

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique**  
**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU**



**FACULTE DUGENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE**  
**DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE**

**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**De MASTER ACADEMIQUE**

Domaine: **Sciences et Technologies**  
Filière: **Electrotechnique**  
Spécialité: **Electrotechnique industrielle**

**Thème**  
**Retour au réseau de la génératrice asynchrone auto-amorcée**

*Mémoire soutenu publiquement le.../...../2019 : Devant les jurys composé de :*

*Arezki DICHE Maitre Assistant à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou*

*Farid NAMANI Maitre Assistant à l'université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou*

*Propose et dirigé par*

*M<sup>me</sup> M. IMADOUCHENE Maitre de conférences classe B*

*Présenté par*


*BABOU Faïza*

Promotion : 2018 / 2019

---

# *Remerciement*

---



*A Dieu, le tout puissant, nous rendons grâce d'avoir  
Nous donné la santé, la patience et la volonté pour réaliser ce  
modeste travail.*

*Mes profonds remerciements s'adressent à ma promotrice  
« Mme .M. IMADOUCHENE- DJAOUUD » enseignante au  
département électrotechnique à  
L'UMMTO qui a fortement contribué à la réussite de ce travail par sa  
patience et ses conseils avisés.*

*Je tiens aussi à remercier vivement les membres de jury de me faire  
l'honneur*

*D'évaluer ce modeste travail.*

*Par ailleurs, je remercie tous les enseignants du département  
électrotechnique qu'ont contribué à ma formation.*

*Et*

*A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation  
de ce modeste travail*

---

# *Dédicaces*

---

*Je dédie ce travail*

*A mes chers parents qui m'ont toujours  
soutenu Durant toute ma vie.*

*A mes sœurs fatiha et zedjiga, mes frères  
sid ali, seddik ,mahphoudh , karim ,  
yacine, mes belles sœurs fatima, safia et  
leurs petits et toute ma famille.*

*A mes chères amis kheloudja , kader et  
nassim qui Mon aidé et encouragé.*

# Table de matiere

Introduction générale .....	2
<b>CHAPITRE I : Généralités sur la machine asynchrone</b>	
Généralités sur la machine asynchrone .....	3
I.1.constitution de la machine asynchrone à cage .....	3
I.1.1. Stator .....	4
I.1.2. Le rotor .....	4
I.1.2.a. Rotor à bague ou rotor bobiné.....	5
I.1.2.b. Rotor à cage d'écureuil .....	5
I.3.L'entrefer .....	6
I.4.Paliers.....	6
I.5.Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone .....	6
I.5.1.Avantages.....	6
I.5.2 . Inconvénients .....	6
I.6.Le glissement .....	7
I.7.La vitesse de synchronisme.....	8
I.9.Principe de fonctionnement .....	8
I.9.a Fonctionnement en moteur.....	9
I.9.b Fonctionnement en générateur.....	10
I.10 Utilisation de la Machine asynchrone .....	10
I.11.structures d'aérogénérateurs asynchrones autonomes .....	10
I.11.a.Convertisseur unidirectionnel (redresseur à diode au mixte).....	10
I.11.b.Batterie de condensateurs fixes associée à un onduleur en parallèle avec la charge .....	11
Conclusion.....	12
<b>CHAPITRE II : Etude statique d'étude amorçage</b>	
II. Introduction.....	13
II.1 Mode du générateur asynchrone .....	13
II.1.1 Fonctionnement non autonome.....	13
II.1.2 Fonctionnement autonome.....	14
II.2 Etude du phénomène d'auto- amorçage en régime permanent.....	14
II.2.1. Mise en équation de l'auto-amorçage à vide .....	15

II.2.2. Domaine d'auto amorçage.....	16
Conclusion.....	19

### **CHAPITRE III : Modélisation du générateur asynchrone en régime linéaire**

III. Introduction .....	20
III.1. Modélisation du générateur asynchrone en régime linéaire.....	20
III.2. Hypothèses simplificatrices.....	20
III.3 Mise en équation de la machine asynchrone .....	21
III.3.1 Equations électriques.....	21
III.3.2 Equations magnétiques.....	22
III.4. Modèle diphasé équivalent de la machine transformation de Park .....	23
III.5 Choix du référentiel (d, q) .....	25
III.5.1 Référentiel lié au stator.....	26
III.5.2 Référentiel lié au rotor.....	26
III.5.3 Référentiel lié au champ tournant .....	26
III.6 Equation d'auto-amorçage en régime dynamique.....	27
III.7 Simulation du générateur asynchrone en régime linéaire .....	28
III.8 Simulation de l'auto-amorçage du générateur asynchrone sous hypothèse de linéarité .....	29
Conclusion.....	30

### **CHAPITRE IV : Modélisation de la génératrice asynchrone en régime Saturé**

IV.1 Introduction .....	32
IV.2 Prise en compte de l'effet de saturation .....	32
IV.3 Le phénomène de saturation croisée .....	33
IV.4 Mise en œuvre du modèle saturé dans le référentiel de Park.....	33
IV.5 Résultats de simulation en régime saturé .....	39
IV.6 Influence de la capacité sur la tension d'auto-amorçage .....	43
IV.7 Influence de la vitesse sur la tension d'auto-amorçage.....	45
IV.8. Comportement de la génératrice lors de la connexion au réseau .....	46
IV.9 Résultats de simulation .....	48
IV.9.a L'influence des déphasages sur les pics de courant .....	49
IV.9.b :L'influence de l'instant de connexion sur les pics de courant.....	50
Conclusion.....	52
Conclusion générale .....	54

## Liste des figures

Figure I.1 : vue détaillée d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.....	3
Figure I.2 : vue d'ensemble d'une machine asynchrone à simple cage d'écureuil.....	4
Figure I.3 : vue du stator d'une machine asynchrone .....	4
Figure I.4 : vue du Rotor bobiné.....	5
Figure I.5: Vue du rotor a cage de la machine asynchrone.....	6
Figure I.6 : couple de la machine asynchrone .....	7
Figure I.7 : schéma de principe du fonctionnement de la machine asynchrone.....	8
Figure I.8 : Structure avec convertisseur à diode et hacheur .....	10
Figure I.9 : Structure avec convertisseurMLI en parallele avec la charge .....	11
Figure II.1 : générateur asynchrone couple au réseau .....	12
Figure II.2 : générateur asynchrone isolé du réseau.....	13
Figure II.3 : Schéma équivalent par phase en régime permanent du générateur asynchrone auto-amorcé .....	14
Figure II.4 : Schéma réduit du générateur auto-amorcé.....	14
Figure II.5: Domaine d'auto-amorçage.....	16
Figure III.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasé.....	20
Figure III.2 : Représentation de la machine asynchrone dans le repère diphasé.....	24
Figure III.3 : Schéma bloc de simulation du générateur asynchrone en régime linéair.....	27
Figure III.4 Evolution des courants magnétisants sous hypothèse de linéarité.....	28
Figure III.5 Evolution des courants statoriques sous hypothèse de linéarité.....	28
Figure III.6 Evolution des tensions statoriques sous l'hypothèse de linéarité.....	29
Figure IV.1 : Courbe de la première aimantation d'un matériau ferromagnétique.....	32
Figure IV.2 Représentation des vecteurs flux et courants magnétisants.....	33
Figure IV.3 Schéma bloc de simulation de la génératrice asynchrone en régime saturé. ....	37
Figure IV.4 Variation des inductances statique et dynamique en fonction du courant magnétisant en régime saturé.....	38
Figure IV.5a Evolution des tensions statoriques en fonction du temps en régime saturée avec $N=1500$ tr/min et $C=155\mu F$ .....	39
Figure IV.5b Tension d'une phase statorique en fonction du temps en régime saturée avec $N=1500$ tr/min et $C=155\mu F$ .....	39
Figure IV.6a Evolution des courants statoriques en fonction du temps en régime saturée avec $N=1500$ tr/min et $C=155\mu F$ .....	40

Figure IV.6b Courant statorique en fonction du temps en régime saturée avec $N=1500\text{tr/min}$ et $C=155\mu\text{F}$ .	40
Figure IV.7 Evolution des courants rotoriques en fonction du temps en régime saturée avec $N=1500\text{tr/min}$ et $C=155\mu\text{F}$ .....	41
Figure IV.8 Evolution des courants magnétisants (composantes du modèle de Park) en fonction du temps en régime saturée avec $N=1500\text{tr/min}$ et $C=155\mu\text{F}$ .....	41
Figure IV.9 Enveloppes supérieures des tensions d'auto-amorçage pour différentes valeurs de $\text{dec}$ à une vitesse $N=1500\text{tr/min}$ .....	43
Figure IV.10 Phénomène d'auto-amorçage .....	43
Figure IV.11 Enveloppes supérieures des tensions d'auto-amorçage pour différentes valeurs de $N$ à $C=155\mu\text{F}$ .....	44
Figure IV.12. Schéma synoptique de la connexion de la machine à cage au réseau.....	44
Figure.IV.13. Schéma de simulation de la connexion de la génératrice au réseau.....	46
Figure IV.14 : Tension de la machine lors de la connexion au réseau.....	47
Figure.IV.15.a Courant statorique avec un faible pic négatif suite à une reconnexion de la tension du générateur ( $\varphi=0^\circ$ ).....	48
Figure.IV.15.b Courant statorique avec un pic positif suite à une reconnexion de la tension du générateur ( $\varphi=90^\circ$ ).....	48
Figure.IV.15.c Courant statorique avec un pic positif suite à une reconnexion de la tension du générateur ( $\varphi=180^\circ$ ).....	49
Figure.IV.16a. Courant statorique avec un pic négatif suite à une reconnexion de la tension du générateur $t=2\text{s}$ .....	49
Figure.IV.16b. Courant statorique avec un pic positif suite à une reconnexion de la tension du générateur à $t=2.21\text{s}$ .....	50
Figure.IV.16c. Courant statorique avec un pic négatif suite à une reconnexion de la tension du générateur à $t=2.23\text{s}$ .....	50

*Introduction*

---

*Générale*

## **Introduction générale**

La machine asynchrone est la machine la plus répandue aujourd'hui dans l'industrie, surtout comme moteur. Elle offre aussi la possibilité de l'utiliser comme générateur. En principe, toute machine asynchrone peut être utilisée en générateur, il suffit de créer le flux magnétique tournant, en apportant au stator l'énergie réactive nécessaire, tout en entraînant son rotor au-delà de sa vitesse de synchronisme. Alors, une fois que les pertes mécaniques sont compensées, la puissance excédentaire se retrouve sous forme électrique au stator, où elle est récupérée.

L'augmentation de la demande en électricité et les problèmes engendrés par la dégradation de la qualité d'énergie sur les réseaux ont poussé beaucoup de chercheurs à se consacrer à l'étude des performances de la machine asynchrone en vue de l'adapter à la production de l'énergie électrique, l'utilisation de ce type de machine devient intéressant avec le développement de l'électronique de puissance et de l'outil informatique, ces deux options ont permis l'élargissement de son domaine d'application.

Le développement des sources autonomes et des systèmes de récupération d'énergie ont favorisé l'utilisation des machines asynchrones en générateur. Dans ce mode de fonctionnement, elles occupent la majorité des éoliennes dans la gamme de moyenne puissance. Ces dernières sont caractérisées par un fonctionnement à des vitesses variables et par une capacité de surcharge, ce qui les favorise à remplacer l'alternateur dans des applications particulières tel que l'alimentation des endroits ruraux ou isolés.

Le principal avantage de la machine asynchrone réside en particulier dans sa morphologie à cage et dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste et qui ne nécessite qu'un minimum d'entretien. Par contre ce type de machine souffre d'une dynamique très complexe en raison du fort couplage entre les circuits statorique et rotorique.

L'étude du comportement en régime dynamique de cette machine est donc une tâche difficile qui nécessite l'élaboration d'un modèle assez précis, afin de pouvoir prédire son comportement dans les différents modes de fonctionnements envisagés.

Dans notre travail qu'on a divisé en quatre parties nous commençons par présenter, dans le premier chapitre qui parle sur, les généralités sur les machines asynchrones en donnant les différentes parties constituantes et les deux types de fonctionnement, moteur et générateur, ainsi que les domaines de l'utilisation.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude en régime permanent de l'auto-amorçage. Cette étude permet de définir la capacité minimale ou l'amorçage peut avoir lieu.

Dans le troisième chapitre nous présenterons la modélisation du générateur asynchrone sans tenir compte de l'effet de saturation, en donnant les différentes équations en utilisant le modèle de Park, puis la simulation sous Matlab Simulink pour observer le comportement de la machine à travers les différentes grandeurs tels que le courant et la tension.

Dans le quatrième chapitre nous allons établir un modèle mathématique du générateur asynchrone autonome par un banc de capacités en prenant compte le phénomène de saturation par des équations simples en utilisant la transformation de Park. Ce qui va faciliter la simulation du modèle utilisé par la suite. Puis nous allons analyser le comportement de la machine lors de l'accrochage au réseau particulièrement le transitoire de courant.

# *Chapitre I*

---

## *Généralités sur la machine asynchrone*

## Généralités sur la machine asynchrone

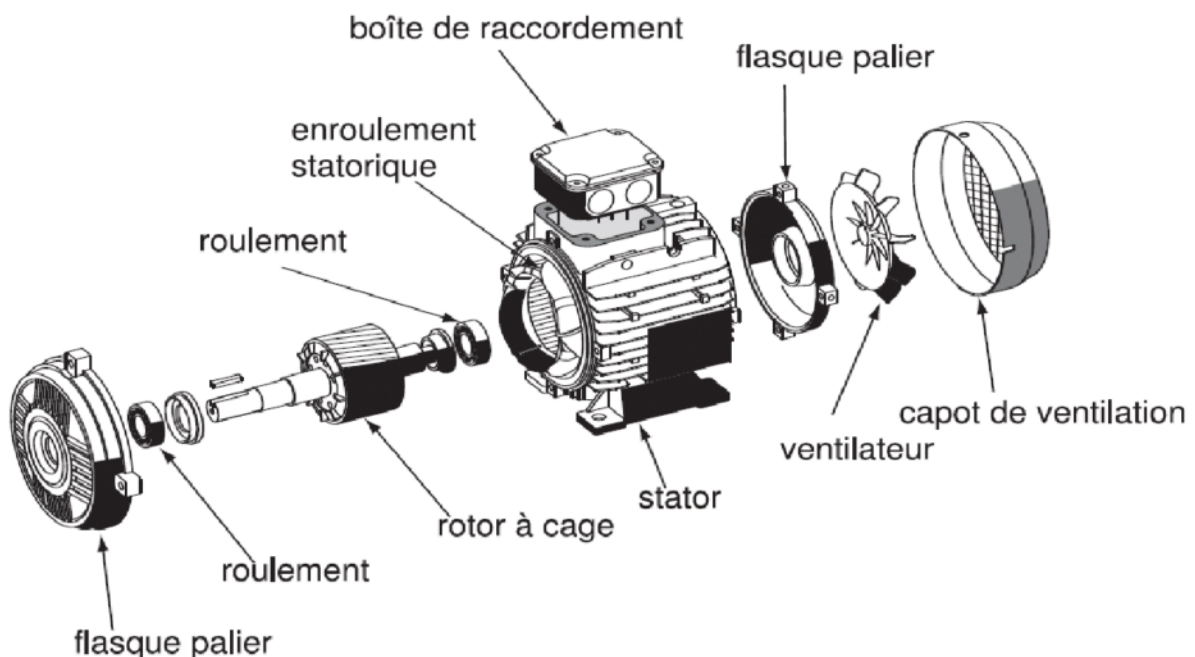
La machine asynchrone, connue également sous le nom de machine à induction, est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor, elle est largement utilisée dans les applications industrielles. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de rotation n'est pas égale à celle du champ statorique, c'est une machine à fonctionnement réversible, elle peut fonctionner en mode moteur ou en générateur [1] [2].

Elle a été longtemps concurrencée par la machine synchrone dans le domaine des fortes puissances, jusqu'à l'invention de l'électronique de puissance. On la retrouve dans de nombreuses applications le transport ferroviaire (exemple : tramway, TGV), l'industrie, l'électroménager...etc. Elle était à l'origine utilisée en moteur, mais aujourd'hui et grâce à l'électronique de puissance elle est de plus en plus utilisée en génératrice comme c'est le cas dans les éoliennes. La simplicité de construction, la robustesse et son faible coût font d'elle un matériel très fiable et qui nécessite peu d'entretien [3].

### I.1. Constitution de la machine asynchrone à cage

La machine asynchrone comprend deux armatures :

Le stator (fixe) et le rotor (tournant).



**Figure I.1 :** Vue détaillé d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [4].

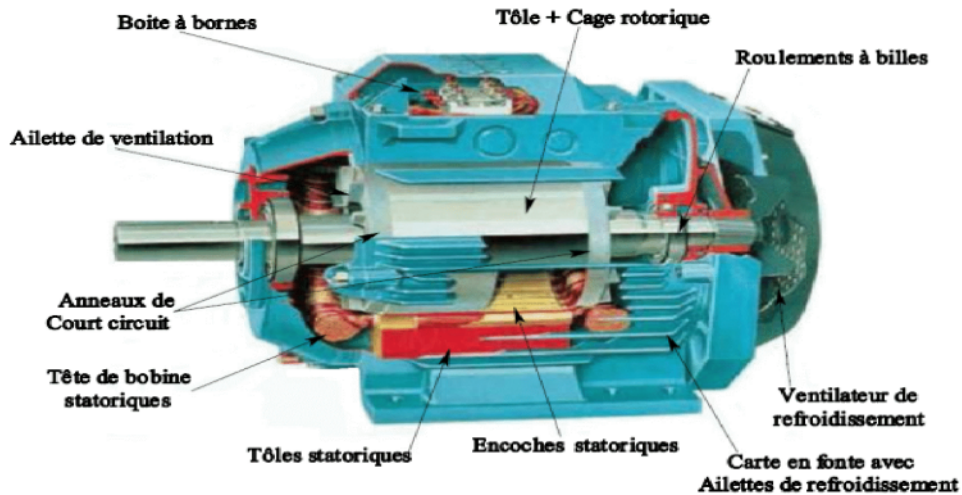


Figure I.2 : Vue d'ensemble d'une machine asynchrone à simple cage d'écureuil [4].

### I.1.1. Stator

Le stator est la partie fixe de la machine, appelé aussi primaire, il est parfaitement feuilleté et comporte des encoches régulièrement réparties. Dans ces encoches se logent trois enroulements identiques à ( paires de pôles fictifs), qui créent un champ tournant lorsqu'ils sont parcourus par des courants alternatifs triphasés, leurs axes sont décalés d'un angle de  $\frac{2\pi}{3}$  [2].

