



Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique

**Projet de fin d'études en vue de l'obtention du  
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique**

Présenté par :

**ASFIRANE Salim**

**BELHADJ EZZINE Soufiane**

Intitulé

---

**Etude des Performances d'un Générateur à Cage en  
Isolé et Connecté au Réseau**

---

Promoteurs :

- Pr. S. Mekhtoub
- M. Imadouchene

**Ecole Nationale Polytechnique  
Université UMM Tizi-Ouzou**

ENP 2014

## ملخص

هذا العمل ينص على التعريف بالخصائص الكهربائية للمولد الكهربائي اللامتزامن ذو قفص السنجاب و تمثيل المولد في النظامين الخطي و المشبع ، نقوم بعدها بالتحقق من قيم التوتر و التيار الخاصين بالاشتعال الذاتي للمولد بالمحاكاة، في الأخير ننهى عملنا بمحاكاة وصل الشبكة بالمولد اللامتزامن و التي سنقارنها بعدها بالنتائج التجريبية.

**الكلمات المفتاحية :** المولد اللامتزامن ، قفص السنجاب ، المحاكاة ، التمثيل ، نظام خطي ، نظام خطي ، نظام مشبع ، وصل الشبكة ، الاشتعال الذاتي ، الحمل المقاوم.

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude de la machine asynchrone à cage d'écureuil et l'élaboration d'un modèle en saturé. La validation du modèle passera par la comparaison des résultats expérimentaux et de simulations sur l'auto-amorçage et le retour réseau. Puis, nous présenterons les simulations du fonctionnement en autonome du générateur asynchrone alimentant une charge résistive et inductive.

**Mots clés :** Eolienne, génératrice asynchrone, cage d'écureuil, identification, modélisation, simulation, régime saturé, auto-amorçage, fonctionnement autonome, accrochage réseau, isolé, charge résistive, charge inductive.

## Abstract

This thesis focuses on the study of squirrel cage induction generator. A model has been developed in magnetic saturation. Model validation will be by comparing experimental results and simulations on self-seed and connection to the local grid. Then, we present simulations of stand-alone operation of the asynchronous generator supplying a resistive and inductive load.

**Key words:** Wind turbine, Asynchronous generator, squirrel cage, identification, modeling, simulation, saturated, self-priming, stand-alone operation, grid connection, resistive load, inductive load.

## *Remerciements*

---

*Nous remercions Dieu, de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études.*

*Nous remercions nos promoteurs, le professeur Saïd MEKHTOUB et Malika IMADOUCHENE pour nous avoir suivi et soutenu pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions monsieur le président, et les membres du jury qui ont accepté d'évaluer et de corriger ce travail.*

*Nous remercions les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique qui ont contribué à ma formation.*

*Nous remercions enfin, tous ceux qui ont, d'une quelconque façon, contribué à l'élaboration de ce travail.*

## *Dédicaces*

---

*A ma défunte grand-mère,*

*A ma mère,*

*A mes sœurs,*

*A mes camarades de l'école nationale polytechnique,*

*A mes amis,*

*Je dédie ce travail.*

*Salim*

## *Dédicaces*

---

*À toute ma famille,*

*À tous mes amis,*

*À ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études,*

*Je dédie ce travail.*

*Soufiane*

## *Table des matières*

---

Liste des symboles et abréviations	
Introduction générale	2
Chapitre I :	Rappels sur l'énergie éolienne
1. Introduction	4
2. Le Vent, Principe et Limites de l'éolien	4
3. Fonctionnement général et chaîne de conversion éolienne	5
4. Types d'éoliennes	6
4.1 Eoliennes à axe vertical	6
4.2 Eoliennes à axe horizontal	7
5. Puissance captée par l'éolienne	9
6. Aérogénérateurs connectés au réseau	12
6.1 Machine Synchrone	12
6.1.1 Machine synchrone à aimants permanents connectée au réseau	13
6.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un redresseur	13
6.1.3 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un convertisseur 4 Quadrants	14
6.1.4 Machine synchrone multipolaire	14
6.2 Machine asynchrone	14
6.2.1 Machine asynchrone à cage à vitesse fixe	15
6.2.2 Machine asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence	15
6.2.3 Machine asynchrone à rotor bobiné (dissipation de la puissance)	15
6.2.4 Machine asynchrone double alimentation (récupération de la puissance)	16
7. Aérogénérateurs isolés	16
7.1 Machine synchrone à aimants permanents en éolien isolée	17
7.1.1 MSAP en Association avec un redresseur	17
7.1.2 MSAP association redresseur et hacheur	17
7.2 MAS à cage en éolien isolé	18
7.2.1 MAS auto-excitée par une batterie de condensateur fixe	18
7.2.2 MAS avec capacités de compensation série	18
7.2.3 MAS avec batterie de condensateurs commandés	18
7.2.4 MAS et STATCOM	19
7.2.5 MAS et Convertisseurs unidirectionnels	19
7.2.6 Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)	19
8. Vitesse fixe / vitesse variable :	20
9. Conclusion	22
Chapitre II :	Généralités et identification
1. Introduction	24
2. Généralités sur les machines asynchrones	24
2.2 Constitution	24

2.2 Principe de fonctionnement	25
2.3 Avantages et inconvénients de la MAS à cage	27
3. Identification de la machine asynchrone à cage d'écureuil	28
3.1 Plaque signalétique de la MAS	28
3.2 Présentation du banc d'essai	28
3.3 Schéma équivalent par phase de la MAS à cage	29
3.4 Essais d'identification	29
3.4.1 Essai en courant continu	29
3.4.2 Essai à rotor bloqué	30
3.4.3 Essai au synchronisme	31
4. Conclusion	33
Chapitre III : Modélisation et Etude du fonctionnement de la génératrice à cage	
1. Introduction	35
2. Modélisation de la MAS à cage	35
2.1 Equations électriques générales de la machine	36
2.2 Modèle diphasé équivalent de la machine asynchrone (modèle de R.H Park)	37
2.3 Expression du couple électromagnétique de la machine	43
2.4 Modèle de la machine asynchrone à cage en régime saturé	44
3. Auto-amorçage de la MAS à cage	50
3.1 Principe de l'auto-amorçage	50
3.2 Modèle de l'auto-amorçage (machine et banc de capacités associé)	55
3.3 Essais expérimentaux et simulations d'auto-amorçage	56
4. Accrochage au réseau de la MAS à cage	59
5. Fonctionnement en charge de la MAS, en isolé sur charge purement résistive	65
5.1 Modèle du système machine-charge résistive	65
5.2 Résultats de simulation	66
6. Fonctionnement en charge, en isolé, sur charge réelle	68
6.1 Modèle du système machine-charge réelle	68
6.2 Résultats de la Simulation de la machine connectée à la charge	70
7. Conclusion	72
Conclusion générale	74
Bibliographie	

## *Liste des symboles et abréviations*

---

MAS	Machine Asynchrone
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
MS	Machine synchrone
MSAP	Machine synchrone
MCC	Machine à courant continu.
f. e. m	Force électromotrice.
f. m. m	Force magnétomotrice.
s, r	Indices respectifs du stator et du rotor de la machine asynchrone à cage.
a, b, c	Les trois phases du rotor.
d, q	l'axe direct et l'axe en quadrature dans le référentiel de R.H.Park
$\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}$	Flux total par phase statorique respectivement rotorique.
$v_{sabc}, v_{rabc}$	Tension par phase statorique respectivement rotorique.
$i_{sabc}, i_{rabc}$	Courant par phase statorique respectivement rotorique.
$R_s, R_r$	Résistance d'une phase statorique respectivement rotorique.
$L_s, L_r$	Inductance propre statorique, respectivement rotorique.
$l_s, l_r$	Inductance de fuite statorique respectivement rotorique.
$M_s, M_r$	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques respectivement rotorique.
$R'_r$	Résistance d'une phase rotorique ramené au stator.
$l'_r$	Inductance de fuite d'une phase rotorique ramené au stator.
$m_{sr}$	Inductance mutuelle maximum entre une phase statorique phase rotorique.
$\mathcal{L}_s$	Inductance cyclique d'une phase statorique.
$\mathcal{L}_r$	Inductance cyclique d'une phase rotorique.
$\mathcal{M}$	Inductance cyclique mutuelle.
$\theta_s$	L'angle électrique entre l'axe direct et celui du stator.
$\theta_r$	L'angle électrique entre l'axe direct et celui du rotor.
$\theta$	Angle électrique entre l'axe du stator et celui du rotor.
$\omega_s, \omega_r$	La pulsation statorique, respectivement rotorique.
$\omega$	Pulsation électrique.
$v_{sp}, v_{rp}$	Tension statorique respectivement rotorique par Park.
$i_{sp}, i_{rp}$	Courant statorique respectivement rotorique par Park.
$v_{sd}, v_{sq}$	Composantes de la tension statorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
$v_{rd}, v_{rq}$	Composantes de la tension rotorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
$i_{sd}, i_{sq}$	Composantes du courant statorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
$i_{rd}, i_{rq}$	Composantes du courant rotorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}$	Composantes du flux statorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
$\Phi_{rd}, \Phi_{rq}$	Composantes du flux rotorique suivant l'axe direct respectivement quadrature.
$i_{md}, i_{mq}$	Composantes du courant magnétisant suivant l'axe direct respectivement quadrature.

$\Phi_{md}, \Phi_{mq}$	Composantes du flux magnétisant suivant l'axe direct respectivement quadrature.
$i_m$	Le courant magnétisant.
$\Phi_m$	Le flux magnétisant.
$M_{st}$	L'inductance magnétisante statique.
$M'_{st}$	L'inductance magnétisante dynamique.
$M_d$	L'inductance magnétisante suivant l'axe direct.
$M_q$	L'inductance magnétisante suivant l'axe quadratique.
$M_{dq}$	Inductance d'effet croisé.
$Z_s$	Impédance d'une phase statorique.
$Z_r$	Impédance d'une phase rotorique.
$Z_m$	Impédance de la branche magnétisante.
$Z_g$	Impédance totale d'une phase de la génératrice.
$Z_c$	Impédance d'un condensateur.
$Z_{tot}$	Impédance totale.
$C$	Capacité par phase.
$g$	Le glissement.
$[p(\theta)]^{-1}$	La matrice de passage dans la base de Park.
$C_{em}$	Couple électromagnétique
$C_p$	Coefficient de puissance

# *Introduction générale*

---

Les énergies renouvelables sont perçues comme étant celles sur lesquelles pourra se baser le développement socio-économique de nombreux pays dépourvus de ressources énergétiques conventionnelles. Leurs applications se multiplient et les évolutions techniques permettent d'atteindre des niveaux de puissance de plus en plus élevés.

La capacité mondiale de production d'énergie d'origine éolienne était de 318,137 GW à la fin de l'année 2013. En dix ans, la capacité de production a été multipliée par 10 (39,4 GW en 2003) [1].

Les machines électriques qui équipent les éoliennes sont souvent des machines asynchrone soit à cage d'écureuil, soit à rotor bobiné. Notre travail se propose d'étudier la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un fonctionnement raccordé au réseau et dans un fonctionnement en mode isolé. Notre étude se divise en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous ferons un rappel de l'éolien, nous aborderons les types d'éoliennes et les types de génératrices électriques qui leurs sont adjointes, ainsi que les différentes associations de convertisseurs d'électronique de puissance. On s'intéressera aux topologies électriques d'une part, pour les aérogénérateurs connectés au réseau, et d'autre part pour ceux prévus pour fonctionner en mode isolé.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéresserons à la machine asynchrone à cage. Après une brève description de sa constitution et de son principe de fonctionnement nous passerons à l'identification de la machine.

Dans le troisième chapitre, nous suivrons les étapes de la modélisation du générateur asynchrone qui conduiront au modèle qui prend en compte l'effet de la saturation magnétique. En utilisant les paramètres issus de l'identification on réalisera les simulations sur le logiciel MATLAB du fonctionnement de la machine pour l'auto-amorçage et le raccordement au réseau, et nous comparerons les résultats aux relevés expérimentaux pour valider le modèle. Enfin, on présentera les résultats des simulations pour un fonctionnement du générateur en isolé, sur une charge résistive, puis sur une charge réelle, on terminera par une conclusion.

# *CHAPITRE I*

---

Rappels sur l'énergie éolienne

## *1. Introduction*

---

Dans ce chapitre nous commencerons par une description des différentes éoliennes. Nous détaillerons ensuite les éoliennes à axe horizontal et les types de machines utilisées comme génératrice. On rappellera les différentes associations des convertisseurs statiques utilisés avec ces générateurs.

## *2. Le Vent, Principe et Limites de l'éolien*

---

L'énergie du vent a été utilisée par l'homme depuis des millénaires pour faire avancer les bateaux puis des éoliennes ont été inventées pour moulin du grain, l'énergie cinétique du vent était alors transformée en énergie mécanique seulement. En 1891 le danois "Poul Lacour" a réalisé une turbine éolienne qui génère de l'électricité en l'associant à une dynamo [2], l'aérogénérateur. Depuis, les technologies ne cessent d'évoluer que ce soit pour le type de turbine, ou celui des machines électriques utilisées ou pour leurs commande.

Le vent résulte du mouvement des masses d'air dû aux différentiels de pression créés par les différences de températures (réchauffement inégal des masses d'air) engendrées par l'absorption des rayonnements solaires et le mouvement de rotation de la planète. Les vents diffèrent selon la localisation géographique et la période saisonnière, ses vitesses sont mesurées avec un anémomètre et sont classées en 12 catégories, selon l'échelle de Beaufort, d'un vent calme (moins de 1 m/s) à l'ouragan (plus de 32,5 m/s).

Une éolienne n'est efficace qu'à partir d'une moyenne annuelle de vitesse du vent supérieure à 5 m/s et est mise à l'arrêt pour des raisons de sécurité du matériel et de limites techniques à partir de 25 m/s.

L'énergie du vent a beau être gratuite, inépuisable et non polluante, son exploitation dans l'éolien présente des inconvénients communs à toutes les énergies dites renouvelables. L'Intermittence (dépend des rafales de vent), et les pics de consommation de l'énergie produite ne coïncident pas toujours avec les pics de production ce qui est un vrai casse-tête pour les producteurs d'énergie. De plus les éoliennes sont bruyantes et s'imposent dans le paysage. D'autres paramètres sont aussi à prendre en compte avant l'installation d'éoliennes : l'existence d'obstacles, les turbulences, la direction qui fournit le maximum d'énergie, les durées où le vent souffle dans cette direction. De ce fait, une étude à priori du site d'implantation est nécessaire.

### 3. Fonctionnement général et chaîne de conversion éolienne

Le fonctionnement général est illustré par la Figure I.1. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines divers et intègre des concepts aérodynamiques, mécaniques, électriques et électroniques. Les topologies dépendent des types de génératrices électriques et de turbines éoliennes mais le principe de conversion reste le même. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales de l'aérogénérateur qui se mettent en mouvement et transmettent cette énergie mécaniquement à un arbre qui entraîne à son tour le rotor d'une génératrice électrique, voir figure ci-dessous.

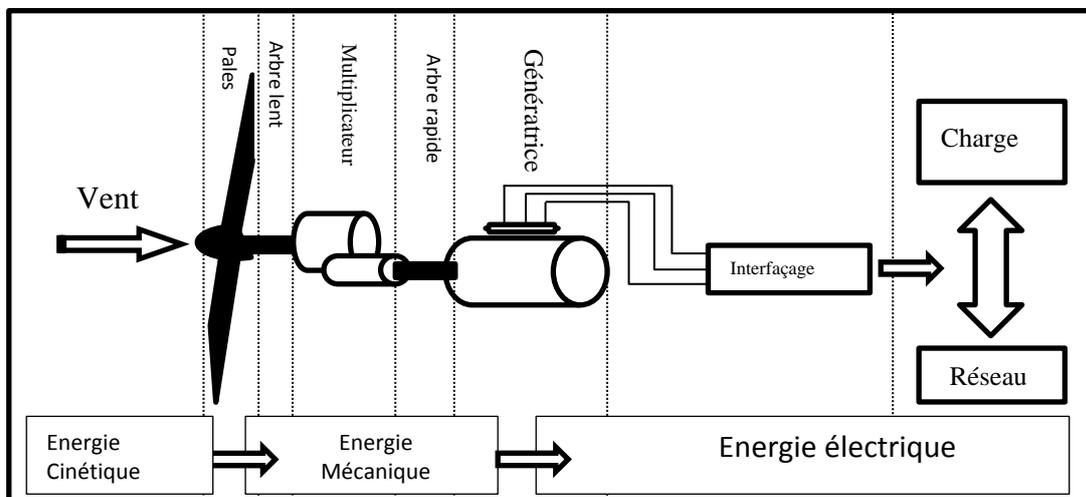


Fig.I.1 . Chaîne de conversion éolienne

Plusieurs caractéristiques et concepts technologiques permettent de classer les différentes sortes d'aérogénérateurs [2-6]. La position de leur axe par rapport au sol, leur vitesse de rotation lente ou rapide, leur nombre de pales, la puissance qu'ils fournissent...

Les éoliennes selon leur puissance sont classées en trois catégories [7,8].

Puissance	Diamètre de la voilure	
Moins de 40kW	Moins de 12 m	Petite puissance
Entre 40kW et quelques centaines de kW	12 m à 45 m	Moyenne puissance
Supérieure à 1MW	46 m et plus	Grande puissance

D'autres classements considèrent que le petit éolien s'exprime dans des gammes de puissance de 1 kW à 100kW. Pour des puissances inférieures à 1 kW, on parle de micro et de mini éolien.

Dans ce qui suit nous nous contenterons de classer les aérogénérateurs selon leur axe, puis explorerons l'architecture des aérogénérateurs à axe horizontal tripales.

#### 4. Types d'éoliennes

---

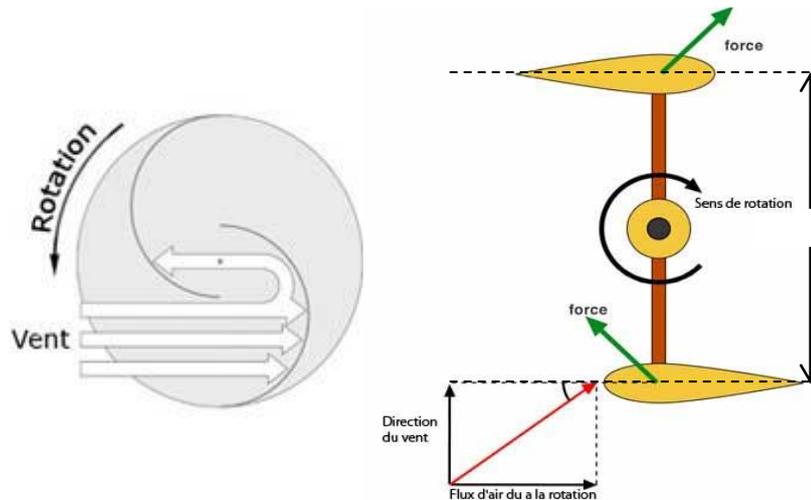
On peut classer les éoliennes selon la disposition géométrique de leur axe de rotation de l'arbre. La disposition de la turbine par rapport au sol permet de distinguer les aérogénérateurs à axe vertical et les aérogénérateurs à axe horizontal. Les éoliennes à axe vertical, dû à leur faible rendement aérodynamique ainsi qu'aux fluctuations élevées de la puissance électrique générée, ont été progressivement abandonnées [3]. De nos jours, les éoliennes commerciales sont toutes ou presque à axe horizontal.

##### 4.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ne disposent pas d'un système d'orientation par rapport au vent. Elle possède l'énorme avantage de pouvoir capter des vents très faibles, ce qui en fait un excellent moteur pour le pompage de l'eau. En revanche, en ce qui concerne la production électrique, elles sont moins performantes que les modèles à axe horizontal. Les deux types d'éoliennes à axe vertical parvenus au stade de l'industrialisation sont le type "Savonius" et le type "Darrieus"[3]. Le rotor de Darrieus a donné naissance à différentes variantes illustrées au côté du rotor de Savonius sur la Figure.I.2.



**Fig.I.02** .Eoliennes à axe vertical:  
En haut Savonius[4],en bas de gauche à droite Darrieus, Darrieus H [9], Darrieus Hélicoïdal [10]



**Fig.I.03** .Principe de fonctionnement à gauche "Savonius" à droite "Darrieus"

Le rotor de Savonius repose sur le principe de la trainée différentielle ou les efforts d'intensités différentes sont exercés par le flux d'air sur les surfaces de plusieurs demi-cylindres creux et engendre un couple moteur d'entraînement. Celui de Darrieus exploite le principe aérodynamique de variation cyclique d'angle d'incidence qui suppose qu'un profil aérodynamique dans un flux d'air subit des forces d'intensité et de direction variables selon l'angle dans lequel il est placé ; ce qui engendre un couple moteur proportionnel au diamètre de l'éolienne.

Ces éoliennes présentent l'avantage d'avoir une turbine et un générateur proches du sol et donc faciles d'accès pour les opérations de maintenance. Cet état de fait les rend sensibles aux turbulences d'une part, et leur rendement est moins bon (les vents à proximité du sol sont faibles), d'autre part elles occupent des superficies assez importantes pour les grandes puissances. Les éoliennes munies d'un rotor de type Darrieus ne démarrent pas seules, elles comportent un dispositif d'entraînement pour le démarrage. Elles subissent des contraintes mécaniques très fortes et sont sujettes à des problèmes d'aéroélasticité. Elles ont été progressivement abandonnées par les constructeurs qui se sont dirigés vers les éoliennes à axe horizontal.

