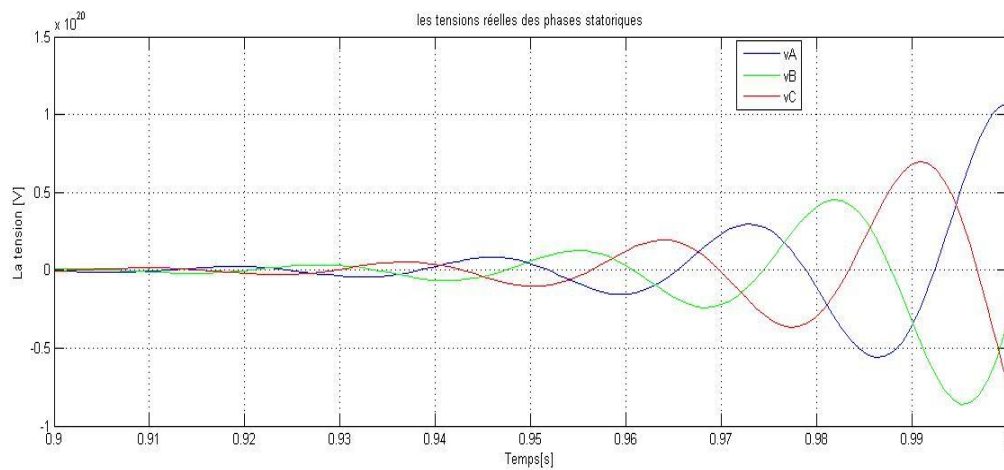


Fig.I.7 Tensions statoriques d'auto-amorçage obtenues par simulation (modèle linéaire)



Zoom de la figure I.7

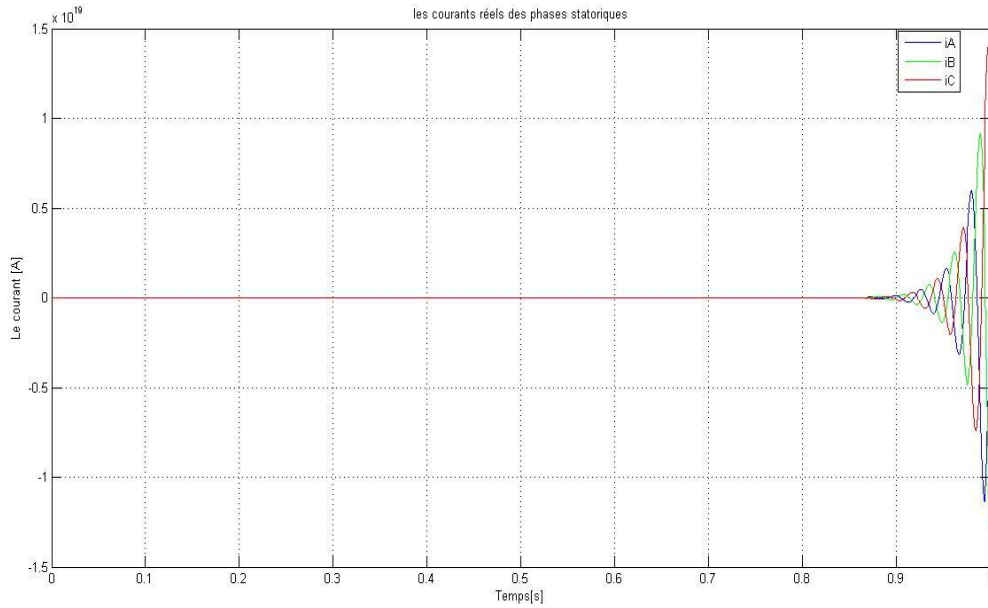
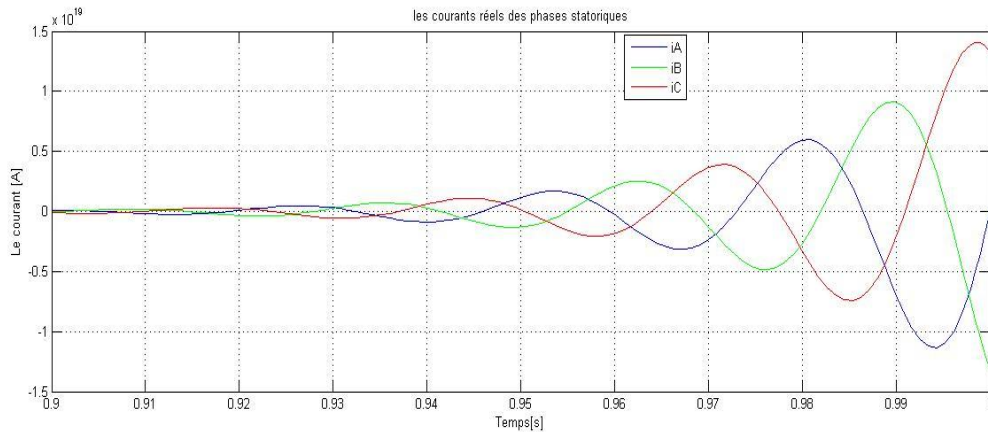