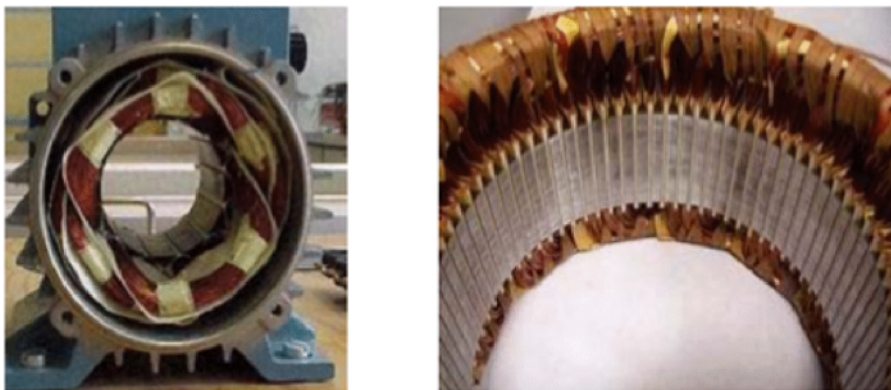


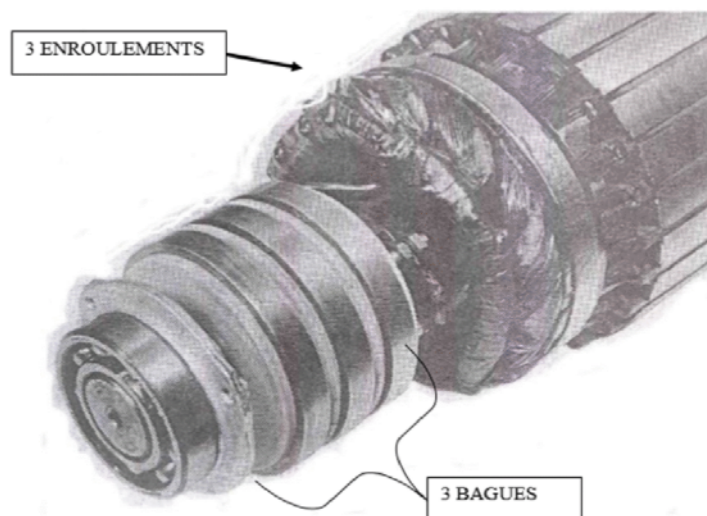
Figure I.3 : vue du stator d'une machine asynchrone [4].

### I.1.2. Le rotor

Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont en général de même nature que celles utilisées pour la construction du stator. On trouve deux types de rotors dans les machines asynchrones : Rotors bobinés ou à cage d'écureuil.

**I.1.2.a. Rotor à bague ou rotor bobiné**

Le rotor est constitué par un enroulement identique à celui du stator, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les sorties des extrémités des enroulements rotoriques sont reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. Pour permettre le réglage de la caractéristique couple/vitesse on peut mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances...). Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux (il assure de meilleures conditions au démarrage) [1].

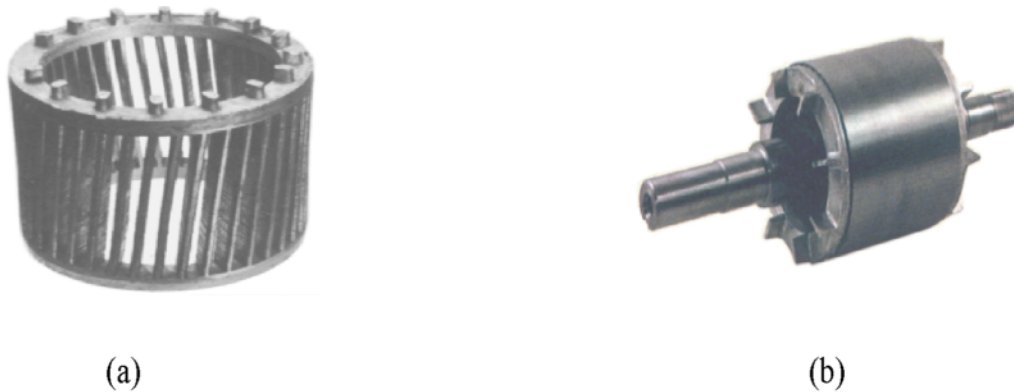


**Figure I.4 :** vue du Rotor bobiné [4].

**I.1.2.b. Rotor à cage d'écureuil**

Pour les rotors à cage, le circuit est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités (voir la figue I.5.a). Les enroulements sont constitués de barres de cuivre dans le cas des gros moteurs ou d'aluminium dans le cas des petits.

La construction du rotor à cage d'écureuil est simple mais robuste elle est formée par l'ensemble de barres de l'arbre rotorique parallèles à son axe, qui sont réunies sur chacune des faces de l'armature par un anneau d'une forte section appelé anneau de court-circuit, qui a une résistance électrique très faible[5].



**Figure I.5 :** Vue du rotor à cage de la machine asynchrone [4].

### I.3.L'entrefer

L'entrefer permet le mouvement du rotor par rapport au stator. Il est d'une faible épaisseur et sépare le rotor et le stator. La grande perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques vis-à-vis de l'air permet de supposer que toute induction dans l'entrefer est normale au stator et donc radiale [1].

### I.4.Paliers

Les paliers permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, ils sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre. Les flasques, moulés en fonte sont fixés avec des tiges de serrage ou des boulons sur l'écarteur statorique [5].

### I.5.Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone

#### I.5.1.Avantages

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisée dans la puissance moyenne et élevés.
- Reliée directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Tourne à une vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- La vitesse de rotation peut variable.
- Elle est utilisée pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse [6].

I.5.2 . Inconvénients

- Le couple de démarrage est très élevé par rapport au couple nominal.
- La vitesse dépend de la charge.
- La variation de vitesse nécessite un variateur.
- La structure dynamique est fortement non linéaire avec un fort couplage [6].

I.6.Le glissement

Le glissement d’une machine asynchrone représente la différence relative entre la vitesse du champ tournant statorique  $\Omega_s = \omega_s/p$  et celle de l’arbre du rotor

$$\Omega_m = \omega_m/p.$$

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

$\Omega_s$  : Vitesse angulaire des courants au stator ou vitesse synchrone des courants au stator (rad/s).

$g$  : Glissement.

$\Omega_r$  : Pulsation des grandeurs électriques rotoriques (rad/s).

$\Omega_m$  : Vitesse mécanique du rotor (rad/s).

La figure (1.5) nous donne la caractéristique couple électromagnétique / vitesse de rotation

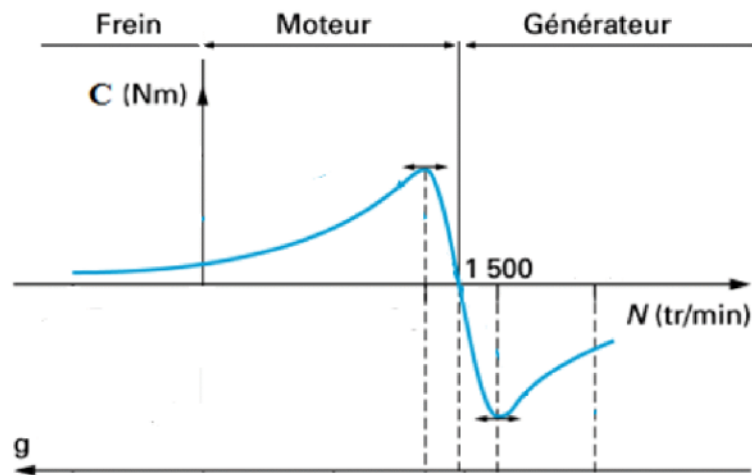


Figure I.6 : couple de la machine asynchrone [7].

**I.7. La vitesse de synchronisme**

Pour les moteurs asynchrones, la vitesse de synchronisme dépend de la fréquence d'alimentation et du nombre de paires de pôles  $p$  constituant le stator [8] :

$$N_s = \frac{60 \times f}{p}$$

Avec :

$N_s$  : Vitesse de synchronisme [tr/min]

$f$  : Fréquence [Hz]

$p$  : Nombre de paires de pôles

**I.9. Principe de fonctionnement**

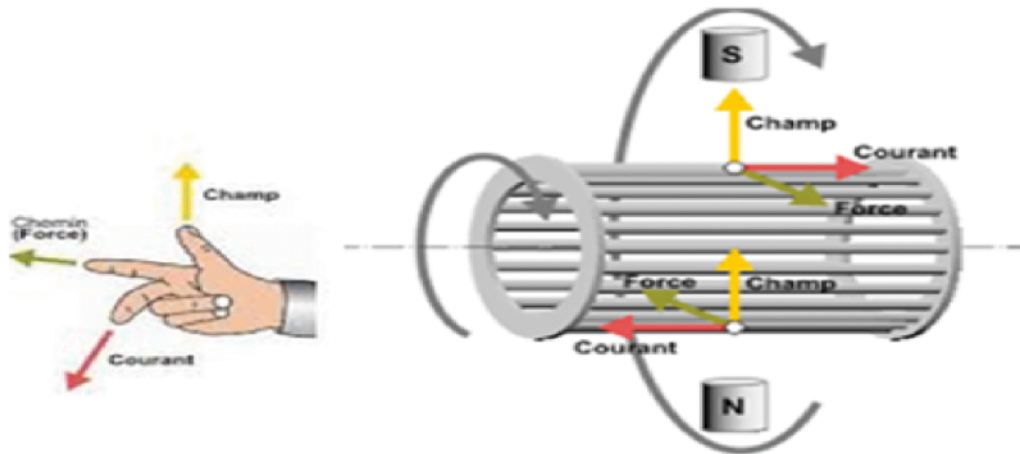
Le fonctionnement d'une machine asynchrone repose essentiellement sur trois principes de l'induction :

**Principe I :** création d'un champ magnétique par un courant équilibré et qui est défini par la loi de Ferraris. Si on applique une tension triphasée aux bornes du stator, des courants alternatifs traversent les conducteurs des enroulements du stator, ces derniers génèrent une force électromotrice et créent un champ magnétique tournant à une vitesse  $\omega_s/p$  par rapport au stator et  $(\omega_s - \omega_m)/p$  par rapport au rotor.

$\Omega_s$  : étant la pulsation des courants statoriques directement liés à la fréquence de réseau qui est la source d'alimentation de la machine.

$\Omega_m$  : est la vitesse électrique du rotor.

**Principe II :** La force exercée sur un conducteur placé dans un champ magnétique et qui est défini par la loi de Laplace, les conducteurs se trouvent à la fois dans des champs statorique et rotorique. Ils sont soumis à des forces électromagnétiques qui vont entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ figure(I.7).



**Figure I.7 :** schéma de principe du fonctionnement de la machine asynchrone [4].

**Principe III :** la tension induit par des conducteurs en mouvement dans un champ magnétique (loi de Faraday) ; les conducteurs du rotor deviennent siège d'un système de forces électromotrices induites de pulsation  $\omega_r = \omega_s - \omega_m$ , Quand ils sont coupés par le champ tournant provenant du stator. Cette fréquence variable selon le nombre de pôle nord et sud passant devant un conducteur. Quand le rotor est au repos elle est toujours égale à la fréquence du réseau.

Lorsque les conducteurs rotoriques sont court-circuités à leurs extrémités, ils sont parcourus par des courants induits de pulsations  $\omega_r$ . d'après la loi de lenz ces derniers s'opposent à la cause qui les a créé (le champ statorique) et génèrent un système de forces magnétomotrices donc un champ magnétique tournant à la vitesse  $\omega_r/p$  par rapport au rotor et à la vitesse  $(\omega_r + \omega_m)/p$  égale à  $\omega_s/p$  par rapport au stator ce qui fait que les champs statorique et rotorique tournent à la même vitesse [9].

### I.9.a Fonctionnement en moteur

En exerçant un couple résistant sur l'arbre, la machine ralentit, le champ du stator tend à accélérer le rotor pour atteindre la vitesse de synchronisme ce qui lui permet d'absorber de l'énergie électrique du réseau qu'il va transformer en énergie mécanique. Dans ce cas la machine fonctionne en moteur. La vitesse du rotor continue d'augmenter mais sans atteindre celle du champ tournant parce que si le rotor tourne à la même vitesse que le champ (vitesse de synchronisme), le flux ne couperait plus les conducteurs donc la tension induite et les courants dans le rotor seront nuls. Dans ces conditions, ce sont les forces qui agissent sur les conducteurs qui deviendraient nulles.

La vitesse du rotor doit être légèrement inférieure à celle du synchronisme pour produire un courant et, par conséquent, un couple suffisant pour vaincre les frottements.

**I.9.b Fonctionnement en générateur**

En exerçant un couple moteur sur le rotor de sorte que la vitesse  $\omega_r$  devienne supérieure à la vitesse  $\omega_s$ , le champ statorique force de le ramener à la vitesse de synchronisme. La machine va développer alors un couple résistant et absorbe de l'énergie mécanique qu'elle va renvoyer au réseau sous forme d'énergie électrique. Dans ce cas, la machine se comporte comme un générateur asynchrone [10]. Et pour créer son champ magnétique elle a besoin d'une source réactive qui peut provenir soit du réseau auquel elle est reliée ou bien fournie par une batterie de condensateurs branchée à ses bornes.

**I.10 Utilisation de la Machine asynchrone**

Le machine asynchrone est largement utilisée dans les applications industrielles, car grâce à son faible coût sa robustesse et sa simplicité de construction. Avec l'arrivée de l'électronique de puissance on la retrouve aussi dans le domaine de fortes puissances, aujourd'hui elle occupe une grande partie dans l'industrie mondiale dans le transport (Métros, trains, propulsion des navires...etc), dans l'industrie (machines-outils), ainsi que dans l'électroménager, comme générateur asynchrone on la retrouve généralement dans les applications de puissance limitée, comme la microcentrale hydraulique et à proximité des petites chutes d'eau, comme on la retrouve en grande partie dans le marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour les puissances modestes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes [1].

**I.11. Structures d'aérogénérateurs asynchrones autonomes**

Nous présentons deux structures d'aérogénérateurs isolés du réseau. Une structure avec convertisseur unidirectionnel et l'autre avec condensateur fixe associée à un onduleur en parallèle avec la charge :

**I.11.a. Convertisseur unidirectionnel (redresseur à diode ou mixte)**

Dans cette configuration, les convertisseurs d'énergie sont un redresseur de type PD3 (redresseur triphasé pont de Graëtz) et un hacheur de type survolteur/dévolteur. Cette adaptation a pour but de maintenir la tension à une valeur constante aux bornes de la charge et ceci lorsque le système est placé dans un environnement dynamique où la vitesse, la charge et la capacité changent. La régulation de la tension de sortie à la valeur désirée aux bornes de la charge et la charge peut se faire en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$  du signal commandant l'interrupteur du convertisseur DC-DC à la valeur adéquate [11].

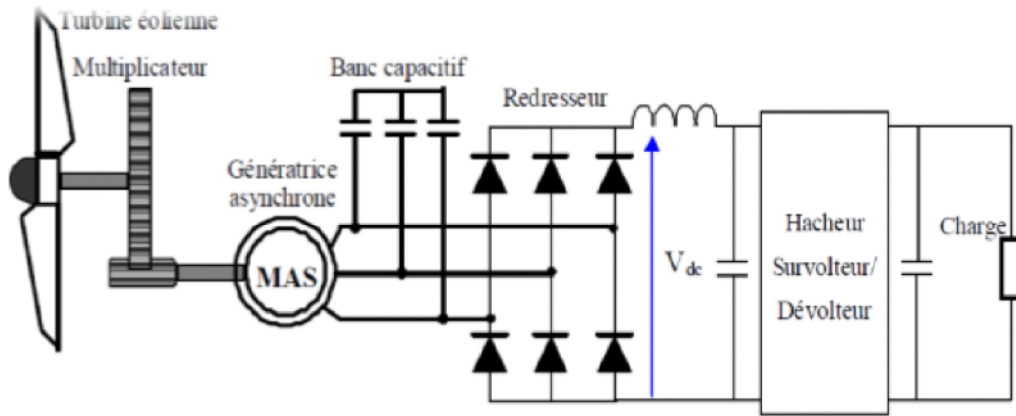


Figure I.8 : Structure avec convertisseur à diode et hacheur [11].

**I.11.b. Batterie de condensateurs fixes associée à un onduleur en parallèle avec la charge**

Dans une structure constituée d'un circuit d'excitation qui comprend une batterie de condensateurs fixes connectée en permanence avec la machine asynchrone, assurant un minimum d'excitation associée à un onduleur avec une capacité à son entrée, jouant le rôle d'une source de tension (VSI : Voltage Source Inverser) connectée en parallèle au stator de la machine .L'objectif est de maintenir la tension aux bornes de la machine avec une amplitude et une fréquence fixes en dépit des variations de la charge de la vitesse[11].

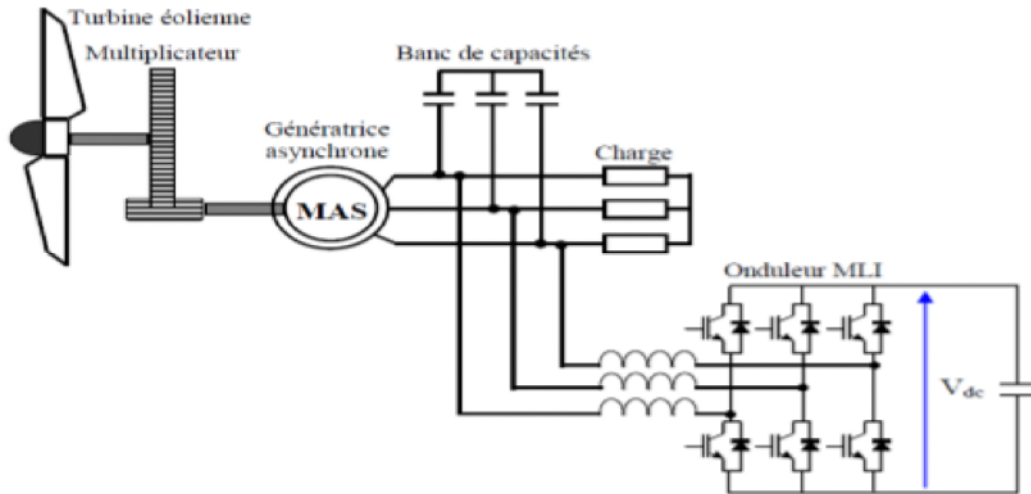


Figure I.9 : structure avec convertisseur MLI en parallèle avec la charge [11].

**Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons donné une brève description de la machine asynchrone et les différentes parties la constituant. Une étude a été présentée et qui concerne les machines asynchrones avec les constitutions et leurs principes de fonctionnements, puis nous avons donné un aperçu des deux types (rotor à cage d'écureuil et à rotor bobiné), ensuite nous avons montré le principe de fonctionnement en moteur et en générateur de la machine asynchrone ainsi que ses avantages et ses inconvénients, et fini par les différentes structures des aérogénérateurs.

D'après tous ce que la machine asynchrone a comme performances, elle constitue la plus grande partie des machines en service, ses robustesses, son faible coût et son entretien facile la mettent en avant dans la génération décentralisée de l'énergie électrique.

# *Chapitre II*

---

## *Etude statique de l'auto-amorçage*

## Introduction

La machine asynchrone est utilisée en génératrice dans des applications telles que la génération de l'énergie hydrolienne, éolienne.

Dans ce mode de fonctionnement le rotor tourne à une vitesse légèrement supérieure à celle du champ tournant. La génératrice fournit de la puissance active, tout en absorbant le réactif nécessaire à son aimantation. Lors d'un fonctionnement isolé (absence du réseau), l'apport en réactif peut-être fourni par l'adjonction d'une batterie de condensateurs.

### II.1 Modes de fonctionnement de la génératrice asynchrone

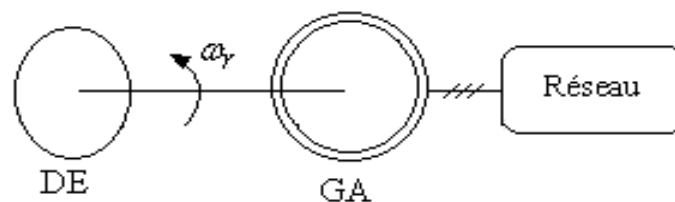
Toute machine asynchrone peut être utilisée comme générateur. Pour cela, il suffit de créer le flux magnétique tournant, en apportant au stator l'énergie réactive nécessaire, tout en entraînant son rotor au-delà de vitesse de synchronisme. Une fois les pertes compensées, la puissance mécanique excédentaire se retrouve sous forme électrique, active, au stator, ou elle est récupérée [12].

Le générateur asynchrone présent deux modes de fonctionnements :

#### II.1.1 Fonctionnement non autonome

Le système sous sa forme la plus simple est donné à la figure (II.1)

Lorsque la génératrice est couplée au réseau l'analyse devient simple, puisque le réseau lui impose sa propre fréquence, sa propre tension mais aussi, il lui fournit l'énergie réactive dont elle a besoin [13].

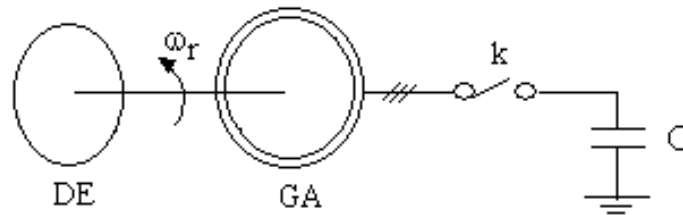


**Figure II.1 :** Générateur asynchrone couplé au réseau.

GA : Générateur asynchrone, DE : Dispositif d'entraînement

### II.1.2 Fonctionnement autonome

Dans ce mode de fonctionnement la génératrice asynchrone n'est plus couplée au réseau, la machine est entraînée à une vitesse suffisante, le réseau est remplacé par une batterie de condensateur qui est montée en parallèlement, avec le stator qui fournit le réactif au générateur.



**Figure II.2 :** Générateur asynchrone isolé du réseau.

L'interrupteur  $k$  de la figure(II.2) nous permet de connecter les condensateurs à la machine.

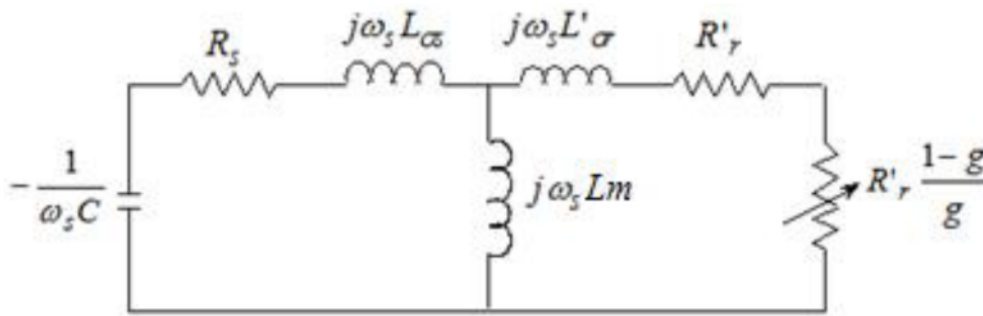
La mise en marche du système est soumise aux conditions suivantes :

- Vitesse d'entraînement suffisante.
- Existence d'une aimantation rémanente, pour cela, il suffit que la génératrice ait été mise déjà au moins une fois sous tension.
- La source d'énergie réactive doit être correctement dimensionnée (la valeur de la capacité des condensateurs doit être supérieure à une capacité de seuil en dessous de laquelle la machine ne s'amorce pas).

Dans ces conditions, la f.e.m induite et les courants statoriques accroîtront jusqu'à atteindre un équilibre imposé par la saturation magnétique de la machine.

### II.2 Etude du phénomène d'auto- amorçage en régime permanent

L'étude en régime statique du générateur asynchrone auto-amorcé, permet une prédétermination du fonctionnement de la machine en régime dynamique. Pour la mise en équations du fonctionnement autonome, nous utiliserons le schéma équivalent par phase à vide en régime établi, représenté par la figure (II.3) [13].

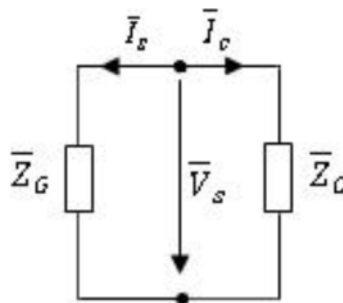


**Figure II.3 :** Schéma équivalent par phase en régime permanent du générateur asynchrone auto-amorcé.

Les hypothèses simplificatrices sont :

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

Il est possible de réduire le schéma équivalent de la figure (II.3) à un schéma contenant deux impédances l'impédance résultante vue des bornes de la génératrice  $Z_G$  et l'impédance du condensateur  $Z_C$  comme le montre la figure (II.4) :



**Figure II.4 :** Schéma réduit du générateur auto-amorcé

### II.2.1. Mise en équation de l'auto-amorçage à vide

Définissons d'abord les deux impédances du schéma de la figure (II.4) :

$$\bar{Z}_G = R_s + j\omega_s L_{\sigma s} + \frac{j\omega_s L_m \left[ \frac{R'_r}{g} + j\omega_s L'_{\sigma r} \right]}{\frac{R'_r}{g} + j\omega_s L'_{\sigma r} + j\omega_s L_m} \tag{II.1}$$

$$\bar{Z}_C = -\frac{j}{C\omega_s} \tag{II.2}$$

$\bar{Z}_G$  Impédance résultante vue des bornes statoriques de la machine.

$\bar{Z}_C$  Impédance du condensateur.

Lorsque la génératrice est chargée sur des condensateurs on écrit :

$$\bar{V}_s = \bar{Z}_G \bar{I}_s = -\bar{Z}_C \bar{I}_s \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II.3) peut également s'écrire comme suit :

$$\bar{Z}_G + \bar{Z}_C = 0 \quad (\text{II.4})$$

Le fonctionnement stable du générateur asynchrone sera assuré si l'équation (II.4) est satisfaite, c'est-à-dire si l'impédance résultante du circuit de la figure (II.1), est telle que :

$$R_e(\bar{Z}_G + \bar{Z}_C) = 0 \quad (\text{II.5})$$

$$I_m(\bar{Z}_G + \bar{Z}_C) = 0 \quad (\text{II.6})$$

### II.2.2 Domaine d'auto -amorçage

Le phénomène d'auto-amorçage 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 la condition (II.4) [13].

La condition d'amorçage peut s'exprimer par la formule simple  $R_e(\bar{Z}_{res}) < 0$ .

On a :

$$\bar{Z}_{res} = R_s + j(\omega_s L_{\sigma s} - \frac{1}{C\omega_s}) + \frac{j\omega_s L_m [\frac{R'_r}{g} + j\omega_s L'_{\sigma r}]}{\frac{R'_r}{g} + j\omega_s L'_{\sigma r} + j\omega_s L_m} \quad (\text{II.7})$$

$$\bar{Z}_{res} = R_s + j(\omega_s L_{\sigma s} - \frac{j}{C\omega_s}) + \frac{\omega_s^2 L_m^2 \frac{R'_r}{g} + j\omega_s L_m [\omega_s^2 (L'_{\sigma r} + L_m) L'_{\sigma r} + (\frac{R'_r}{g})^2]}{(\frac{R'_r}{g})^2 + \omega_s^2 (L'_{\sigma r} + L_m)^2} \quad (\text{II.8})$$

La partie réelle de l'impédance résultante est égale à :

$$R_e(\bar{Z}_{res}) = R_s + \frac{\omega_s^2 L_m^2 \frac{R'_r}{g}}{(\frac{R'_r}{g})^2 + \omega_s^2 (L'_{\sigma r} + L_m)^2} = R_s + \frac{\omega_s^2 L_m^2 R'_r g}{R'_r{}^2 + \omega_s^2 g^2 (L'_{\sigma r} + L_m)^2} \quad (\text{II.9})$$

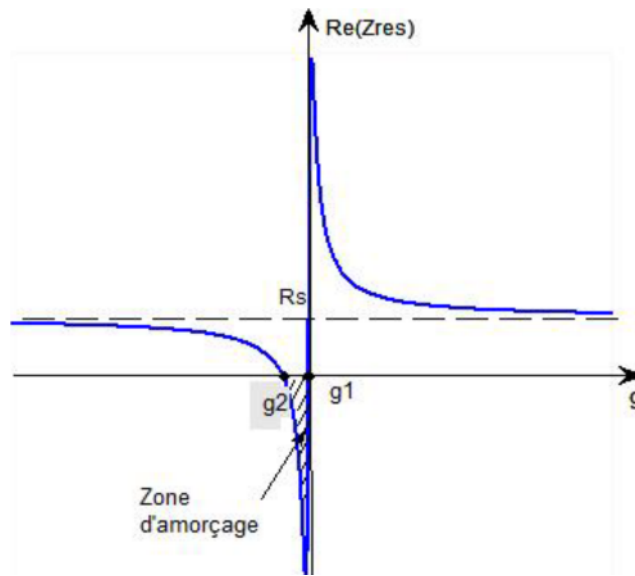


Figure II.5 Domaine d'auto-amorçage

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 :  $g_1 < g < g_2$

Pour des valeurs de  $g$  très faibles, on a :

On néglige  $(L'_{\sigma r} + L_m)^2 \omega_s^2$  devant  $\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2$ , la partie réelle à l'expression approchée suivante :

$$R_e(\bar{Z}_{res}) \cong R_s + \frac{\omega_s^2 L_m^2}{R'_r} g_1 \tag{II.10}$$

$$R_e \bar{Z}_{res}_{g \rightarrow g_1} = 0 \rightarrow R_s + \frac{\omega_s^2 L_m^2}{R'_r} g_1 = 0$$

D'où : 
$$g_1 \cong -\frac{R_s R'_r}{\omega_s^2 L_m^2} \cong 0 \tag{II.11}$$

La machine tourne pratiquement à sa vitesse de synchronisme.

Pour des valeurs de  $g$  très grandes, le terme  $\frac{R'_r}{g}$  devient négligeable devant  $(L'_{\sigma r} + L_m)^2 \omega_s^2$ , ce qui donne l'expression suivante :

$$R_e \bar{Z}_{res} \cong R_s + \frac{\omega_s^2 L_m^2}{\omega_s^2 (L'_{\sigma r} + L_m)^2} \frac{R'_r}{g} \cong R_s + \frac{R'_r}{g} \quad (\text{II.12})$$

$$R_e \bar{Z}_{res_{g \rightarrow g_2}} \cong 0 \rightarrow R_s + \frac{R'_r}{g_2} \cong 0$$

D'où :

$$g_2 \cong -\frac{R'_r}{R_s} \quad (\text{II.13})$$

A partir des deux glissements limites  $g_1$ , et  $g_2$ , on en déduit les capacités limites qui définissent le domaine dans lequel l'amorçage peut avoir lieu.

Nous avons selon l'expression (II.6) :

$$I_m \bar{Z}_{res} = \omega_s L_{\sigma s} - \frac{1}{C \omega_s} + \omega_s L_m \frac{\frac{R_r^2}{g} + \omega_s^2 L'_{\sigma r} (L_m + L'_{\sigma r})}{\frac{R'_r{}^2}{g} + \omega_s^2 L'_r{}^2} \quad (\text{II.14})$$

Pour  $g = g_1 \cong 0$ , on a :  $\omega_{s1} \cong \omega_r$

L'expression (II.14) devient alors :

$$\omega_r L_{\sigma s} - \frac{1}{C \omega_r} + \omega_r L_m \cong 0 \quad (\text{II.15})$$

D'où :

$$C = C_1 \cong \frac{1}{\omega_r^2 (L_{\sigma r} + L_m)} \quad (\text{II.16})$$

La capacité  $C_1$  correspond à la résonance avec l'inductance propre statorique  $L_s = L_{\sigma s} + L_m$

La machine génère une fréquence nominale en tournant pratiquement à la vitesse de Synchronisme.

Pour :

$$g = g_2 \cong -\frac{R_s}{R'_r} \cong -1$$

On a :

$$\omega_r = (1 - g_2) \omega_{s2} \cong \frac{R_s + R'_r}{R'_r} \omega_{s2} \cong 2 \omega_{s2} \quad (\text{II.17})$$

L'équation (II.14) devient en négligeant le terme  $\left(\frac{R_r}{g_2}\right)^2$  :

$$\omega_{s2} L_{\sigma s} - \frac{1}{C \omega_{s2}} + \omega_{s2} L_m \frac{L'_{\sigma r}}{L_m + L'_{\sigma r}} \cong \omega_{s2} (L_{\sigma s} + L'_{\sigma r}) - \frac{1}{C \omega_{s2}} \cong 0 \quad (\text{II.18})$$

Il vient alors :

$$C = C_2 \cong \frac{1}{\omega_s^2(L_{\sigma s} + L'_{\sigma r})} = \frac{1}{\omega_r^2(L_{\sigma s} + L'_{\sigma r})} \left( \frac{R_s + R'_r}{R'_r} \right)^2 \quad (\text{II.19})$$

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

### **Conclusion**

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'auto-amorçage du générateur asynchrone, sur une batterie des condensateurs. Nous avons considéré deux types de fonctionnement, l'un autonome et l'autre non autonome.

Le travail est basé sur le schéma équivalent de la figure (II.3) en régime permanent. Quand la condition du fonctionnement stable est satisfaite, nous avons déterminé le domaine dans lequel l'auto-amorçage peu avoir lieu.

La résonance entre l'inductance cyclique du stator et la capacité du condensateur est déterminé par la première limite, elle correspond au point de fonctionnement (point d'intersection entre la courbe de magnétisation et la droite d'excitation).

La résonance entre l'inductance du court-circuit et la capacité est déterminée par la deuxième limite.

# *Chapitre III*

---

## *Modélisation du générateur asynchrone en régime linéaire*

**Introduction**

La modélisation est une interprétation mathématique d'un phénomène physique. Dans notre cas nous allons modéliser une machine asynchrone pour cela on va utiliser des hypothèses simplificatrices parce que les phénomènes électromagnétiques sont généralement très complexes et leur formulation mathématiques sont difficiles et pour la simplicité de ce modèle nous allons utiliser la transformation de Park.

Le processus de modélisation nécessite, d'abord l'identification des paramètres de la machine (résistance, inductance...) en fonction des données expérimentales disponibles et de considérations théoriques. On pourra ensuite décrire l'évolution des grandeurs (courant, tension et flux) de la machine par l'écriture d'un système d'équations différentielles [12].

Dans ce chapitre nous allons procéder à la présentation de modèle linéaire de générateur asynchrone en régime dynamique, dont l'intérêt est essentiellement théorique. Nous reprenons les équations de base de la machine asynchrone idéalisée, en utilisant la transformation Park qui nous permettra d'obtenir des équations différentielles simplifiées. Les résultats de simulation nous permettront de juger la fiabilité du modèle.

**III.1. Modélisation du générateur asynchrone en régime linéaire**

Pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone dans un repère biphasé (d, q), dans ce cas, nous allons utiliser la transformation de Park.

Pour établir le modèle de la machine en régime dynamique, nous optons pour des hypothèses simplificatrices.

**III.2. Hypothèses simplificatrices**

- La machine est de construction symétrique,
- L'effet des encoches est négligé,
- L'entrefer est à épaisseur constante,
- Pas d'effet pelliculaire,
- L'induction et les forces magnétomotrices dans l'entrefer sont supposées à répartition sinusoïdale.
- Les pertes ferromagnétiques (pas de courants de Foucault ni d'hystérésis) et mécaniques sont négligeables,

➤ La saturation est négligée.

### III.3 Mise en équation de la machine asynchrone

La structure de la machine asynchrone que nous allons étudier est représentée par le schéma suivant:

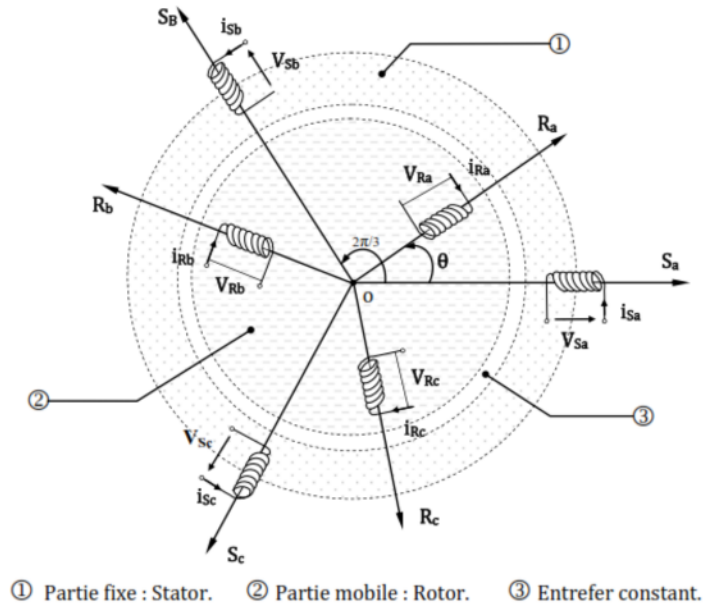


Figure III.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

Les enroulements des trois phases statoriques et rotoriques peuvent être représentés par la figure (III. 1).

