

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.Mira de Bejaia



Faculté de Technologie  
Département d'Electrotechnique

---

**MEMOIRE**

Présenté par :

***Melle* . SAHI Choumaïssa**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN ELECTROTECHNIQUE**

Option : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Thème

**COMMANDE D'UNE GENERATRICE ASYNCHRONE  
DOUBLE ETOILE EN FONCTIONNEMENT AUTONOME**

Encadreur :

***M<sup>r</sup>* . AMIMEUR Hocine**

Co-encadreur :

***M<sup>r</sup>* . HAMOUDI Yanis**

Année Universitaire : 2019/2020

# Remerciements

## Remerciements

Avant tout, louange à notre créateur ALLAH, le tout puissant, pour m'avoir donné la patience, le courage, la volonté et surtout la santé afin d'accomplir ce mémoire dans les circonstances difficiles dans lesquelles nous vivons actuellement en raison de l'épidémie.

Tout d'abord, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur **AMIMEUR Hocine**, Maître de conférences à l'université de Béjaia, d'avoir proposé ce thème intéressant et d'avoir accepté de m'encadrer, je lui exprime ma profonde gratitude pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce travail, pour la documentation qu'il a mis à ma disposition et pour le temps précieux qu'il m'a consacré pour mener ce travail.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur **HAMOUDI Yanis**, doctorant en électrotechnique à l'université de Béjaia, mon co-encadreur pour avoir accepté de me diriger patiemment. Ses conseils, son aide précieuse, ses encouragements ont enrichi mes connaissances et m'ont apporté un soutien constant, j'ai pu bénéficier à la fois de ses compétences scientifique et de sa grande disponibilité, tant pour résoudre les difficultés rencontrées lors de ma réalisation, de répondre à mes questions, qu'il trouve ici, l'expression de ma sympathie et de ma reconnaissance, je le remercie de tout mon cœur.

Aussi, mes remerciements s'adressent aux membres de jury de m'avoir donné l'honneur d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique de l'université de Béjaia pour la formation qu'ils nous ont assuré au long de notre cursus universitaire.

J'aimerais à présent remercier mes chers parents à qui je dois tout, je les remercie de m'avoir soutenu pendant toute la durée de mes études et d'avoir cru en moi et de m'encourager, je remercie également mon cher Abdelhamid pour le soutien qu'il m'a apporté et pour ses encouragements, je remercie aussi mon frère et mes sœurs pour leurs soutien moral et pour tout ce qu'ils ont fait pour moi durant cette période.

Enfin, je remercie vivement toute ma famille et tous ceux qui m'ont soutenu toute la durée de mes études.

# Dédicaces

## Dédicaces

A la mémoire de mes chers grands-parents et ma chère tante,

A ma chère grand-mère (mimi),

A mes chers parents,

A mon cher frère et mes chères sœurs,

A toute la famille SAHI et BRAHAMI,

A mes amis,

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pendant toute la durée de mes études.

Je dédie ce modeste mémoire.

# Liste des figures

## Liste des figures

I.1	Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases.....	4
I.2	Modes de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile suivant la vitesse.....	5
I.3	Représentation schématique des enroulements de la GASDE.....	7
I.4	Représentation du modèle de la GASDE selon les axes (d, q).....	14
II.1	Système éolien basé sur une GASDE.....	26
II.2	Schéma représentatif de la GASDE auto-amorcée en fonctionnement autonome.....	27
II.3	Phénomène d'auto-amorçage.....	28
II.4	Connexion de la charge R selon l'axe d (étoile 1).....	30
II.5	Connexion de la charge RL selon l'axe d (étoile 1).....	31
II.6	Tension et courant statoriques de l'étoile 1.....	33
II.7	Variation de l'inductance de magnétisation.....	34
II.8	Evolution des caractéristiques de la GASDE (à vide).....	35
II.9	Influence de la capacité d'excitation sur la tension statorique de l'étoile 1.....	36
II.10	Influence de la capacité d'excitation sur le courant statorique de l'étoile 1.....	37
II.11	Influence de la capacité d'excitation sur le courant de magnétisation.....	37
II.12	Influence de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de l'étoile 1.....	38
II.13	Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant statorique de l'étoile 1.....	38
II.14	Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant de magnétisation.....	39
II.15	Influence de la vitesse d'entraînement sur les fréquences de la tension statorique de l'étoile 1.....	39
II.16	Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge R.....	40
II.17	Influence de la charge résistive sur la tension statorique dans l'étoile 1.....	41
II.18	Influence de la charge résistive sur le courant statorique dans l'étoile 1.....	42
II.19	Influence la charge résistive sur le courant de magnétisation.....	42
II.20	Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge R.....	44
II.21	Influence de la charge RL sur la tension statorique de l'étoile 1.....	45
II.22	Influence de la charge RL sur le courant statorique de l'étoile 1.....	45
II.23	Influence de la charge RL sur le courant de magnétisation.....	45
III.1	Redresseur à MLI structure tension.....	48