Fig.I.8 Courants statoriques d'auto-amorçage obtenues par simulation (modèle linéaire)



Zoom de la figure I.8

On voit sur les figures (I.7) et (I.8) que les tensions et les courants statoriques divergent et atteignent des valeurs très grandes quand la simulation se fait dans un régime linéaire, cela est dû au fait de ne pas tenir compte du phénomène de saturations.

Ces résultats ne sont pas réels et montrent la nécessité de la prise en compte de la saturation du circuit magnétique de la machine

- **Modèle saturé**

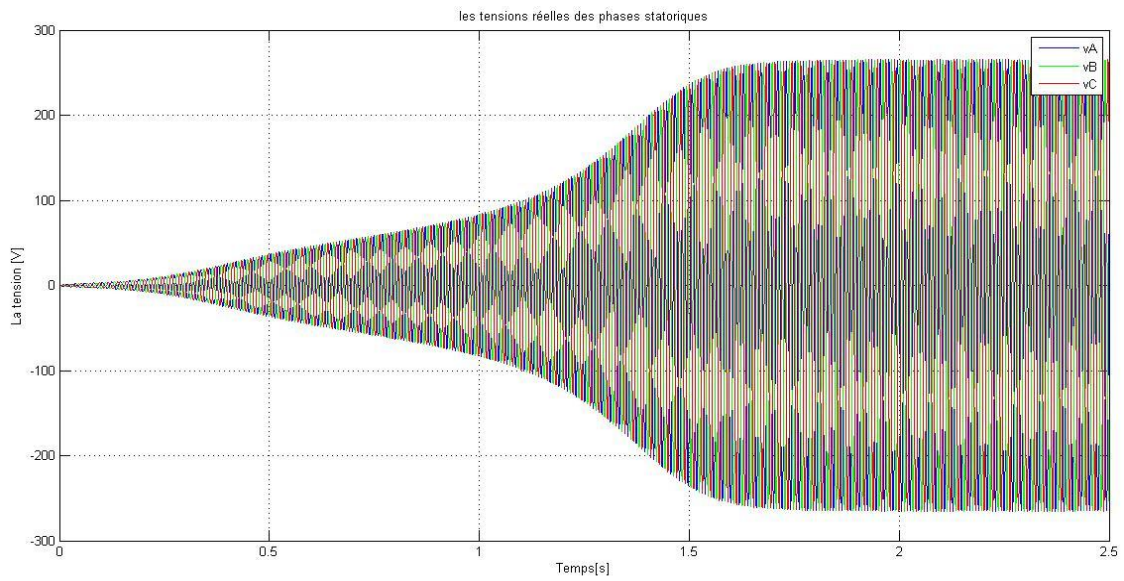


Fig.I.9 Tensions statoriques d'auto-amorçage obtenues par simulation

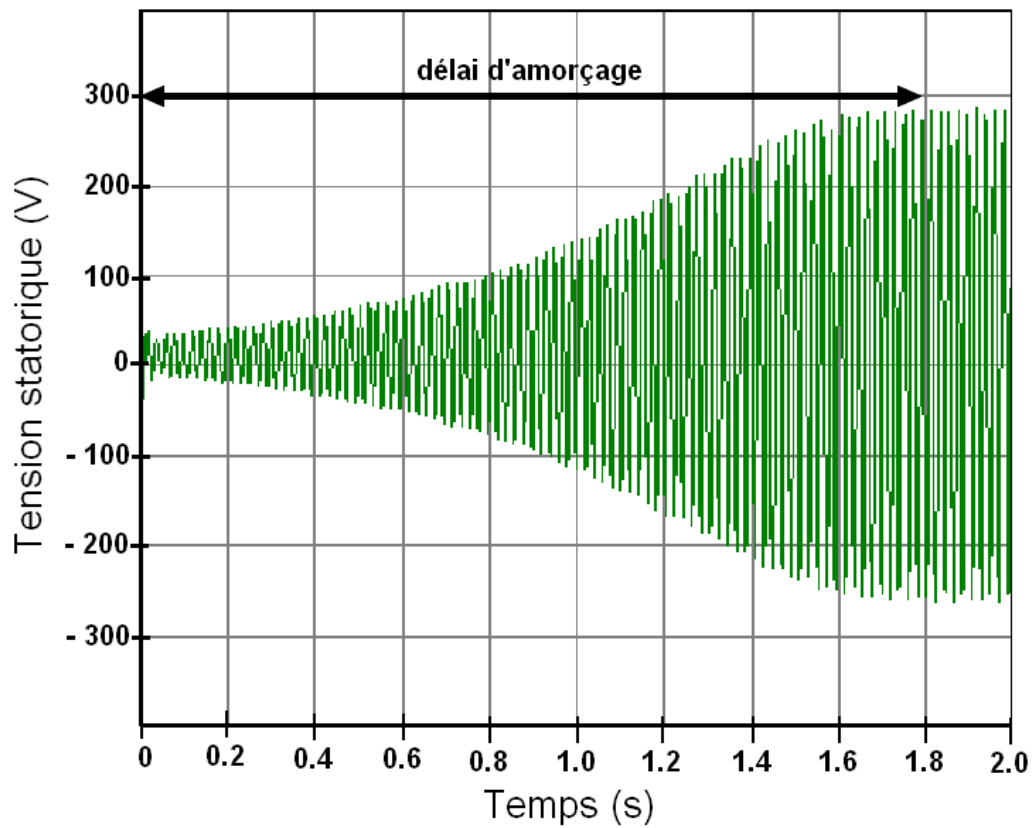


Fig I.10. Tensions statoriques d'auto-amorçage obtenue expérimentalement

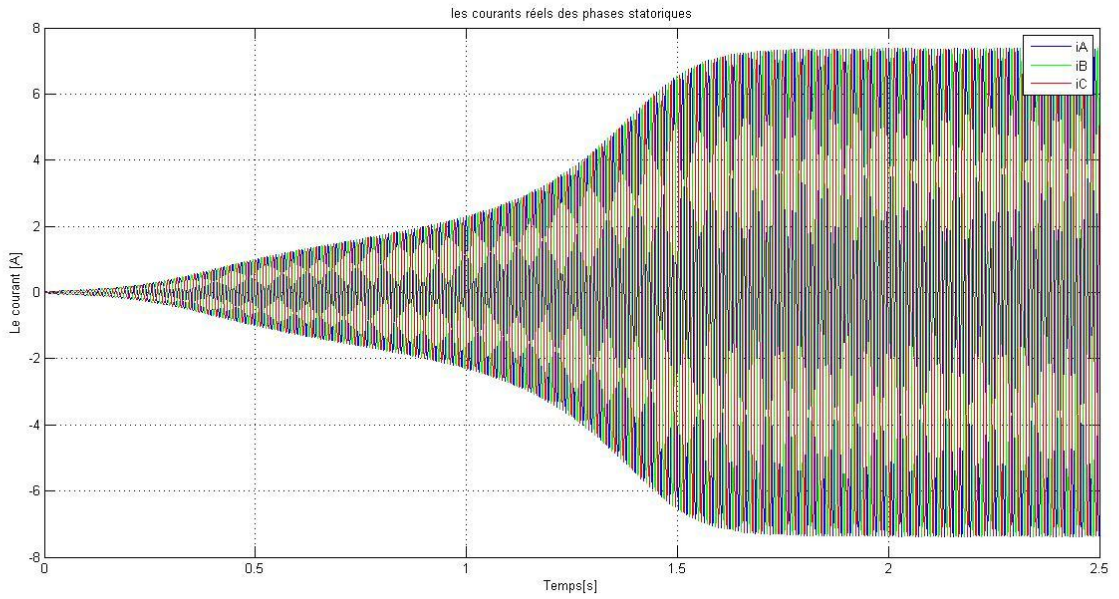