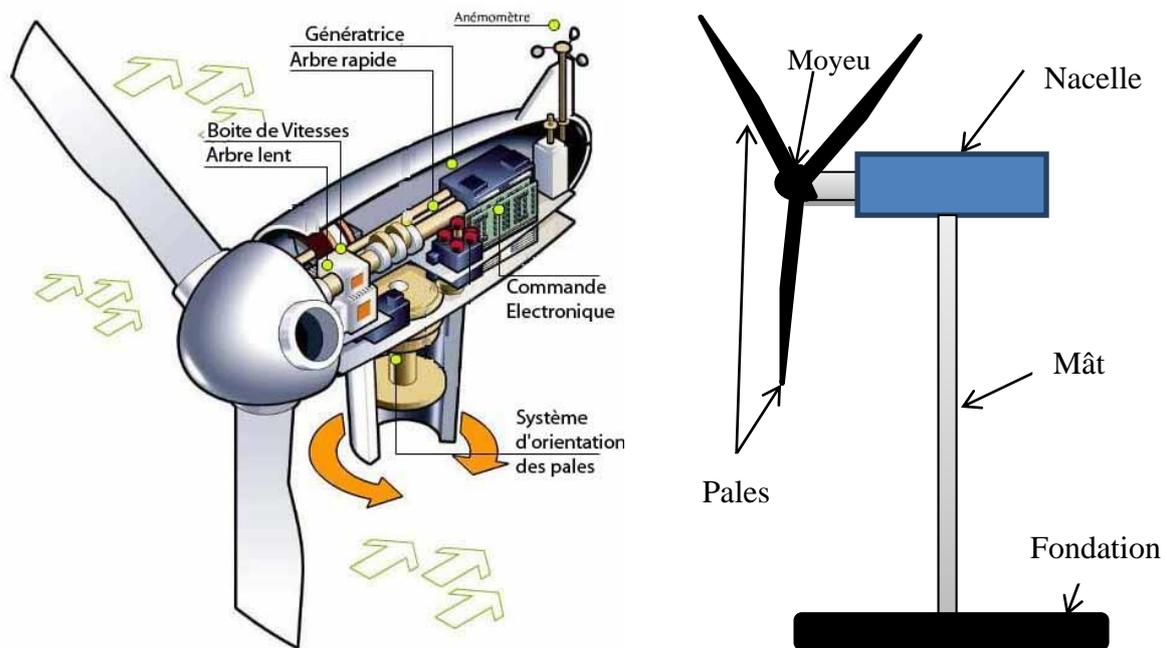
#### 4.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (les plus courantes sont à hélices) permettent un rendement élevé. L'axe de rotation de ces éoliennes est placé horizontalement par rapport au sol .Elles sont montées sur pylônes et possèdent un système d'orientation dans le vent. Elles ont également deux types de rotation: Lente et Rapide. Les lentes comportent généralement un grand nombre de pales et fonctionnent à de faible vitesses de vent et ne servent quasiment

qu'au pompage de l'eau. Les Rapides ont un petit nombre de pales (une à quatre pales) et sont utilisées pour la production d'électricité.

Les systèmes à trois pales sont les plus répandus. Ils possèdent un bon rendement théorique mais est moins résistant aux vents forts que les modèles à axe vertical.

La structure d'une éolienne tripale est constituée d'une tour (le Mât) au sommet de laquelle se trouve la nacelle. La fondation est l'ensemble qui fixe la structure de l'éolienne au sol, le mât permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour lui permettre d'être entraîné par un vent plus fort et régulier. Au niveau du sol, il abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques. La nacelle contient les composants mécaniques, la génératrice électrique et certains composants électroniques et certaines nacelles tournent pour orienter les pales dans la direction du vent.



**Fig.I.4** .Schéma d'une éolienne tripale

La turbine est munie des pâles fixes ou orientables dotées d'un profil aérodynamique qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

**Le moyeu** : reçoit les pales et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur. Il est pourvu d'un système d'orientation des pales pour réguler la vitesse de rotation.

**L'arbre lent ou primaire** : relie le moyeu au multiplicateur.

**Le multiplicateur:** boîte de vitesse qui adapte la vitesse mécanique de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

**L'arbre rapide ou secondaire:** relie le multiplicateur à la génératrice électrique.

**La génératrice électrique :** se charge de la conversion mécanique-électrique (le plus souvent une machine synchrone ou une machine asynchrone à cage ou à double alimentation).

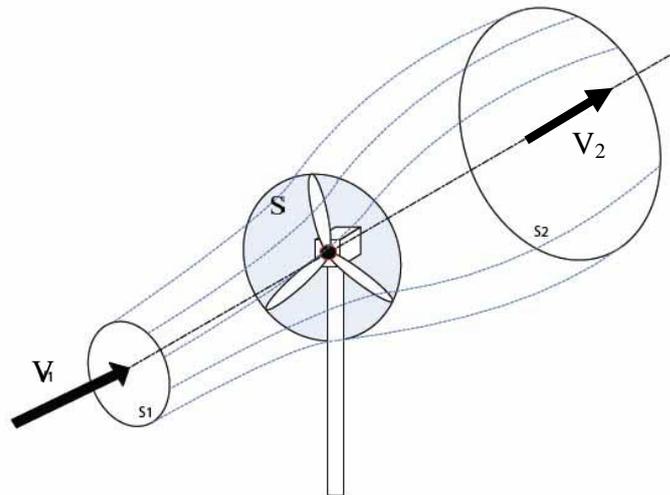
**Le système d'orientation des pâles :** sert au réglage aérodynamique et à la régulation de la puissance.

En plus de ce qui a été cité l'éolienne comporte un système de refroidissement sous forme de radiateur d'eau ou d'huile qui refroidit le multiplicateur qui subit un échauffement dû à l'effort mécanique ou de ventilateurs pour refroidir la génératrice, un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent et une électronique prévue pour contrôler le fonctionnement (démarrage, freinage...) et les mécanismes d'orientation (orientation de la nacelle, orientation des pales).

## *5. Puissance captée par l'éolienne*

---

La puissance captée par l'aéroturbine est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Les variations du vent ont donc une influence considérable sur le potentiel de la puissance récupérée. Cependant, les pales font dévier le flux d'air avant qu'il n'atteigne la surface balayée par le rotor, le vent est freiné et la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortante, la surface s'élargit à l'arrière du rotor. La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent : loi de Betz.



**Fig.I.5** .Schéma de principe loi de Betz [12]

Cette loi, énoncée par Albert Betz, définit le pourcentage qui peut être extrait de l'énergie cinétique du vent à vitesse donnée et donc la limite de la puissance extractible à partir du vent :

$V_1$  : Vitesse du vent avant d'atteindre les pales de l'éolienne.

$V_2$  : Vitesse du vent après le passage à travers le plan de rotor.

$V$  : Vitesse du vent au niveau des pales (vitesse moyenne du vent traversant la surface balayée par le rotor).  $V = \frac{V_1+V_2}{2}$

$S$  : Surface balayée par le rotor.

$m$  : La masse d'air traversant l'éolienne :  $m = \rho S V = \rho S \frac{V_1+V_2}{2}$  avec  $\rho$  : densité de l'air.

La puissance extraite lors du passage du flux d'air à travers les pales est par la seconde loi de Newton:  $P_{extractible} = \frac{1}{2} m V_1^2 - \frac{1}{2} m V_2^2 = m \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2}$

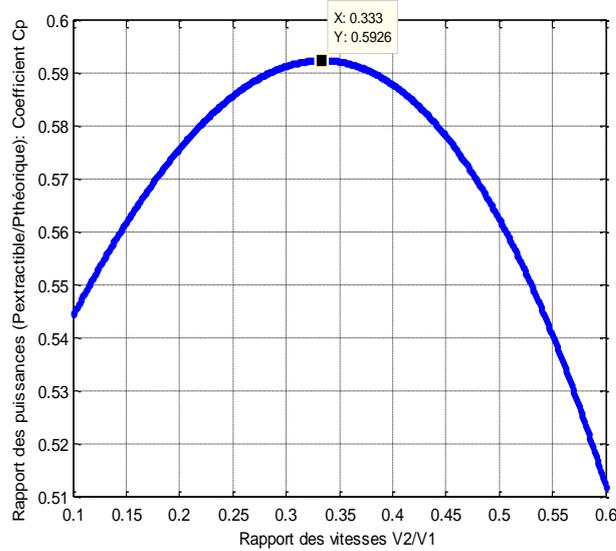
En substituant la masse par son expression en fonction de la densité, de la surface balayée et de la vitesse du vent au niveau des pales :  $P_{extractible} = \rho S \frac{(V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4}$

La puissance théorique étant calculée à partir de la vitesse  $V_1$  du vent non perturbé par la présence de l'éolienne et son passage à travers le rotor elle équivaut à :

$$P_{théorique} = \frac{\rho S V_1^3}{2}$$

On définit le coefficient de puissance  $C_p$  rapport des puissances extractible et

$$\text{théorique : } C_p = \frac{P_{\text{extractible}}}{P_{\text{théorique}}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_1}{V_2} \right) \left( 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^2 \right)$$



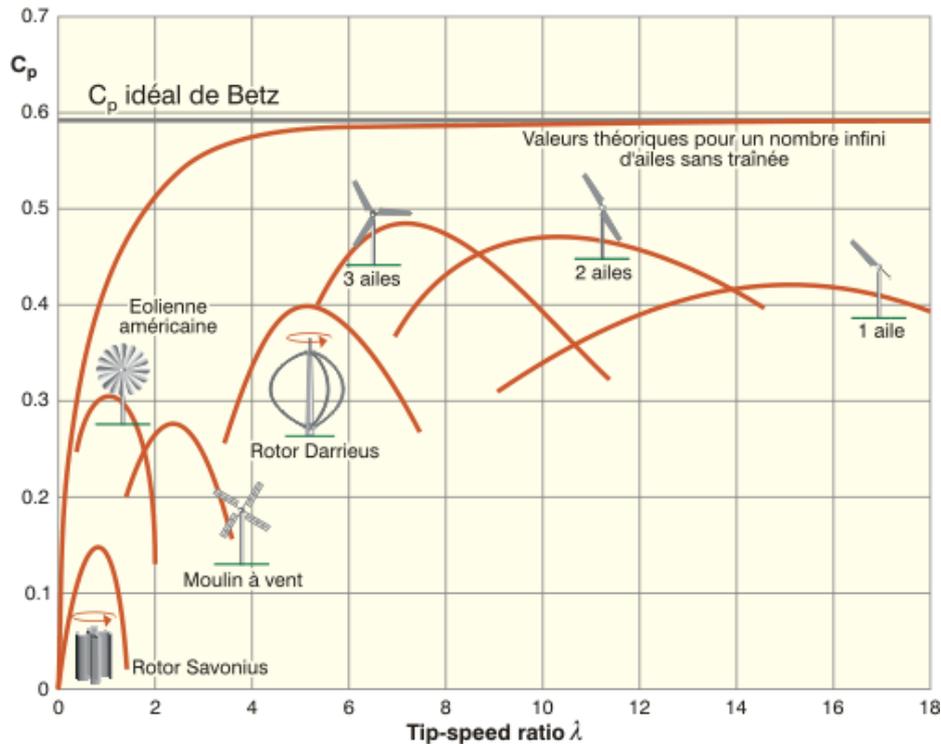
**Fig.I.6 .** Evolution de Coefficient de Puissance en fonction de  $\frac{V_2}{V_1}$

En étudiant l'évolution de ce coefficient en fonction du rapport des vitesses  $V_2/V_1$  représenté par la Figure.I.6,  $C_p$  atteint son maximum théorique à 0,59 pour un rapport égale à 1/3.

$C_p = 0,59$  est la limite théorique (limite de Betz) de la fraction maximale de puissance du vent qu'une éolienne puisse extraire à vitesse de vent donnée. Cependant, en pratique, chaque turbine éolienne, indépendamment de ses paramètres de construction dispose de sa propre courbe caractéristique de coefficient de puissance  $C_p$  dont le maximum est en dessous de cette limite théorique qui n'est jamais atteinte dues aux différentes pertes. On définit ici un rapport qui influe sur ces pertes : le tip-speed ratio (TSR) ou le rapport de la vitesse en bout de pale et de la vitesse du vent :

$$\lambda = R\omega_T/V_1$$

Avec :  $R$  : rayon de la pale,  $\omega_T$  : vitesse angulaire de la turbine,  $V_1$  : vitesse du vent.



**Fig.I.7** .Evolution de Coefficient de Puissance en fonction de  $\lambda$  de différentes éoliennes [11]

Le coefficient de puissance  $C_p$  diminue rapidement pour des vitesses de vent qui entraîne les éoliennes lentes à des vitesses supérieures à leur vitesse nominale. Par opposition aux éoliennes rapides elles atteignent très rapidement leurs maximums de puissance. Les éoliennes à marche rapide ont un nombre de pales plus restreint et comportent l'avantage d'avoir un coefficient de puissance qui ne baisse que lentement lorsque la vitesse nominale est dépassée. On peut remarquer ici que les éoliennes tripales arrivent rapidement à leur maximum de puissance mais après avoir dépassé leur vitesse nominale le  $C_p$  ne diminue que lentement. C'est une des raisons pour lesquelles, elles restent aujourd'hui les plus répandues.

## 6. Aérogénérateurs connectés au réseau

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones.

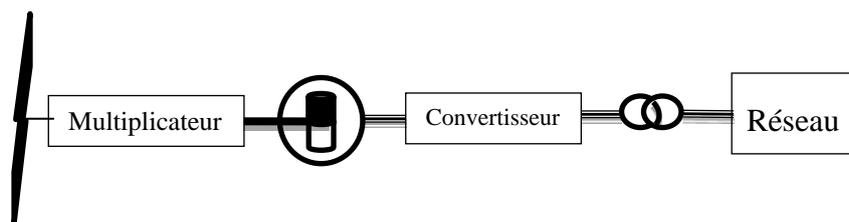
### 6.1 Machine Synchrone

Les machines synchrones classiques sont utilisées dans la production d'électricité par éoliennes dans une gamme de puissance allant de 500kW à 2MW [5]. Lorsqu'elles sont

directement connectées au réseau, la vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau, un des principaux inconvénients est que les fluctuations du couple captées par les pales de l'éolienne en premier lieu se propagent sur l'arbre et se font ressentir sur la puissance électrique produite. Ceci est la raison pour laquelle les MS ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs connectés directement au réseau, mais elles sont raccordées au réseau via des convertisseurs d'électronique de puissance qui permettent le découplage de la vitesse de rotation de la machine et de la fréquence du réseau. La vitesse par conséquent peut varier de manière à optimiser le rendement aérodynamique et à amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes de la MS fonctionnent à des vitesses faibles et peuvent être directement couplées à la turbine sans passer par un multiplicateur.

Les figures suivantes représentent les différentes configurations les plus courantes pour les machines synchrones utilisées comme générateurs dans les systèmes éoliens [13] :

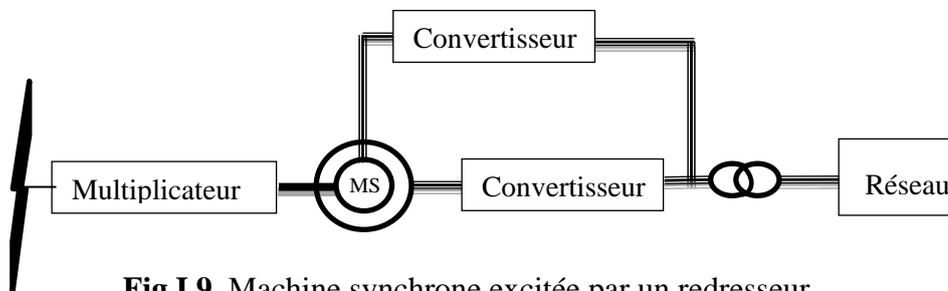
### 6.1.1 Machine synchrone à aimants permanents connectée au réseau



**Fig.I.8.** MSAP Connectée au réseau

Cette configuration utilise une machine synchrone à aimants permanents. La totalité de la puissance est commandée, cette machine est utilisée dans les éoliennes de moins de 20 kW [5].

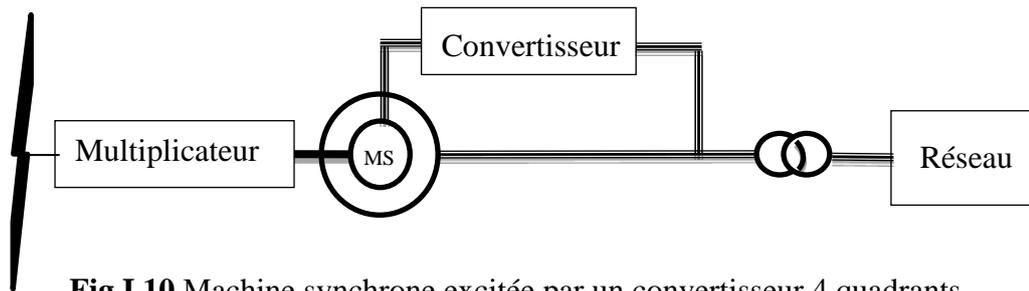
### 6.1.2 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un redresseur



**Fig.I.9.** Machine synchrone excitée par un redresseur

La MS est excitée par un redresseur ce qui implique le besoin d'un circuit d'excitation, de bagues (système à entretenir) et d'une stratégie de commande plus complexe que pour la machine à aimants.

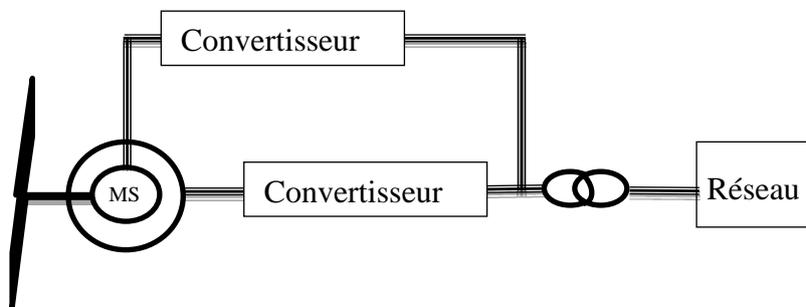
### 6.1.3 Machine synchrone à rotor bobiné excitée par un convertisseur 4 Quadrants



**Fig.I.10.**Machine synchrone excitée par un convertisseur 4 quadrants

Avec un convertisseur à 4 quadrants cette configuration permet un fonctionnement à vitesse variable.

### 6.1.4 Machine synchrone multipolaire



**Fig.I.11 .**Machine synchrone Multipolaire

Avec une machine synchrone multipolaire on peut alors se passer de multiplicateur.

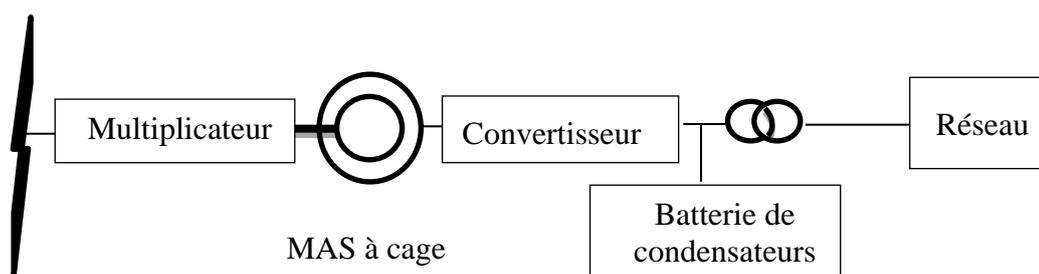
## 6.2 Machine Asynchrone

Grâce à la variation du glissement entre le flux du stator et la vitesse du rotor, la connexion directe de la machine asynchrone au réseau est plus douce. Les machines à induction équipent la plus part des éoliennes à vitesse fixe.

L'introduction des convertisseurs de l'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau permet au même titre que pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine et de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable. Cependant l'inconvénient de la machine asynchrone par rapport à la machine synchrone est la consommation de la puissance réactive et le courant de démarrage élevé, problèmes auxquels on peut répondre grâce à l'électronique de puissance. La machine asynchrone à cage, quant à elle, a un nombre de paires de pôles fixe et fonctionne donc sur une plage de vitesse très limitée : le glissement est de l'ordre de quelques %.

Les figures suivantes illustrent les topologies les plus utilisées dans les aérogénérateurs avec machine asynchrone :

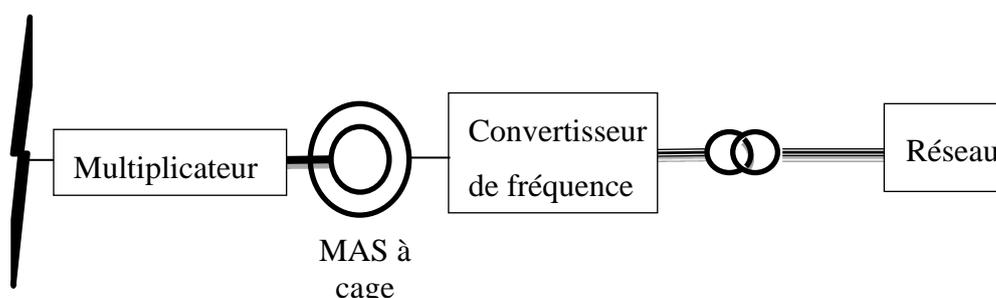
### 6.2.1 Machine asynchrone à cage à vitesse fixe



**Fig.I.12** .MAS à cage à vitesse fixe

Cette figure présente une configuration où l'éolienne fonctionne à vitesse fixe avec une machine asynchrone à cage d'écurieul. La batterie de condensateurs sert à compenser la puissance réactive et le convertisseur d'électronique de puissance à adoucir le raccordement au réseau.

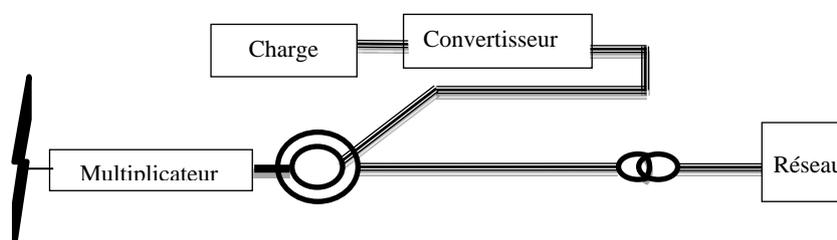
### 6.2.2 Machine asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence



**Fig.I.13** .Machine Asynchrone à cage avec convertisseur de fréquence

Les convertisseurs de fréquence remplissent la fonction de la batterie de condensateurs et des convertisseurs du premier montage. L'avantage étant de faire varier la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.

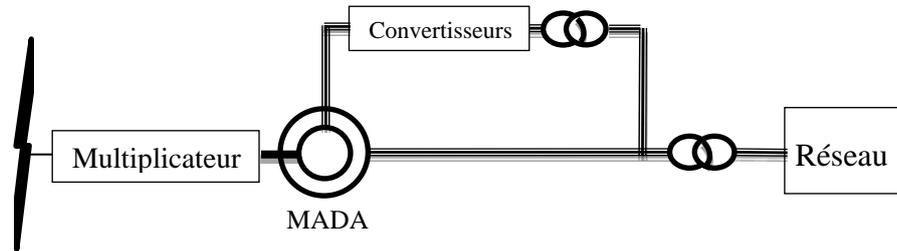
### 6.2.3 Machine asynchrone à rotor bobiné (dissipation de la puissance)



**Fig.I.14** .Machine Asynchrone à rotor bobiné  
(Dissipation de la puissance rotorique)

La résistance rotorique est contrôlée au moyen de résistances insérées dans le circuit par l'intermédiaire d'un convertisseur d'électronique de puissance et permet ainsi d'intervenir sur le glissement de la machine.

### 6.2.4 Machine asynchrone double alimentation (récupération de la puissance)



**Fig.I.15.** MADA récupération de la puissance

Un convertisseur de fréquences commande directement les courants dans les enroulements du rotor, ceci permet de contrôler la puissance de sortie de la machine. C'est une cascade qui permet la récupération de l'énergie rotorique. Le transformateur permet l'isolation galvanique et l'adaptation (contrôle de la vitesse).

## 7. Aérogénérateurs isolés

Les aérogénérateurs fonctionnant en mode autonome alimentent des zones d'habitation ou des systèmes de télécommunication isolés mais la plus grande partie des aérogénérateurs sont connectés à des réseaux électriques [5].