III.2	Redresseur à MLI structure courant.....	49
III.3	Principe de fonctionnement d'un comparateur à hystérésis.....	50
III.4	Principe d'une commande par hystérésis.....	51
III.5	Structure du redresseur à MLI.....	51
III.6	Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.....	53
III.7	Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le référentiel (d, q).....	54
III.8	Représentation schématique de la boucle de régulation de la tension du bus continu.....	57
III.9	Représentation schématique de la boucle de régulation du flux.....	58
III.10	Algorithme de commande avec un seul bus continu.....	60
III.11	Tension du bus continu $V_{dc}$ .....	61
III.12	Flux rotorique $\varphi_{rd}$ .....	62
III.13	Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence.....	62
III.14	Tension statorique de l'étoile 1.....	63
III.15	Variation de la vitesse d'entraînement.....	64
III.16	Tension du bus continu $V_{dc}$ en cas de variation de la vitesse d'entraînement.....	65
III.17	Flux rotorique $\varphi_{dr}$ en cas de variation de la vitesse d'entraînement.....	65
III.18	Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence en cas de variation de la vitesse d'entraînement.....	66
III.19	Tension statorique de l'étoile 1.....	67
III.20	Tension du bus continu $V_{dc}$ en cas de variation de la charge.....	68
III.21	Flux rotorique $\varphi_{dr}$ en cas de variation de la charge.....	68
III.22	Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence en cas de variation de la charge.....	69
III.23	Tension statorique de l'étoile 1.....	70

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

II.1	Influence de la capacité d'excitation.....	36
II.2	Influence de la vitesse d'entraînement.....	38
II.3	Influence de la charge résistives.....	41
II.4	Influence de la charge résistive-inductive.....	44

# Symboles & Abréviations

## Symboles & Abréviations

- Symboles

$s_1, s_2, r$	Indices correspondants à l'étoile 1, l'étoile 2 et au rotor	
$as_1, bs_1, cs_1$	Indices correspondants aux trois phases du stator 1	
$as_2, bs_2, cs_2$	Indices correspondants aux trois phases du stator 2	
$a_r, b_r, c_r$	Indices correspondants aux trois phases du rotor	
$V_{s1}, V_{s2}, V_r$	Tensions statoriques et rotorique	(V)
$i_{s1}, i_{s2}, i_r$	Courants statoriques et rotorique	(A)
$R_{s1}, R_{s2}, R_r$	Résistances statoriques et rotorique	( $\Omega$ )
$\varphi_{s1}, \varphi_{s2}, \varphi_r$	Flux statoriques et rotorique	(Wb)
$L_{s1}, L_{s2}, L_r$	Inductance propres des étoiles statoriques et du rotorique.	(H)
$\theta_m$	Position du rotor par rapport à l'étoile 1	(rd)
$\theta_2$	Position du rotor par rapport à l'étoile 2	(rd)
$\theta_0$	Position initiale du rotor par rapport à l'étoile 1	(rd)
$\alpha$	Angle de décalage entre les deux étoiles	(rd)
$\Omega$	Vitesse mécanique du rotor	(rd/s)
$L_{ms}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique	(H)
$L_{mr}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique	(H)
$M_{sr}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor	(H)
$[x]^t$	Transposé d'une matrice	
$C_{em}$	Couple électromagnétique	(N.m)
$C_r$	Couple résistant (charge)	(N.m)
$F_f$	Coefficient de frottement	(Nms/rd)
$J$	Moment d'inertie	(kg.m <sup>2</sup> )
$\omega_r$	Pulsation électrique rotorique	(rd/s)
$\omega_s$	Pulsation électrique statorique	(rd/s)
$\omega$	pulsation électrique de glissement	(rd/s)
$d, q$	Axe direct et quadratique du repère de Park	(rd)