Fig.I.11 Courants statoriques d'auto-amorçage obtenus par simulation

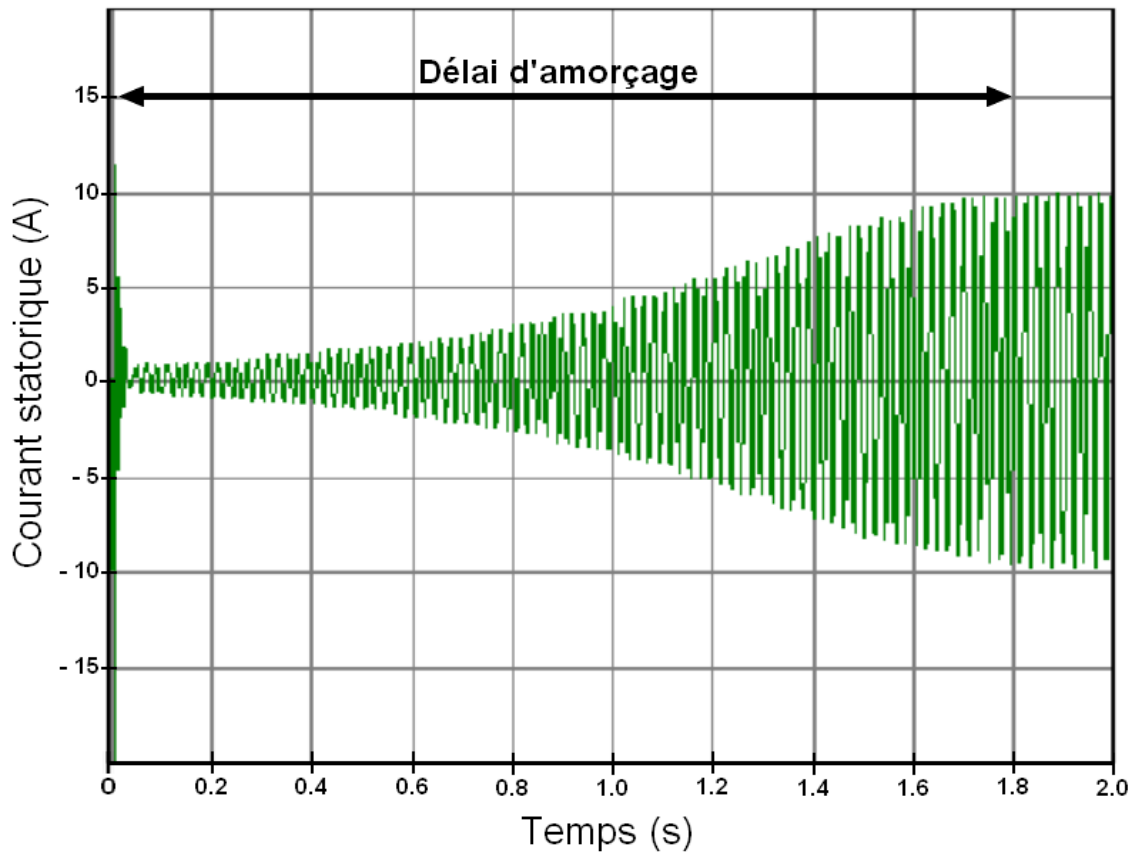


Fig.I.12. Courant statorique d'auto-amorçage obtenu expérimentalement

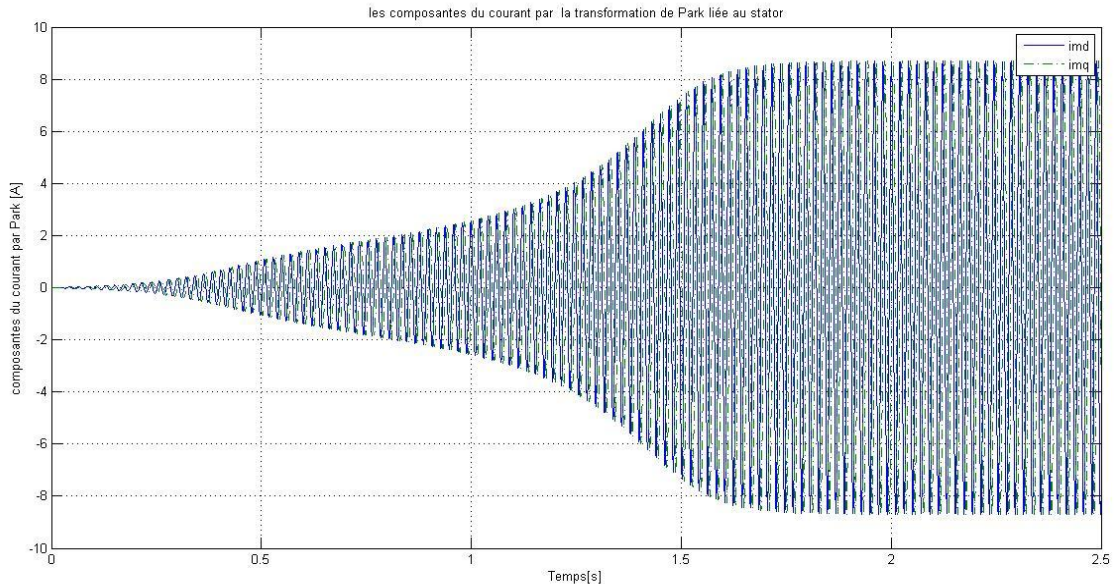


Fig.I.13 Courants magnétisants d'auto-amorçage obtenus par simulation

I.5 Interprétation des résultats

Dans cette application, la valeur de la capacité d'excitation est de $90\mu\text{F}$, alors que la vitesse de rotation est considérée fixe et égale à $1500\text{tr}/\text{min}$

Les figures (I.8) et (I.10) représentent respectivement l'évolution de la tension et le courant statoriques en fonctionnement à vide du générateur asynchrone à cage obtenus par simulation.

Au démarrage, la tension et le courant générés croient de façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 290V et à 8A en régimes totalement