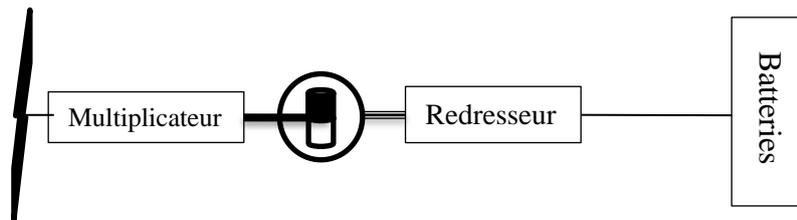
Les éoliennes non raccordées au réseau alimentent des charges isolées avec éventuellement un ou plusieurs groupes électrogènes en appui. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage présente un intérêt en cas d'absence de groupes électrogènes, notamment en cas de vent faible. Le recours à des batteries est utile pour le stockage d'énergie à long terme. La génératrice utilisée pour un fonctionnement en isolé est souvent une machine synchrone à aimants permanents qui comporte l'énorme avantage de se passer d'un circuit d'excitation par rapport à la machine synchrone à rotor bobiné. Laquelle aura qui nécessairement aura besoin d'une batterie pour son circuit d'excitation mais dont le prix revient quand même moins élevé.

La machine asynchrone présente un bon compromis coût/performances avec ses qualités reconnues de robustesse et de tolérance aux surcharges, mais néanmoins ne peut se défaire d'un dispositif lui fournissant l'énergie réactive indispensable à sa magnétisation. Un certain nombre de travaux scientifiques a été consacré à l'étude des montages destinés à un fonctionnement autonome de la machine asynchrone à cage en génératrice pour l'éolien

[14,15,16], dans ce qui suit nous présenterons brièvement quelques-unes des configurations des éoliennes prévues pour un fonctionnement en isolé en détaillant davantage celles des machines asynchrones à cage.

## 7.1 Machine synchrone à aimants permanents en éolien isolée

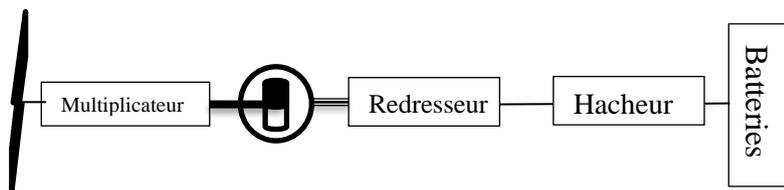
### 7.1.1 MSAP en Association avec un redresseur



**Fig.I.16.** MSAP et Redresseur

La machine synchrone est associée à un redresseur. Il peut être simple à diodes dans le cas des petites puissances ou un redresseur commandé en MLI qui permettra un contrôle de la vitesse ou du couple mais cette commande nécessite un capteur de position.

### 7.1.2 MSAP association redresseur et hacheur



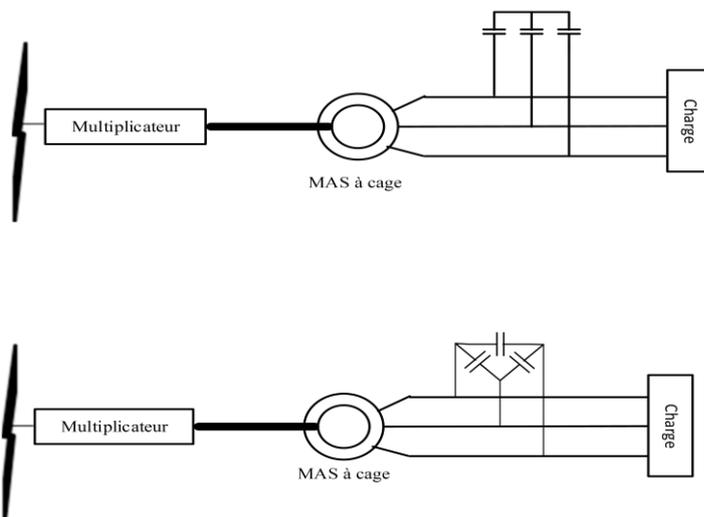
**Fig.I.17.** MSAP avec redresseur et hacheur

Pour pouvoir effectuer un contrôle de vitesse de la MSAP afin d'optimiser le rendement du système éolien en fonction de la vitesse du vent (MPPT), on adjoint au redresseur à diodes, un hacheur.

## 7.2 MAS à cage en éolien isolé

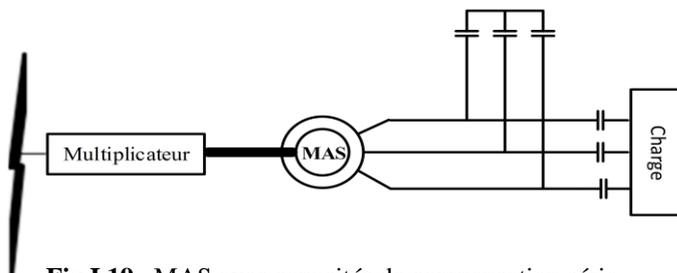
### 7.2.1 MAS auto-excitée par une batterie de condensateur fixe

Une batterie de condensateurs est connectée en parallèle à la charge. Les condensateurs sont connectés en étoile ou en triangle voir figure ci-dessous.



**Fig.I.18** . MAS avec Banc de condensateurs

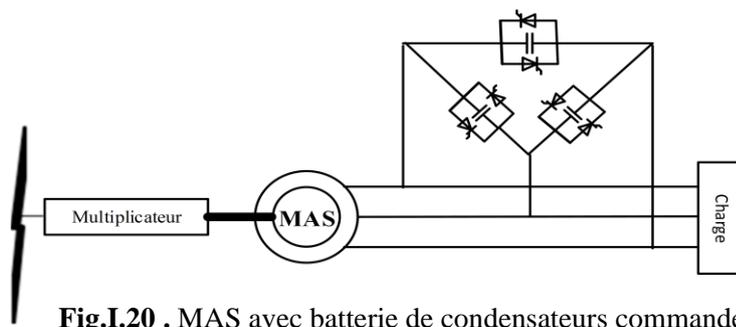
### 7.2.2 MAS avec capacités de compensation série :



**Fig.I.19** . MAS avec capacités de compensation série

Dans cette configuration en plus du banc de capacités placé en parallèle. Ce qui permet de diminuer la chute de tension en charge mais limite les possibilités de régulation [15].

### 7.2.3 MAS avec batterie de condensateurs commandés

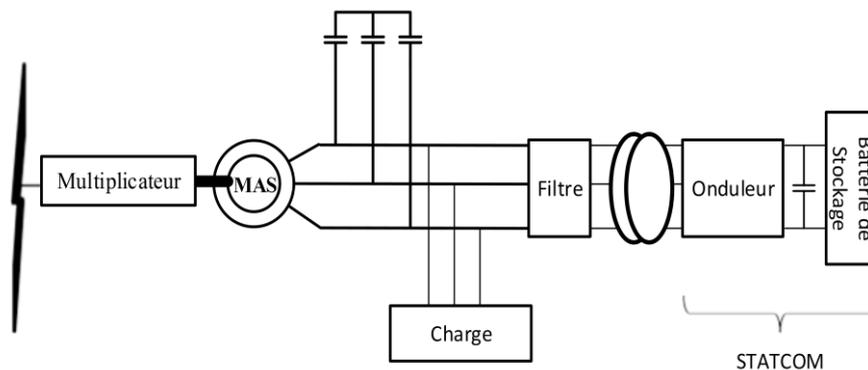


**Fig.I.20** . MAS avec batterie de condensateurs commandés

Une des propositions pour commander la puissance réactive est la mise en place de thyristors en tête bêche en parallèle avec les capacités. Les valeurs apparentes des capacités sont ajustées par action sur leur temps de connexion au circuit. Ce qui permet pour les perturbations de charge ou de vitesse du vent d'atténuer les variations de la tension [15].

#### 7.2.4 MAS et STATCOM

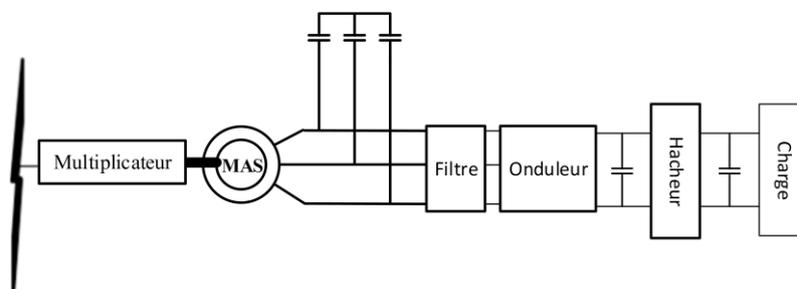
La MAS est reliée à un dispositif " Static Compensator". Cette configuration prévoit, en plus des condensateurs d'excitation, un filtre, un transformateur abaisseur et un onduleur de tension à deux niveaux avec batterie de stockage (sur son bus continu) qui peut fournir ou absorber la puissance réactive par le contrôle de la tension. Ce système est néanmoins coûteux et compliqué à mettre en œuvre [18].



**Fig.I.21.** MAS avec STATCOM

#### 7.2.5 MAS et Convertisseurs unidirectionnels

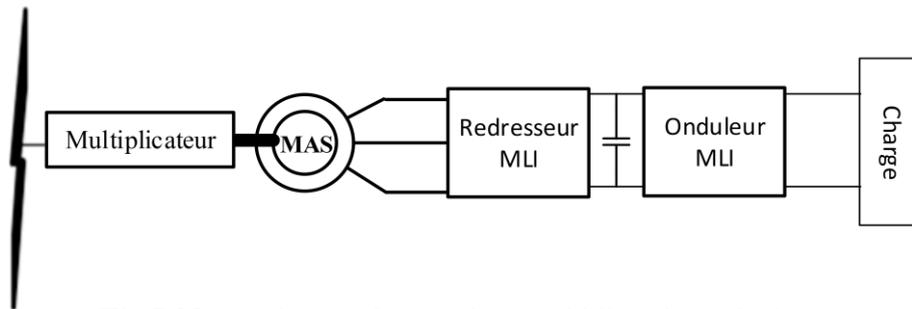
Un redresseur simple à diodes et un hacheur qui garde la tension à sa sortie constante par action sur le rapport cyclique de ce dernier. Ce système est simple mais ne permet pas le contrôle de la magnétisation de la machine.



**Fig.I.22 .** MAS et Convertisseurs unidirectionnels

#### 7.2.6 Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)

La machine est connectée à un redresseur et un onduleur de tension à MLI.



**Fig.I.23** .MAS avec Convertisseurs bidirectionnels (à MLI)

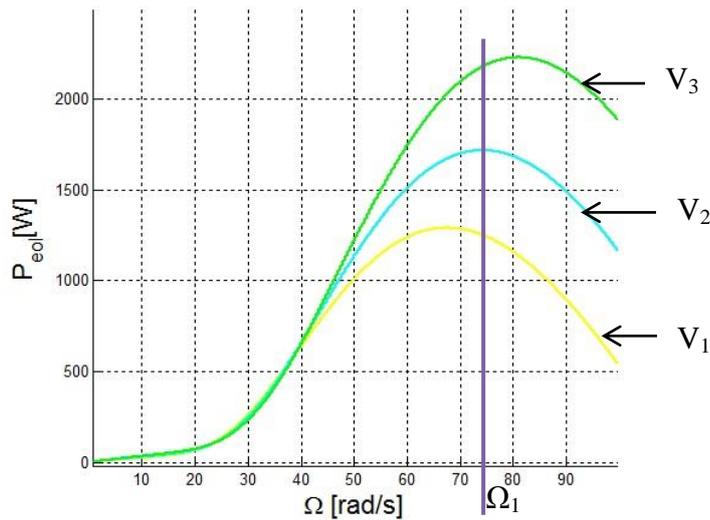
L'avantage de ce système est le fonctionnement sur une plus large gamme de vitesses, une optimisation du transfert d'énergie, une meilleure gestion des transitoires par rapport à la charge mais la commande reste complexe [15,18].

## 8. Vitesse fixe / vitesse variable

La configuration électrique d'un aérogénérateur est dans une certaine mesure déterminée par son mode de fonctionnement vis à vis de la vitesse de rotation de sa génératrice : fixe ou variable.

La génératrice asynchrone directement couplée au réseau (configuration 6.2.1) voit alors sa vitesse imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles. Le couple mécanique de la turbine éolienne a tendance à accélérer la vitesse de la génératrice qui fonctionne alors en hyper-synchronisme et génère de la puissance électrique sur le réseau. La vitesse mécanique est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme [14]. La structure présentée précédemment au point 6.2.2 de la machine asynchrone à cage fonctionne à vitesse variable par pilotage au stator par des convertisseurs statiques.

La configuration des points 6.2.3 et 6.2.4 est basée sur une machine asynchrone à rotor bobiné et la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs placés sur le circuit rotorique. Cependant la première utilise le principe de la dissipation de la puissance rotorique sur une charge alimentée par le convertisseur et permet une variation de la vitesse de l'ordre de 10% au-delà de la vitesse du synchronisme et la deuxième utilise la cascade hyper-synchrone avec une MADA qui permet une variation plus large de vitesse atteignant les  $\pm 30\%$  [3].



**Fig.I.24.** Puissance générée d'une éolienne en fonction de la vitesse de la génératrice pour plusieurs vitesses du vent

La figure I.24 représente la caractéristique générale de la puissance en fonction de la vitesse d'une aéro turbine pour différentes vitesses de vent. Si l'éolienne est à vitesse fixe et ne tourne qu'à la vitesse de  $\Omega_1$ , pour la vitesse de vent  $V_2$  elle extrait le maximum de puissance du vent mais si la vitesse du vent change, le maximum de la puissance qu'elle pourrait en tirer n'est pas atteint. Si la vitesse de vent augmente ( $V_3$ ), il faudrait augmenter la vitesse de rotation pour atteindre le point de puissance maximum ou si la vitesse du vent baisse ( $V_1$ ) il faudrait fixer la vitesse de rotation à une vitesse inférieure à  $\Omega_1$ . C'est là tout l'intérêt de la vitesse variable, extraire le maximum de puissance à partir du vent.

Cependant, il reste certains avantages à l'éolienne à vitesse fixe : Système électrique plus simple, Plus grande fiabilité, Pas de systèmes électroniques de commande donc un coût moins élevé.

Les avantages de l'éolienne à vitesse variable : Augmentation du rendement énergétique, Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance, Réduction des efforts subis par le circuit de puissance.

## *9. Conclusion*

---

Dans ce chapitre nous avons parlé en premier lieu de l'énergie du vent et des concepts éoliens en général, des types d'éoliennes et de la constitution des éoliennes tripales. Puis, nous avons exploré différents montages possibles pour des éoliennes tripales à axe horizontal dans un fonctionnement raccordé au réseau et dans un fonctionnement en isolé. Nous avons présenté les plus importantes topologies concernant la machine asynchrone à cage qui a des avantages certains comparativement aux autres types de machines mais présente des limites concernant sa consommation de puissance réactive, et la faible marge de manœuvre dans sa commande. Cependant, l'adjonction de l'électronique de puissance permet de palier à ces problèmes.

## *CHAPITRE II*

---

### Généralités et identification

## *1. Introduction*

---

La machine asynchrone avec ses avantages certains de robustesse et de simplicité de construction a conquis le monde de l'industrie dans des applications de faible puissance (outillage, électroménager...). Dans les grandes puissances elle est utilisée en tant que moteur pour le pompage le levage ou la traction, ou même plus récemment en tant que génératrice pour les éoliennes par exemple. Plus récemment, depuis l'avènement de l'électronique de puissance et les possibilités de contrôle de vitesse et de couple, les MAS ou machines à induction par leur faible coût de revient et de maintenance concurrencent aisément les machines synchrones.

Les constructeurs d'éoliennes intègrent de plus en plus cette technologie mais reste un inconvénient majeur de la MAS : l'énergie réactive. En effet, c'est une grande consommatrice d'énergie réactive nécessaire à l'induction. Cette énergie de magnétisation lui est fournie par le réseau dans un mode de fonctionnement non autonome ou par des dispositifs tel un banc de capacités pour un fonctionnement en autonome. On commencera dans ce chapitre par une courte description de la machine asynchrone à cage, construction et principe de fonctionnement, puis on passera à l'identification de la machine asynchrone à cage accompagnée de la présentation du banc d'essais qui ont servi aux essais d'auto-amorçage et de couplage au réseau afin de pouvoir les introduire dans la modélisation mathématique qui sera développée dans le prochain chapitre

## *2. Généralités sur les machines asynchrones*

---

### **2.1 Constitution**

La machine asynchrone à cage est composée comme toutes les machines électriques tournantes d'un stator et d'un rotor entre lesquels se trouve un entrefer. Le stator des machines asynchrones est identique à celui des machines synchrones (carcasse en acier sous forme d'un cylindre creux constitué de tôles feuilletés et qui porte un bobinage triphasé reparti régulièrement dans des encoches).

Le rotor des machines asynchrones est un cylindre plein constitué aussi de tôles feuilletées mais peut revêtir plusieurs formes, par principe il peut être juste un cylindre plein fait d'un matériau ferromagnétique. Il existe plusieurs types de rotor : rotor bobiné, rotor à cage d'écureuil, rotor à double cage, rotor à encoches profondes.

Le Rotor à cage d'écurieil est un ensemble de barres rigides reliées aux extrémités par des anneaux de court-circuit est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique (les tôles ferromagnétiques guident les lignes de champ et les barres conduisent les courants induits). Contrairement au rotor bobiné, aucun accès n'est possible au circuit rotorique. Il ne comporte ni balais, ni bagues, ni contact. Ce type de machine demande de ce fait beaucoup moins d'entretien. C'est le type de machine qui fera l'objet de cette étude et la figure II.1 illustre une machine à cage.



**Fig.II.1.** Machine asynchrone à cage [19]

## 2.2 Principe de fonctionnement

Une alimentation en tension des enroulements statoriques engendrera un courant circule dans ces même enroulements qui créerons un champ magnétique tournant. Il s'induit un f.e.m dans les barres rotoriques qui perçoivent cette variation du champ, puis un courant s'installe puisque les barres sont en court-circuit. L'interaction entre ce courant induit et le champ magnétique engendre un couple électromagnétique qui entrainera le rotor a la vitesse de :

$$\Omega_r = \frac{1}{p} (1 - g) \omega_s \text{ [rd/s]}$$

Avec :

$\Omega_r$  : vitesse du rotor

p : nombre de paires de pôles

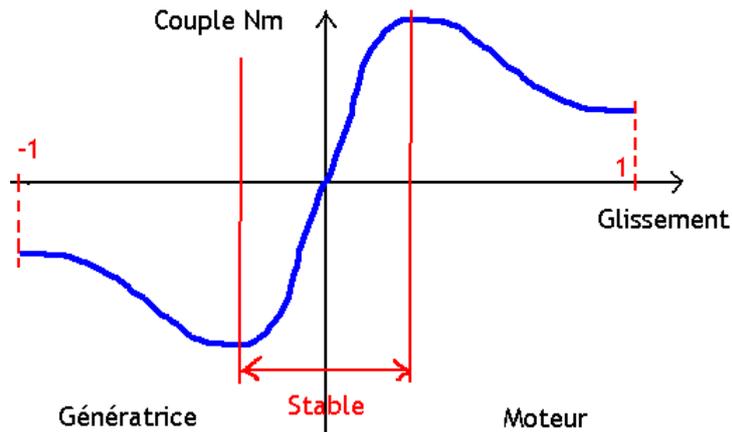
$\omega_s$  : Pulsation des grandeurs statoriques

$g$  : glissement et  $g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$

Lorsque le rotor est entraîné à la vitesse de synchronisme, les pertes dans l'enroulement et dans le stator sont fournies par le réseau et la puissance nécessaire pour compenser les pertes mécaniques est fournie par le dispositif qui entraîne la machine asynchrone. Si on augmente encore plus la vitesse du moteur asynchrone, le glissement  $g$  deviendra négatif et le rotor tourne en hyper synchronisme.

Le courant rotorique induit crée une f.m.m qui tourne dans l'espace à la vitesse de synchronisme déterminée par la fréquence du courant d'excitation, sa vitesse est égale  $(\omega_s - p\Omega_r)$  par rapport au rotor. La f.m.m rotorique tourne dans le sens opposé à celui du rotor et en interaction avec la f.m.m statorique crée un couple électromagnétique opposé au sens de rotation du rotor, le couple électromagnétique est « résistant » et la machine fonctionne en générateur. Le branchement d'un générateur asynchrone sur le réseau ne présente pas de difficultés. On fait tourner le rotor à une vitesse voisine de la vitesse de synchronisme et dans le même sens dans lequel tourne le flux. Lors du branchement du générateur sur le réseau les mêmes phénomènes se produisent que lors du branchement des transformateurs et des moteurs asynchrones, la variation de la puissance active fournie par le générateur au réseau est obtenue par la variation de la puissance mécanique fournie à l'arbre du générateur [20].

Les générateurs asynchrones sont utilisés, le plus souvent dans les centrales hydrauliques et dans les installations éoliennes. Si le générateur asynchrone doit fonctionner séparément sur un réseau extérieur, le courant magnétisant peut être obtenu lors de l'auto-excitation du générateur. Donc, il faut connecter aux bornes de son stator une batterie de condensateurs convenablement choisie et faire tourner le rotor à la vitesse nécessaire. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable à l'auto-excitation d'un générateur asynchrone. Le circuit extérieur du stator étant ouvert, le flux magnétique rémanent crée dans l'enroulement statorique une f.m.m sous l'action de laquelle un courant circulera vers les condensateurs renforçant ainsi le flux rotorique. Dans les générateurs asynchrones à auto-excitation, c'est la batterie de condensateurs qui représente la partie la plus coûteuse de l'installation [20].