$\theta_{s1}$	Angle entre l'axe magnétique de la phase $a_{s1}$ et l'axe d	(rd)
$\theta_{s2}$	Angle entre l'axe magnétique de la phase $a_{s2}$ et l'axe d	(rd)
$\theta_r$	Angle entre l'axe magnétique de la phase $a_r$ et l'axe d	(rd)
$P_s$	Puissance absorbée	(W)
$P_{em}$	Puissance électromagnétique	(W)
$p$	Nombre de paires de pôles	
$L_m$	Inductance de magnétisation	(H)
$I_m$	Courant de magnétisation	(A)
$L_{md,q}$	Inductances cycliques de saturation	(H)
$L_{s1d,q}; L_{s2d,q}$	Inductances cycliques totales statoriques	(H)
$L_{rd,q}$	Inductances cycliques totale rotorique	(H)
$\varphi_{md,q}$	Flux de magnétisation	(Wb)
$L_{dq}$	Inductance cyclique d'inter saturation	(H)
$L$	Inductance dynamique	(H)
$C_{a1}, C_{a2}$	Condensateurs d'excitation aux bornes de l'étoile 1 et 2	( $\mu F$ )
$i_{d,qca1}; i_{d,qca2}$	Courants d'excitation selon les axes d et q, étoile 1 et 2	(A)
$R_1, R_2$	Résistance électrique connectées aux bornes statoriques	( $\Omega$ )
$L_1, L_2$	Inductances des charges connectées aux bornes statoriques	(H)
$i_{d,qL1}, i_{d,qL2}$	Courants de charge (RL) directs et quadratiques	(H)
$V_{dc}$	Tension du bus continu	(V)
$i_{dc}$	Courant du bus continu	(A)
$(x)^*$	Grandeur de référence	
$T_r$	Constante de temps rotorique	(s)
$\tau$	Constante de temps d'un système du premier ordre	(s)
$\omega_{coord}$	Vitesse de rotation du repère (d,q)	(rd/s)
$K_{pdc}, K_{idc}$	Gains proportionnel et intégral du régulateur PI du bus continu	
$K_{p\varphi}, K_{i\varphi}$	Gains proportionnel et intégral du régulateur PI du flux	
$S$	Opérateur de Laplace	
$F_{11}, F_{12}, F_{13}$	Fonctions de connexion dans le repère (a,b,c)	
$F_d, F_q$	Fonctions de connexion dans le repère (d,q)	

- Abréviations

MASDE	Machine ASynchrone Double Etoile
GASDE	Génératrice ASynchrone Double Etoile
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel – Intégrale
FOC	Field Oriented Control ( Commande à flux orienté)
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte

# Table des matières

# Table des matières

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Symboles et abréviations

Introduction générale.....01

## Chapitre I :

### Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE)

I.1 Introduction.....03

I.2 Description de la machine asynchrone double étoile.....03

I.2.1 Avantages et inconvénients de la MASDE.....04

I.2.2 Domaine d'application de la MASDE.....05

I.2.3 Principe de fonctionnement de la MASDE.....06

I.3 Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile.....07

I.3.1 Hypothèses simplificatrices pour l'étude de la GASDE.....07

I.3.2 Modèle dans le repère naturel (a, b, c) de la GASDE.....08

I.3.2.1 Equations des tensions en mode générateur.....08

I.3.2.2 Expressions des flux.....11

I.3.2.3 Equation mécanique.....12

I.3.2.4 Expression du couple électromagnétique.....13

I.3.3 Modèle biphasé de la GASDE.....13

I.3.3.1 Transformation de Park.....13

I.3.3.2 Choix du référentiel.....16

I.3.4 Modélisation de la GASDE dans un repère (d, q) lié au champ tournant.....	17
I.3.4.1 Equations des tensions.....	18
I.3.4.2 Expressions des flux.....	19
I.3.4.3 Puissance absorbée et couple électromagnétique.....	21
I.3.5 Représentation sous forme d'équation d'état du modèle de la machine.....	23
I.4 Conclusion.....	24