$\theta$  : est l'angle électrique entre l'axe de la phase ( $S_a$ ) statorique et la phase ( $R_a$ ) rotorique.

#### III.3.1 Equations électriques

$$\begin{cases} [v_{abcs}] = [R_s][i_{abcs}] + \frac{d[\varphi_{abcs}]}{dt} & \text{(III. 1)} \\ [v_{abcr}] = [R_r][i_{abcr}] + \frac{d[\varphi_{abcr}]}{dt} & \text{(III. 2)} \end{cases}$$

Avec :

$$[v_{abcs}] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, \quad [v_{abcr}] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}$$

$[v_{abcs}]$  et  $[v_{abcr}]$  : Sont respectivement les vecteurs tensions statoriques et rotoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$[R_s]$  et  $[R_r]$  : sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

$$[i_{abcs}] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad [i_{abcr}] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$[i_{abcs}]$  et  $[i_{abcr}]$  : sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\varphi_{abcs}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_{abcr}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}$$

$[\varphi_{abcs}]$  et  $[\varphi_{abcr}]$  : sont respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

Comme le rotor de la machine est en court-circuit, la relation (III.2) devient :

$$[v_{abcr}] = 0 = [R_r][i_{abcr}] + \frac{d[\varphi_{abcr}]}{dt} \tag{III. 3}$$

### III.3.2 Equations magnétiques

Les flux s'expriment en fonction des courants et des inductances sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [\varphi_{abcs}] = [L_{ss}] \cdot [i_{abcs}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{abcr}] \end{cases} \tag{III. 4}$$

$$\begin{cases} [\varphi_{abcr}] = [L_{rr}] \cdot [i_{abcr}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [i_{abcs}] \end{cases} \tag{III. 5}$$

$[L_{ss}]$  : Matrice de l'inductance propre statorique.

$[L_{rr}]$  : Matrice de l'inductance propre rotorique.

$$\text{Où :} \quad [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$l_s$  : Inductance propre d'une phase de l'enroulement statorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases de l'enroulement statorique.

$l_r$  : Inductance propre d'une phase de l'enroulement rotorique.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases de l'enroulement rotorique.

Si  $\theta$  est l'écart angulaire, considéré dans la direction de rotation, entre les phases du rotor et du stator. En désignant par  $M_{sr}$  la mutuelle inductance entre ces phases et par  $M_{max}$  sa valeur lorsque leurs axes coïncident, on aura la forme matricielle suivante :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{max} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$[M_{sr}]$  et  $[M_{rs}]^t$ : Matrice des mutuelles inductances.

$M_{max}$ : Maximum d'inductance mutuelle entre une phase statorique et rotorique (les axes des deux phases coïncident).

### **III.4 Modèle diphasé équivalent de la machine transformation de Park**

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe.

Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé [14]. Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par :

$$[X_{dq}] = [p(\theta_s)][X_{abcs}]$$

En choisissant un repère (d,q) diphasé, l'axe d peut être repéré (voir figure III.2) par :

$\theta_s$ : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « Sa » du stator ;

$\theta_r$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « Ra » du rotor ;

A chaque instant, ces deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s = -\theta_r \tag{III.6}$$

Les grandeurs (courant, tension et flux) du système diphasé s'expriment en fonction des grandeurs triphasées :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = [p(\theta_s)] \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} [v_{dq_s}] = [p(\theta_s)][v_{abcs}] \\ [v_{dqr}] = [p(\theta_r)][v_{abcr}] \end{cases}, \quad \begin{cases} [i_{dq_s}] = [p(\theta_s)][i_{abcs}] \\ [i_{dqr}] = [p(\theta_r)][i_{abcr}] \end{cases}, \quad \begin{cases} [\varphi_{dq_s}] = [p(\theta_s)][\varphi_{abcs}] \\ [\varphi_{dqr}] = [p(\theta_r)][\varphi_{abcr}] \end{cases}$$

$[p(\theta_s)]$  et  $[p(\theta_s)]^{-1}$  s'expriment par :

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

et

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

Ainsi, en appliquant la transformation de Park à l'équation statorique (III.1), nous obtenons le système d'équation suivant :

$$[p(\theta_s)]^{-1}[v_{dq_s}] = [R_s][i_{dq_s}][p(\theta_s)]^{-1} + \frac{d}{dt}[p(\theta_s)]^{-1}[\varphi_{dq_s}] \quad (III.7)$$

On démontre facilement que :

$$[p(\theta_s)] \frac{d[p(\theta_s)]^{-1}}{d\theta_s} = [p(\theta_r)] \frac{d[p(\theta_r)]^{-1}}{d\theta_r} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

On obtient les expressions suivantes dans le repère (d, q) :

Les équations de Park statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_a \varphi_{qs} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_a \varphi_{ds} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (III.8)$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_a - \omega_m) \varphi_{qr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = 0 \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_a - \omega_m) \varphi_{dr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (III.9)$$

$\omega_a$  vitesse angulaire électrique du repère (d, q) telle que  $\omega_r = \omega_a - \omega_m$

Suite à l’hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s’expriment dans le repère de Park, en fonction des grandeurs, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & L_m \\ L_m & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \tag{III.10}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & L_m \\ L_m & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \tag{III.11}$$

Plusieurs solutions sont possibles pour orienter le repère (d, q) par rapport aux repères triphasés. Si les axes d et q sont solidaires du champ tournant de la machine, lors d’une alimentation sinusoïdale, il est possible d’écrire :

$$\Omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt},$$

$$\omega_s - \omega_r = p\Omega = \omega_m \tag{III.12}$$

$\omega_s$  : Pulsation des grandeurs statoriques.

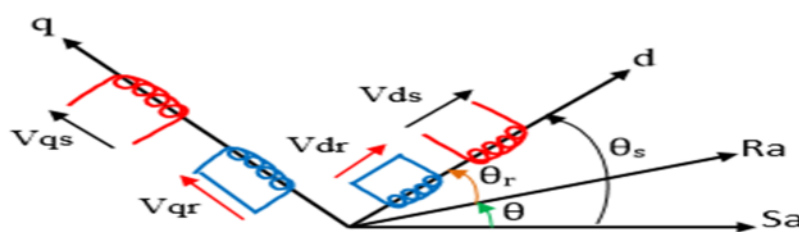
$\omega_r$  : Pulsation des grandeurs rotoriques.

Avec :

$\Omega$  : La vitesse mécanique.

$\omega_m$  : La vitesse électrique du rotor.

La machine est représentée dans le nouveau repère par la figure (III.2) ci-dessous :



**Figure III.2 :** Représentation de la machine asynchrone dans le repère diphasé

### III.5 Choix du référentiel (d, q)

Jusqu’à présent, nous avons exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère (d, q) qui fait un angle électrique  $\theta_s$  avec le stator et qui fait également un angle électrique  $\theta_r$  avec le rotor mais qui n’est pas défini par ailleurs [14]. Il existe différentes possibilités

concernant le choix de l'orientation du repère d'axes (d, q), qui dépendent des objectifs de l'application:

**III.5.1 Référentiel lié au stator**

Ce référentiel est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation. Les conditions sont telles que:

$$\omega_a = 0 \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = -\omega_m$$

**III.5.2 Référentiel lié au rotor**

Ce référentiel est intéressant dans les problèmes des régimes transitoires lorsque la vitesse de rotation est considérée comme constante. Il se traduit par la relation :

$$\omega_a = \omega_m \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = 0$$

**III.5.3 Référentiel lié au champ tournant**

C'est le seul référentiel qui n'introduit pas de simplification dans les équations de la machine, Il est utilisé lorsque la fréquence d'alimentation des moteurs asynchrones doit être constante et à fréquence variable lors des petites perturbations autour d'un régime donné [14].

Ce type de référentiel est caractérisé par les relations :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \omega_a \quad ; \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_m$$

Ainsi, en partant des équations (III.8), (III.9), et en utilisant les relations (III.10) et (III.11) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère (d, q) en utilisant le référentiel lié au rotor :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & l_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & l_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & -l_s\omega_m & 0 & -L_m\omega_m \\ l_s\omega_m & R_s & L_m\omega_m & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

On aura alors :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{dr}}{dt} \\ \frac{di_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{l_s l_r - L_m^2} \begin{bmatrix} l_r & 0 & L_m & 0 \\ 0 & l_r & 0 & L_m \\ L_m & 0 & l_s & 0 \\ 0 & L_m & 0 & l_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_m l_s i_{qs} + \omega_m L_m i_{ds} \\ v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_m l_s i_{ds} - \omega_m L_m i_{dr} \\ -R_r i_{dr} \\ -R_r i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

### III.6 Equation d'auto-amorçage en régime dynamique

Les équations d'auto excitation de la machine asynchrone correspondent en réalité aux équations électriques régissant le fonctionnement des condensateurs :

$[i_c] = \frac{d[Q_c]}{dt}$  : Courant qui traverse les trois condensateurs.

$[Q_c]$  : La charge des trois condensateurs.

Dans le repère de Park :

$$[p(\theta_s)][i_{cp}] = \frac{d[p(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt} \quad (\text{III.15})$$

$$[i_{cp}] = [p(\theta_s)]^{-1} \frac{d[p(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt} = [p(\theta_s)]^{-1} \left( \frac{d[p(\theta_s)]}{dt} \right) [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [Q_{cp}] + \frac{d[Q_{cp}]}{dt}$$

Sachant que :  $[Q_{cp}] = C [v_{cp}]$

$$[i_{cp}] = C \omega_a \begin{bmatrix} 0 \\ -v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix} + C \frac{d[v_{cp}]}{dt} \quad \frac{d[v_{cp}]}{dt} = \frac{[i_{cp}]}{C} - \omega_a \begin{bmatrix} 0 \\ -v_{cq} \\ v_{cd} \end{bmatrix}$$

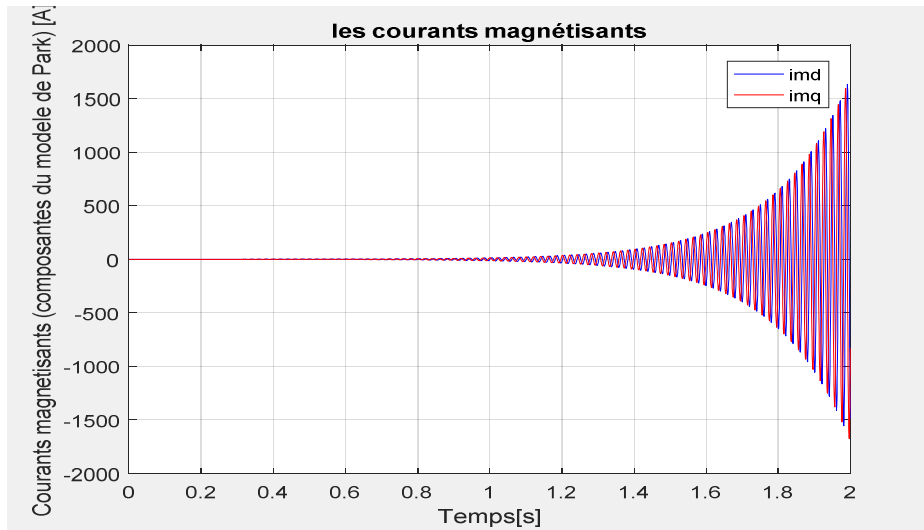
Pour  $\omega_a = \omega_m$  (repère de Park lié au rotor), on peut écrire l'équation sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} + \omega_m v_{cq} \\ \frac{dv_{qc}}{dt} = \frac{i_{qc}}{C} - \omega_m v_{cd} \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

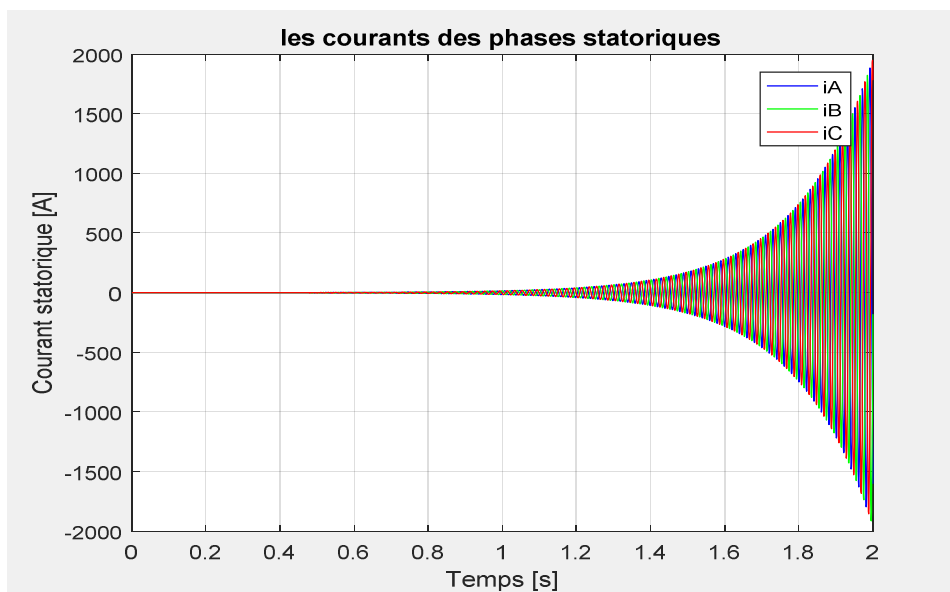


**III.8 Simulation de l’auto-amorçage du générateur asynchrone sous hypothèse de linéarité**

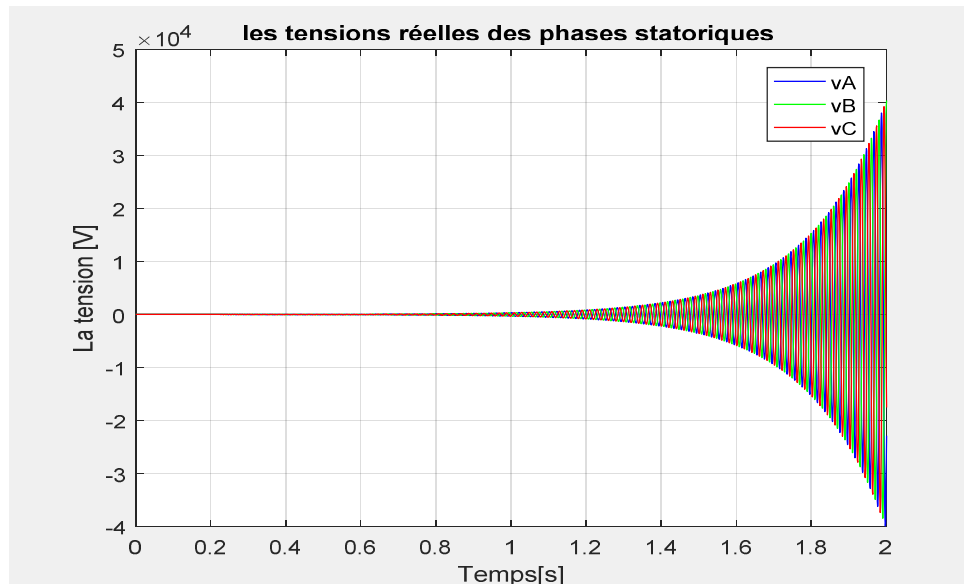
Ces résultats sont obtenus en négligeant le phénomène de saturation du matériau magnétique, les figures (III.5) et (III.6) donnent l’évolution des courants et des tensions statoriques :



**Figure III.4** Evolution des courants magnétisants sous hypothèse de linéarité



**Figure III.5** Evolution des courants statoriques sous l’hypothèse de linéarité



**Figure III.6** Evolution des tensions statoriques sous l'hypothèse de linéarité

La simulation du fonctionnement du générateur asynchrone auto-amorcé à vide sur la base d'un modèle linéaire, donne des valeurs de la tension et du courant statorique, extrêmement élevées. En effet la tension statorique atteint quelques milliers de volts après le début de l'auto-amorçage figure (III.6). Même constat pour le courant, il atteint 2000 A au bout de 2s figure (III.5).

Ces résultats sont dus au fait d'avoir négligé la saturation. En effet, quand la caractéristique de magnétisation est linéaire (ne présente pas de coude de saturation), en régime permanent, le point de fonctionnement ne peut pas être atteint, l'auto amorçage est donc possible mais la tension statorique augmente alors jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie ainsi que le courant atteint rapidement des valeurs inadmissibles. Ces résultats sont purement théoriques, la tension aux bornes de la machine est en réalité limitée par le phénomène de non linéarité du circuit magnétique dont il faudra nécessairement tenir compte dans certains cas de fonctionnement.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi un modèle mathématique de la machine asynchrone en partant des équations des tensions, exprimées dans les axes réels vers un système d'équations différentielles en termes de flux d'axes en quadrature. Pour cela nous avons utilisé la transformation triphasé-biphasé qui permet de rendre constants les coefficients dépendants du temps.

Lors de cette étude, nous avons négligé l'effet de la saturation du circuit magnétique. Le modèle développé sous cette hypothèse donne des résultats fictifs qui ne reflètent aucune réalité physique

pour le fonctionnement en générateur autonome, ceci n'est certes pas le cas de la simulation du fonctionnement en moteur où le développement du modèle des courants donne des résultats appréciables.[13]

Nous allons introduire au prochain chapitre, le phénomène de la saturation du circuit magnétique, dans le modèle établi par la variation de l'inductance magnétisante considérée constante dans le modèle de la machine.

# *Chapitre IV*

---

## *Modélisation du générateur asynchrone en régime Saturé*

**IV.1 Introduction**

L'étude en régime dynamique de la machine asynchrone requiert l'élaboration d'un modèle qui doit être suffisamment précis afin de mieux prédire par simulation, son comportement dans les différents modes de fonctionnements envisagés. La prise en compte de certains phénomènes physiques internes à la machine (la saturation, la variation de la résistance rotorique due à l'élévation de la température et la répartition non sinusoïdale du champ dans l'entrefer...etc.) est parfois indispensable même si leur introduction augmente considérablement la complexité du modèle mathématique.