**Fig.II.2.** Caractéristique de couple MAS

### 2.3 Avantages et inconvénients de la MAS à cage

Les points forts de la machine asynchrone à cage par rapport aux autres types de machines électriques sont :

- Robustesse et Facilité d'entretien : absence de système balais bagues pour le rotor.
- Faible prix
- Rendement élevé
- Faible encombrement

En contrepartie de ses atouts ses principaux inconvénients sont :

- Grande consommation d'énergie réactive
- Aucune accessibilité au rotor
- Mauvais refroidissement

### 3. Identification de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Les essais d'identification ont été conduits sur la machine asynchrone à cage dont les caractéristiques et la plaque signalétique sont données ci-dessous :

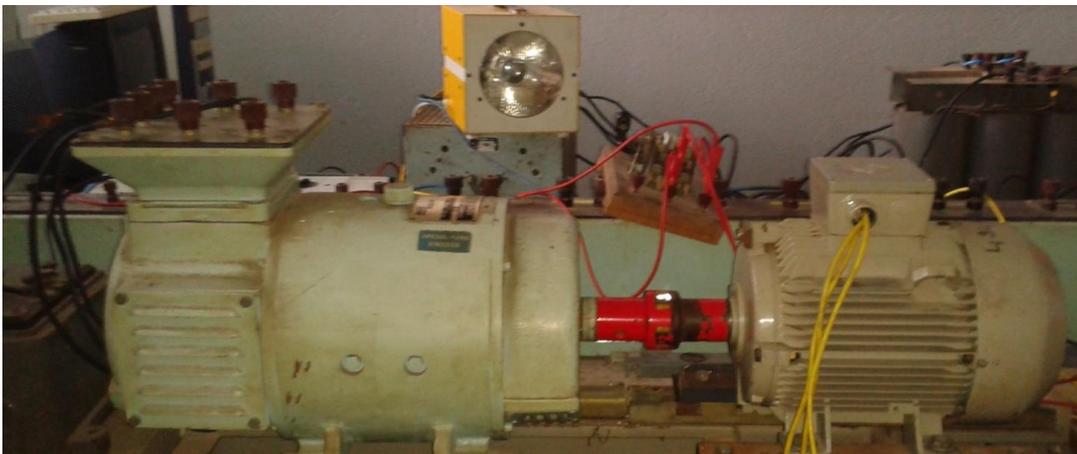
#### 3.1 Plaque signalétique de la MAS

<b>Fabricant</b> :ELECTRO-INDUSTRIES (Algérie)	
<b>Puissance nominale</b> :4kW	
Tension nominale :	220/380 V
Courant nominal :	 5,2/8,8 A
Facteur de puissance : $\cos\varphi = 0.83$	
Nombre de pôles : 4	
Fréquence : 50 Hz	

#### 3.2 Présentation du banc d'essai

Le banc expérimental d'essai comporte la machine asynchrone à cage couplé mécaniquement à une machine à courant continu utilisée pour l'entraînement.

Les images suivantes du banc d'essai montrent les machines utilisées pour les essais expérimentaux de l'autoamorçage et du raccordement au réseau de la MAS à cage.



**Fig.II.3.** Photo du banc d'essai

Caractéristiques de la MCC :

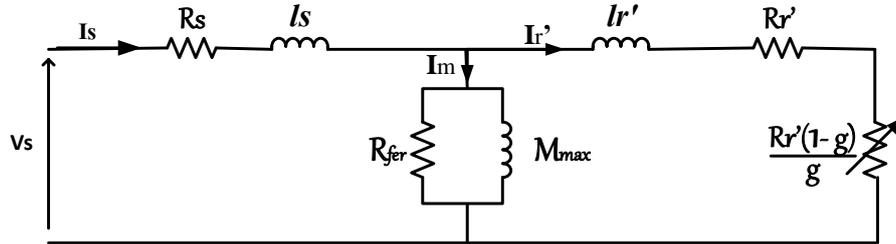
Puissance : 3,5 kW

Tension nominale : 110 V

Vitesse nominale : 1500 tr/min

### 3.3 Schéma équivalent par phase de la MAS à cage

La figure II.4 présente le schéma équivalent d'une phase de la machine asynchrone à cage.



**Fig.II.4.** Schéma équivalent par phase ramené au stator

$R_r' \left(\frac{1-g}{g}\right)$  est une résistance fictive qui traduit la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.

### 3.4 Essais d'identification

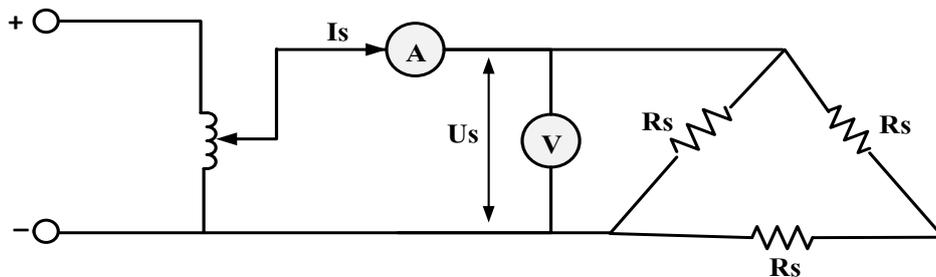
Afin d'identifier les paramètres du modèle de la machine asynchrone à cage, on effectue des essais qui nous permettent de déterminer les éléments du schéma équivalent .

Tous les essais ont été conduits pour un montage en triangle des bobines statoriques de la machine.

#### 3.4.1 Essai en courant continu

Pour mesurer la valeur de la résistance d'une phase statorique, on effectue un essai en courant continu et on réalise la mesure par une méthode volt-ampérométrique.

Le schéma suivant représente le montage de l'essai :



**Fig.II.5.** Schéma de l'essai en courant continu

D'après la loi d'Ohm, on a :

$$R_{seq} = \frac{U_s}{I_s} = \frac{9}{10} = 0.9 \Omega$$

Puis par la loi des mailles et la loi des nœuds :

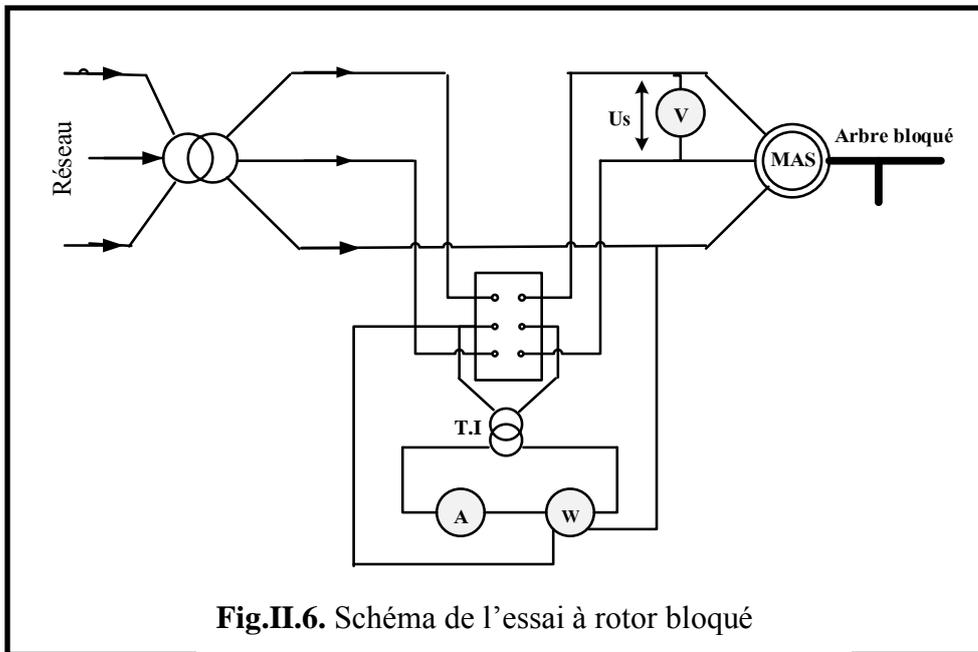
$$R_{seq} = \frac{2}{3}R_s \Rightarrow R_s = \frac{3}{2}R_{seq} \Rightarrow R_s = 1.35 \Omega$$

### 3.4.2 Essai à rotor bloqué

Par un essai à rotor bloqué, on peut obtenir un glissement unitaire et une valeur de courant magnétisant négligeable due à la faible tension aux bornes de la branche de magnétisation, ce qui nous permet de déterminer la valeur de la résistance rotorique ramenée au stator et les inductances de fuites statorique et rotorique. La méthode de mesure est basée sur la méthode des deux wattmètres mais l'adjonction d'un inverseur de phase nous permet de faire l'économie d'un wattmètre. Le circuit de mesure passe par transformateur d'intensité.

Grâce à cet essai nous déterminons la résistance rotorique ramené au stator ainsi que la somme des inductances de fuite.

La figure II.6 montre le schéma du montage :



**Fig.II.6.** Schéma de l'essai à rotor bloqué

Nous déterminons la puissance et la tension au courant nominal :

$$P_{cc} = 620 \text{ W} \quad I_{cc} = 15 \text{ A} \quad v_{cc} = 48,5 \text{ V}$$

$$P_{cc} = (R_s + R'_r)I_{cc}^2 \Rightarrow R'_r = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} - R_s \Rightarrow R'_r = 1,405 \Omega$$

$$\frac{v_{cc}}{I_{cc}} = \sqrt{(R_s + R_r')^2 + (l_s + l_r')^2 \omega_s^2} \Rightarrow (l_s + l_r') = \frac{\sqrt{\frac{v_{cc}^2}{I_{cc}^2} - (R_s + R_r')^2}}{\omega_s}$$

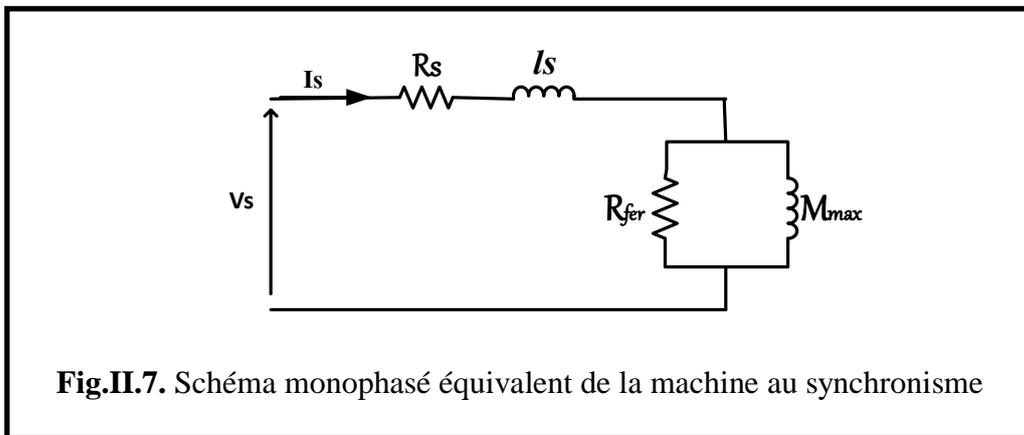
$$\Rightarrow (l_s + l_r') = 0,0092 \text{ H}$$

Les fuites statoriques et rotoriques seront considérées égales :

$$l_s = l_r' = \frac{0,0092}{2} = 0,0046 \text{ H}$$

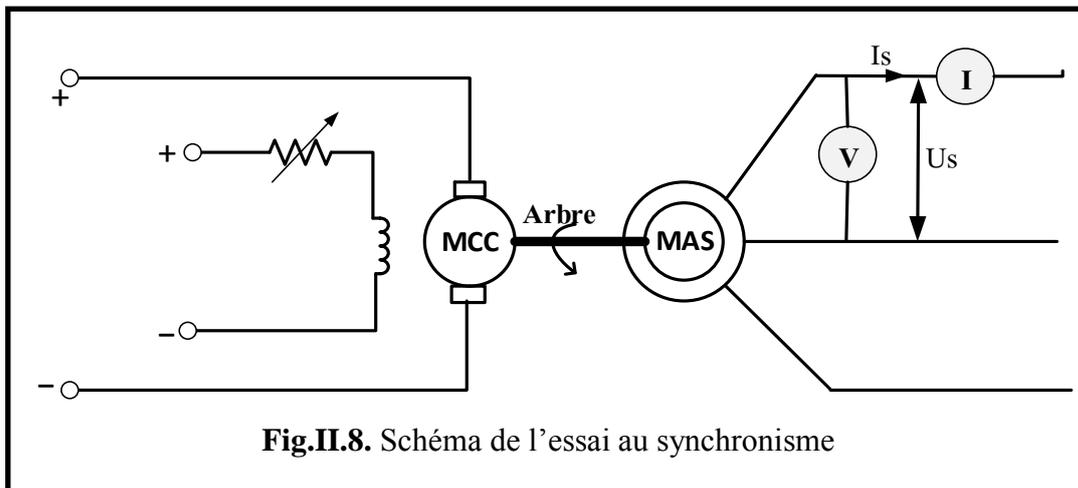
### 3.4.3 Essai au synchronisme

Dans cet essai la machine est entraînée à vitesse synchrone par la MCC, soit à 1500 tr/min, le glissement est donc nul et le rapport  $R_r'/g$  devient infini. La partie rotorique du circuit devient un circuit ouvert, et le courant passe donc totalement dans la branche de magnétisation.



**Fig.II.7.** Schéma monophasé équivalent de la machine au synchronisme

La figure II.8 présente le schéma du montage utilisé pour l'essai au synchronisme :



**Fig.II.8.** Schéma de l'essai au synchronisme

L'essai au synchronisme nous permet de tracer la caractéristique  $\Phi_{max} = f(|i_m|)$  de la machine par la mesure de la tension et du courant statorique.

D'après la loi de Lenz, on a :  $v_s = -\frac{d\Phi}{dt}$

Donc si l'on considère que les tensions et les flux sont des sinusoïdes parfaites on peut écrire :

$$v_s = -j\omega_s \Phi \quad \text{ce qui en module nous amène à : } |v_s| = | -j\omega_s \Phi |$$

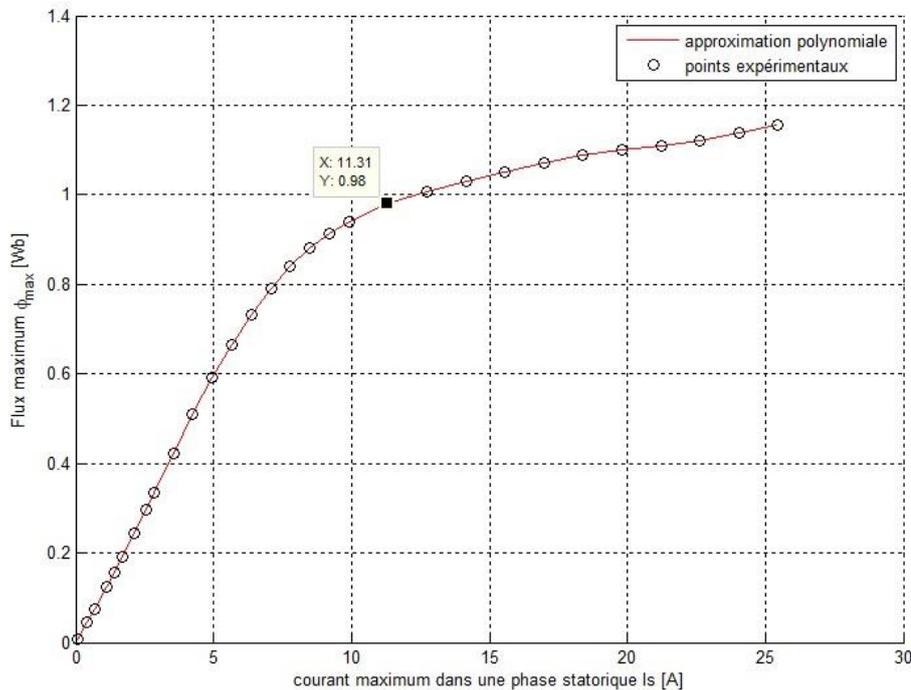
$$V\sqrt{2} = \omega_s \Phi_{max} \Rightarrow \Phi_{max} = \frac{\sqrt{2}V}{\omega_s}$$

Avec :

$v_s$  : Tension d'une phase statorique à glissement nul.

V : Valeur efficace de la tension statorique.

$\Phi_{max}$  : Flux magnétisant maximal.



**Fig.II.9.** Flux en fonction du courant magnétisant

Ce qui nous permet de déduire l'inductance de magnétisation maximale relevée à partir de la courbe au coude de saturation  $M_{max} = \frac{\Phi_{max}}{|i_m|} = \frac{0.993}{11.31} = 0.087 H$

Afin d'obtenir une courbe lisse, et de pouvoir l'utiliser dans le modèle de simulation qui sera abordé plus loin, nous effectuons une interpolation polynomiale d'ordre 8 grâce à la méthode des moindres carrés sur le logiciel MATLAB. Méthode qui minimise la somme quadratique des écarts de mesures. Le polynôme d'interpolation et ses coefficients sont donnés ci-dessous tel que  $\Phi_{max} = f(|i_m|)$  et que à vide le courant de phase est le même que le courant magnétisant :

$$\begin{aligned} \Phi_{max} = & -0.000000000708485 |i_s|^8 + 0.000000071550851 |i_s|^7 - 0.000002844574681 |i_s|^6 \\ & + 0.000054870053229 |i_s|^5 - 0.000484176092551 |i_s|^4 + 0.000911459992701 |i_s|^3 \\ & + 0.005565213153085 |i_s|^2 + 0.104346801687798 |i_s|^1 - 0.000028613012548 \end{aligned}$$

Les essais d'identification, essai en courant continu, essai au synchronisme, et essai à rotor bloqué nous ont permis de déterminer les paramètres de la machine asynchrone à cage du laboratoire afin de les utiliser pour les simulations, et de valider le modèle après comparaison des résultats expérimentaux lors de l'autoamorçage et du raccordement au réseau.

#### 4. Conclusion

---

Dans ce chapitre nous avons en premier lieu donné une brève description de la constitution de la machine asynchrone à cage. Nous avons abordé le principe de fonctionnement de la machine asynchrone à cage en génératrice. Nous avons discuté les avantages et les limites de ce type de machines, nous nous sommes ensuite intéressés à l'identification des paramètres de la machine que nous utiliserons pour les essais pratiques et les simulations qui seront abordés dans le chapitre suivant.

## *CHAPITRE III*

---

Modélisation et Etude du  
fonctionnement de la génératrice à cage

## *1. Introduction*

---

Nous aborderons dans ce chapitre la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, d'abord dans un régime linéaire dans le repère diphasé de Park. Puis nous développerons dans ce modèle par une méthode de prise en compte du phénomène de saturation, en utilisant les paramètres de la machine identifiée dans le chapitre précédent. On réalisera les simulations sur le logiciel MATLAB du fonctionnement de la machine, d'abord en auto-amorçage, puis dans un raccordement au réseau, et comparerons les relevés expérimentaux aux résultats de ces simulations.

## *2. Modélisation de la MAS à cage*

---

On ramènera le système de bobinage triphasé qui existe dans la machine à un modèle diphasé équivalent ceci en s'assurant que la puissance instantanée est conservée et que la puissance complexe l'est aussi. Nous adopterons la transformation de R.H. Park qui remplit ces deux conditions et nous permet le passage du système triphasé au système biphasé dans la base de Park. Cependant, dans un premier temps on adoptera les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les forces magnétomotrices sont sinusoïdales, donc les harmoniques d'espaces sont négligés.
- L'entrefer est supposé constant (épaisseur constante).
- Les pertes ferromagnétiques sont supposées inexistantes (Courants de Foucault et pertes par hystérésis nuls).
- La cage d'écureuil est assimilée à un bobinage triphasé équilibré.
- L'effet de la température sur les paramètres de la machine est négligé.
- Le flux est une fonction linéaire du courant (le circuit magnétique de la machine ne sature pas).

## 2.1 Equations électriques générales de la machine

Sous forme matricielle les équations des tensions statoriques et rotoriques se présentent comme suit :

$$\text{Au stator :} \quad [v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Au rotor :} \quad [v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{III.2})$$

Les notations :

- s, r : désignent respectivement le stator et le rotor.
- abc : désignent les trois phases du stator ou les trois phases auxquelles le rotor à cage a été assimilé : a, b, et c.

Avec :

$$\text{Les vecteur des tensions statoriques et rotoriques:} \quad [v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad [v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\text{Les courants statoriques et rotoriques:} \quad [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\text{Les flux totaux statoriques et rotoriques :} \quad [\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

$$\text{Les matrices des résistances :} \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

En vertu des hypothèses que nous avons adoptées, on peut écrire les relations entre flux et les courants :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)][i_{rabc}] \quad (\text{III.3})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)][i_{sabc}] \quad (\text{III.4})$$

Avec les matrices inductances :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

Les matrices des inductances mutuelles stator- rotor  $[M_{sr}(\theta)]$  et rotor – stator  $[M_{rs}(\theta)]$  sont :

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

$m_{sr}$  : Maximum d'inductance mutuelle entre le stator et le rotor.

$\theta$  : Angle déterminant la position angulaire du rotor par rapport au stator.

En introduisant les équations de flux III.3 et III.4 dans celles des tensions III.1 et III.2 on peut écrire le système :

$$[v_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][i_{sabc}]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}(\theta)][i_{rabc}]) \quad (\text{III.5})$$

$$[v_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][i_{rabc}]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}(\theta)][i_{sabc}]) \quad (\text{III.6})$$

Le rotor étant en court-circuit nous pouvons écrire que:

$$[v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## 2.2 Modèle diphasé équivalent de la machine asynchrone (modèle de R.H Park)

Dans un souci de simplification l'analyse de circuits triphasés, la transformation de R.H Park réduit les grandeurs triphasés alternatives dépendantes du temps qui composent le système différentiel régissant le fonctionnement de la machine, en un système de grandeurs diphasé indépendantes du temps. Ce qui a pour effet, par un choix de variables adéquat, de faciliter les calculs avant d'effectuer la transformation inverse pour récupérer les résultats des tensions, courants et flux réels triphasés. Les axes d (direct) et q (quadrature) viennent alors se positionner par rapport aux axes triphasés comme le montre la figure III.1.