## **Chapitre II :**

### **Auto-amorçage de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE) en fonctionnement autonome**

II.1 Introduction.....	25
II.2 Définition d'un système autonome.....	25
II.3 Génératrice asynchrone double étoile (GASDE) auto-amorcée en fonctionnement autonome.....	26
II.4 Phénomène d'auto-amorçage.....	27
II.5 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage.....	28
II.6 Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE.....	29
II.7 Modélisation des charges statiques.....	29
II.7.1 Charge purement résistive (R).....	30
II.7.2 Charge inductive (RL).....	31
II.8 Simulation et interprétation des résultats.....	32
II.8.1 Fonctionnement à vide.....	32
II.8.2 Fonctionnement en charges purement résistives.....	39
II.8.3 Fonctionnement en charges résistives-inductives.....	42
II.9 Conclusion.....	46

## **Chapitre III :**

### **Commande vectorielle de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE)**

III.1 Introduction.....	47
III.2 Généralités sur le redresseur à MLI.....	47
III.2.1 Définition d'un redresseur MLI.....	47
III.2.2 Topologies de base d'un redresseur à MLI.....	47
III.2.3 Principe de fonctionnement du redresseur à MLI.....	49
III.2.4 Techniques de commande d'un redresseur à MLI.....	50
III.3 Modélisation du redresseur à MLI.....	51
III.3.1 Représentation du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	52
III.3.2 Représentation du redresseur MLI dans le référentiel tournant (d, q).....	53
III.4 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique.....	54
III.4.1 Application d'orientation du flux rotorique.....	55
III.4.2 Calcul des régulateurs.....	57
III.5 Simulation et interprétation des résultats.....	59
III.5.1 Essai sans variation de la vitesse ou de la charge.....	61
III.5.2 Essai avec variation de la vitesse d'entraînement.....	63
III.5.3 Essai avec variation de la charge.....	67
III.6 Conclusion.....	70
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>71</b>

**Annexe**

**Bibliographie**

# **Introduction**

## **générale**

## Introduction générale

Les machines triphasées à courant alternatif sont des ensembles moteurs générateurs permettant la transformation électrique-mécanique et vice versa. Actuellement, ces machines dominent assez largement le domaine des machines électriques. Depuis la première machine inventée par Tesla, les chercheurs ne cessent d'avancer dans ce domaine. A l'apparition des machines polyphasées (dont le nombre de phases est supérieur à trois), plus fiable, robuste, et donne la possibilité de segmentation de la puissance[Sad17], minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, réduction des courants harmonique ce qui lui donne une priorité par rapport aux machines conventionnelles triphasées, grâce à ses avantages ces dernières sont utilisées dans les applications de fortes puissances, tel que la propulsion navale, la traction ferroviaire et production de d'énergie électrique d'origine éolienne.

De nos jours les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'étude, l'analyse et la commande des machines multiphasées, l'une de ces machines que nous allons étudier dans ce travail, est la machine asynchrone double étoile «MASDE», ce type de machine possède deux enroulements statoriques triphasés identiques décalés l'un de l'autre d'un angle électrique de  $30^\circ$ , la structure du rotor reste identique à celle d'une machine triphasée qui peut être soit à cage d'écureuil, soit à rotor bobiné[Ber16]. Cette machine équipe intensivement la majorité des systèmes éoliens dans le monde autant que génératrice auto-excitée en fonctionnement autonome [Mer08], grâce à ses avantages, cependant, son inconvénient majeur est la complexité de sa commande.