Différentes méthodes de modélisation peuvent être élaborées de manière à ce qu'elles conviennent mieux à l'étude et à l'analyse des phénomènes avec un meilleur compromis possible précision-temps de calcul.

Dans le cas particulier du fonctionnement de la machine asynchrone en mode générateur autonome, la prise en compte du phénomène de saturation du circuit magnétique n'est pas dans l'optique d'affinement du modèle mais il est nécessaire à sa convergence [12].

Dans ce chapitre nous allons introduire en premier lieu, le modèle mathématique du phénomène de saturation du circuit magnétique dans le modèle linéaire établi au chapitre précédent. Ensuite, nous étudierons le comportement dynamique de la génératrice asynchrone avec un mode de fonctionnement autonome à vide, en charge et lors de la connexion au réseau.

**IV.2 Prise en compte de l'effet de saturation**

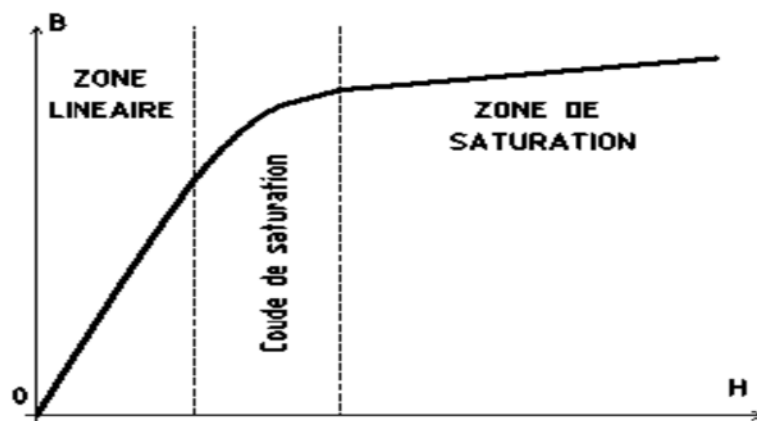
Dans le modèle linéaire l'inductance magnétisation est considérée comme constante, ce qui n'est pas le cas dans la réalité, car le matériau magnétique utilisé dans la génératrice pour la construction n'est pas parfaitement linéaire. Cependant dans certaines utilisations de la machine asynchrone (alimentation avec onduleur, génératrice auto-excitée, éoliennes), il est indispensable de tenir compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique et donc de la variation de l'inductance magnétisante [1].

En réalité, les inductances peuvent varier largement selon l'état du flux dans les différentes parties internes de la génératrice. Ainsi, il est plus indiqué qu'elle soit reconsidérée différemment par un système d'équation différentielle avec des paramètres non linéaire caractérisant les modes saturées. En outre, il faudrait alors trouver un modèle qui permet de décrire la variation de ces inductances en fonction du courant [16]. Afin de tenir compte de la saturation du circuit

magnétique de la machine, il est nécessaire de modéliser la courbe de magnétisation. Plusieurs fonctions sont utilisées ; mais il n'existe aucune fonction qui couvre tous les points de la courbe, pour cela la modélisation reste approximative avec un minimum d'erreur, dans ce chapitre nous avons utilisé celle du modèle de Park, qui nous a permis d'avoir le résultat final des équations [14].

La machine, dans sa partie intégrante est composée d'un empilage de tôles ferromagnétique. Exposées à un champ magnétique ; ces tôles s'aimantent naturellement, en outre, cette aimantation est limitée [9].

On dit que le matériau se sature lorsque sa perméabilité diminue avec le degré d'induction magnétique figure (IV.1).



**Figure IV.1 :** Courbe de la première aimantation d'un matériau ferromagnétique.

### IV.3 Le phénomène de saturation croisée

L'effet de la saturation entraîne également un autre phénomène secondaire dit « l'effet croisé », qui peut être considéré comme un couplage magnétique entre les enroulements d'axe d et q de la machine biphasée, ces deux bobinages sont spécialement en quadrature, ce qui veut dire qu'elles ne devraient avoir aucune interaction mutuelle en régime non saturé [16]. L'effet croisé de la saturation est un phénomène analogue à celui de la réaction d'induit de la machine à courant continu ainsi que la machine synchrone à pôle saillants [13] [17].

### IV.4 Mise en œuvre du modèle saturé dans le référentiel de Park

Réécrivons le système d'équations en tensions :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_a \varphi_{ds} \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (IV.2)$$

Les flux suivant chaque axe dans le stator et le rotor est la somme d'un flux mutuel et d'un flux de fuites.

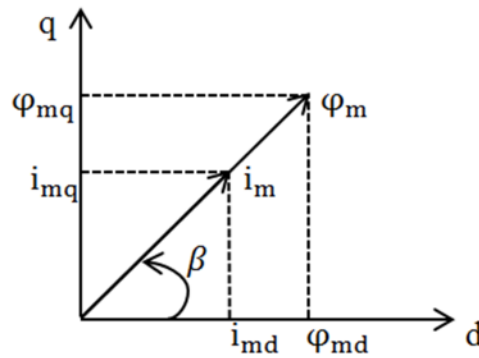
$$\begin{cases} \varphi_{ds} = l_{\sigma s} i_{ds} + \varphi_{md} \\ \varphi_{qs} = l_{\sigma s} i_{qs} + \varphi_{mq} \end{cases} \quad (IV.3)$$

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = l_{\sigma r} i_{dr} + \varphi_{md} \\ \varphi_{qr} = l_{\sigma r} i_{qr} + \varphi_{mq} \end{cases} \quad (IV.4)$$

$l_{\sigma s}, l_{\sigma r}$ : Inductances de fuites statorique et rotorique.

$\varphi_{md}, \varphi_{mq}$ : respectivement le vecteur de flux magnétisant suivant les axes d et q.

Les composantes d'axes d et q des vecteurs spatiaux flux et courant magnétisants sont représentées sur la figure (IV.2).



**Figure IV.2** Représentation des vecteurs flux et courants magnétisants

Les composantes d'axes d et q du flux et du courant magnétisants :

$$\begin{cases} \varphi_{md} = L_m i_{md} \\ \varphi_{mq} = L_m i_{mq} \end{cases}, \quad \begin{cases} i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \quad (IV.5)$$

$L_m$  : Inductance magnétisante statique.

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_{\sigma s} i_{sd} + L_m i_{md} \\ \varphi_{qs} = L_{\sigma s} i_{sq} + L_m i_{mq} \end{cases} \quad (IV.6)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_{\sigma r} i_{rd} + L_m i_{md} \\ \varphi_{rq} = L_{\sigma r} i_{rq} + L_m i_{mq} \end{cases} \quad (IV.7)$$

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = -L_{\sigma r} i_{sd} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{md} \\ \varphi_{rq} = -L_{\sigma r} i_{sq} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{mq} \end{cases} \quad (IV.8)$$

On considèrera le courant magnétisant circulant dans la branche magnétisante du modèle de la machine comme suit :

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2}$$

Les équations des tensions du modèle de Park (équations IV.1 et IV.2) de la machine font apparaître les dérivées des flux par rapport au temps, en les substituant par leurs expressions (équations IV.6 et IV.8) nous aurons :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (L_{\sigma s} i_{sd} + L_m i_{md}) - \omega_a \varphi_{sq} \quad (IV.9)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (L_{\sigma s} i_{sq} + L_m i_{mq}) + \omega_a \varphi_{sd} \quad (IV.10)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} (-L_{\sigma r} i_{sd} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{md}) - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rq} \quad (IV.11)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} [-L_{\sigma r} i_{sq} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{mq}] + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rd} \quad (IV.12)$$

Développons les termes en dérivées dans les équations (IV.9) et (IV.10).

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dL_m}{dt} \quad (IV.13)$$

$$\frac{d\varphi_{sq}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sq}}{dt} + L_m \frac{di_{mq}}{dt} + i_{mq} \frac{dL_m}{dt} \quad (IV.14)$$

Les inductances de fuites sont considérées constantes et l'inductance  $L_m$  est fonction de  $|i_m|$  nous pouvons écrire donc:

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt} \quad (IV.15)$$

$$\frac{d\varphi_{sq}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sq}}{dt} + L_m \frac{di_{mq}}{dt} + i_{mq} \frac{dL_m}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt} \quad (IV.16)$$

Soit :

$$L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|}$$

La dérivée du courant magnétisant est :

$$\frac{d|i_m|}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} = \frac{i_{md}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (IV.17)$$

En remplaçant la dérivée du courant magnétisant par son expression dans (IV.15) et (IV.16), on obtient :

$$\frac{d\phi_{sd}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sd}}{dt} + \left[ L_m + L_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt} + L_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (IV.18)$$

$$\frac{d\phi_{sq}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sq}}{dt} + \left[ L_m + L_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{mq}}{dt} + L_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} \quad (IV.19)$$

Les termes  $\left[ L_m + L_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt}$  et  $\left[ L_m + L_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{mq}}{dt}$  : expriment respectivement l'effet dû à la saturation suivant l'axe direct et en quadrature.

Le terme  $L_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt}$  : exprime l'effet du courant de l'axe q sur le flux de l'axe d (on l'appelle effet de saturation croisée).

Les dérivées des flux rotoriques s'obtiennent en suivant la même démarche :

$$\frac{d\phi_{rd}}{dt} = -L_{\sigma r} \frac{di_{sd}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_m + L_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|}) \frac{di_{md}}{dt} + L_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (IV.20)$$

$$\frac{d\phi_{rq}}{dt} = -L_{\sigma r} \frac{di_{sq}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_m + L_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|}) \frac{di_{mq}}{dt} + L_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} \quad (IV.21)$$

Pour alléger le modèle, on pose :

$L_d = L_m + L_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|}$  : Inductance magnétisante statique suivant l'axe d.

$L_q = L_m + L_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|}$  : Inductance magnétisante dynamique suivant l'axe q.

$L_{dq} = L_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|}$  : Représente Inductance magnétisante d'effet croisé.

On exprime aussi ces inductances en fonction des inductances magnétisantes statique et dynamique.

$$\begin{cases} M_{st} = \frac{\phi_m}{i_m} \\ M_{dy} = \frac{d\phi_m}{dt} \end{cases}$$

$M_{st}$ : Représente la mutuelle inductance statique

$M_{dy}$ : Représente la mutuelle inductance dynamique

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sd}}{dt} + L_d \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (IV.22)$$

$$\frac{d\varphi_{sq}}{dt} = L_{\sigma s} \frac{di_{sq}}{dt} + L_q \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \quad (IV.23)$$

$$\frac{d\varphi_{rd}}{dt} = -L_{\sigma r} \frac{di_{sd}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_d) \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (IV.24)$$

$$\frac{d\varphi_{rq}}{dt} = -L_{\sigma r} \frac{di_{sq}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_q) \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \quad (IV.25)$$

Le modèle saturé de la machine asynchrone est finalement obtenu en introduisant les équations (IV.22) à (IV.25) et les équations (IV.6) et (IV.8) dans le modèle de Park établi précédemment.

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + L_{\sigma s} \frac{di_{sd}}{dt} + L_d \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} - \omega_a (L_{\sigma s} i_{qs} + L_m i_{mq}) \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + L_{\sigma s} \frac{di_{sq}}{dt} + L_q \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} + \omega_a (L_{\sigma s} i_{ds} + L_m i_{md}) \end{cases} \quad (IV.26)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} - L_{\sigma r} \frac{di_{sd}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_d) \frac{di_{md}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) (-L_{\sigma r} i_{sq} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{mq}) \\ 0 = R_r i_{rq} - L_{\sigma r} \frac{di_{sq}}{dt} + (L_{\sigma r} + L_q) \frac{di_{mq}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{md}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) (-L_{\sigma r} i_{sd} + (L_{\sigma r} + L_m) i_{md}) \end{cases} \quad (IV.27)$$

Le couple électromagnétique développé par le champ tournant s'écrit :

$$C_{em} = p(\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (IV.28)$$

$$C_{em} = p((L_{\sigma s} i_{sd} + L_m i_{md}) i_{sq} - (L_{\sigma s} i_{sq} + L_m i_{mq}) i_{sd})$$

Le couple électromagnétique s'exprime donc par :

$$C_{em} = p L_m (i_{md} i_{sq} - i_{mq} i_{sd}) \quad (IV.29)$$

$p$ : Nombre de paire de pôle.

En choisissant un référentiel lié au stator ( $\omega_a=0$ ) et en ajoutant les équations des condensateurs établies avec le modèle linéaire, nous simulons l'auto-amorçage à vide de la génératrice asynchrone. La valeur de la capacité utilisée est de 155 $\mu$ F [14].

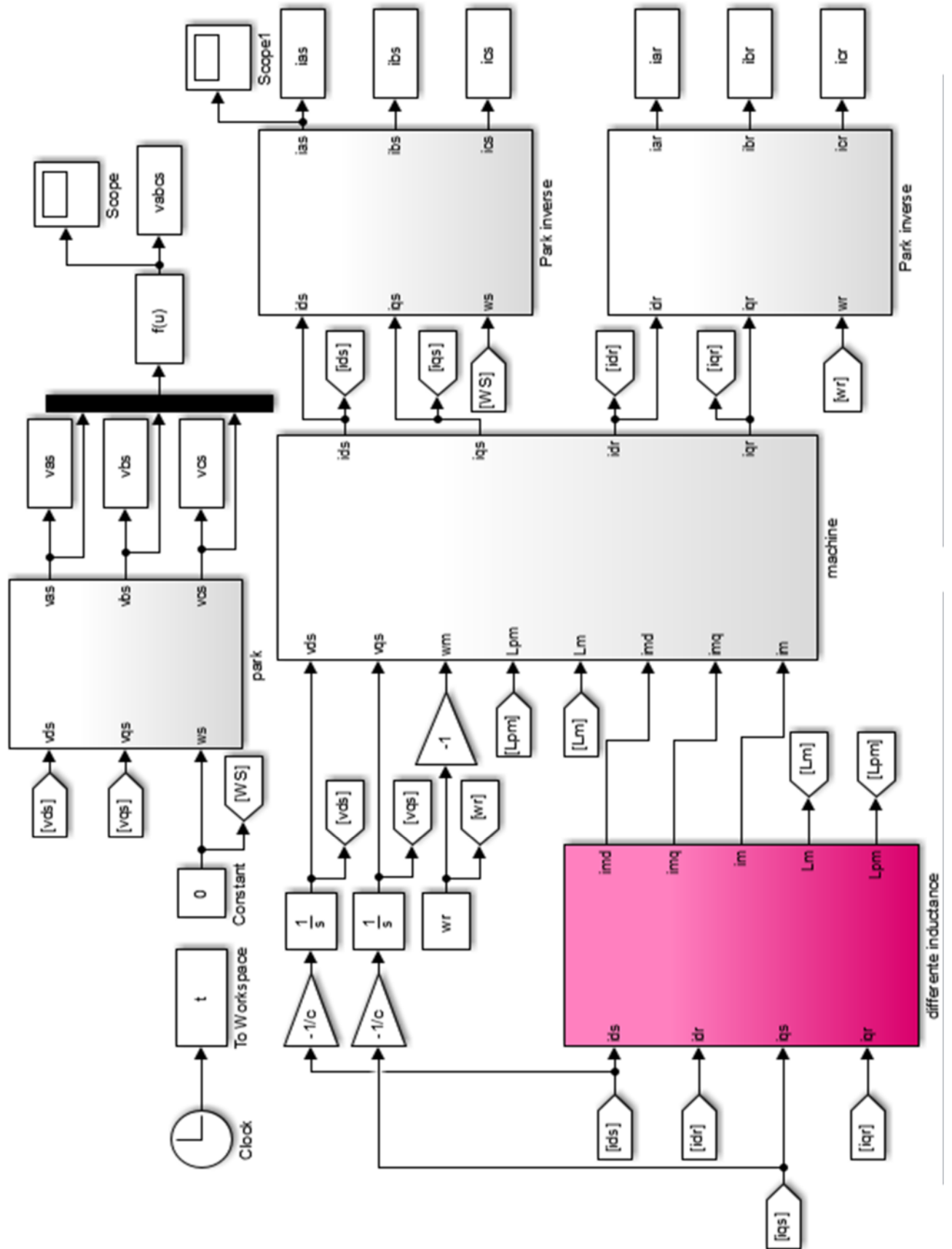
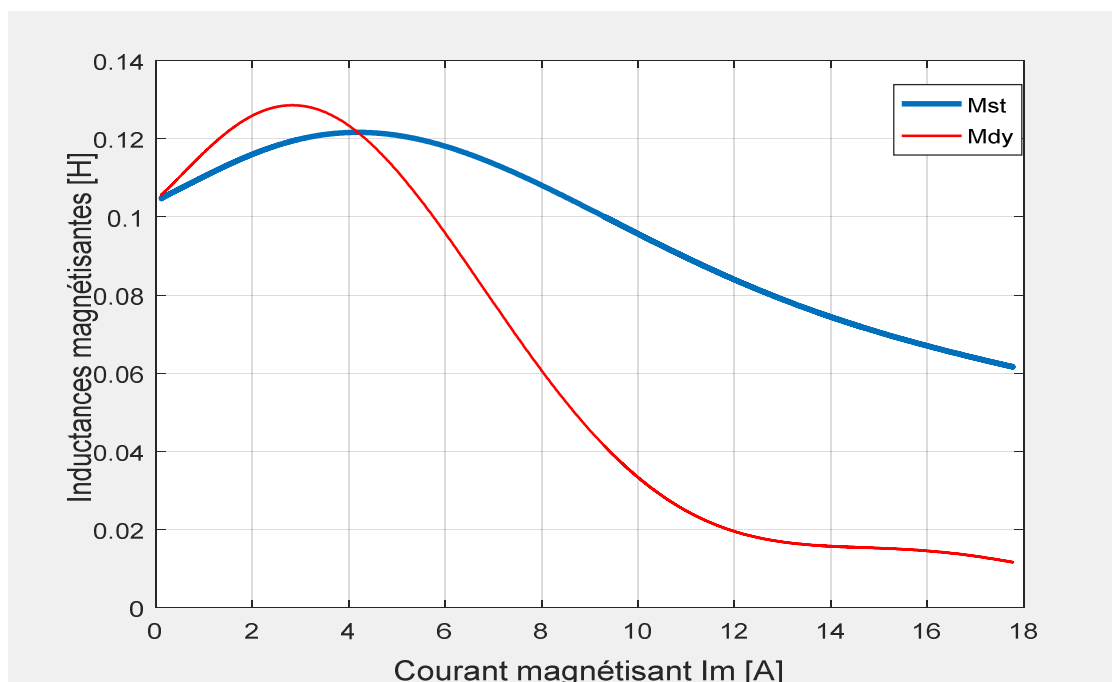


Figure IV.3 Schéma bloc de simulation de la génératrice asynchrone en régime saturé.