Avec :

$$\begin{aligned} [v_{abc}] & \quad \text{Grandeurs dans la base triphasée a, b, c} \\ [v_p] & \quad \text{Grandeurs dans la base de Park} \end{aligned}$$

Et :

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

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

Avec l'angle  $\theta_s$  qui intervient pour les grandeurs au stator, l'équation III.1 devient :

$$\begin{aligned} [p(\theta_s)][v_{sp}] &= [R_s][p(\theta_s)][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[p(\theta_s)][\Phi_{sp}] \\ [v_{sp}] &= [R_s][i_{sp}] + [p(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt}[p(\theta_s)][\Phi_{sp}] \\ &= [R_s][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sp}] + [p(\theta_s)]^{-1} \left( \frac{d}{dt}[p(\theta_s)] \right) [\Phi_{sp}] \end{aligned}$$

En effectuant le calcul du dernier terme de cette équation on obtient :

$$\frac{d}{dt}[p(\theta_s)] = -\frac{d\theta_s}{dt} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta_s & \cos \theta_s \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} \left( \frac{d}{dt}[p(\theta_s)] \right) = -\frac{2}{3} \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \sin \theta_s & \cos \theta_s \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & \sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} \left( \frac{d}{dt}[p(\theta_s)] \right) = -\frac{2}{3} \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2} \\ 0 & -\frac{3}{2} & 0 \end{bmatrix} = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} \left( \frac{d}{dt} [p(\theta_s)] \right) [\Phi_{sp}] = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{so} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix}$$

$$[v_{sp}] = [R_s][i_{sp}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sp}] + \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$[v_{sp}] = \begin{bmatrix} v_{so} \\ v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad [i_{sp}] = \begin{bmatrix} i_{so} \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{sp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{so} \\ \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix}$$

Les équations du stator exprimées dans la base de Park ou repère (dq0) sont donc :

$$\begin{aligned} v_{so} &= R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \\ v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq} \\ v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} \end{aligned}$$

Par la même démarche de calcul appliquée aux équations du rotor en faisant intervenir  $\theta_r$  on aboutit aux équations du rotor exprimées dans le repère (dq0):

$$\begin{aligned} v_{ro} &= R_r i_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \\ v_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} \\ v_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd} \end{aligned}$$

Ou sous la forme matricielle :

$$[v_{rp}] = [R_r][i_{rp}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rp}] + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$[v_{rp}] = \begin{bmatrix} v_{ro} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} \quad [i_{rp}] = \begin{bmatrix} i_{ro} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ro} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix}$$

Puisque nous considérons que le système est équilibré, les grandeurs homopolaires sont donc toutes nulles et nous pouvons écrire :

$$v_{s0} = 0 \quad i_{s0} = 0 \quad \Phi_{s0} = 0 \quad , \quad v_{r0} = 0 \quad i_{r0} = 0 \quad \Phi_{r0} = 0$$

Et réduire les vecteurs  $[v_{sp}]$ ,  $[i_{sp}]$ ,  $[\Phi_{sp}]$  et  $[v_{rp}]$ ,  $[i_{rp}]$ ,  $[\Phi_{rp}]$  tels que :

$$[v_{sp}] = \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad [i_{sp}] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{sp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix}$$

$$[v_{rp}] = \begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} \quad [i_{rp}] = \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix}$$

Les expressions des flux en fonction des courants dans la base de R.H Park s'expriment de la façon suivante:

$$\Phi_{sd} = \mathcal{L}_s i_{sd} + \mathcal{M} i_{rd} \quad (III.9)$$

$$\Phi_{sq} = \mathcal{L}_s i_{sq} + \mathcal{M} i_{rq} \quad (III.10)$$

$$\Phi_{rd} = \mathcal{L}_r i_{rd} + \mathcal{M} i_{sd} \quad (III.11)$$

$$\Phi_{rq} = \mathcal{L}_r i_{rq} + \mathcal{M} i_{sq} \quad (III.12)$$

Ou sous forme matricielle en les regroupant suivant l'axe d et q :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_s & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & \mathcal{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sq} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_s & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & \mathcal{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

Avec :

$$\mathcal{L}_s = L_s - M_s \quad \text{Inductance propre cyclique du stator}$$

$$\mathcal{L}_r = L_r - M_r \quad \text{Inductance propre cyclique du rotor}$$

$$\mathcal{M} = \frac{3}{2} m_{sr} \quad \text{Inductance mutuelle cyclique}$$

En combinant les systèmes d'équations, on peut écrire les équations III.7 et III.8 sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s \mathcal{M} \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s \mathcal{M} & 0 \\ 0 & -\omega_r \mathcal{M} & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r \mathcal{M} & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & \mathcal{M} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & \mathcal{M} & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Avec :  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  et  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$

À des fins de simplification du modèle pour des commodités de calcul selon l'application souhaité, le repère (dq) peut être lié:

- Au stator
- Au rotor
- Au champ tournant

Pour simplifier notre modèle davantage on considèrera le repère (dq) lié au stator et on écrit que :  $\theta_s = \theta - \theta_r$ ,  $\theta_s = 0$ ,  $\theta_r = -\theta$  donc  $\omega_s = 0$   $\omega_r = -\omega$

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r \mathcal{M} & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r \mathcal{M} & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & \mathcal{M} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & \mathcal{M} \\ \mathcal{M} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & \mathcal{M} & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

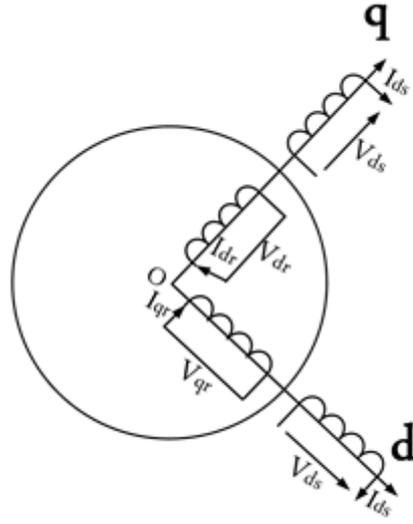


Fig.III.2 . Modèle de de Park de la MAS

### 2.3 Expression du couple électromagnétique de la machine

La puissance électrique de la machine s'exprime de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 P_e &= v_{sabc}^T i_{sabc} = v_{sp}^T i_{sp} = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} + v_{so} i_{so} \\
 &= \left( R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \right) i_{sd} + \left( R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \right) i_{sq} + \left( R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \right) i_{so} \\
 &= \{ R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2 + R_s i_{so}^2 \} + \left\{ i_{sd} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + i_{so} \frac{d\Phi_{so}}{dt} \right\} + \{ \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \}
 \end{aligned}$$

Avec :

$\{ R_s i_{sd}^2 + R_s i_{sq}^2 + R_s i_{so}^2 \}$  : représente les pertes joules.

$\left\{ i_{sd} \frac{d\Phi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + i_{so} \frac{d\Phi_{so}}{dt} \right\}$  : correspond à la puissance électromagnétique stockée.

$\{ \omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \}$  : représente la puissance transformée.

Donc

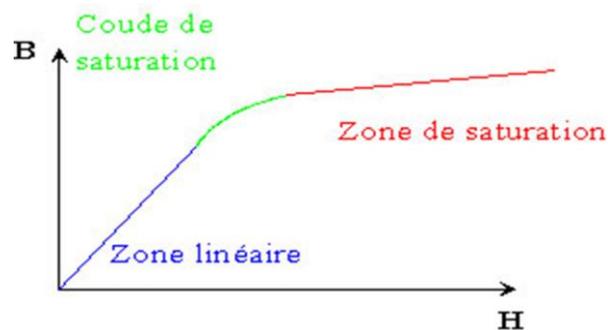
$$C_{em} = \frac{\omega_s (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd})}{\Omega_s} = p (\Phi_{sd} i_{sq} - \Phi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{III.17})$$

## 2.4 Modèle de la machine asynchrone à cage en régime saturé

Le modèle linéaire de la machine asynchrone à cage fonctionne parfaitement en moteur, mais de nombreux travaux ont prouvé les limites de ce modèle dans un fonctionnement génératrice [21, 22, 23, 24], notamment pour les simulations de l'auto-amorçage ou il s'agit de retrouver les tensions aux points de fonctionnements. En effet, comme le modèle linéaire ne suppose pas de saturation, le flux reste donc toujours proportionnel au courant et donc plus le courant augmente, plus le flux augmente et la tension fait de même. Les tensions n'atteignent jamais de régime permanent, augmentent d'une manière exponentielle et divergent très vite. Cela ne reflète bien évidemment pas la réalité physique. La saturation est donc indispensable au fonctionnement de la machine asynchrone en générateur et sa prise en compte dans la modélisation l'est tout autant.

C'est pour cette raison que nous nous dirigerons dans la partie suivante vers le modèle de la machine asynchrone à cage en régime saturé.

Le matériau se sature lorsque sa perméabilité diminue avec le degré d'induction magnétique, c'est ce qui donne cette forme concave sur une caractéristique de magnétisation  $B(H)$  :



**Fig.III.3.** Courbe de principe d'une caractéristique de magnétisation  $B(H)$

L'effet de saturation engendre un phénomène de couplage magnétique entre les enroulements d'axe d et d'axe q (dans un modèle diphasé) qui, placés à  $90^\circ$  l'un de l'autre, ne devraient avoir aucune réaction mutuelle dans un régime linéaire. Aucun couplage ne se produit entre 2 bobinages perpendiculaires dans un régime non saturé. Cette inductance mutuelle d'effet croisé ou de cross-saturation ou encore d'inter-saturation qui apparait le circuit magnétique se sature joue un rôle non négligeable lors des régimes transitoires [16].

Plusieurs méthodes qui prennent en compte la saturation magnétique dans le modèle de Park ont été développées en se basant sur une modélisation mathématique du comportement non linéaire de la machine. Certaines méthodes adoptent l'ajustement de l'inductance de magnétisation: modèle des flux, modèle des courants... D'autres gardent l'hypothèse de non variation de l'inductance de magnétisation mais se basent sur le réajustement du flux magnétisant à l'aide de facteurs de saturation [22].

L'approche de modélisation que nous allons suivre se base sur la variation d'inductances de magnétisation en fonction du courant magnétisant. Nous déterminerons les expressions des inductances en séparant les flux suivant les axes d et q en flux de fuite et flux de magnétisant, tout en considérant les inductances de fuites constantes (le parcours du flux de fuite est dans l'air dont la perméabilité est constante).

Cette approche a l'avantage de faire apparaître les grandeurs d'état et facilite donc le traitement du problème par la mise du modèle sous forme d'équations d'état.

On décomposera les flux magnétiques en flux de fuite et flux utile tels que :

$$\Phi_{sd} = l_s i_{sd} + \Phi_{md} \quad (\text{III.18})$$

$$\Phi_{sq} = l_s i_{sq} + \Phi_{mq} \quad (\text{III.19})$$

$$\Phi_{rd} = l_r i_{rd} + \Phi_{md} \quad (\text{III.20})$$

$$\Phi_{rq} = l_r i_{rq} + \Phi_{mq} \quad (\text{III.21})$$

$l_s, l_r$  : Inductance de fuite statorique et rotorique respectivement.

On considèrera les courants magnétisants circulant dans la branche magnétisante du modèle de la machine :

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

Avec ses composantes suivant les deux axes d et q :

$$i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \quad (\text{III.22})$$

$$i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \quad (\text{III.23})$$

On pose les flux magnétisants :

$$\Phi_{md} = M_{st}i_{md} \quad (III.24)$$

$$\Phi_{mq} = M_{st}i_{mq} \quad (III.25)$$

Avec :  $M_{st}$ : Inductance magnétisante statique.

$$\Phi_{sd} = l_s i_{sd} + M_{st} i_{md} \quad (III.26)$$

$$\Phi_{sq} = l_s i_{sq} + M_{st} i_{mq} \quad (III.27)$$

$$\Phi_{rd} = -l_r i_{sd} + (l_r + M_{st}) i_{md} \quad (III.28)$$

$$\Phi_{rq} = -l_r i_{sq} + (l_r + M_{st}) i_{mq} \quad (III.29)$$

Les équations des tensions du modèle de Park de la machine font apparaître (équation III.7) les dérivées des flux par rapport au temps, en les substituant par leurs décompositions en flux de fuite et flux magnétisant (équations III.18 à III.21) on peut écrire :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (l_s i_{sd} + M_{st} i_{md}) - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq} \quad (III.30)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (l_s i_{sq} + M_{st} i_{mq}) + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} \quad (III.31)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} [-l_r i_{sd} + (l_r + M_{st}) i_{md}] - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} \quad (III.32)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} [-l_r i_{sq} + (l_r + M_{st}) i_{mq}] + \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rd} \quad (III.33)$$

En développant la dérivée du flux dans l'équation III.30 [15], [23]:

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = \frac{d}{dt} (l_s i_{sd} + M_{st} i_{md}) = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_{st} \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dM_{st}}{dt}$$

Puisque les inductances de fuite ont été supposées constantes :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_{st} \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dM_{st}}{dt}$$

Puisque  $M_{st}$  est fonction de  $|i_m|$  nous pouvons écrire :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_{st} \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dM_{st}}{d|i_m|} \frac{d|i_m|}{dt}$$

On posera :

$$M'_{st} = \frac{dM_{st}}{d|i_m|}$$

La dérivée du courant magnétisant est [14,20]:

$$\frac{d|i_m|}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} = \frac{i_{md}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt}$$

On aboutira à l'expression de la dérivée du flux :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_{st} \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} M'_{st} \left[ \frac{i_{md}}{|i_m|} \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt} \right]$$

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + \left[ M_{st} + M'_{st} \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt} + M'_{st} \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt}$$

$l_s \frac{di_{sd}}{dt}$  : Flux de fuite.

$\left[ M_{st} + M'_{st} \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \right] \frac{di_{md}}{dt}$  : Effet dû à la saturation suivant l'axe direct.

$M'_{st} \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \frac{di_{mq}}{dt}$  : Effet du courant de l'axe q sur le flux de l'axe d. Effet de saturation croisée.

On posera :

$M_d = M_{st} + M'_{st} \frac{i_{md}^2}{|i_m|}$  : Inductance magnétisante statique suivant l'axe d.

$M_q = M_{st} + M'_{st} \frac{i_{mq}^2}{|i_m|}$  : Inductance magnétisante dynamique suivant l'axe q.

$M_{dq} = M'_{st} \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|}$  : Inductance magnétisante d'effet croisé.

Et par la même démarche de calcul les dérivées des flux s'écriront :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = l_s \frac{di_{sd}}{dt} + M_d \frac{di_{md}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{III.34})$$

$$\frac{d\Phi_{sq}}{dt} = l_s \frac{di_{sq}}{dt} + M_q \frac{di_{mq}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \quad (\text{III.35})$$

$$\frac{d\Phi_{rd}}{dt} = -l_r \frac{di_{sd}}{dt} + (l_r + M_q) \frac{di_{md}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{mq}}{dt} \quad (\text{III.36})$$

$$\frac{d\Phi_{rq}}{dt} = -l_r \frac{di_{sq}}{dt} + (l_r + M_q) \frac{di_{mq}}{dt} + M_{dq} \frac{di_{md}}{dt} \quad (\text{III.37})$$

Dans le modèle linéaire et suivant l'hypothèse que la saturation n'existe pas dans le matériau, l'inductance magnétisante statique est constante et égale aux inductances magnétisantes d'axe d et d'axe q, et dans ce cas, l'inductance d'effet croisé  $M_{dq}$  est nulle. Cette inductance fait donc apparaître l'effet croisé (cross-saturation).

En introduisant dans le modèle de Park établi précédemment (équation III.15), les équations III.34 à III.37 on aboutit au système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s M_{st} \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s M_{st} & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (M_{st} + l_r) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (M_{st} + l_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & M_d & M_{dq} \\ 0 & l_s & M_{dq} & M_q \\ -l_r & 0 & l_r + M_d & M_{dq} \\ 0 & -l_r & M_{dq} & l_r + M_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III.38})$$

Etant donné notre choix de repère lié au stator ( $\omega_s = 0$ ), le modèle est d'autant plus simple et prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (M_{st} + l_r) \\ -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (M_{st} + l_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & M_d & M_{dq} \\ 0 & l_s & M_{dq} & M_q \\ -l_r & 0 & l_r + M_d & M_{dq} \\ 0 & -l_r & M_{dq} & l_r + M_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{III.39})$$

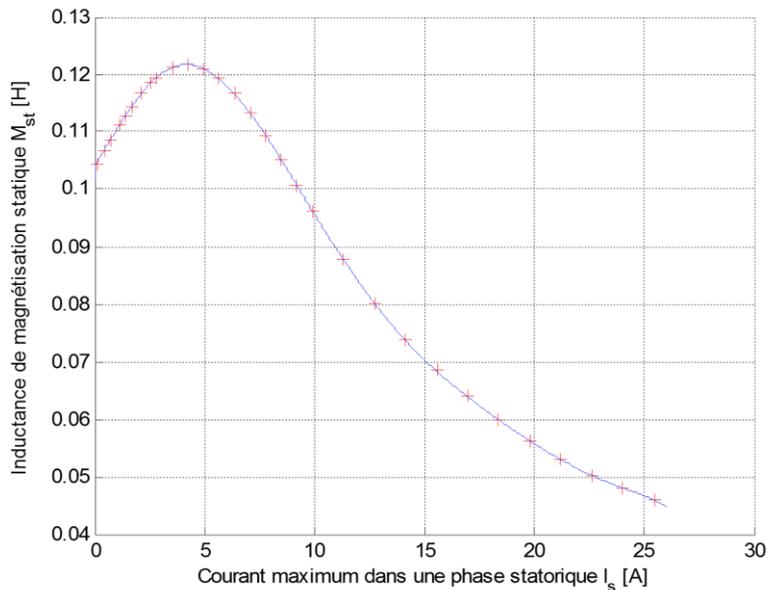
En introduisant les expressions des flux (équations III.26 et III.27) dans l'expression du couple électromagnétique (éq.III.17):

$$\begin{aligned} C_{em} &= p(\Phi_{sd}i_{sq} - \Phi_{sq}i_{sd}) \\ &= p((l_s i_{sd} + M_{st} i_{md})i_{sq} - (l_s i_{sq} + M_{st} i_{mq})i_{sd}) \end{aligned}$$

Le couple électromagnétique s'exprime donc par :

$$C_{em} = p M_{st}(i_{md}i_{sq} - i_{mq}i_{sd}) \quad (\text{III.40})$$

L'évaluation de  $\Phi_{max}$  en fonction du courant magnétisant par l'approximation polynomiale présentée précédemment  $\Phi_{max} = f(|i_m|)$  nous a amené à la courbe d'évolution de l'inductance statique  $M_{st}$  développée dans la modélisation et utilisée dans les simulations présentées plus loin.  $M_{st}$  en fonction du courant magnétisant  $I_m$  est représentée sur la figure.III.4  $M_{st} = f_1(i_m) = \frac{\Phi_{max}}{|i_m|}$  :



**Fig.III.4.** Evolution de l'inductance de magnétisation statique  $M_{st}$  en fonction du courant magnétisant

### 3. Auto-amorçage de la MAS à cage

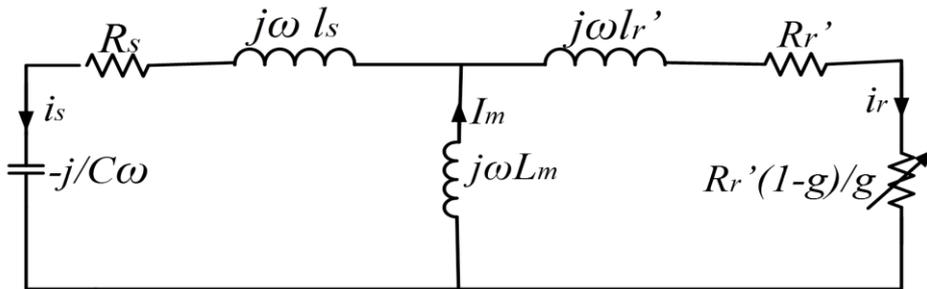
#### 3.1 Principe de l'auto-amorçage

Pour que la machine asynchrone s'amorce il est nécessaire de réunir deux conditions :

- L'existence d'une induction rémanente dans le circuit magnétique du rotor il suffit pour cela que le circuit ai été magnétisé au moins une fois, donc que la machine ai été mise sous tension au moins une fois.
- Une source d'énergie réactive : lorsqu'elle est raccordée au réseau, il lui fournit cette puissance réactive, mais en mode isolé un dispositif telle une batterie de condensateur est utilisée pour que la machine soit « auto-amorcée ».

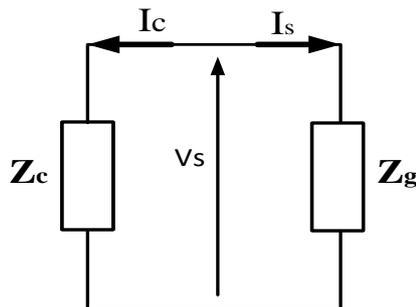
L'auto-amorçage de la MAS à cage se fait à l'aide de condensateurs qui avec le circuit de la génératrice forment un circuit RLC oscillant.

La figure III.5 présente le schéma équivalent par phase du générateur asynchrone auto-excité :



**Fig.III.5.**Schéma équivalent par phase du générateur en auto-amorçage

On peut réduire le schéma équivalent de l'auto-amorçage à un schéma contenant deux impédances,  $Z_g$  débitant sur une impédance de condensateur  $Z_c$  comme le montre la figure III.6ci-dessous :



**Fig.III.6.**Schéma réduit de l'auto-amorçage

On posera :

$$Z_s = R_s + j\omega_s l_s \quad \text{Impédance d'une phase statorique}$$

$$Z_r = \frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r \quad \text{Impédance d'une phase rotorique}$$

$$Z_m = j\omega_s M_{max} \quad \text{Impédance d'une phase statorique}$$

$$Z_g = Z_s + (Z_r \parallel Z_m) \quad \text{Impédance totale}$$

$$Z_c = -\frac{j}{C\omega_s} \quad \text{Impédance d'un condensateur}$$

D'après ce circuit :  $I_s = -I_c \quad \Rightarrow \quad \frac{V_s}{Z_g} = -\frac{V_s}{Z_c} \quad \Rightarrow Z_g + Z_c = 0$

Et :

$$\begin{cases} Z_g = R_s + j\omega_s l_s + \frac{j\omega_s M_{max} \left( \frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r \right)}{\frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r + j\omega_s M_{max}} \\ Z_c = -\frac{j}{C\omega_s} \end{cases}$$

On pose :

$$Z_{tot} = Z_g + Z_c = R_s + j\omega_s l_s + \frac{j\omega_s M_{max} \left( \frac{R'_r}{g} + j\omega_s l'_r \right)}{\frac{R'_r}{g} + j\omega_s (l'_r + M_{max})} - \frac{j}{C\omega_s}$$

Le phénomène d'amorçage de l'auto-excitation correspond au passage d'un état d'équilibre instable à un état d'équilibre stable [25], et la condition d'amorçage peut se résumer à  $Re(Z_{tot}) < 0$

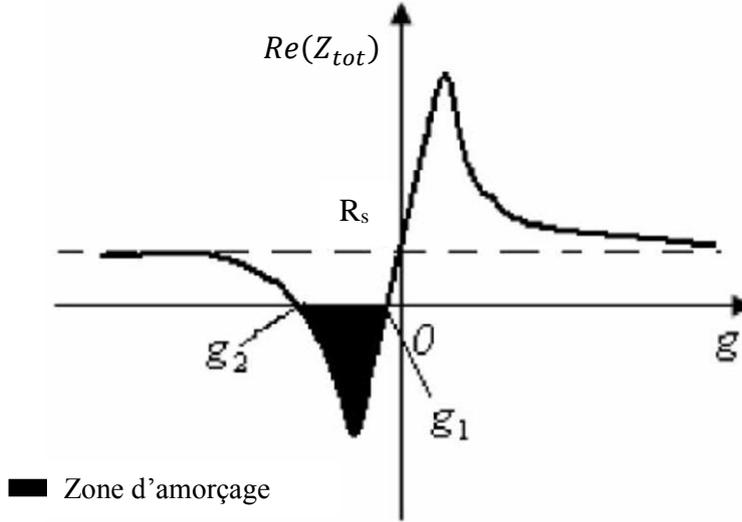
Le fonctionnement stable du générateur asynchrone auto-excité se traduit par l'équation suivante:

$$Z_{tot} = 0$$

$$Z_{tot} = Z_g + Z_c = 0 \quad \Rightarrow \begin{cases} Re(Z_{tot}) = 0 \\ Im(Z_{tot}) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Re(Z_{tot}) = R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 \frac{R'_r}{g}}{\omega_s^2 (l'_r + M_{max})^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} = 0 \\ Im(Z_{tot}) = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \frac{\omega_s M_{max} \left[ \omega_s^2 l'_r (M_{max} + l'_r) + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 \right]}{\omega_s^2 (l'_r + M_{max})^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2} = 0 \end{cases}$$