Dans ce cadre diverses approches de commande ont été développées et exploitées grâce à l'avènement de l'électronique de puissance dans ce domaine, en particulier la commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique (FOC) [Ber16] pour aboutir à un découplage entre le flux magnétique et le couple électromagnétique similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée.

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier et d'analyser le comportement de la génératrice asynchrone double étoile «GASDE » auto-excitée avec un banc de condensateurs et la modéliser afin de la maîtriser pour lui appliquer la technique de commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique.

Dans ce contexte, ce manuscrit est scindé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à quelques généralités concernant la MASDE et la modélisation de la GASDE en s'appuyant sur un certain nombre d'hypothèses pour simplifier les démarches de cette modélisation dans les deux différents repères : triphasé (a,b,c) en négligeant la saturation magnétique et biphasé (d,q) en tenant compte de la saturation magnétique, dont la transformation du repère triphasé au biphasé est faite par la transformée de Park.

Le deuxième chapitre fera l'objet de l'analyse de l'auto-amorçage de la GASDE en fonctionnement autonome à vide et en charge (purement résistives et inductives).

Le troisième chapitre sera focalisé sur la commande vectorielle par orientation du flux de la GASDE en utilisant des redresseurs à MLI commandés par la technique à bande d'hystérésis et des régulateurs classiques PI pour réguler la tension du bus continu et du flux, et cela dans le but de maintenir la tension à la sortie des redresseurs constante indépendamment de la vitesse d'entraînement et de la charge.

Finalement, ce travail sera clôturé par une conclusion générale qui résumera les résultats obtenus.

# **Chapitre I :**

**Modélisation de la génératrice  
asynchrone double étoile (GASDE)**

## I.1 Introduction

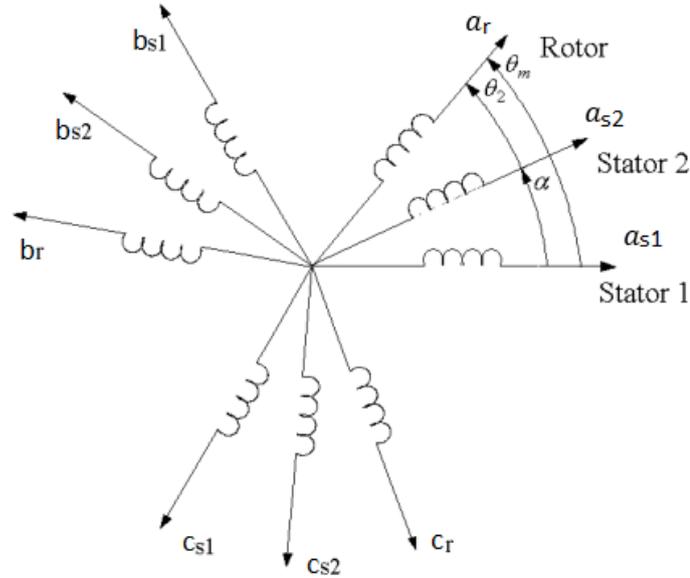
La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement d'une part, d'autre part lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. L'étude des machines électriques s'appuie sur un modèle de représentation.

Ce chapitre a pour objectif de présenter la modélisation mathématique de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE) qui fait appel à un système d'équations très complexe, cette complexité a été relativement réduite en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, nous commençons par donner un aperçu sur la MASDE (description, avantages, inconvénients et domaines d'applications), puis on va procéder à la modélisation de la GASDE dans le repère réel triphasé en négligeant la saturation du circuit magnétique, enfin nous effectuons un changement de repère par l'application de la transformée de Park pour simplifier les systèmes d'équations et les rapporter à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) en tenant compte de la saturation du circuit magnétique.

## I.2 Description de la machine asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile comporte dans le stator deux systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle électrique (dans cette modélisation on prend  $\alpha = 30^\circ$ ) et d'un rotor soit bobiné soit à cage d'écureuil. Pour simplifier l'étude, nous considérons les circuits électriques du rotor comme équivalant à un enroulement triphasé en court-circuit.

La figure I. donne la position des axes magnétiques des enroulements formant les phases de la machine.