### IV.5 Résultats de simulation en régime saturé

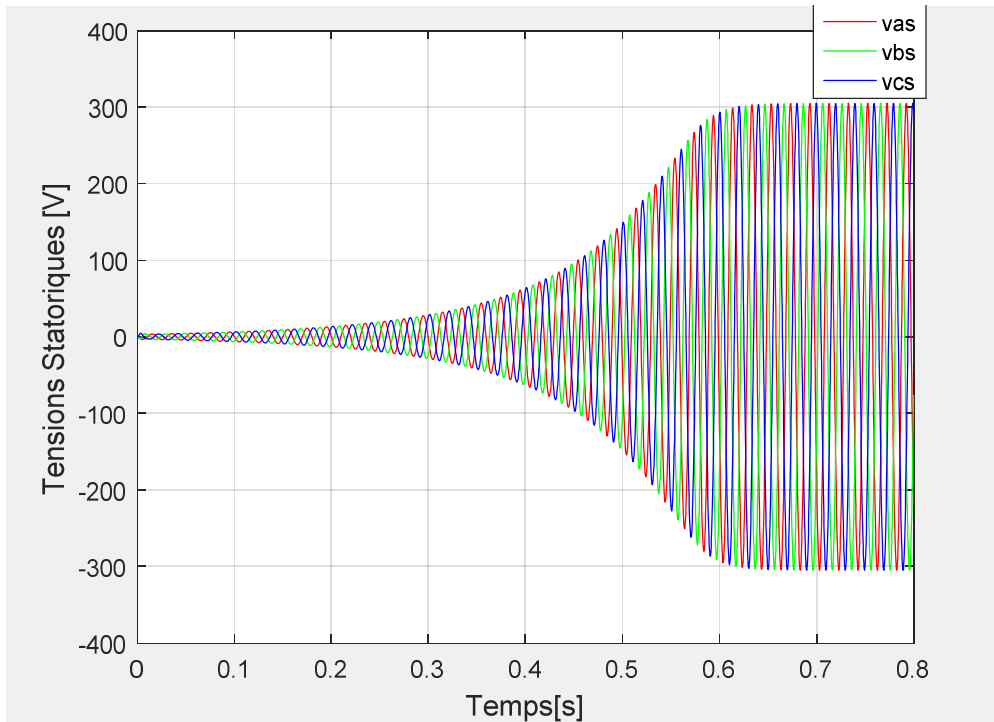
Nous avons effectué la simulation de l'auto-amorçage de la génératrice à l'aide du logiciel Matlab-Simulink, sachant que dans ce modèle nous n'avons pas pris en considération certains phénomènes perturbateurs (frottements, effet de la température... etc.), qui peuvent bien intervenir. Nous prenons en compte l'effet de la saturation qui nous permet de limiter les valeurs de la tension et du courant, car 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 jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie [18].

#### Les inductances magnétisantes statique et dynamique

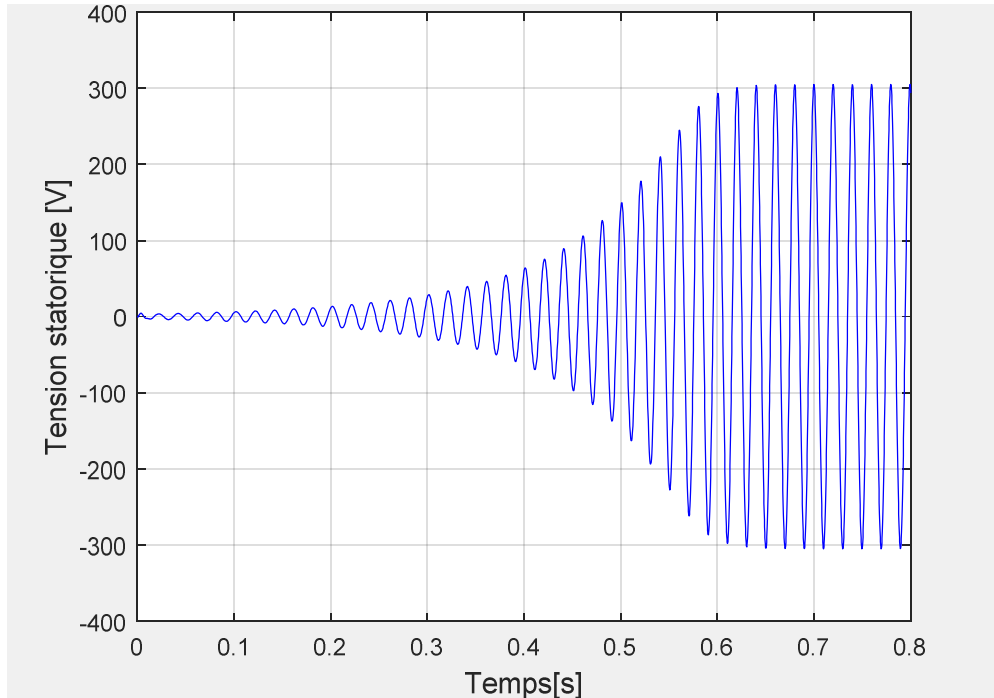


**Figure IV.4** Variation des inductances statique et dynamique en fonction du courant magnétisant en régime saturé

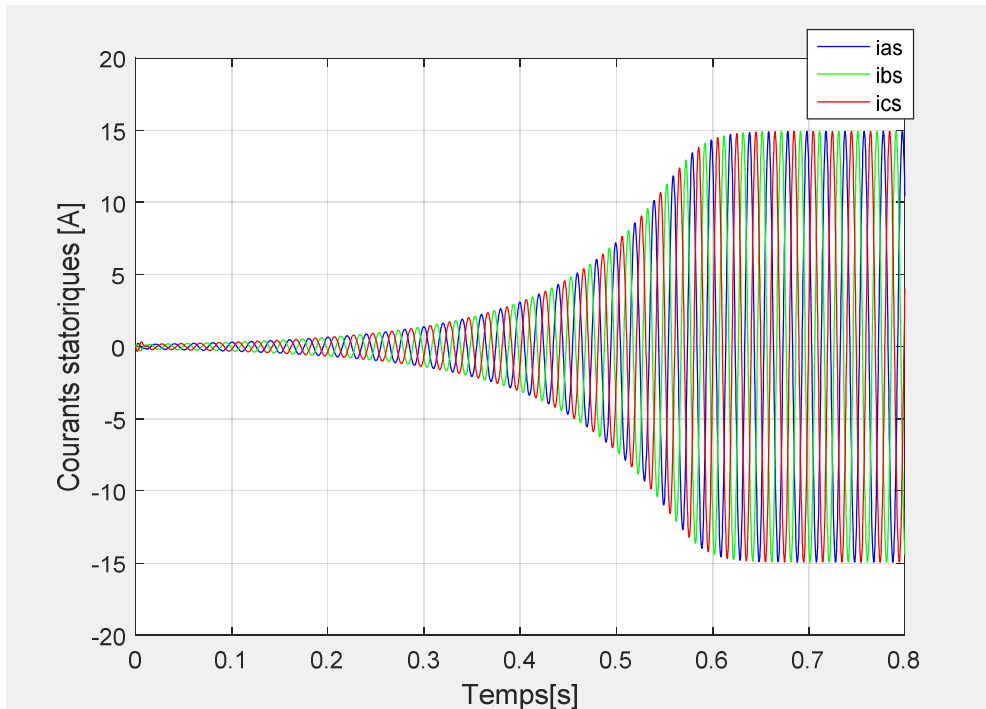
On voit sur la figure (IV.4) que les inductances statique (caractérise le régime permanent) et dynamique qui caractérise le régime transitoire varient lorsque le courant magnétisant augmente.



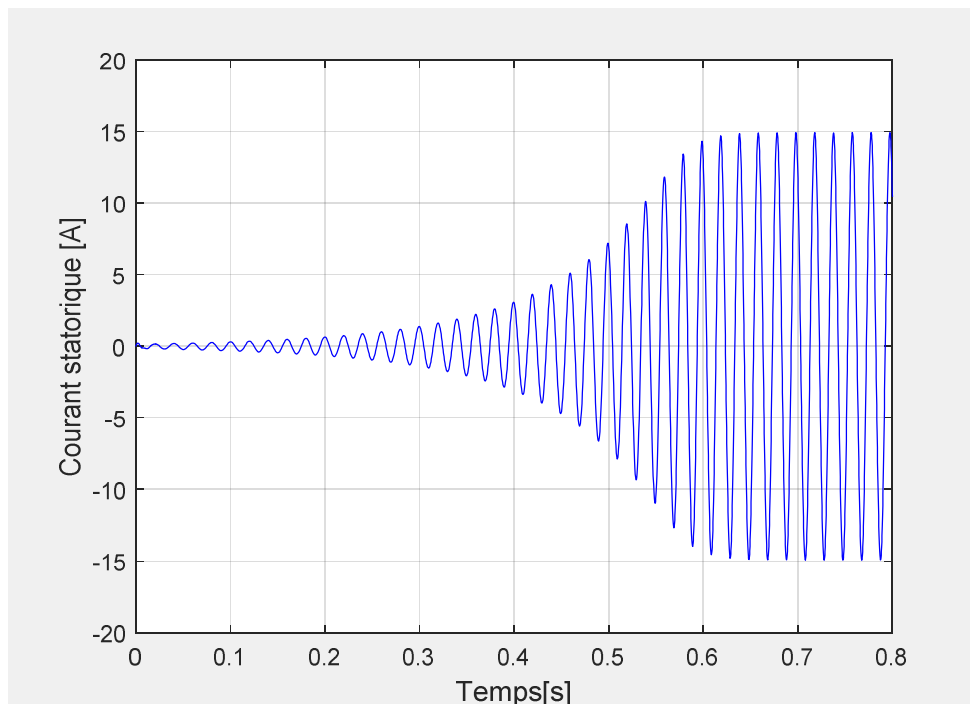
**Figure IV.5.a** Evolution des tensions statoriques en fonction du temps en régime saturée avec  $N=1500\text{tr/min}$  et  $C=155\mu\text{F}$ .



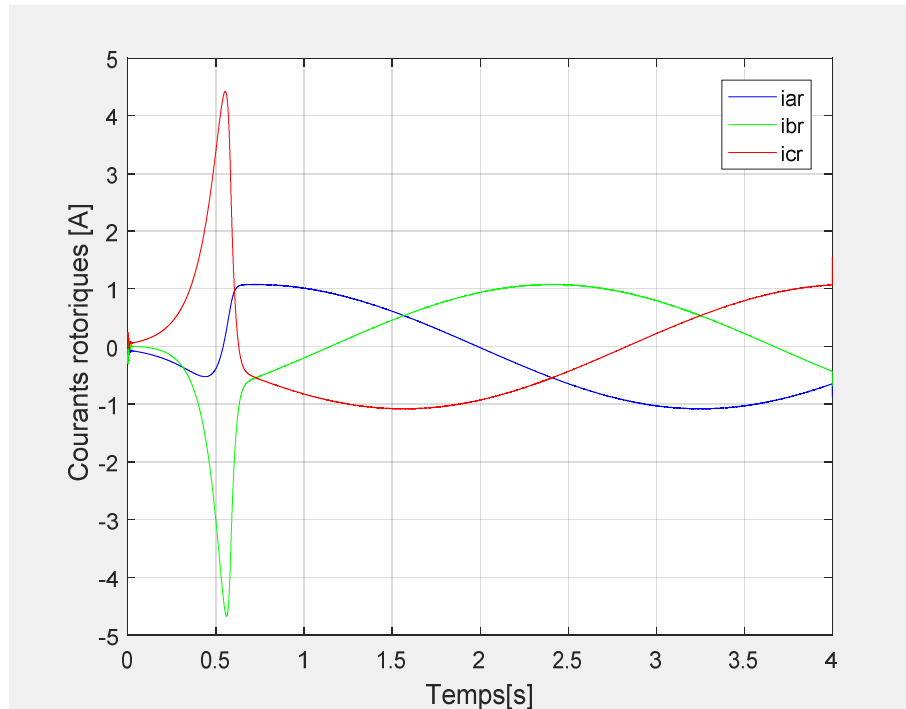
**Figure IV.5.b** Tension d'une phase statorique en fonction du temps en régime saturée avec  $N=1500\text{tr/min}$  et  $C=155\mu\text{F}$



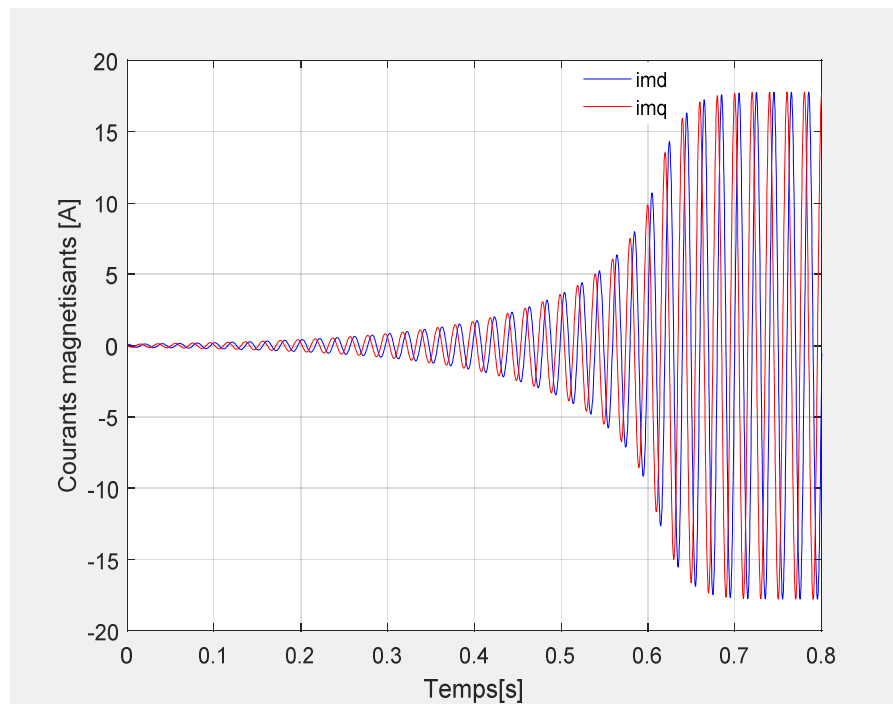
**Figure IV.6.a** Evolution des courants statoriques en fonction du temps en régime saturée avec  $N=1500$  tr/min et  $C=155\mu F$ .



**Figure IV.6.b** Courant statorique en fonction du temps en régime saturée avec  $N=1500$ tr/min et  $C=155\mu F$



**Figure IV.7** Evolution des courants rotoriques en fonction du temps en régime saturée avec  $N=1500\text{tr/min}$  et  $C=155\mu\text{F}$



**Figure IV.8** Evolution des courants magnétisants (composantes du modèle de Park) en fonction du temps en régime saturée avec  $N=1500\text{tr/min}$  et  $C=155\mu\text{F}$

Les figures (IV.5) et les figures (IV.6) montrent l'évolution de tension d'auto-amorçage à vide de la génératrice asynchrone et le courant statorique. D'après les résultats obtenus on peut constater qu'au début de l'amorçage ces grandeurs croient indéfiniment dans la zone non saturée puis convergent (à cause de la saturation du circuit magnétique) vers une valeur fixe dans la zone saturée, qui dépend de la vitesse de rotation du rotor, des paramètres de la machine et de la capacité des condensateurs utilisés. On remarque que les courbes montrent aisément la caractéristique interne ainsi qu'externe du condensateur, peuvent modifier l'emplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique de magnétisation.

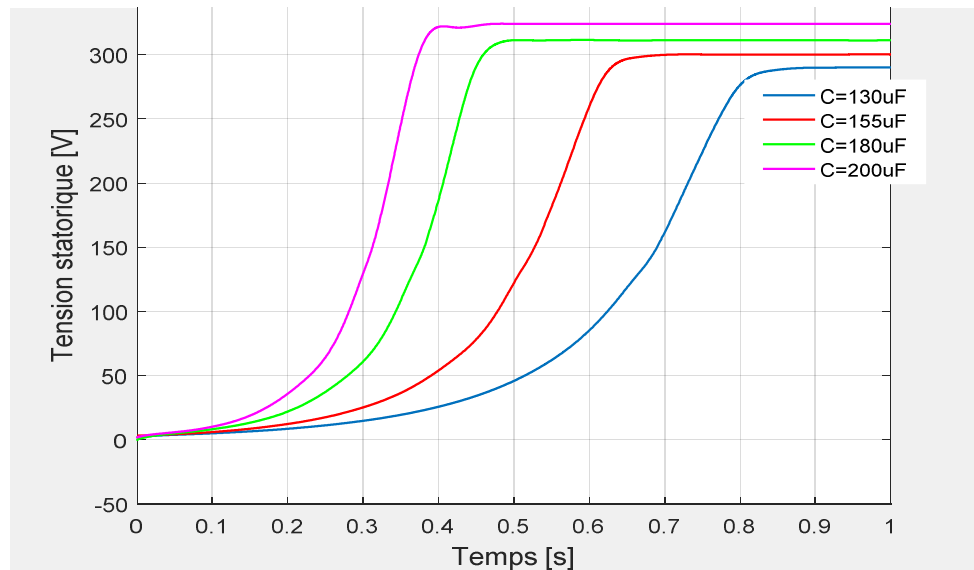
On remarque aussi que l'évolution des grandeurs courant et tension statoriques suivent la forme de l'évolution de courant magnétisation figure (IV.8), et le courant rotorique donnée dans la figure (IV.7) est négligeable à vide.