En étudiant l'évolution de  $Re(Z_{tot})$  en fonction du glissement  $g$ , on s'aperçoit qu'il existe deux valeur de  $g$  pour lesquelles  $Re(Z_{tot})$  est nulle :



**Fig.III.7.** Domaine d'auto-amorçage

Nous avons :  $Re(Z_{tot}) = R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 \frac{R'_r}{g}}{\omega_s^2 L_r'^2 + \left(\frac{R'_r}{g}\right)^2}$  En multipliant par  $\frac{g^2}{g^2}$  :

$$Re(Z_{tot}) = R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 R'_r g}{\omega_s^2 L_r'^2 g^2 + R_r'^2}$$

- Si  $g = g_1$  (très faible) et le terme  $\omega_s^2 L_r'^2 g^2$  est négligeable on a donc :  $\omega_s^2 L_r'^2 g^2 \approx 0$

Donc on peut écrire :  $Re(Z_{tot}) \cong R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 g}{R_r'}$

$$\lim_{g \rightarrow g_1} [Re(Z_{tot})] = 0 \Rightarrow R_s + \frac{\omega_s^2 M_{max}^2 g_1}{R_r'} = 0 \Rightarrow g_1 \cong -\frac{R_s R_r'}{\omega_s^2 M_{max}^2}$$

- Pour  $g = g_2$  (grande valeur de glissement), le terme  $\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2$  devient négligeable et on a :

$$Re(Z_{tot}) \cong R_s + \frac{M_{max}^2 R_r'}{(l_r' + M_{max})^2 g} \cong R_s + \frac{R_r'}{g}$$

Donc :  $\lim_{g \rightarrow g_2} [Re(Z_{tot})] = 0 \Rightarrow R_s + \frac{R_r'}{g_2} = 0 \Rightarrow g_2 = -\frac{R_r'}{R_s} \cong -1$

Ces deux valeurs limites de glissement nous permettent donc de déduire les capacités limites pour l'auto-excitation de la machine :

A partir de :

$$Im(Z_{tot}) = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \frac{\omega_s M_{max} \left[ \omega_s^2 l_r' (M_{max} + l_r') + \left( \frac{R_r'}{g} \right)^2 \right]}{\omega_s^2 (l_r' + M_{max})^2 + \left( \frac{R_r'}{g} \right)^2} = 0$$

On obtient l'expression de la capacité :

$$C = \frac{R_r'^2 + (l_r' + M_{max}) (\omega_s - \omega_r)^2}{\omega_s^2 R_r'^2 (l_s + M_{max}) + \omega_s^2 (\omega_s - \omega_r)^2 [l_s (l_r' + M_{max})^2 + M_{max} l_r' (l_r' + M_{max})]}$$

- Pour des très faibles valeurs de glissement  $g = g_1 \cong 0$  et  $\omega_s \cong \omega_r$  :

En multipliant par  $\frac{g^2}{g^2}$  on a :

$$Im(Z_{tot}) = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \frac{\omega_s M_{max} \left[ g^2 \omega_s^2 l_r' (M_{max} + l_r') + R_r'^2 \right]}{g^2 \omega_s^2 (l_r' + M_{max})^2 + R_r'^2}$$

$$\lim_{g \rightarrow g_1} [Im(Z_{tot})] = \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \omega_s M_{max} = 0$$

Et comme la vitesse  $\omega_r \cong \omega_s$  nous avons donc :

$$C_1 \cong \frac{1}{(l_s + M_{max}) \omega_s^2}$$

- Pour  $g = g_2 \cong -1$  (fort glissement) et  $\omega_s \cong \frac{\omega_r}{2}$  :

$$\omega_r \cong (1 - g_2) \omega_s \cong \frac{R_s + R_r'}{R_r'} \cong 2 \omega_s$$

En négligeant le terme  $\left( \frac{R_r'}{g} \right)^2$  :

$$Im(Z_{tot}) \cong \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \omega_s M_{max} \frac{l_r'}{(M_{max} + l_r')}$$

Et en admettant que  $l_r' \ll M_{max}$  le troisième terme  $\omega_s M_{max} \frac{l_r'}{(M_{max} + l_r')}$  devient  $\omega_s l_r'$  et :

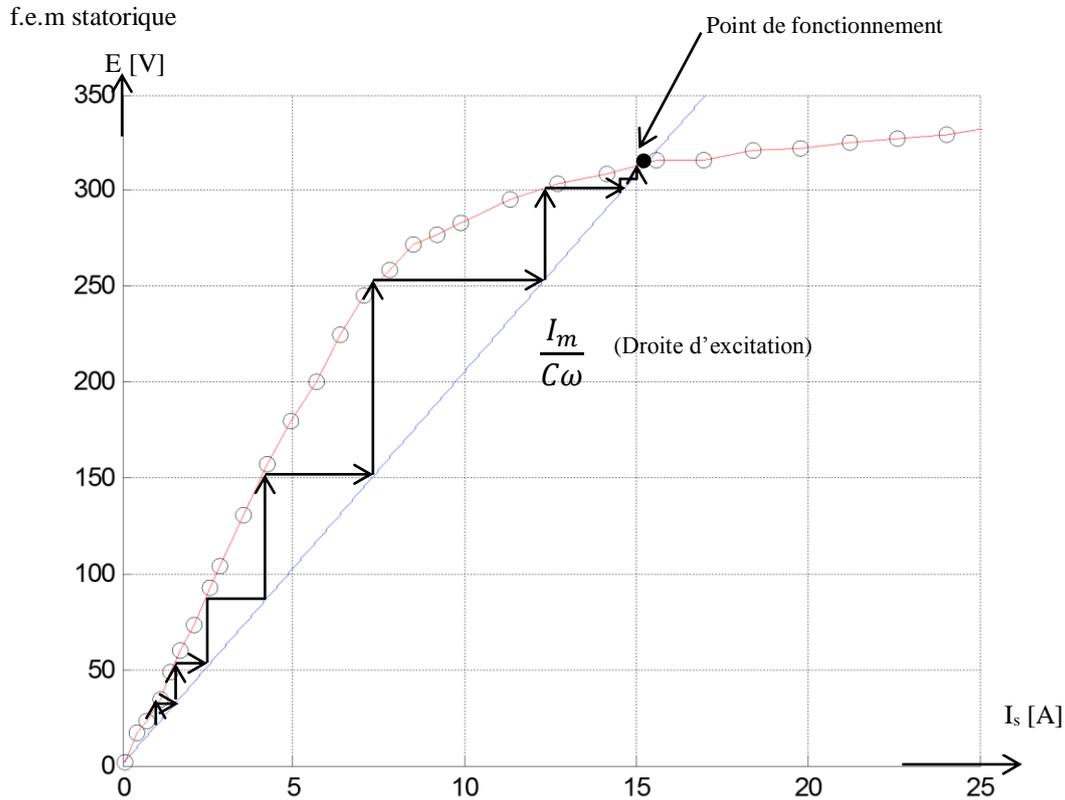
$$Im(Z_{tot}) \cong \omega_s l_s - \frac{1}{\omega_s C} + \omega_s M_{max} \frac{l_r'}{(M_{max} + l_r')}$$

De là on peut calculer :

$$C_2 \cong \frac{1}{(l_s + l_r) \omega_s^2}$$

La valeur de capacité  $C_1$  correspond a la resonance dans le circuit avec l'inductance statorique propre.

La valeur de capacité  $C_2$  correspond à la résonance dans le circuit avec l'inductance de fuite totale de la machine. En pratique ce n'est pas réalisable car la machine devra supporter une vitesse qui est égale au double de la vitesse synchrone.



**Fig.III.8** .Phénomène d'Auto-excitation

La figure III.8 représente l'évolution de la f.e.m statorique de la machine (en rouge), et la caractéristique externe de la capacité (droite d'excitation en bleu avec  $C=160\mu\text{F}$ ). 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, lorsque les capacités sont connectées 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 l'arrivée au point de fonctionnement (état d'équilibre stable).

Le point de fonctionnement est ainsi déterminé par la droite d'excitation (caractéristique de la capacité) et la caractéristique de magnétisation. Dans le modèle linéaire, l'inductance de magnétisation est supposée constante et la caractéristiques de magnétisation est linéaire et ne croise jamais la caractéristique de magnétisation de la machine [22,23].

### 3.2 Modèle de l'auto-amorçage (machine et banc de capacités associé)

Nous avons :

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

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

$$\text{Dans le repère de R. H. Park :} \quad [p(\theta_s)][i_{cp}] = \frac{d[p(\theta_s)][Q_{cp}]}{dt}$$

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

$$\text{Sachant que : } [Q_{cp}] = C [v_{cp}] \implies [i_{cp}] = C \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -Q_{cq} \\ Q_{cd} \end{bmatrix} + C \frac{d[v_{cp}]}{dt} \implies \frac{d[v_{cp}]}{dt} = \frac{[i_{cp}]}{C} - \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -Q_{cq} \\ Q_{cd} \end{bmatrix}$$

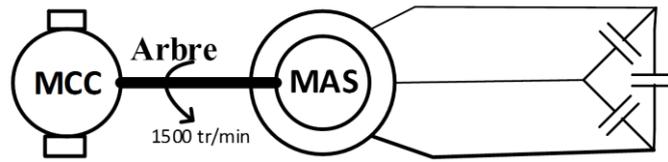
$$\text{Pour } \omega_s = 0 \text{ (repère de Park lié au stator), on peut écrire l'équation sous la forme : } \begin{cases} \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_{dc}}{C} \\ \frac{dv_{qc}}{dt} = \frac{i_{qc}}{C} \end{cases}$$

Le modèle d'état du système sous forme matricielle s'écrit donc de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} l_s & 0 & M_d & M_{dq} & 0 & 0 \\ 0 & l_s & M_{dq} & M_q & 0 & 0 \\ -l_r & 0 & (l_r + M_d) & M_{dq} & 0 & 0 \\ 0 & -l_r & M_{dq} & (l_r + M_q) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{dv_{sd}}{dt} \\ \frac{dv_{sq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 \\ R_r & -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (l_r + M_{st}) & 0 & 0 \\ \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (M_{st} + l_r) & -R_r & 0 & 0 \\ -1/c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/c & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \\ v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix}$$

### 3.3 Essais expérimentaux et simulations d'auto-amorçage

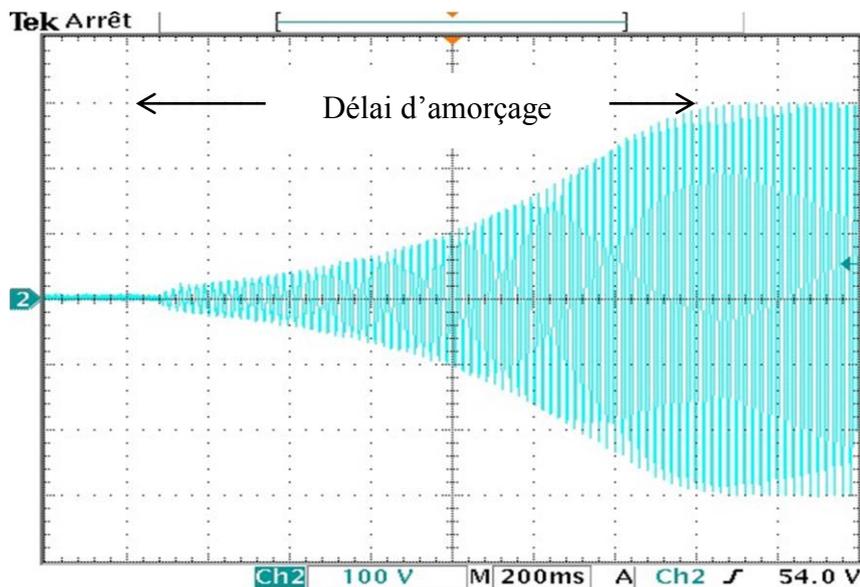
Le schéma de montage de l'essai est représenté sur la figure III.9



**FigIII.9.** Schéma de montage pour l'auto-amorçage

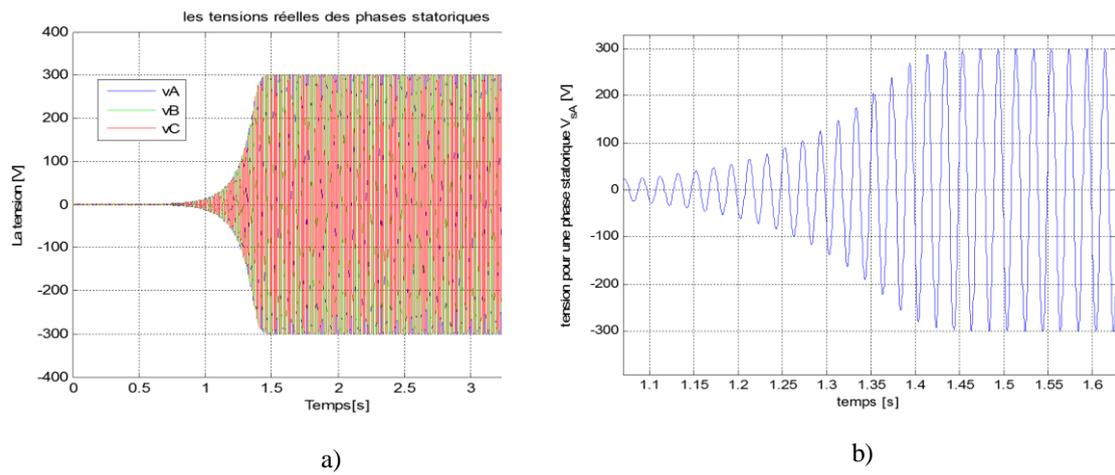
La valeur de la capacité utilisée lors de l'essai d'auto-amorçage est de  $198 \mu\text{F}$ . La mesure des courants sur l'oscilloscope s'est fait à travers un shunt de (5 ampères pour 100 milliVolts). La machine est entraînée à vitesse synchrone (1500tr/min).

Sur les figures qui suivent, on peut voir le relevé expérimental de la tension figure III.10 ainsi que celui du courant figure III.12 d'une phase du stator en fonction du temps de l'essai réalisé sur la machine asynchrone à cage identifiée précédemment. Les résultats donnés par la simulation sont représentés sur les figures III.11 et III.13 (respectivement tensions et courants).

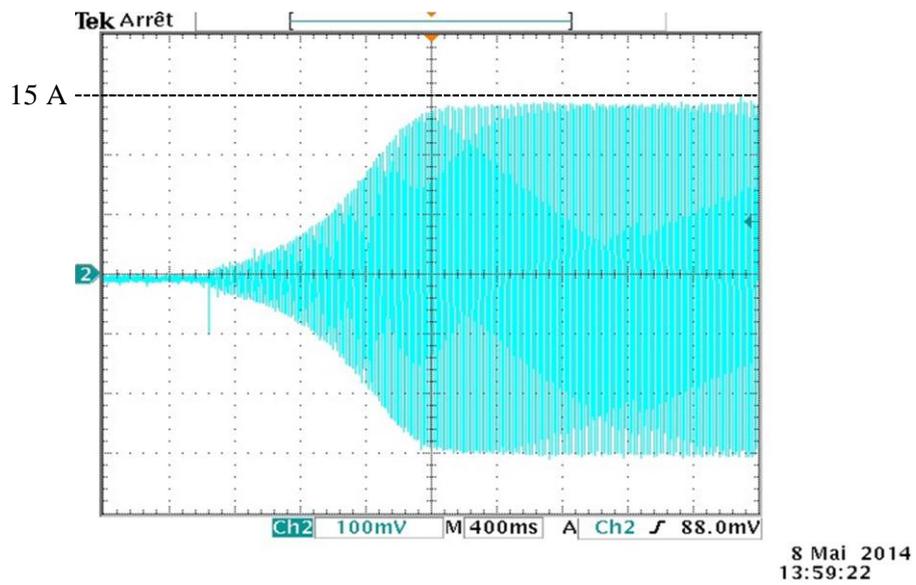


8 Mai 2014  
13:11:53

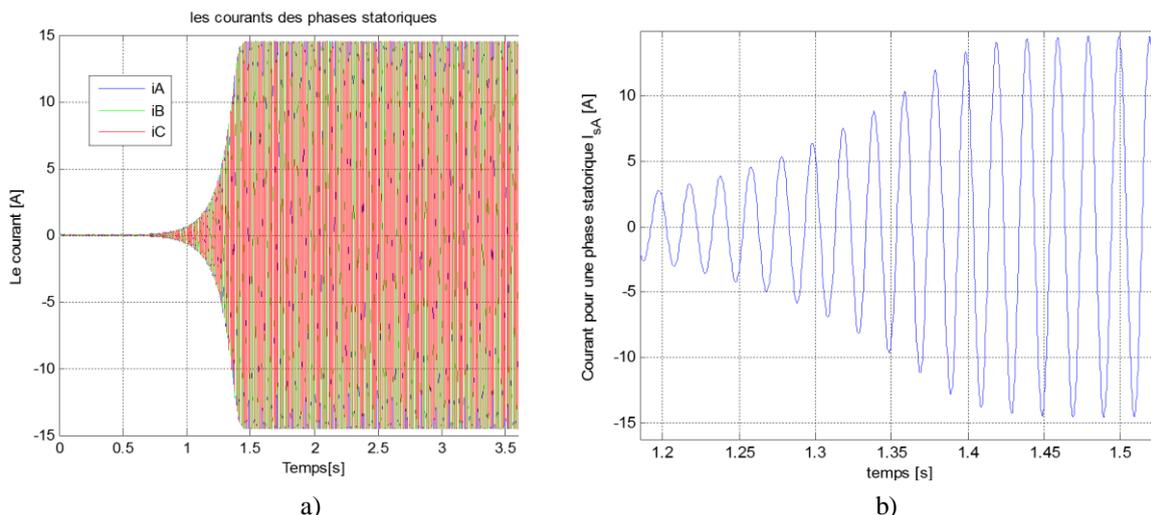
**Fig.III.10.** Evolution de la tension d'auto-amorçage (expérimentation)



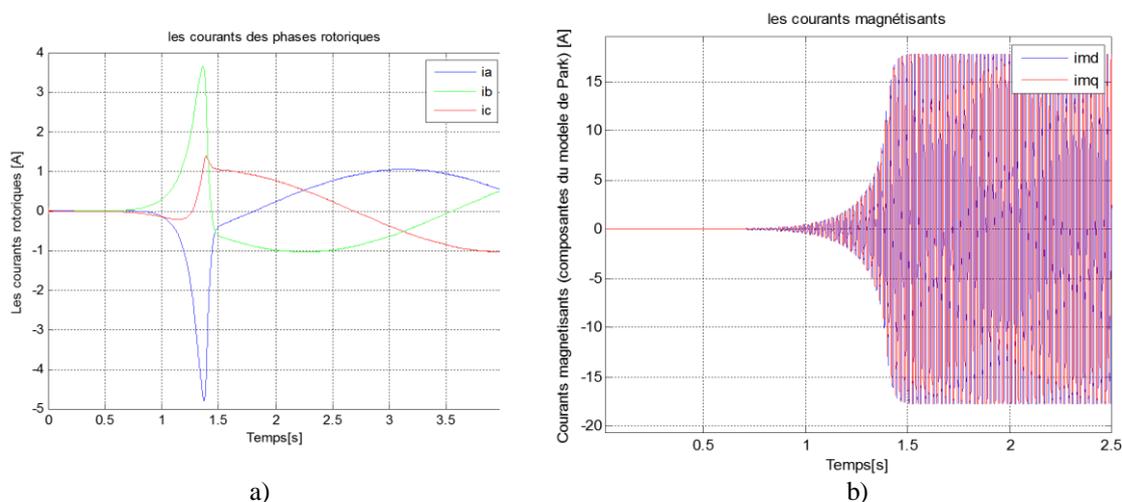
**Fig.III.11.** a) Evolution de la tension d’auto-amorçage (Simulation)  
b) Zoom pour une phase



**Fig.III.12.** Evolution du courant d’auto-amorçage (Expérimentation)



**Fig.III.13.** a) Evolution du courant statorique (Auto-amorçage par Simulation)  
 b) Zoom pour une phase statorique



**Fig.III.14.** a) Evolution des courants rotoriques (Auto-amorçage par Simulation)  
 b) Evolution des courants magnétisants (Auto-amorçage par Simulation)

On observe un pic sur les courbes d'évolution des courant rotoriques à l' instant où la machine s'amorce. Les courants atteignent un régime établi à une valeur faible (autour de 1 Ampère), on constate aussi que leur fréquence est très faible.

On remarque que les courants, tout autant que les tensions de la machine passent par un régime transitoire (un délai d'amorçage), ils augmentent d'une manière exponentielle avant que la machine n'atteigne la saturation. Là, ils rentrent dans leur régime permanent et leurs valeurs maximums se stabilisent à près de 15 Ampères pour le courant et de 300 Volts pour la tension en régime établi.

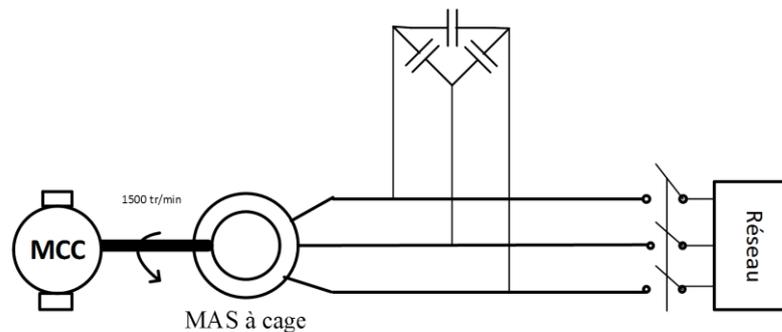
Le délai d'amorçage est le temps nécessaire aux courants de magnétisation pour atteindre la saturation et croiser la caractéristique des condensateurs.

Les différences entre les relevés expérimentaux et les simulations sont dues d'une part, aux différences entre les conditions initiales de ces dernières, à la tension rémanente, aux instants de capture de l'oscilloscope les erreurs de lecture et d'instrument commises lors des essais d'identification de la machine asynchrone à cage, courbe caractéristique de magnétisation, mesure des inductances, mesure des résistances.

Mais d'une manière générale la forme qu'adopte l'enveloppe des courants et des tensions est sensiblement la même, au même titre que les valeurs des courants et tensions atteintes pour ce point de fonctionnement ainsi que la durée du transitoire.