**Figure I.1:** Représentation schématique des enroulements de la MASDE. [MER08]

On notera par l'indice s1 pour les grandeurs relatives à la première étoile (stator 1) et par l'indice s2 pour celles relatives à la deuxième étoile (stator 2).

Les phases de la première étoile  $a_{s1}, b_{s1}, c_{s1}$ , les phases de la deuxième étoile  $a_{s2}, b_{s2}, c_{s2}$  et les phases rotoriques  $a_r, b_r, c_r$ .

L'angle de décalage entre les deux étoiles est  $\alpha$ .  $\theta_m$  exprime la position du rotor (phase  $a_r$ ) par rapport à l'étoile 1 (phase  $a_{s1}$ ).  $\theta_2$  la position du rotor par rapport à l'étoile 2 (phase  $a_{s2}$ ), ces angles sont définis par les équations suivantes :

$$\theta_m = \Omega t + \theta_0 \quad (I.1)$$

$$\theta_2 = \theta_m - \alpha \quad (I.2)$$

Avec  $\Omega$  : la vitesse mécanique du rotor,  $\theta_0$  : la position initiale du rotor par rapport à l'étoile 1.

### I.2.1 Avantages et inconvénients de la MASDE

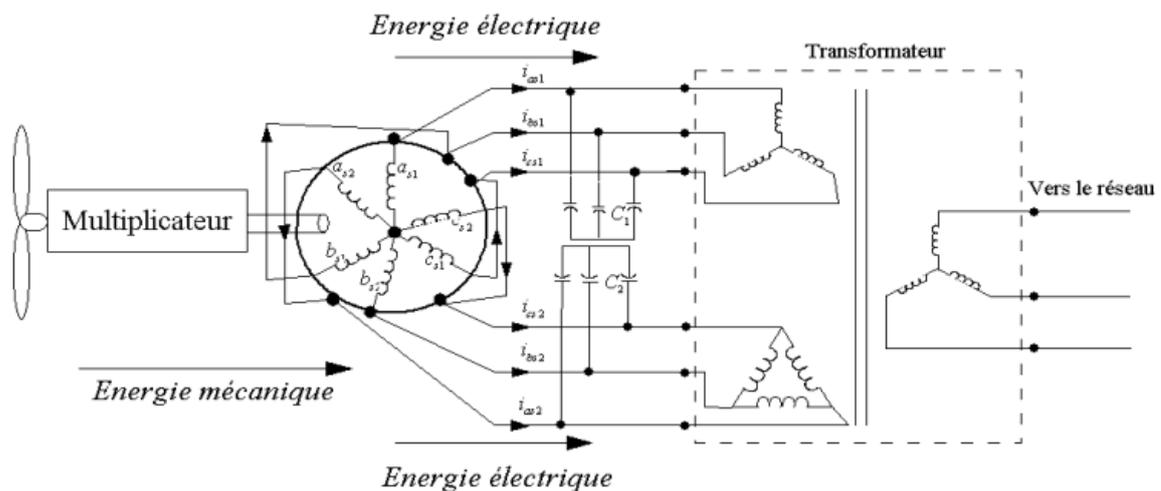
- **Avantages**
  - Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques ;
  - Amélioration de la fiabilité ;

- Elimination d'harmonique d'espace ;
  - Segmentation de la puissance afin de réaliser des ensembles convertisseur-machine de forte puissance. [Sad17]
- **Inconvénients**
    - Le nombre de semi-conducteur augmente avec le nombre de phase, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur-machine ;
    - L'apparition des courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension. [Had17]

### I.2.2 Domaines d'applications de la MASDE

Dans les applications de fortes puissances comme la propulsion navale et la traction ferroviaire ainsi que pour les applications nécessitant une grande fiabilité, les actionneurs électriques multiphasés sont très fréquemment employés tel que la MASDE. En effet, cette machine à grand nombre de phase présente plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées.

Une autre application concerne l'utilisation de la MASDE dans les systèmes de production de l'énergie éolienne (figure I.2). [Bes18]



**Figure I.2 :** Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases. [Lak14]

### I.2.3 Principe de fonctionnement de la MASDE

Comme toutes les machines électriques, la MASDE peut fonctionner en deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice).