établis après écoulement d'une période temporelle de 3s , et c'est l'instant où le courant de magnétisation atteint son régime saturé (figure (I.13)).

On constate que les évolutions des tensions et des courants statoriques suivent la forme de l'évolution du courant de magnétisation.

En comparant les résultats obtenus par simulation avec ceux obtenus expérimentalement, on observe que la valeur initiale de la tension, avant le processus d'amorçage est un peu différente en simulation et dans l'essai expérimental. Cette différence est due aux conditions initiales correspondantes à la valeur de l'aimantation rémanente dans le rotor de la machine. En effet celle-ci est différente après chaque utilisation de la machine. Dans nos simulations, cette rémanence est prise en compte par une faible ($0,0054\text{ Wb}$) valeur initiale sur un des intégrateurs de flux.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes d'abord intéressés à la détermination des capacités d'auto-amorçage d'un générateur asynchrone autonome en fonctionnement linéaire que nous avons corrigées par la suite en tenant compte de la saturation magnétique qui permet de limiter les amplitudes des tensions et courants en régime établi, Durant l'expérience nous avons relevé les différentes courbes d'auto-amorçage à vide. Dans un esprit de clarté nous avons poursuivi notre étude en procédant à la simulation du modèle du générateur afin de pouvoir valider nos résultats. L'interprétation et la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation ont révélé que ceux donnés par la simulation sont assez satisfaisants, ce qui nous a permis de valider le modèle.