#### 4. Accrochage au réseau de la MAS à cage

En pratique autant que dans la simulation le couplage de la machine au réseau se fait de la manière suivante : La machine asynchrone à cage est d'abord entraînée à vitesse proche du synchronisme et ensuit amorcée à l'aide des condensateurs puis, le temps que les grandeurs atteignent leurs régimes établis, elle est couplée au réseau



**Fig.III.15.** Schéma de principe de la connexion de la machine à cage au réseau

Avant la connexion la machine est dans un régime auto-excité à vide ou les tensions des phases statoriques et les courants qui les traversent sont respectivement :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} V \sin(\omega t) \\ \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \\ \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} I \sin(\omega t + \alpha) \\ \sqrt{2} I \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \alpha) \\ \sqrt{2} I \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \end{bmatrix}$$

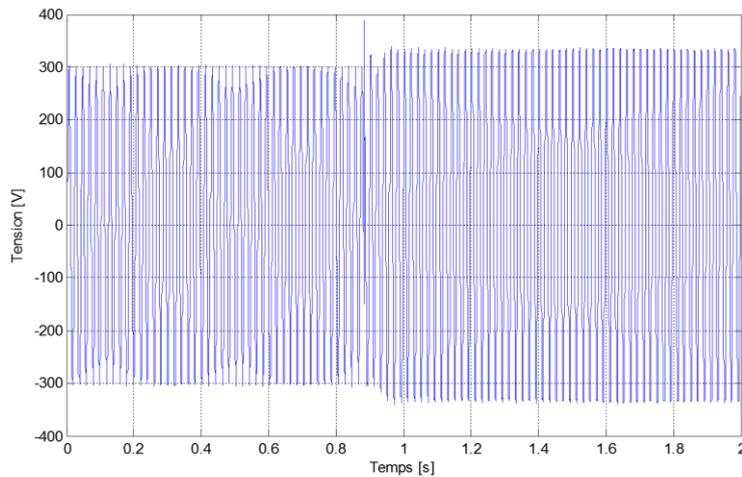
Où  $\alpha$  représente le déphasage des courants statoriques par rapport aux tensions statoriques de la machine.

Au moment de l'accrochage le réseau imposera sa tension et les tensions deviennent :

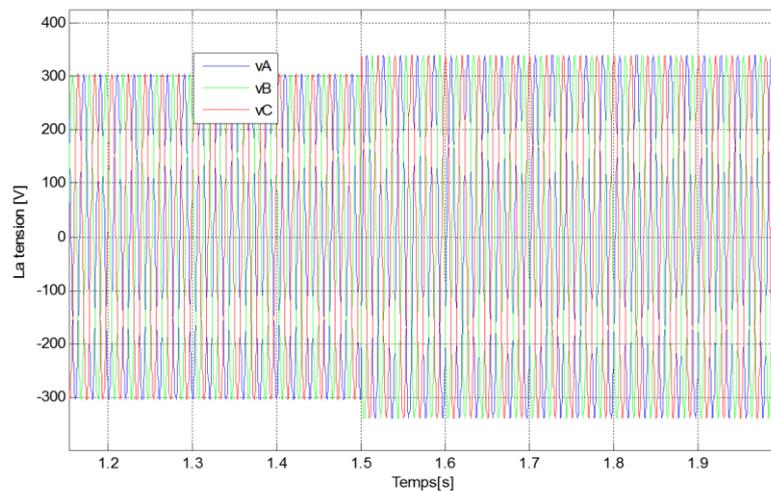
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} V \sin(\omega t + \varphi) \\ \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \varphi) \\ \sqrt{2} V \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \end{bmatrix}$$

Où  $\varphi$  est le déphasage des tensions du réseau par rapport aux tensions statoriques.

Les figures qui suivent illustrent l'évolution de la tension d'une phase statorique de la machine asynchrone lors de la connexion au réseau par expérimentation et par simulation respectivement.

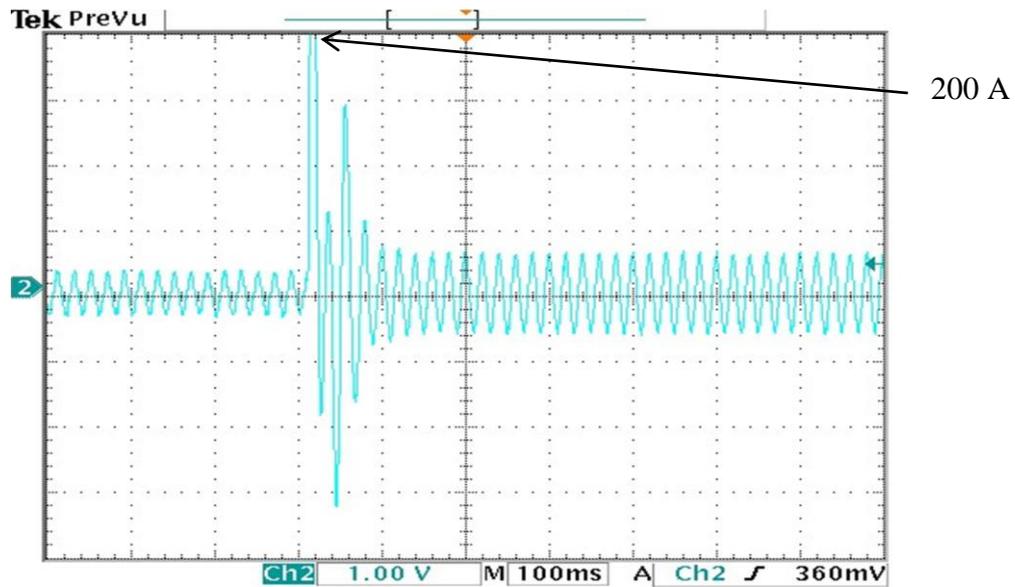


**Fig.III.16.** Evolution de la tension lors de la connexion au réseau (expérimentation)



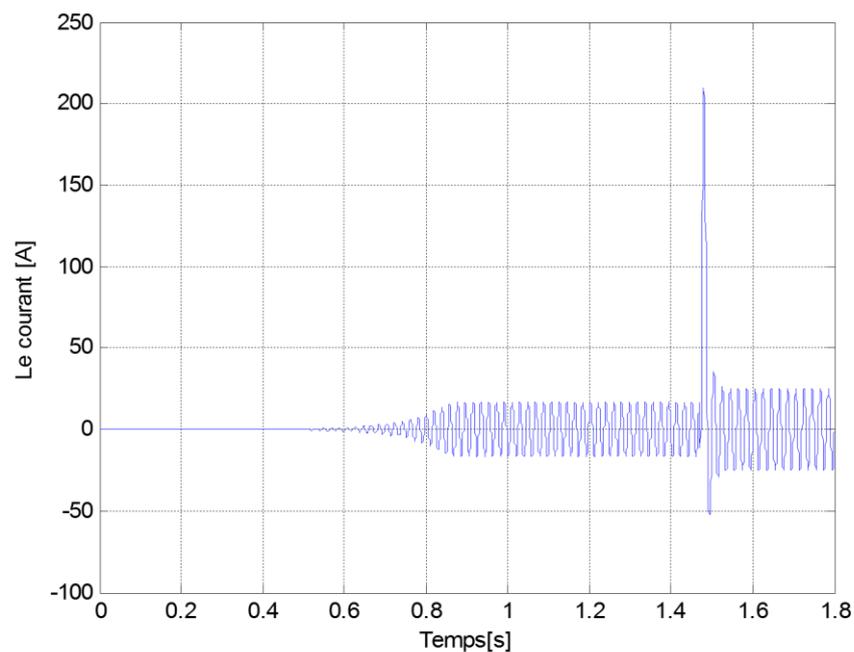
**Fig.III.17.** Evolution de la tension lors de la connexion au réseau (Simulation)

Les figures suivantes montrent l'évolution du courant d'une phase statorique lors du retour réseau effectués expérimentalement à différents instants de connexion et par simulation reparti selon les pics de courant obtenus.



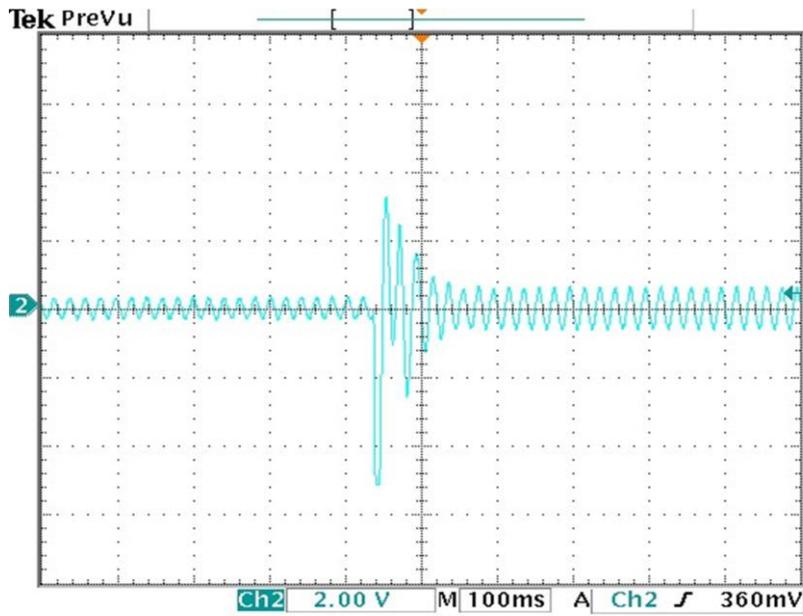
**Fig.III.18.** Evolution du courant lors de la connexion au réseau (Relevé expérimental)

- pic de courant positif



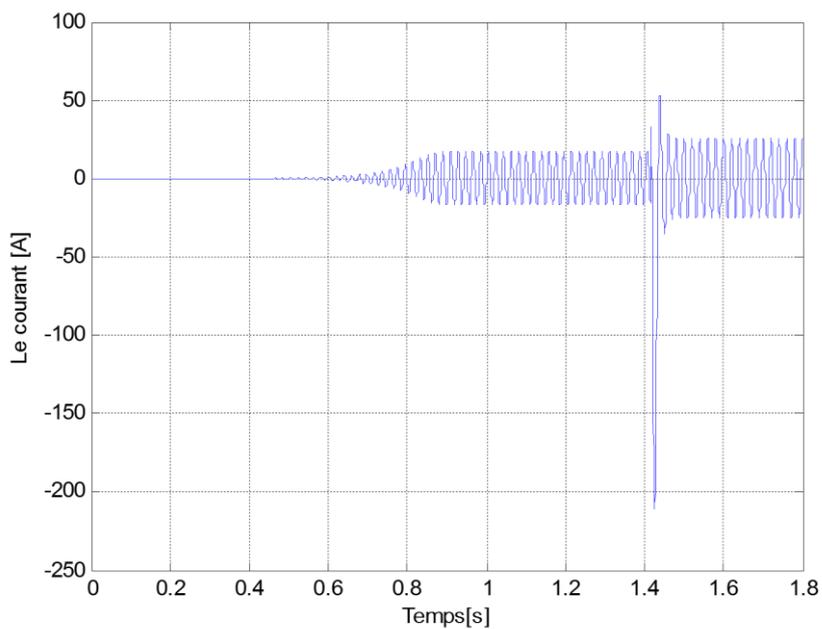
**Fig.III.19.** Evolution du courant lors de la connexion au réseau (Simulation)

- pic de courant positif



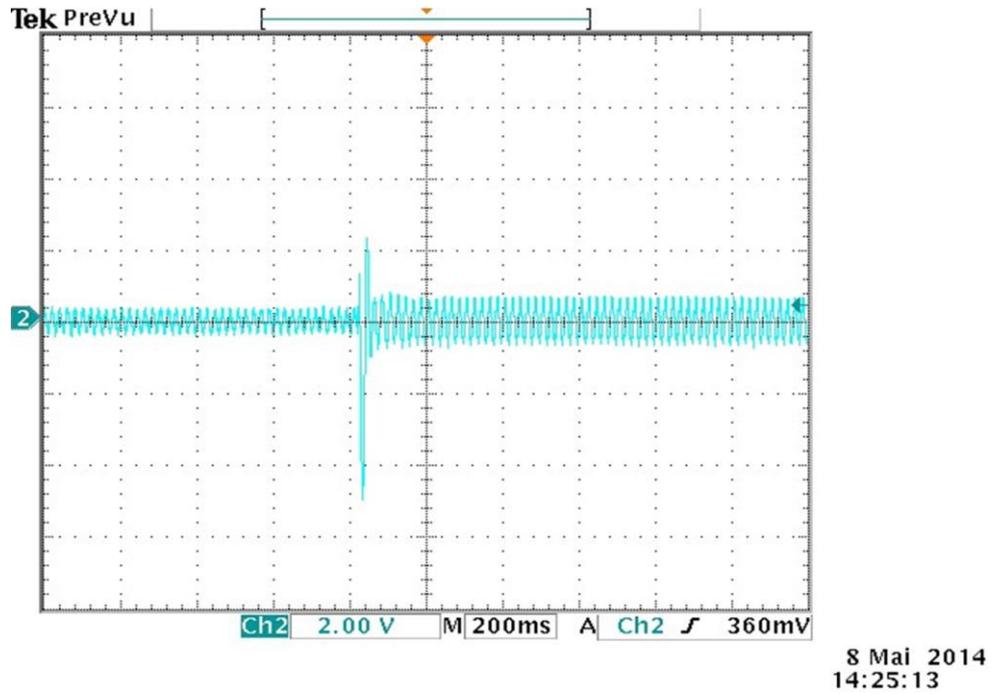
**Fig.III.20.** Evolution du courant lors de la connexion au réseau (Relevé expérimental)

- pic de courant négatif



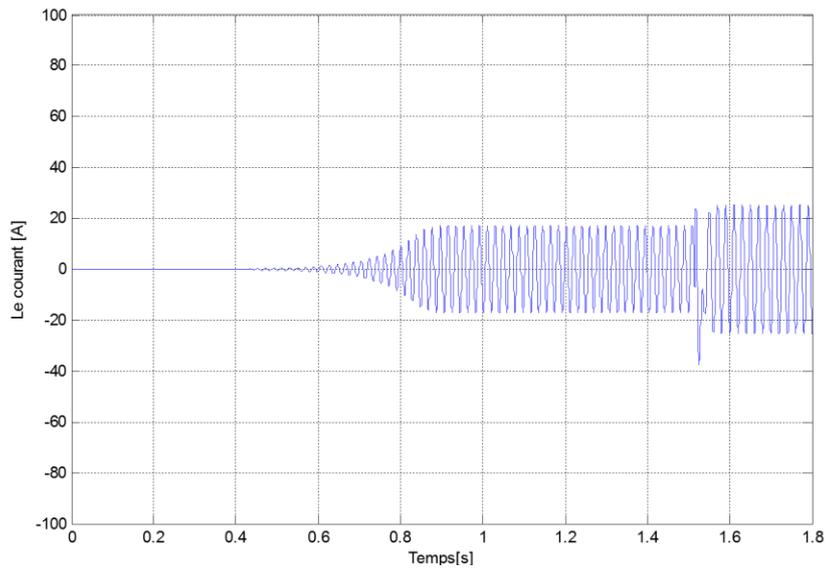
**Fig.III.21.** Evolution du courant lors de la connexion au réseau (Simulation)

- pic de courant négatif



**Fig.III.22.** Evolution du courant lors de la connexion au réseau (Relevé expérimental)

- pic de courant minimum



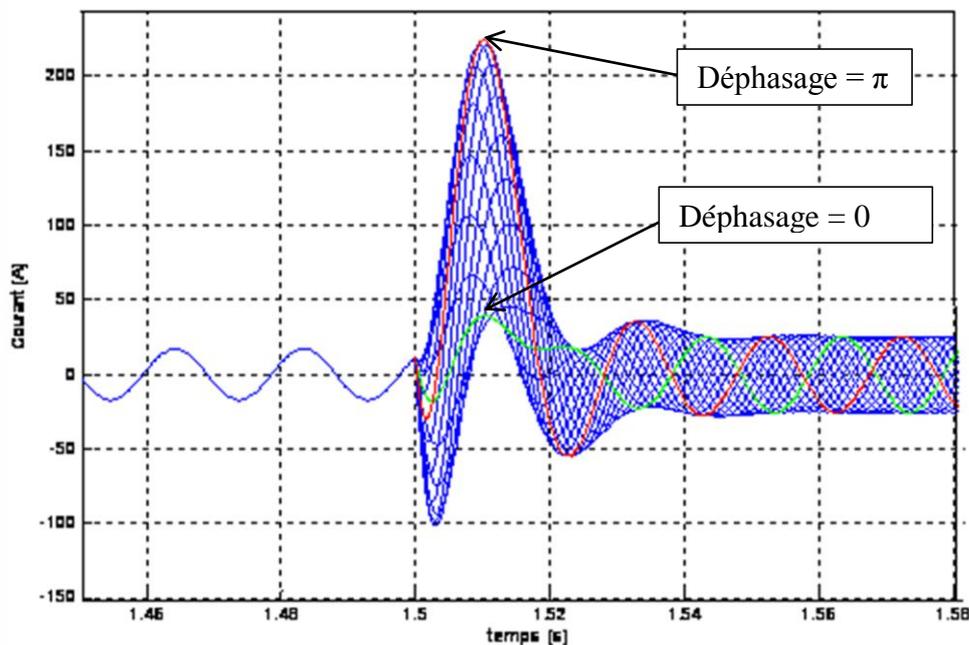
**Fig.III.23.** Evolution du courant lors de la connexion au réseau (Simulation)

- pic de courant minimum

Au moment de l'accrochage, la MAS subit des régimes transitoires importants et les pics de courants peuvent atteindre des valeurs très élevées. Cela dépend en fait du moment où la connexion se produit et du déphasage entre les tensions du réseau et les courants de la machine. Dans les situations les plus favorables le pic de courant est minimum, dans les situations les plus défavorables, les pics de courant sont élevés, que ce soit un pic en valeur positive ou en valeur négative.

Au niveau des simulations la grandeur sur laquelle nous pouvons agir est le déphasage  $\varphi$ . Nous ne pouvons agir sur le déphasage des courants  $\alpha$ .

La figure suivante illustre les transitoires de courant et les pics atteints au même instant de connexion (1.5 s) pour différents déphasages.



**Fig.III.24.** Transitoires de courant pour différents déphasages (au même instant de connexion)

La courbe en rouge est le régime transitoire qui atteint un pic maximum pour un déphasage de  $\pi$ . La courbe en vert représente le régime transitoire pour lequel il n'y a presque pas de surintensité et il se produit pour un déphasage de  $0^\circ$ . Donc le minimum de pic se produit lorsque les courants statoriques de la machine et les tensions du réseau sont en opposition de phase et le maximum se produit lorsqu'ils sont en opposition de phase.

## 5. Fonctionnement en charge de la MAS, en isolé sur charge purement résistive

### 5.1 Modèle du système machine-charge résistive

La charge est représentée par 3 résistances identiques montées en étoile et branchées en parallèle avec les capacités. Les schémas équivalents selon les axes d et q sont présentés sur la figure suivante :

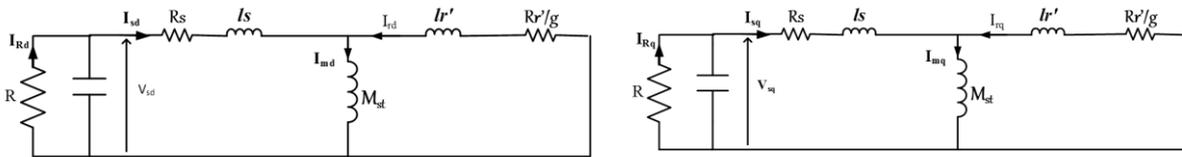


Fig.III.25. Modèle de Park de la MAS alimentant une charge R

Le système d'équations qui régit le fonctionnement la machine asynchrone à cage en isolé alimentant la charge résistive est le suivant :

$$[R_{abc}] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} [i_{Rabc}] = \begin{bmatrix} i_{Ra} \\ i_{Rb} \\ i_{Rc} \end{bmatrix} [v_{Rabc}] = \begin{bmatrix} v_{Ra} \\ v_{Rb} \\ v_{Rc} \end{bmatrix}$$

On a:  $[v_{Rabc}] = [R_{abc}][i_{Rabc}]$

On applique la transformation de Park :  $[v_{Rodq}] = [P(\theta)]^{-1}[R_{abc}][p(\theta)][i_{Rodq}]$

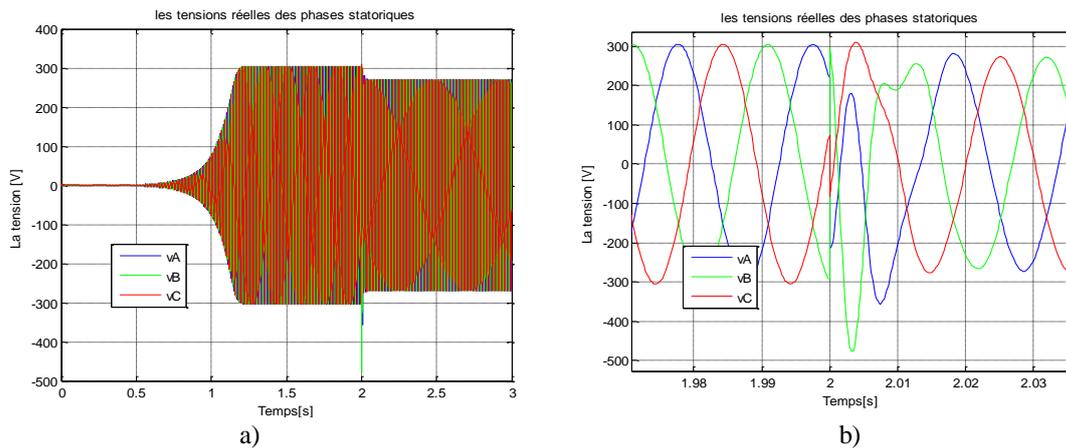
Donc, on obtient  $\begin{cases} v_{sd} = Ri_{Rd} \\ v_{sq} = Ri_{Rq} \\ v_{so} = Ri_{Ro} \end{cases}$

Le modèle du système machine et résistances de charge sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} l_s & 0 & L_{md} & L_{dq} & 0 & 0 \\ 0 & l_s & L_{dq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ -l_r & 0 & (l_r + L_{md}) & L_{dq} & 0 & 0 \\ 0 & -l_r & L_{dq} & (l_r + L_{mq}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{dv_{sd}}{dt} \\ \frac{dv_{sq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 \\ R_r & -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r (l_r + L_m) & 0 & 0 \\ \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (L_m + l_r) & -R_r & 0 & 0 \\ -1/C & 0 & 0 & 0 & -1/RC & 0 \\ 0 & -1/C & 0 & 0 & 0 & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \\ v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix}$$

### 5.2 Résultats de simulation

Les simulations ont été effectuées avec une valeur de résistance de charge  $R=40 \Omega$ , la machine a d'abord été amorcée puis à l'instant  $t = 2$  secondes (le temps que la machine arrive à son régime établi), on connecte la charge. La figure III.26 montre l'évolution de la tension en fonction du temps ainsi qu'un zoom sur le régime transitoire lors de la connexion avec la charge :