#### **IV.6 Influence de la capacité sur la tension d'auto-amorçage**

##### Simulation de l'auto-amorçage en variant la capacité pour une vitesse d'entraînement fixe

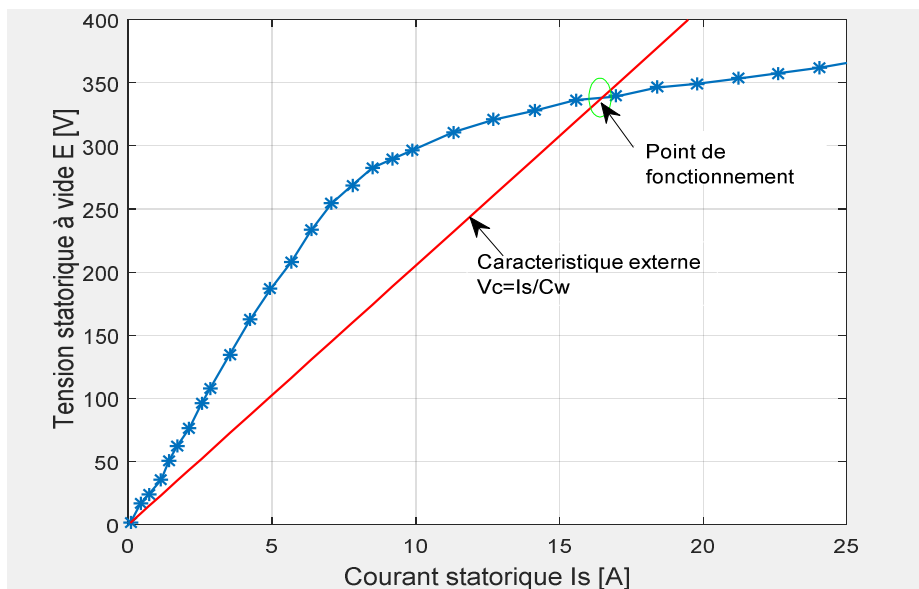
Pour mieux voir l'influence de la capacité sur la tension efficace pour une vitesse donnée (1500 tr/mn), nous présentons les enveloppes des tensions d'auto-amorçage figure (IV.9).

Les résultats de simulation illustrés ci-dessous représentent l'évolution de la tension statorique lorsque la capacité des condensateurs varie. On constate que l'augmentation de la valeur de la capacité influe sur l'amplitude et le régime transitoire (délai d'amorçage) de la tension statorique. Donc, il existe une valeur minimale  $C_{min}$  de la capacité, au-dessous de laquelle l'amorçage ne peut pas avoir lieu, et une valeur maximale  $C_{max}$  au-delà de laquelle la tension statorique n'augmente plus à cause de la saturation.



**Figure IV.9** Enveloppes supérieures des tensions d’auto-amorçage pour différentes valeurs de  $c$  à une vitesse  $N=1500\text{tr/min}$

Ces résultats nous montrent aussi que la valeur de la capacité d’auto-amorçage joue un rôle sur la valeur de la tension et le régime transitoire (temps d’amorçage). Il y a une valeur minimale de la capacité sous laquelle l’amorçage n’existe pas, et une valeur maximale après laquelle la tension n’augmente plus et ça est dû à la saturation [19].



**Figure IV.10** Phénomène d’auto-amorçage

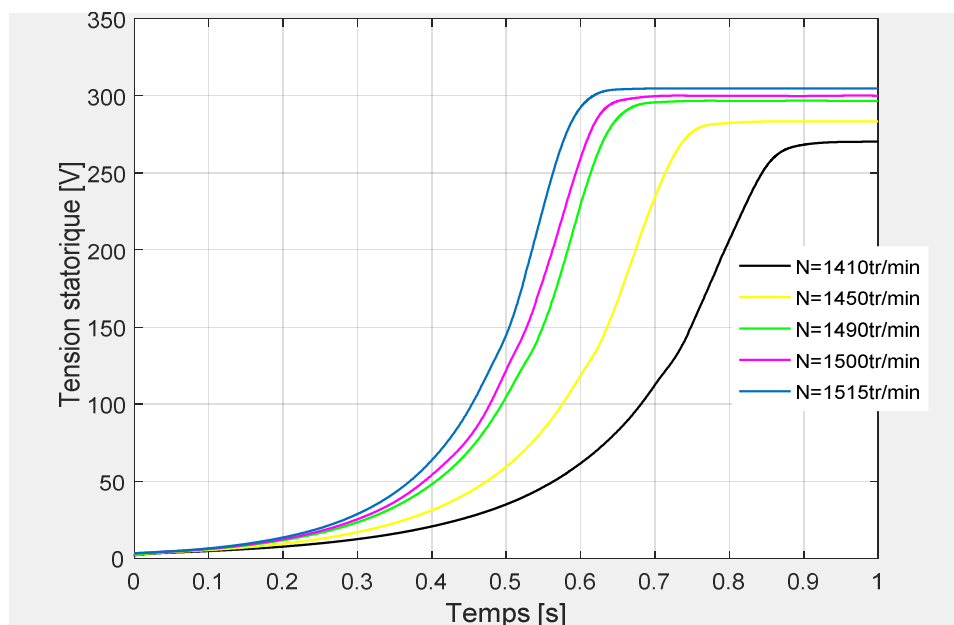
La figure (IV.10) représente l'évolution de la f.e.m de la machine et de la caractéristique externe (droite d'excitation  $C=155\mu\text{F}$ ). Le champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée une f.e.m rémanente aux bornes du stator. Lorsque le rotor est entraîné et les capacités branchées aux bornes de stator, elles créent alors un courant réactif qui tend à augmenter le champ magnétique ce qui induit une f.e.m supérieure et puis un courant plus élevé ; le phénomène se poursuit jusqu'à atteindre le point de fonctionnement qu'on appelle (état d'équilibre stable).

Le point de fonctionnement est ainsi déterminé par l'intersection de la droite d'excitation et la caractéristique interne de la machine ( $E=f(I_s)$ ). Lorsque  $C$  diminue la pente de la droite augmente jusqu'à la zone linéaire, dans ce cas il n'y aura pas d'amorçage.

#### IV.7 Influence de la vitesse sur la tension d'auto-amorçage

##### Simulation de l'auto-amorçage en variant la vitesse d'entraînement pour $C$ fixe

La figure (IV-11) illustre l'influence de la vitesse sur la tension d'auto-amorçage pour une même valeur de la capacité. On constate qu'en faisant augmenter la vitesse de rotation la tension aussi augmente pour se stabiliser à différentes valeurs finales.



**Figure IV.11** Enveloppes supérieures des tensions d'auto-amorçage pour différentes valeurs de  $N$  à  $C=155\mu\text{F}$

#### IV.8. Comportement de la génératrice lors de la connexion au réseau

Lors de la connexion de la machine asynchrone au réseau, elle doit tourner à une vitesse constante. Pour une mise en service de la génératrice, elle est préalablement auto excitée lorsqu'on la fait basculer sur le réseau. Ce dernier possède aussi des moyens de réenclenchement automatique ou de commutation sur les jeux barres en cas de déclenchement de la machine au moment de la connexion, des phénomènes transitoires importants prennent naissance dans le générateur. Suivant le déphasage entre la tension à ces bornes et celle du réseau et l'instant d'accrochage, les courants et les couples électromagnétique transitoire ont des valeurs proches de celle de démarrage directe dans les situations favorables et des valeurs beaucoup plus grandes dans des situations défavorables. La machine subit alors des chocs et devra donc être dimensionnée en conséquence [20] [9].

On aperçoit que lors de la connexion au réseau, l'amplitude du pic du courant  $i(t)$  est maximale lorsque la tension du réseau et celle de la machine sont en opposition de phase, en d'autres termes, lorsque le déphasage entre la tension statorique de la machine et celle de réseau  $\varphi = 180^\circ$  pour une vitesse de rotation valant celle de réseau [9].

Un générateur asynchrone à cage est soumis à des perturbations liées aux défauts qui surviennent pendant l'exploitation du réseau. Ces défauts peuvent être des coupures brèves ou alors de longue durée ce qui sous-entend une coupure du réseau. Dans ce qui suit on se met dans le contexte d'une reconnexion du réseau suite à une coupure et pendant ce temps, le générateur fonctionne en autonome avec une batterie de condensateurs à ces bornes.

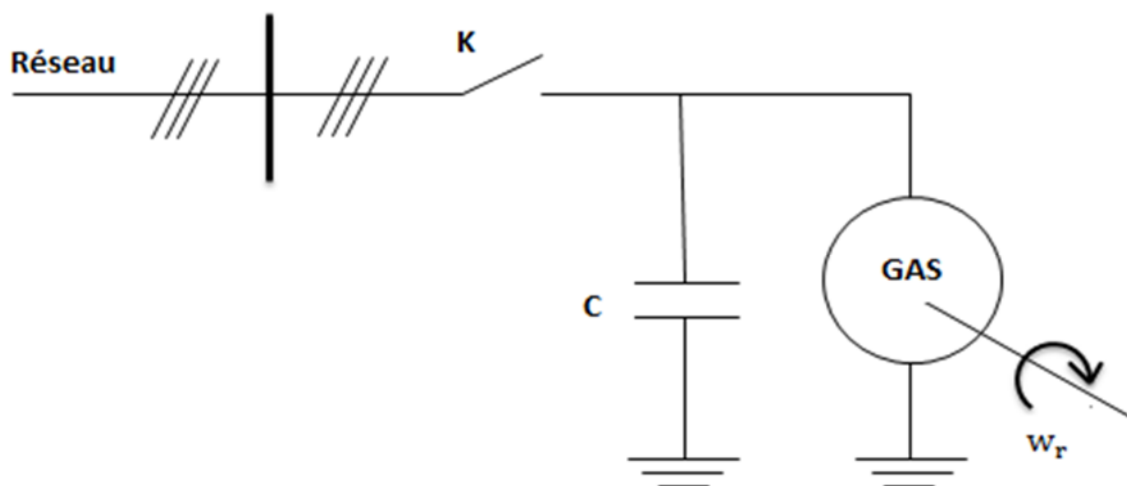


Figure .IV.12 : Schéma synoptique de la connexion de la machine à cage au réseau [21]

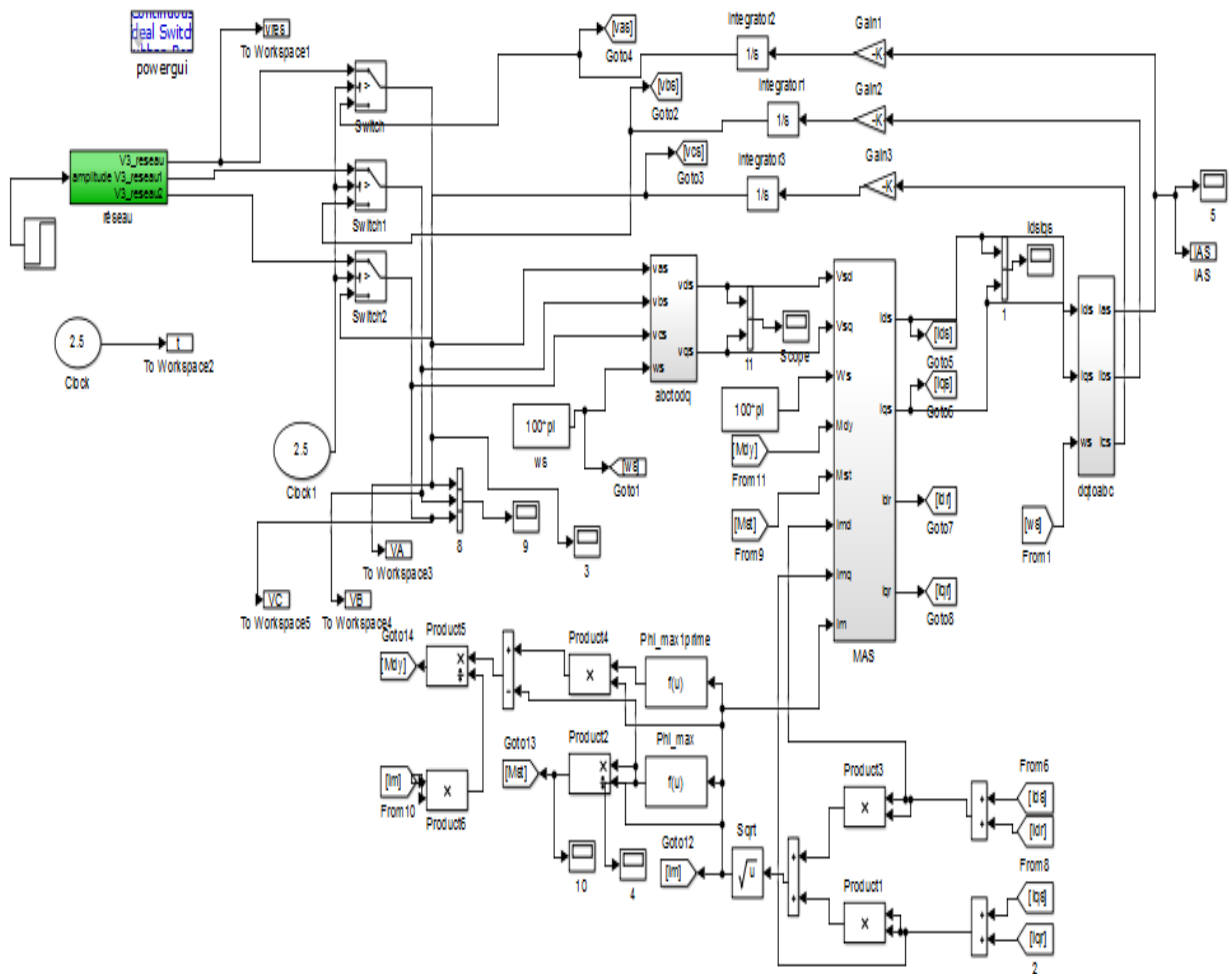


Figure IV.13 : Schéma de simulation de la connexion de la génératrice au réseau

Pour assurer l'auto amorçage, le générateur asynchrone est entraîné par un moteur à courant continu à la vitesse du synchronisme. Les condensateurs sont connectés au stator du générateur par l'intermédiaire d'un interrupteur. Une fois le régime permanent est atteint, on relie le générateur au réseau à l'aide d'un interrupteur K figure (IV.12), et à l'aide d'un oscilloscope, on peut enregistrer les formes des signaux obtenus. On a fait plusieurs opérations d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur K, et chaque fois on enregistre la forme des courants.

Les figures ci-dessous donnent les transitoires des courants statoriques suite à la connexion du générateur au réseau.

Avant la connexion, l'interrupteur K est ouvert. Le fonctionnement d'une façon autonome de la machine constitue un système équilibré, où les enroulements sont parcourus par les courants et les tensions suivants :

$$\begin{cases} i_{as} = I_a \sqrt{2} \cos(\omega t + \alpha) \\ i_{bs} = I_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{cs} = I_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

et :

$$\begin{cases} v_{a1} = V_{a1} \sqrt{2} \cos(\omega t) \\ v_{b1} = V_{a1} \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{c1} = V_{a1} \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

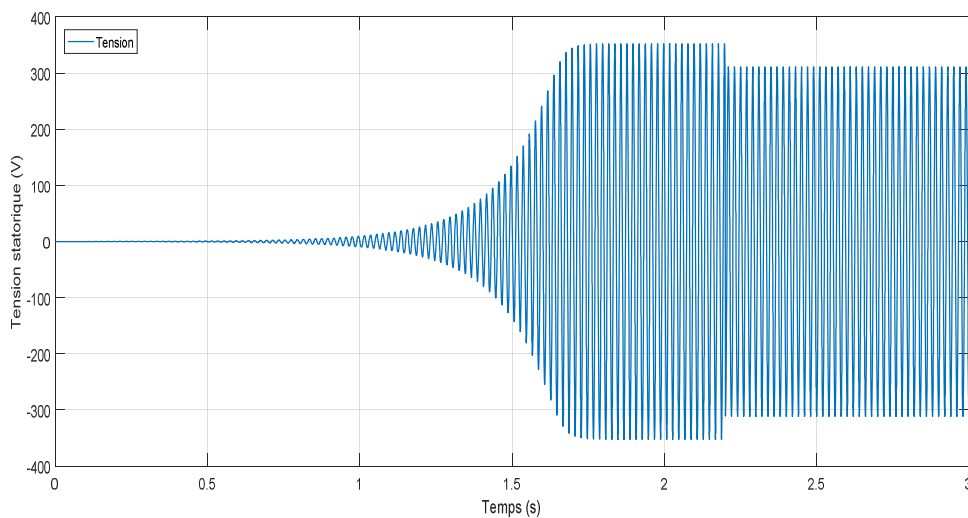
$i_{as}, v_a, \alpha$  : Représentent respectivement la valeur efficace de la tension, le courant, et le déphasage entre le courant et la tension de la machine.

$$\begin{cases} v_{as} = V_a \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi) \\ v_{bs} = V_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cs} = V_a \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

$v_{as}$  : La valeur efficace de la tension du réseau.

$\varphi$ : Le déphasage entre tension de réseau est celle de la machine.