CHAPITRE II : INFLUENCE DES PARAMETRES DE LA MACHINE

Pour voir l'influence des paramètres électriques de la machine sur l'auto-amorçage, des simulations ont été faites en faisant varier l'inductance magnétisante, la résistance rotorique et la capacité d'auto-amorçage.

II.1 Résultats de simulations

En multipliant les valeurs des paramètres par $3/2$ on a eu les résultats suivants :

- **L'inductance magnétisante :**

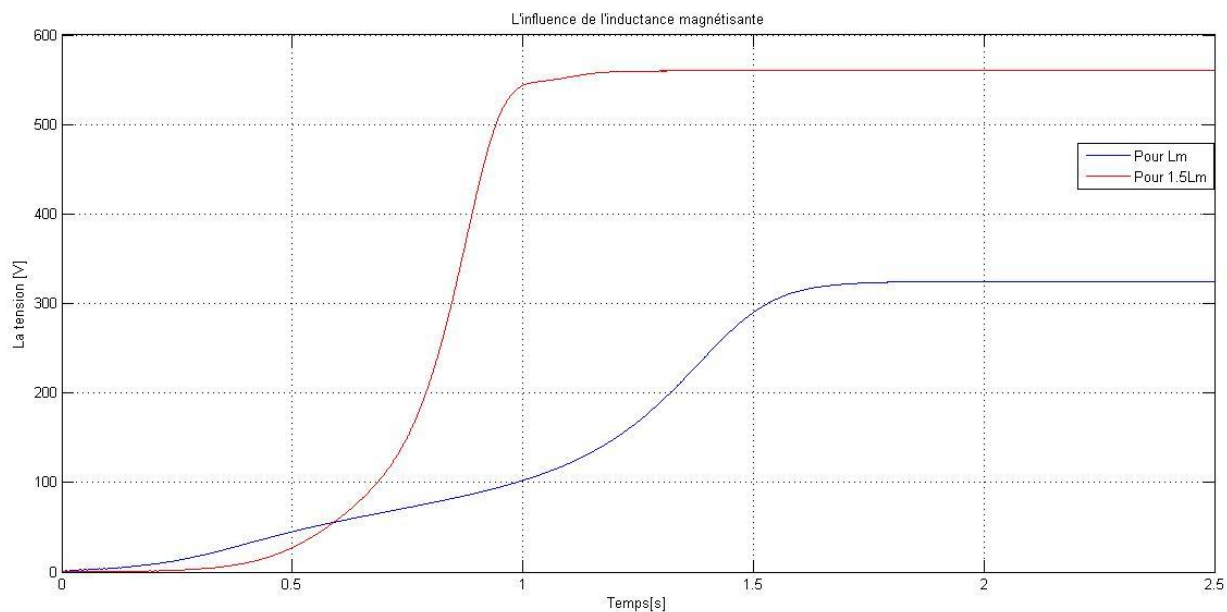


Fig.II.1 L'influence de l'inductance magnétisante

- **La résistance rotorique**

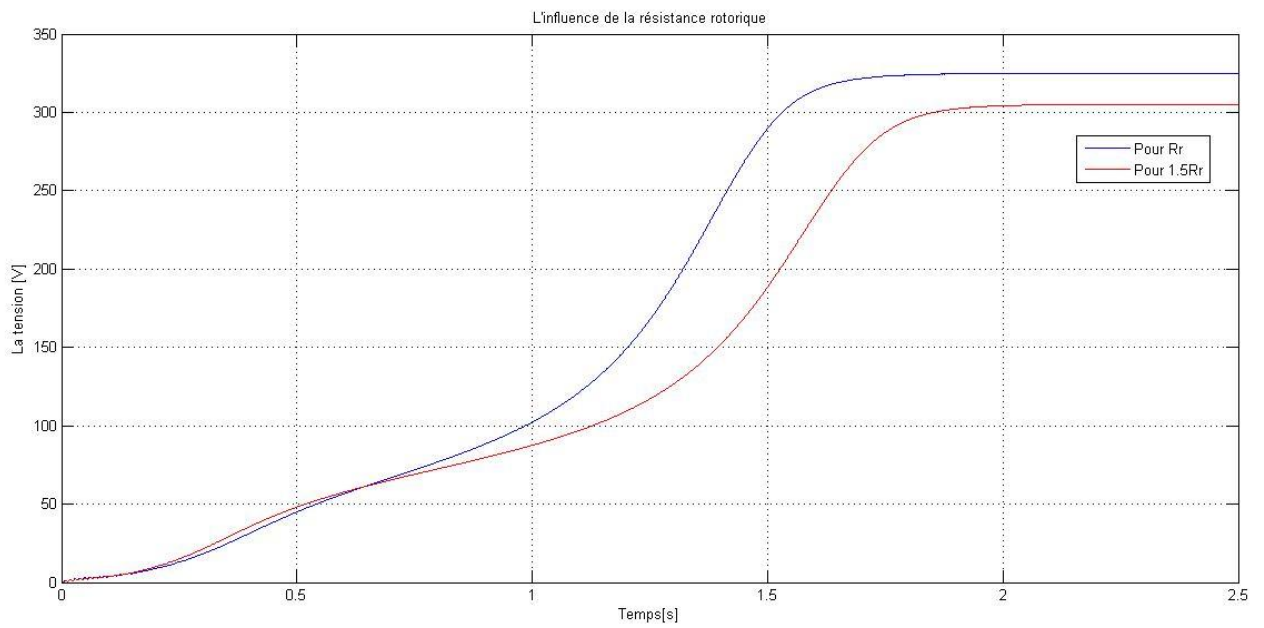


Fig.II.2 L'influence de la résistance rotorique

- **La capacité d'auto-amorçage :**

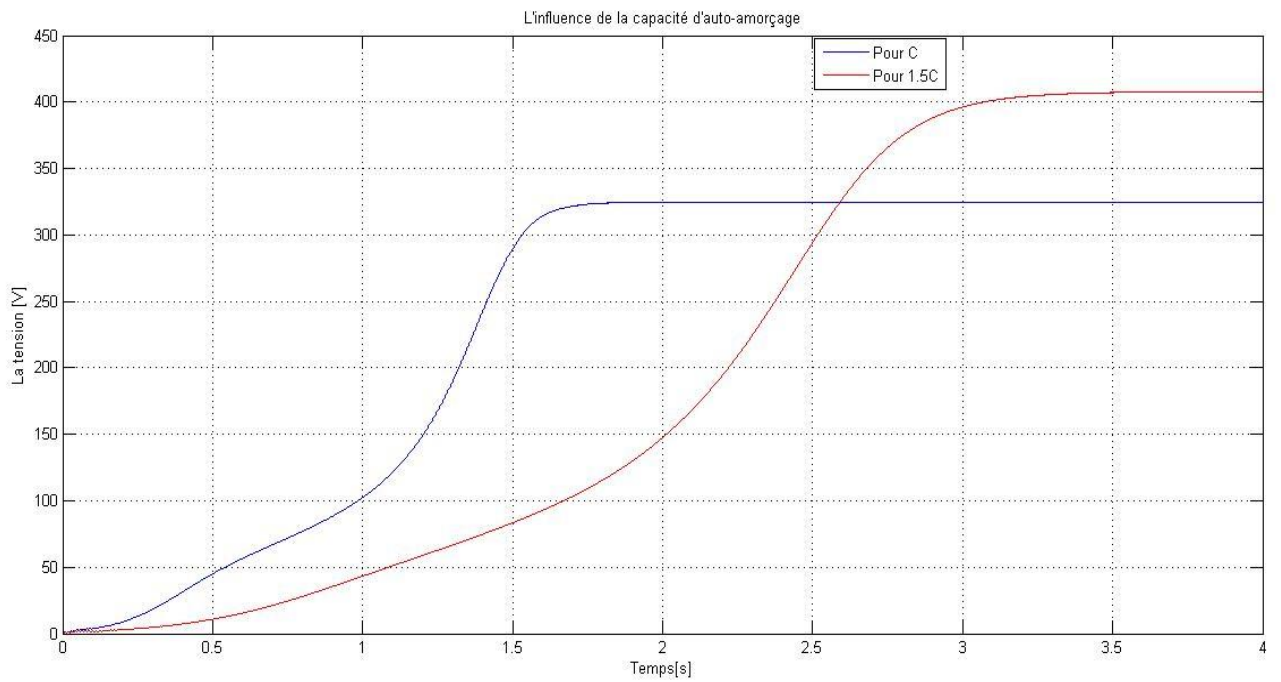


Fig.II.3 L'influence de la capacité d'auto-amorçage

II.2 Interprétation des résultats :

Pour l'inductance magnétisante, on remarque un retard au début d'amorçage par rapport à la courbe obtenue avec L_m initiale (Figure II.1). L'amplitude de la tension finale statorique change en multipliant la valeur de l'inductance par $3/2$, elle augmente de 320V à 570V, on voit aussi une diminution du temps d'amorçage, on peut référer ça au changement de la capacité minimale d'auto-amorçage qui est calculée à partir de la résonance avec l'inductance cyclique statorique, la capacité utilisée devient très grande par rapport à celle minimale du système.