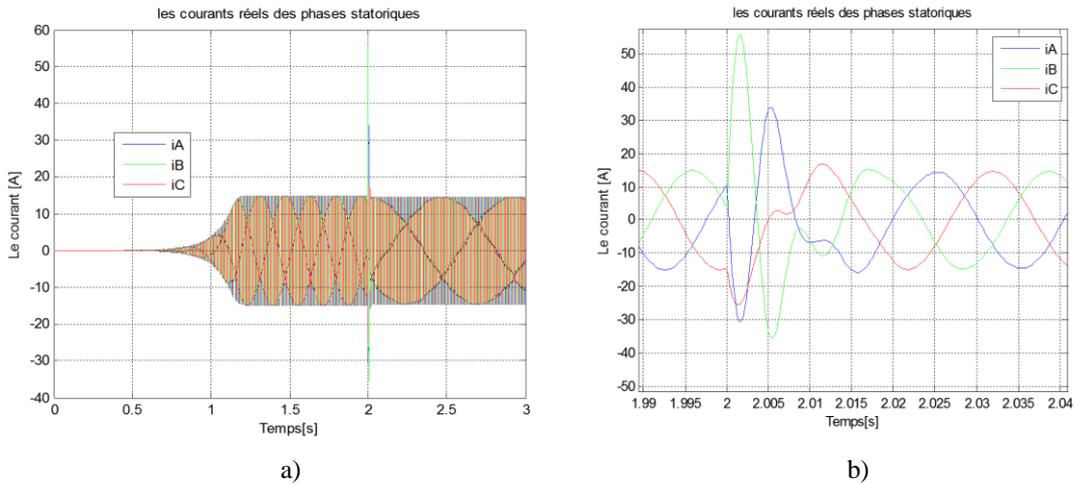


**Fig.III.26.**

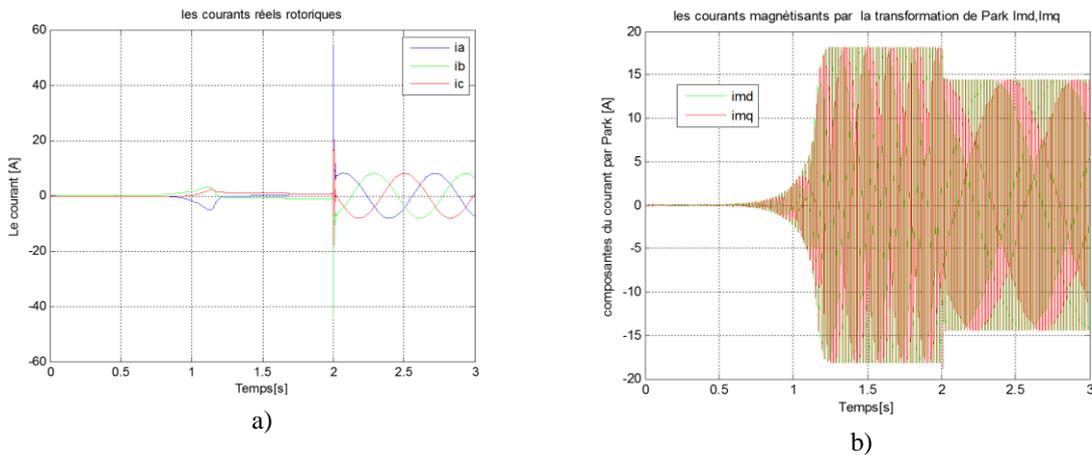
- a) Evolution des tensions statoriques (charge résistive)
- b) Zoom sur le transitoire a l'instant de connexion de la charge résistive

Les figures III.27 décrivent l'évolution des courants statoriques en fonction du temps et un zoom sur la période transitoire.

Sur les figures III.28, on voit l'évolution des courants rotoriques ainsi que des courants magnétisants.



**Fig.III.27.** a) Evolution des courants statoriques (Charge résistive)  
b) Zoom sur le régime transitoire à la connexion (Charge résistive)



**Fig.III.28.** a) Evolution des courants rotoriques (Charge résistive)  
b) Evolution des courants magnétisants (Charge résistive)

La connexion de la charge induit une chute de tension, la tension statorique, après un court régime transitoire, se stabilise sur une valeur plus faible (280 V) que celle d'avant que la charge ne soit connectée (300 V), et les courants statoriques observent un pic durant un court instant autour de 50 Ampères pour revenir à une valeur proche du courant nominal.

Les courants rotoriques observent un pic au moment de la connexion de la charge, puis se stabilisent à un permanent de 10 A environs et ce dû à la demande en puissance active et en

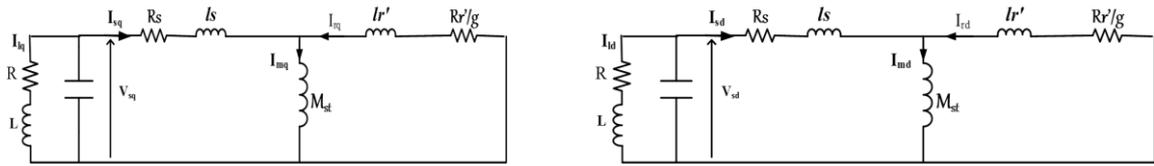
couple électromagnétique puisque la machine devient chargée. Les courants magnétisants baissent car la capacité qui fournit le courant réactif à la machine se voit traversée par un courant plus faible dû à la mise en parallèle de la charge.

## 6. Fonctionnement en charge, en isolé, sur charge réelle

### 6.1 Modèle du système machine-charge réelle

La charge est représentée par trois circuits RL série identiques connectés en étoile et branchés en parallèle avec les condensateurs.

Les Schémas selon les axes d et q sont présentés sur la figure III.29 :



**Fig.III.29.** Schéma du modèle de Park de la MAS alimentant une charge RL

Le système d'équations qui régit le fonctionnement de la machine asynchrone à cage avec condensateurs d'auto-excitation en fonctionnement isolé alimentant la charge réelle est le suivant :

$$v_{abc} = v_{Rabc} + v_{Labc} \Rightarrow [v_{abc}] = [R_{abc}][i_{abc}] + \frac{d[\Phi_{abc}]}{dt}$$

$$[L_{abc}] = \begin{bmatrix} L_c & M_c & M_c \\ M_c & L_c & M_c \\ M_c & M_c & L_c \end{bmatrix} [i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} [v_{Rabc}] = \begin{bmatrix} v_{Ra} \\ v_{Rb} \\ v_{Rc} \end{bmatrix} [v_{l,abc}] = \begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix}$$

On applique la transformée de Park :

$$[v_{odq}] = [p(\theta)]^{-1}[R_{abc}][p(\theta)][i_{odq}] + [p(\theta)]^{-1} \frac{d[p(\theta)][\Phi_{odq}]}{dt}$$

$$= [R][i_{odq}] + \frac{d[\Phi_{odq}]}{dt} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_{abc}] = [L_{abc}][i_{abc}] \Rightarrow [\Phi_{odq}] = [p(\theta)]^{-1}[L_{abc}][p(\theta)][i_{odq}]$$

$$\Rightarrow [\Phi_{l,odq}] = \begin{bmatrix} (L_c + 2M_c) & 0 & 0 \\ 0 & (L_c - M_c) & 0 \\ 0 & 0 & (L_c - M_c) \end{bmatrix} [i_{l,odq}]$$

$$[v_{odq}] = [R][i_{l,odq}] + \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -(L_c - M_c)i_q \\ (L_c - M_c)i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_c + 2M_c) & 0 & 0 \\ 0 & (L_c - M_c) & 0 \\ 0 & 0 & (L_c - M_c) \end{bmatrix} \frac{d[i_{odq}]}{dt}$$

Alors :

$$\begin{cases} \frac{di_o}{dt} = \frac{v_o - Ri_o}{(L_c - M_c)} \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{v_d - Ri_d + \omega_s(L_c - M_c)i_q}{(L_c - M_c)} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{v_q - Ri_q - \omega_s(L_c - M_c)i_d}{(L_c - M_c)} \end{cases}$$

En supposant que la machine est équilibrée et que les mutuelles entre ces inductances de charge sont négligées, et en se plaçant dans un repère lié au stator on peut écrire :

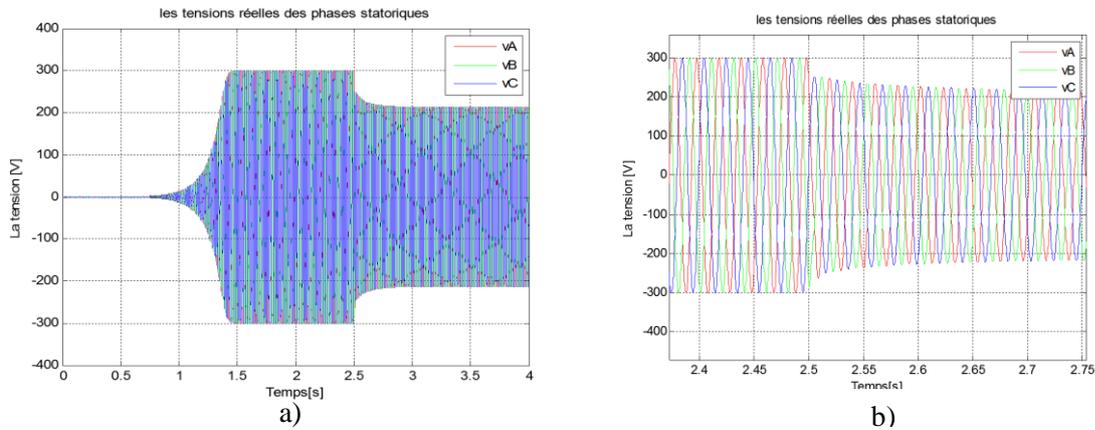
$$\begin{cases} \frac{di_o}{dt} = \frac{v_o - Ri_o}{(L_c)} = 0 \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{v_d - Ri_d}{(L_c)} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{v_q - Ri_q}{(L_c)} \end{cases}$$

Le modèle du système machine, condensateurs d'auto-excitation et charge RL sous forme matricielle devient :

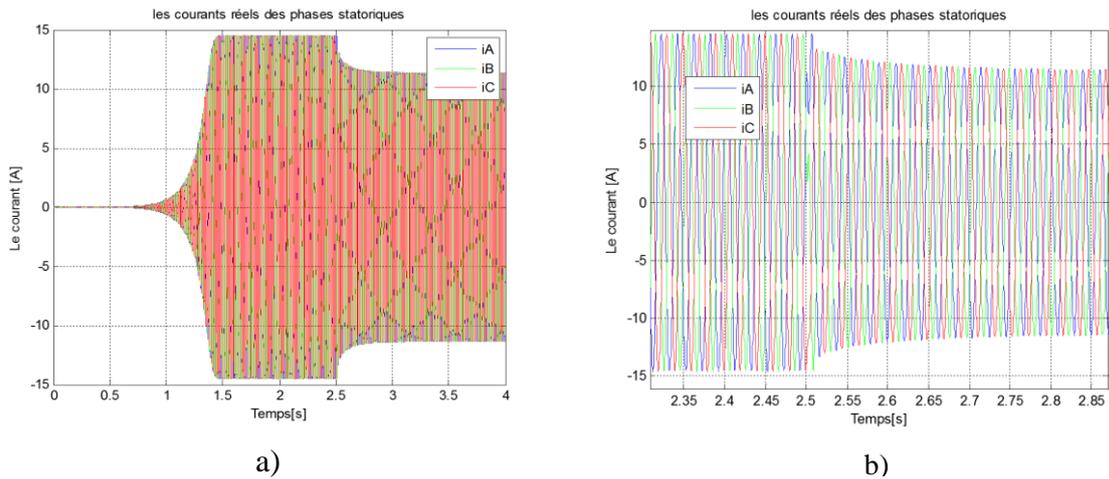
$$\begin{bmatrix} l_s & 0 & M_d & M_{dq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_s & M_{dq} & L_{mq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -l_r & 0 & (l_r + M_d) & M_{dq} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -l_r & M_{dq} & (l_r + M_q) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \\ \frac{dv_{sd}}{dt} \\ \frac{dv_{sq}}{dt} \\ \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ R_r & -\omega_r l_r & -R_r & \omega_r(l_r + M_{st}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_r l_r & R_r & -\omega_r(M_{st} + l_r) & -R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/C & 0 \\ 0 & -1/C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/C \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/Lc & 0 & -R/Lc & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/Lc & 0 & -R/Lc \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \\ v_{sd} \\ v_{sq} \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

### 6.2 Résultats de la Simulation de la machine connectée à la charge

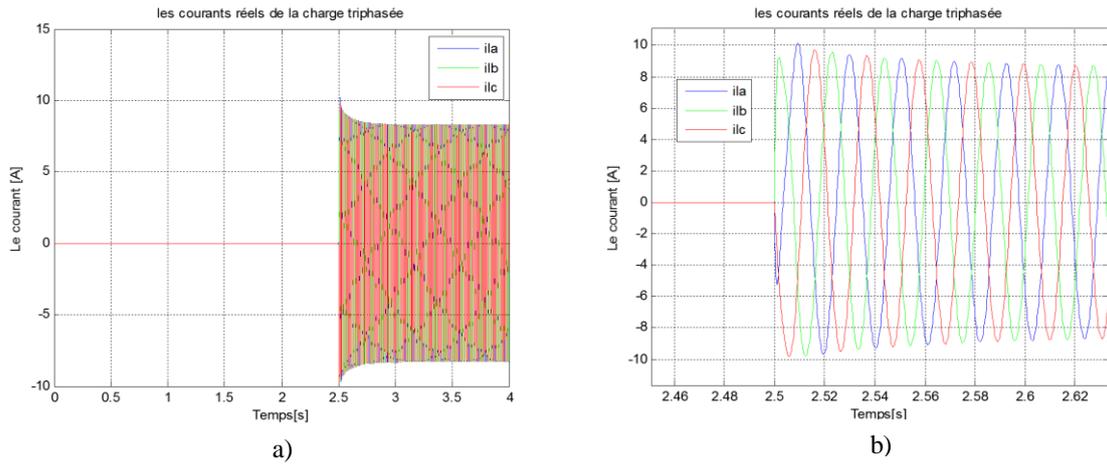
La génératrice est entraînée à 1500 tr/mn à vide. Puis, elle est amorcée par les condensateurs. Une fois qu'elle atteint un régime établi, la charge réelle est connectée. Cette dernière est constituée d'une résistance de 25  $\Omega$  en série avec une inductance de 20 mH par phase. Les résultats des simulations sont présentés dans les figures suivantes :



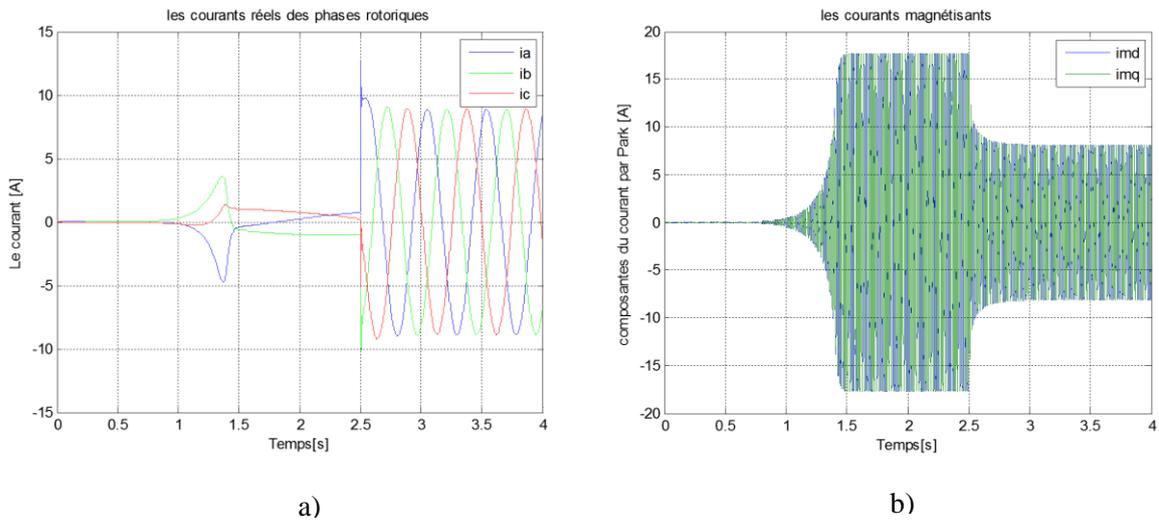
**Fig.III.30.** a) Evolution de la tension statorique (Charge RL)  
b) Zoom sur le régime transitoire



**Fig.III.31.** a) Evolution des courants statoriques (Charge RL)  
b) Zoom sur le régime transitoire à la connexion



**Fig.III.32.** a) Evolution des courants de charge (Charge RL)  
 b) Zoom sur le régime transitoire



**Fig.III.33.** a) Evolution des courants rotoriques (Charge RL)  
 b) Evolution des courants magnétisants (Charge RL)

Comme dans le cas de la charge résistive, au moment de la connexion il existe un court régime transitoire pour toutes les grandeurs étudiées.

La tension statorique subit une chute de tension après la connexion de la charge RL d'autant plus prononcée que pour la charge R.

La charge inductive introduit une consommation d'énergie réactive qui est fournie par les condensateurs d'amorçage et donc réduit l'énergie de magnétisation de la machine, d'où une diminution des courants magnétisants.

## *7. Conclusion*

---

Dans ce chapitre nous avons effectué une modélisation tenant compte de l'effet de la saturation dans les équations du modèle de Park de la machine. Puis, nous avons implémenté ce modèle à des fins de simulation dans le logiciel MATLAB. Nous avons effectué un auto-amorçage de la MAS expérimentalement sur la machine identifiée dans le chapitre précédent. Nous avons comparé les résultats simulés et expérimentaux. Après la validation du modèle, nous avons ensuite simulé le fonctionnement en charge de la machine pour deux types de charges : résistive et réelle.

## *Conclusion générale*

---

Cette étude a porté sur le fonctionnement de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en tant que génératrice électrique pour une turbine éolienne. Elle peut fonctionner en étant raccordé au réseau électrique, et dans un fonctionnement en isolé alimentant une charge résistive ou une charge réelle.

Dans un premier temps, nous avons présenté les principes de l'éolienne et mis en évidence les topologies électriques des éoliennes ayant une MAS comme génératrice.

Dans la deuxième partie, après avoir rappelé les caractéristiques de la machine asynchrone à cage, nous avons abordé l'identification de la machine qui a servi à l'étude expérimentale pour l'auto-amorçage et le raccordement au réseau.

Dans la troisième partie nous avons traité la modélisation mathématique de la machine, puis nous avons inséré dans cette modélisation la prise en compte du phénomène de saturation, par une méthode de variation de l'inductance de magnétisation en accord avec le courant magnétisant. Nous avons ensuite traité le cas du fonctionnement de la machine dans un cadre d'auto-amorçage, puis dans le cadre du raccordement au réseau électrique, dans l'expérience et dans la simulation et validé le modèle. La simulation a donné des résultats très proches de la réalité. Bien que lors du raccordement, il est difficile d'obtenir des résultats identiques dû au caractère aléatoire du phénomène de pic de courant, dont les intensités dépendent de l'instant de connexion et du déphasage entre les courants statoriques et les tensions du réseau. Dans une dernière partie nous avons réalisé les simulations pour le fonctionnement de la machine en isolé. L'adjonction de la charge à la machine (dans les deux cas charge résistive et charge inductive) induit une chute de la tension statorique.

La poursuite de cette étude serait intéressante pour un contexte de défauts apparaissant sur le réseau, de moyen de réduction des pics au moment du raccordement ou de la prise en compte des pertes dans le modèle de la machine.

## *Bibliographie*

---

- [1] Global Wind Statistics 2013, parue le 05/02/2014, Global Wind Energy Council, <http://www.gwec.net/>, pp-4
- [2] Coralie Muschiatti, Sébastien Friess "L'énergie éolienne", CdERN (Centre Didactique des Energie Renouvelables du Gymnase de Nyon), Suisse, 2009, pp-1-25
- [3] S.Metatla, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA", Mémoire de magistère en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009, pp-5-60
- [4] E.Rogier, "Cahier d'Éole", Agence Méditerranéenne de l'Environnement, Montpellier No.2, 2000, pp-1-15
- [5] T.A.Tamegh "Modélisation et Simulation D'un Système De Jumelage Eolien-Diesel", Maitrise En Ingénierie, Université Du Quebec, Canada, 2012, pp-20-67
- [6] T.Ackermann, L.Söder, "An overview of wind energy status", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.6, No.67–128, 2002, pp-70-87
- [7] Frédéric POITIERS, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003, pp-11-36
- [8] Rafika DRARENI, Zahra OUAHRANI, "Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC", Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009, pp-6-21
- [9] <http://www.w-hs.de/erkunden/fachbereiche/elektrotechnik-naturwissenschaften/>
- [10] <http://winddose.com/wind-turbine-technologies.html>
- [11] <http://www.thermoradiances.ch/eolien-rendement.htm>
- [12] Duc-Hoan TRAN Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale Institut National Polytechnique de Toulouse thèse de doctorat, 2010, pp-6-10
- [13] Haritza Camblong, Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. ENSAM N° ordre 2003-22, pp-9-15
- [14] Salma EL AIMANI, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de doctorat délivré conjointement par l'école centrale de Lille et l'université des sciences et technologies de Lille, 2004, pp-46-97
- [15] M. Kassa IDJDARENE, " Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes", Thèse de doctorat en sciences de l'Université Abderrahmane MIRA–Bejaia et doctorat de de l'Université Lille 1, 2010, pp-20-100

- [16] Ali NESBA, "Génératrice Asynchrone en Régime Dynamique : Extension du Modèle Linéaire à la Saturation", Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger
- [17] Li WANG, Ching-Huei LEE, "A novel analysis on the performance of an isolated self-excited induction generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 2, 1997, pp-109-114
- [18] Yasmine BENDJEDDOU, " Contribution à l'étude des performances d'un générateur asynchrone", Thèse de magistère, L'Université Hadj Lakhdar Batna, 2013, pp-14-44
- [19] <http://wanclik.tade.free.fr/InductionACmotor.htm>
- [20] M. KOSTENKO, L. PIOTROVSKI, Machines électriques, Tome 2 : machines à courant alternatif, édition MIR MOSCOU, pp-470-480
- [21] Saïd MEKHTOUB, "Machine asynchrone en régime saturé", Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2001, pp-6-24
- [22] Ali NESBA, "Caractérisation du phénomène de la saturation magnétique de la machine asynchrone", Thèse de doctorat en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007, pp-10-17, pp-45-65
- [23] MOHAMMEDI Imène Zoulikha, BOURAY Islam, "Modélisation d'un générateur asynchrone à vitesse fixe", Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, 2013, pp-34-51
- [24] M. KAIROUS Djilali, "Calcul analytique du couple et des courants dans une machine asynchrone auto excitée reliée au réseau ", Thèse de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004, pp-11-39
- [25] A. MOUSSA SIDDO et I. SOUMANA NOUHOU, "Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", Projet de fin d'études, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007, pp-41-50