**IV.9 Résultats de simulation**



**Figure IV.14** : Tension de la machine lors de la connexion au réseau.

IV.9.a L'influence des déphasages sur les pics de courant

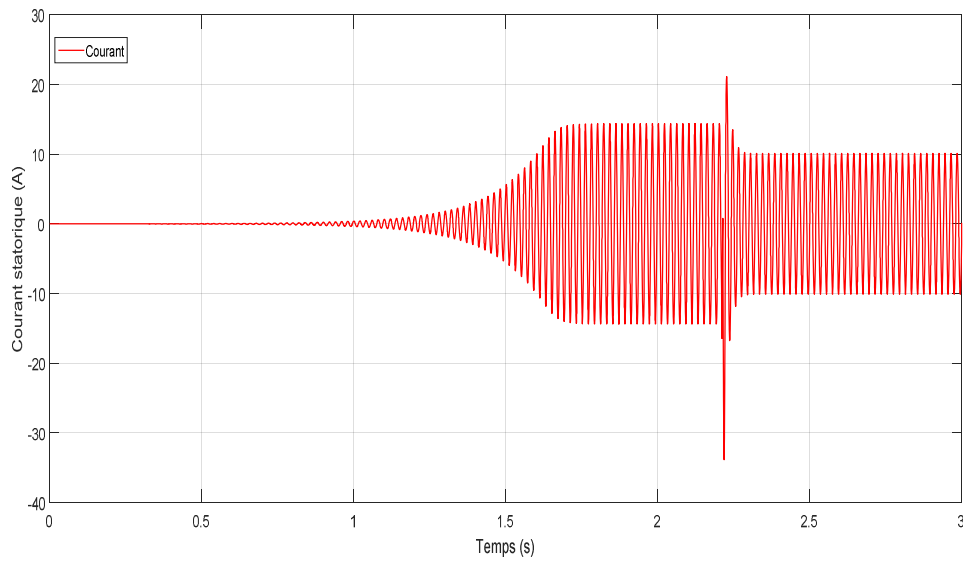


Figure .IV.15.a: Courant statorique avec un faible pic négatif suite à une reconnexion de la tension du générateur ( $\varphi=0^\circ$ )

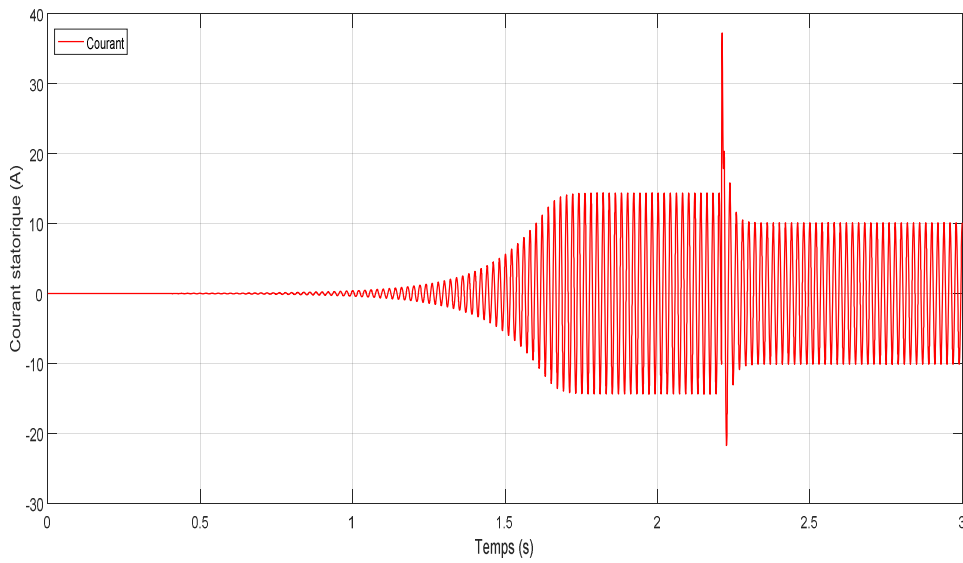
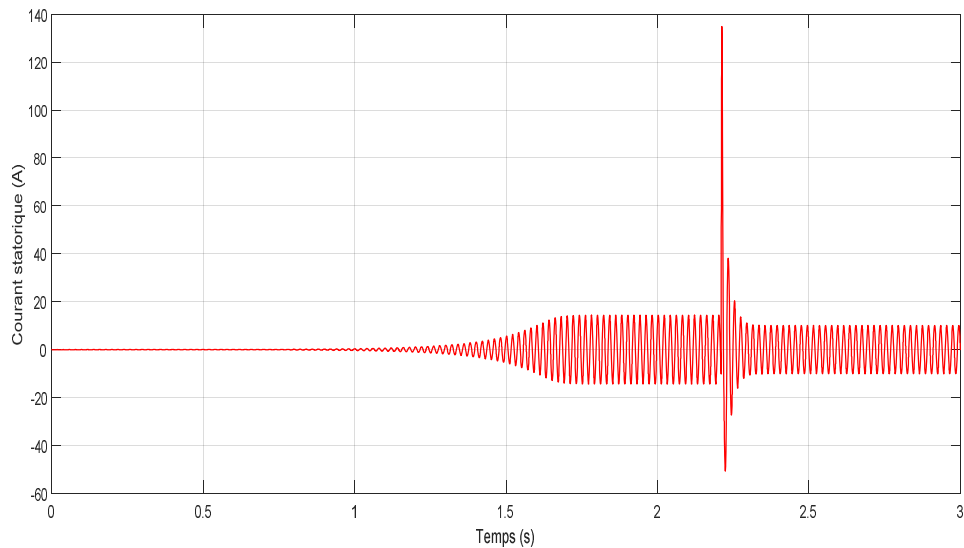


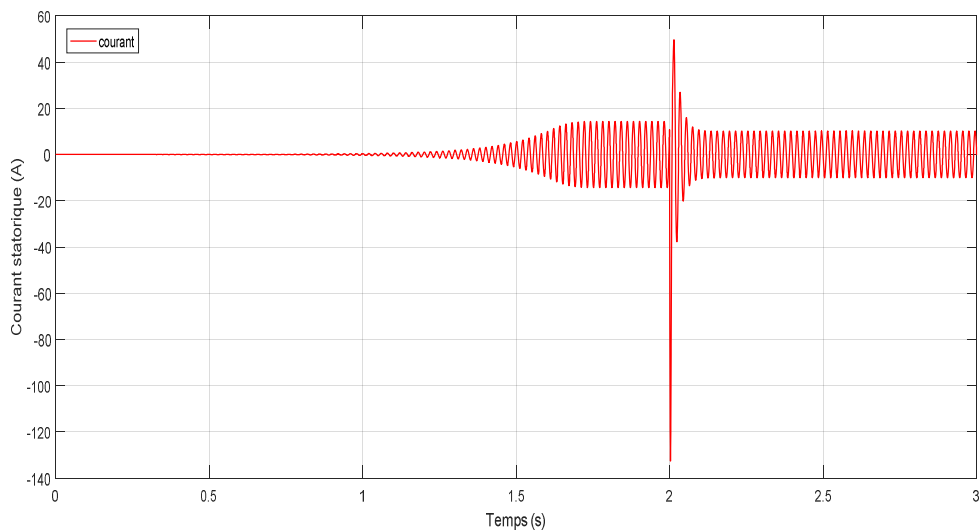
Figure .IV.15.b : Courant statorique avec un pic positif suite à une reconnexion de la tension du générateur ( $\varphi=90^\circ$ )



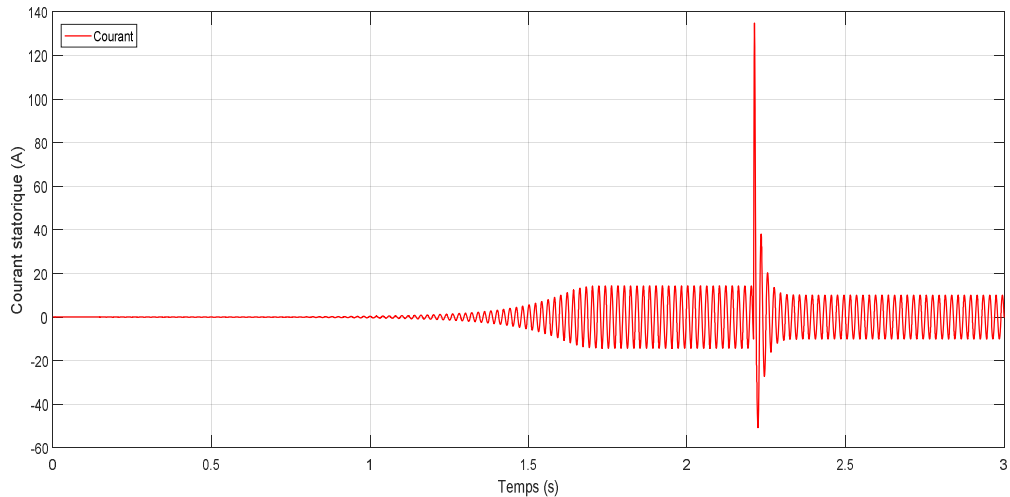
**Figure .IV.15.c :** Courant statorique avec un pic positif suite à une reconnexion de la tension du générateur ( $\varphi=180^\circ$ )

D’après les figures (IV .15a) (IV .15b) (IV .15c) on remarque la variation de pic de courant en fonction du déphasage des tensions (déphasage entre la tension de réseau et celle du génératrice asynchrone, on constate que l’amplitude des pics de courant minimal est obtenue pour des déphasages de 0 et  $2\pi$ , tandis que les pics maximums sont obtenus pour des déphasages de  $\pi$  , lorsque la tension de réseau est en opposition de phase par rapport au courant statorique de la génératrice asynchrone.

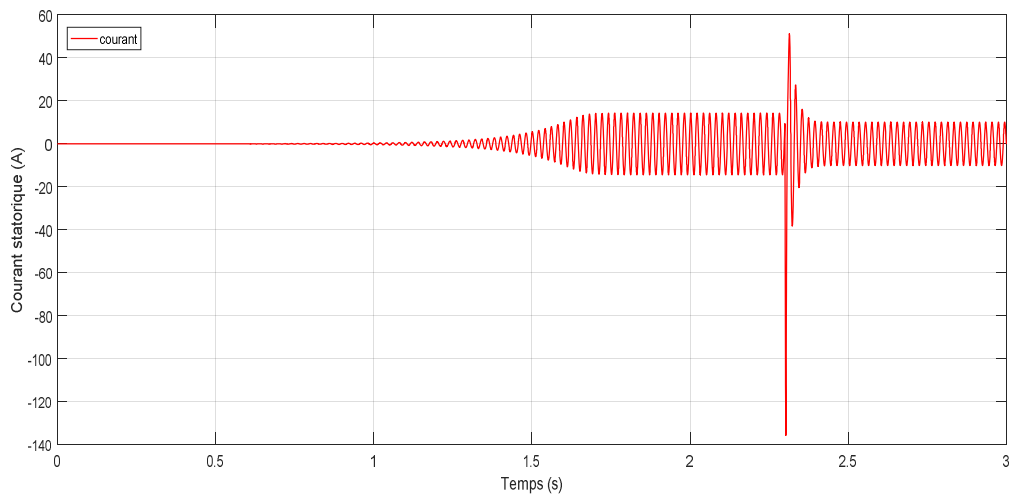
**IV.9.b :L’influence de l’instant de connexion sur les pics de courant**



**Figure .IV.16.a :** Courant statorique avec un pic négatif suite à une reconnexion de la tension du générateur t=2s



**Figure .IV.16.b :** Courant statorique avec un pic positif suite à une reconnexion de la tension du générateur à t=2.21s



**Figure .IV.16.c :** Courant statorique avec un pic négatif suite à une reconnexion de la tension du générateur à t=2.23s

D'après ces figures (IV .16a) (IV .16b) (IV .16c), on constate que les pics de courant varient d'une façon périodique avec la variation de l'instant de connexion le pic de courant et peut atteindre 135A et -135A presque 7.5 fois le courant en régime permanent, on retrouve ces valeurs pour ( $\varphi = 90^\circ$ ).

Quel que soit l'instant de connexion, le pic de courant est au voisinage de zéro (pour un déphasage nul), et il est au voisinage de la valeur maximale pour un déphasage  $\varphi$ .

En fonction de l'instant de connexion le pic est maximal pour 0.05 s (quart de période), il passe par une valeur nulle à l'instant 0.01 s (demi-période), puis il atteint une valeur maximale dans le sens

négatif. Ces variations de pic correspondent au passage du courant par leurs valeurs maximales et minimales à l'instant de connexion.

On peut dire que la forme du régime transitoire est définie par l'instant de connexion.

Le déphasage entre la tension du réseau et le courant de la machine influe sur la valeur maximum de pic.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons introduit l'effet de la saturation dans le modèle dynamique de la machine asynchrone. On n'a pas pris en compte certains phénomènes comme la saturation du flux les fuites qui intervient dans les cas de forte saturation, et les pertes fers qui deviennent nécessaires pour les petites machines.

La plus grande difficulté pour la modélisation est le relevé précis de la courbe  $\varphi_m(im)$ , et son approximation par une fonction mathématique adéquate. Malgré la complexité de la modélisation de l'effet de la saturation dans notre modèle de courant, il est le plus adapté pour notre application qui concerne de la machine sur le réseau.

La simulation du phénomène d'auto-amorçage 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 la capacité 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'atteindre à un régime permanent situé dans la zone saturée. Dans ce modèle il faut bien préciser que les inductances cycliques ne sont pas considérées comme constantes mais plutôt variables. Nous avons pris en considération la variation de l'inductance mutuelle à travers la variation de l'inductance magnétisante notée  $L_m$ .

On constate que la valeur des condensateurs d'excitation ainsi que la vitesse d'entraînement, ont une grande influence sur le comportement en régime dynamique et permanent de la génératrice et la saturation de la branche magnétique est indispensable pour son fonctionnement autonome.

Nous avons présenté le phénomène transitoire qui accompagne le retour réseau sur le générateur asynchrone pendant un fonctionnement autonome. Ce phénomène engendre des pics de courant

atteignant 10 fois la valeur nominale. Ces pics sont principalement dus au déphasage entre la tension réseau et le courant de la machine d'une part, et l'instant de retour réseau d'autre part.

La forme du régime transitoire est définie par l'instant de connexion par contre, le déphasage entre la tension et le courant influe sur l'amplitude des pics. Les résultats obtenus montrent le différent 'type du courant (pic positif, pic négatif,...).

*Conclusion*

---

*Générale*

### **Conclusion générale**

Dans ce mémoire nous avons présenté un travail qui constitue une contribution à l'étude des systèmes comportant des générateurs asynchrones autonomes associés ou non à des dispositifs d'électronique de puissance. Aujourd'hui le générateur asynchrone est de plus en plus exploité pour la production de l'énergie électrique, il est devenu une option importante pour le remplacement de la machine synchrone dans plusieurs applications comme la production de l'énergie éolienne.

Dans un premier temps nous avons présenté un modèle dynamique du générateur asynchrone dans le repère de Park, basé sur l'hypothèse de linéarité, son intérêt est beaucoup plus théorique. Les résultats de la simulation montrent bien que le modèle linéaire n'est pas adapté pour l'auto-amorçage.

Par la suite nous avons pris en compte le phénomène de la saturation du circuit magnétique de la machine asynchrone on a opté pour le modèle des courants où la saturation est prise en compte à travers la variation de l'inductance magnétisante.

Nous avons donné les résultats de la simulation de l'auto-amorçage à vide pour des conditions de fonctionnement adéquates (capacité et vitesse suffisantes). Nous aurions souhaité donner aussi les résultats expérimentaux afin de les confronter à ceux obtenus par simulation.

La connexion du modèle au réseau montre les transitoires de courant qui accompagnent le phénomène du retour réseau, ce dernier produit des pics de courant très importants qui dépendent essentiellement de l'instant de connexion et du déphasage entre la tension de la machine et celle du réseau. Ces pics obtenus pour le courant sont maximums pour des tensions en opposition et minimums dans le cas des tensions en phase.

La poursuite de cette étude serait intéressante dans un contexte de fonctionnement en charge avec une source de tension stable en utilisant l'interfaçage redresseur-onduleur et un dispositif de commande. Pour la connexion au réseau un dispositif de l'électronique de puissance comme le gradateur peut limiter les pics des courants [4].

# *Annexe*

---

**Annexe**

Paramètre de la machine asynchrone étudiée

Nombre de pôles :  $p=2$

Puissance nominale  $P_n= 3.5 \text{ kW}$

Courant statorique :  $I_{sn}=14/8 \text{ A}$

Courant rotorique :  $I_{rn}=9\text{A}$

Tension nominal :  $U_n=380/220 \text{ V}$

Résistance du stator :  $R_s=0.76\Omega$

Résistance du rotor :  $R_r=0.74\Omega$

Inductance mutuelle :  $M=0.74 \text{ H}$

Inductance statorique :  $L_s=0.077 \text{ H}$

Inductance rotorique :  $L_r=0.077 \text{ H}$

Inductance de fuite des enroulements statorique :  $l_{\sigma s}=0.003 \text{ H}$

Inductance de fuite des enroulements rotorique :  $l_{\sigma r}=0.003 \text{ H}$

Vitesse nominale de la machine :  $N=1410 \text{ tr/min}$

# ***Bibliographie***

---

- [1] **Z. KHENNACHE O MELLOUL:** Identification Paramétrique d'une Génératrice Asynchrone auto-excitée dédiée à la Conversion d'Energie Eolienne et Micro-hydraulique dans un Site Isolé, mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2013.
- [2] **R. MEZIANE N.OUERDI :** Etude et Commande de la machine Asynchrone, mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2007/2008.
- [3] **L. AIT OUFELLA L. GOUMIRI :** Contribution au dimensionnement des moteurs Asynchrone par implémentation d'un code de calcul interactif sous Matlab Gui, mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2010.
- [4] **J. OUIDIR M.DIABI :** Modélisation et Simulation du Générateur Asynchrone Autonome, mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 06/07/2017
- [5] **O. ALIK :** Etude et commande d'une machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil, mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2009/2010.
- [6] **BENSLIMANE Mestafa M<sup>r</sup>. HAFI Djafar :** Etude et Modélisation d'une Génératrice Asynchrone double cage, mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merboh Ouargla ,2016.
- [7] **<http://blog.formatis.pro/moteurs-rhrp> :** « allure du glissement d'une Génératrice Asynchrone»21/07/2019.
- [8] **Mourad HELLAL M<sup>r</sup>. Salim RAMDANE :** Etude des Performances de la Machine Asynchrone sous Défauts, mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 25 septembre 2017.
- [9] **I.Z.MOHAMMEDI I. BOURAY :** Modélisation d'un Générateur Asynchrone a vitesse fixe, mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, Département d'électrotechnique, ENP 2013.
- [10] **A. FOUILLE :** «ELECTROTHERNIQUE A L'USAGE DES INGENIEURS, Machines électriques à courants alternatifs, TOME II », Ecole nationales d'ingénieurs, instituts universitaires de technologie, section de techniciens supérieurs. BORDAS, Paris, 1973.
- [11] **F.BRAHIME N.OULD BELKACEM:** Modélisation identification et régulation de tension d'une Génératrice Asynchrone auto-excite, mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2016/2017.

- [12] **G Leghlid** : Modélisation et Simulation d'une Générateur Asynchrone Autonome, mémoire de fin d'étude, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2011.
- [13] **M.IMADOUCHENE**: Modélisation et Régulation d'un Générateur Asynchrone Autonome redressé, mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département de génie électrique.
- [14] **Z.DAMECH B.MOKHTARI**: Modélisation et simulation d'une génératrice asynchrone en saturation, Diplôme de Master en Génie Electrique, Université KasdiMerbah, Ouargla 2011/2012.
- [15] **W.REDJAI H. BENSABRA** : Commande d'une Génératrice Asynchrone auto-excité Application éoliennes, mémoire de fin d'étude, Université Kabdi Merbah Ouargla, 2011/2012.
- [16] **M. OUBIDAR S. BENDAOU**: Machine synchrone / asynchrone, 30 Avril 2010.
- [17] **A. NESBA** : Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [18] **Fediric POINTIES** : Etude commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne, Université de Nantes, 2003.
- [19] **F. ZEMMOUK G. ROUA** : Développement du modèle dynamique d'une génératrice asynchrone auto-excitée en régime saturé, mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, septembre 2015.
- [20] **A. MOUSSA SIDDO** : Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Electrique Spécialité Electrotechnique, ENP 2007.
- [21] **D. KAIROUS** : Calcul analytique du couple et des courants dans une machine Asynchrone auto excitée retour au réseau, mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, ENP, 25 Octobre 2004.