En ce qui concerne la résistance rotorique, au début d'amorçage les courbes sont presque collées l'une sur l'autre, cependant, à partir de $t=0.7s$ on voit une diminution de la tension statorique donc une augmentation du temps d'amorçage par rapport à la courbe initiale (Figure II.2), la valeur finale de la tension est un peu inférieure à celle obtenue pour R_r , cela est dû à l'augmentation de la chute de tension causée par la résistance rotorique.

Enfin, pour la capacité d'auto-amorçage, on voit que le délai d'amorçage a presque doublé pour une valeur de $3/2C$, cela est dû au phénomène de résonance qui est dépassé pour ce cas, la valeur de la capacité utilisée est beaucoup supérieur à la capacité minimale d'auto-amorçage. La valeur finale de la tension a changé aussi en changeant la valeur de la capacité, on voit une légère augmentation par rapport à celle obtenue initialement, la nouvelle valeur obtenue est d'environ 410V (Figure II.3), cela est expliqué par une augmentation de l'énergie réactive délivrée par la capacité à la machine.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette thèse était d'étudier le fonctionnement en générateur autonome de la machine asynchrone à cage d'écuréuil et voir l'influence des différents paramètres de la machine sur l'auto-amorçage.

Nous avons d'abord calculé la capacité minimale d'auto-amorçage de la machine, puis, nous avons simulé le modèle de la machine avec l'insertion d'un banc de capacités en parallèle, les simulations ont été faites dans les deux régimes (linéaire et saturé), une comparaison entre les résultats obtenus par simulations avec ceux obtenus expérimentalement nous a permis de valider le modèle ainsi établi et aussi de constater la nécessité de la prise en compte du phénomène de saturation.

La dernière partie de ce travail a été consacré à l'étude de l'influence des différents paramètres de la machine sur l'auto-amorçage, à savoir l'inductance magnétisante, la résistance rotorique et la capacité d'auto-amorçage, des simulations ont été faites pour voir l'influence de chaque paramètre sur la tension statorique finale et aussi sur le temps d'amorçage de la machine, nous avons constaté l'influence conséquente de la capacité d'auto-amorçage et de l'inductance magnétisante sur ces deux valeurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] J. CHATELAIN, « Machines électriques, Traité d'électricité », Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.

[2] F.POITIERS, « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003

[3] L. MUTREL, « Régimes statique et dynamique des Machines Asynchrones », Technosup, édition Ellipses

[4] D. KAIROUS, S. MEKHTOUB, R. IBTIOUEN, O. TOUHAMI, « Modèle d'un générateur asynchrone auto-amorcé lors d'un retour réseau », Algerian Journal of Technology, P49-55, ENP,2005.