- **Fonctionnement moteur** : les courants statoriques de la machine asynchrone double étoile créent un champ magnétique tournant dans les deux stators, la fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme  $\omega_s$  (équation I.3). Ces deux champs tournants produits par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les barres du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse inférieure à celle du synchronisme. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse de glissement (équation I.4), le glissement (équation I.5) dans ce cas est positif. [Ber16]
- **Fonctionnement génératrice** : pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l'équation suivante :

$$\omega_s = \frac{60f}{p} \quad (I.3)$$

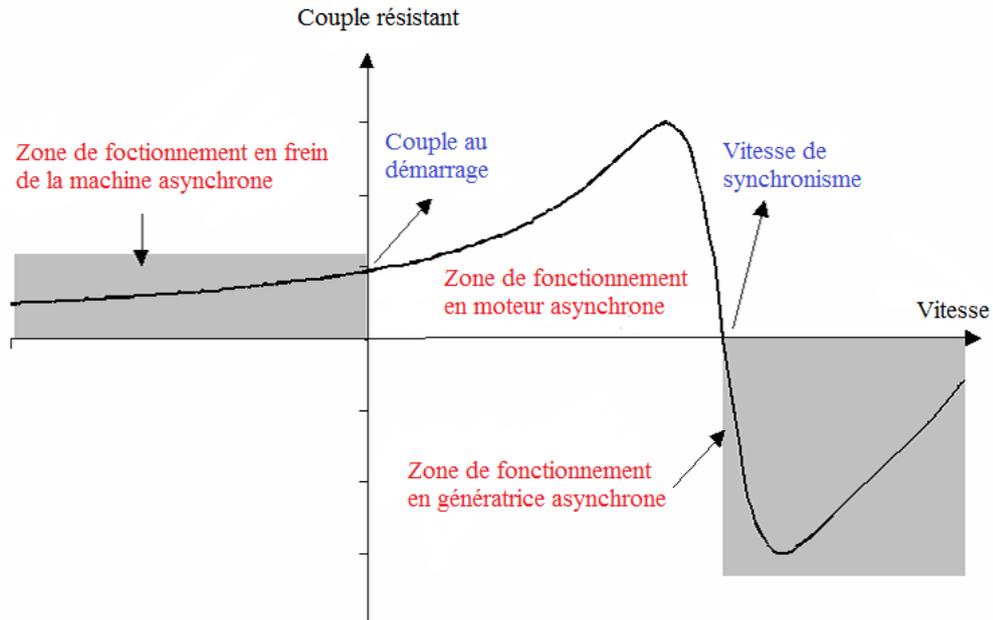
Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique, la différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est la différence (à dimensionner) est dite relative :

$$\omega = \omega_s - \omega_r \quad (I.4)$$

On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport:

$$g = \frac{\omega}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (I.5)$$

Dans ce cas le glissement  $g$  est négatif. [Mou07]



**Figure I.3** : Modes de fonctionnement de la MASDE suivant la vitesse. [Fer09]

L'intérêt techno-économique des systèmes multi-phasés (supérieur à 3 phases) dans la production de l'énergie telle que la segmentation de la puissance, nous conduit à l'étude de l'un de leur modèle type telle que la génératrice asynchrone à cage double étoile (GASDE).

### I.3 Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile

#### 1.3.1 Hypothèses simplificatrices pour l'étude de la GASDE

La génératrice asynchrone double étoile (GASDE), avec la répartition de ses enroulements et sa propre géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- Force magnétomotrice à répartition spatiale sinusoïdale ce qui revient à négliger les harmoniques d'espace ;

- On admet que les deux enroulements triphasés statoriques sont équilibrés et identiques ;
- Les phénomènes provoquant des variations de résistance et d'inductance (température, fréquence) ne sont pas pris en compte ;
- Les pertes dans le fer ne sont pas prises en compte dans la mise en équation de la machine (la perméabilité du circuit magnétique est supposée infinie). [Ami08], [Ben19]

### I.3.2 Modèle dans le repère naturel (a, b, c) de la GASDE

Pris individuellement, les bobines triphasés des deux étoiles et le circuit rotorique (cage d'écureuil ou bobinage triphasé) peuvent être régis par la loi de Faraday du type (équation I.6) qui est, en fait, la combinaison des lois d'Ohm et de Lenz. La machine entière peut être également régie par la même loi en superposant les effets dus à la présence simultanée des trois circuits.

#### I.3.2.1 Equations des tensions en mode générateur [Ben19]

En tenant compte des hypothèses simplificatrices énoncées ci-dessus, les équations des tensions de la GASDE, fonctionnant en génératrice, s'écrivent comme ci-après.

a- Equations des tensions pour l'étoile 1

$$[v_{s1}] = -[R_{s1}][i_{s1}] - \frac{d[\varphi_{s1}]}{dt} \quad (I.6)$$

$$\text{Avec : } [V_{s1}] = \begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix}, [i_{s1}] = \begin{bmatrix} i_{as1} \\ i_{bs1} \\ i_{cs1} \end{bmatrix}, [\varphi_{s1}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as1} \\ \varphi_{bs1} \\ \varphi_{cs1} \end{bmatrix}, [R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{as1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs1} \end{bmatrix}$$

$V_{as1}, V_{bs1}, V_{cs1}$ : Tensions simples des phases de l'étoile 1.

$i_{as1}, i_{bs1}, i_{cs1}$ : Courants des phases de l'étoile 1.

$\varphi_{as1}, \varphi_{bs1}, \varphi_{cs1}$ : Flux propres circulant dans l'étoile 1.

$R_{as1}, R_{bs1}, R_{cs1}$ : Résistances des phases statoriques de l'étoile 1.

Pour un circuit de l'étoile 1 équilibré :

$$[R_{s1}] = [R_{as1}] = [R_{bs1}] = [R_{cs1}]$$

*b- Equations des tensions pour l'étoile 2*

$$[v_{s2}] = -[R_{s2}][i_{s2}] - \frac{d[\varphi_{s2}]}{dt} \quad (1.7)$$

$$\text{Avec : } [V_{s2}] = \begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix}, [i_{s2}] = \begin{bmatrix} i_{as2} \\ i_{bs2} \\ i_{cs2} \end{bmatrix}, [\varphi_{s2}] = \begin{bmatrix} \varphi_{as2} \\ \varphi_{bs2} \\ \varphi_{cs2} \end{bmatrix}, [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{as2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs2} \end{bmatrix}$$

$V_{as2}, V_{bs2}, V_{cs2}$ : Tensions simples des phases de l'étoile 2.

$i_{as2}, i_{bs2}, i_{cs2}$ : Courants des phases de l'étoile 2.

$\varphi_{as2}, \varphi_{bs2}, \varphi_{cs2}$ : Flux propres circulant dans l'étoile 2.

$R_{as1}, R_{bs2}, R_{cs2}$ : Résistances des phases statoriques de l'étoile 2.

Pour un circuit étoile 2 équilibré :

$$[R_{s2}] = [R_{as2}] = [R_{bs2}] = [R_{cs2}]$$

*c- Equations des tensions pour le rotor*

$$[V_r] = [R_r][i_r] - \frac{d[\varphi_r]}{dt} \quad (1.8)$$

$$\text{Avec : } [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

$V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$  : Tensions simples des phases du rotor (supposé triphasé).

$i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$  : Courants dans le circuit du rotor.

$\varphi_{ar}, \varphi_{br}, \varphi_{cr}$  : Flux propres circulant dans le circuit du rotor.

$R_{ar}, R_{br}, R_{cr}$  : Résistances des phases rotoriques.

Pour un circuit équilibré :

$$[R_r] = [R_{ar}] = [R_{br}] = [R_{cr}]$$

Pour un circuit rotorique en cage d'écureuil :

$$[v_{ar}] = [v_{br}] = [v_{cr}] = 0$$

*d- Equations des tensions pour la GASDE*

En notation matricielle, on peut écrire :

$$[v] = -[R][i] - \frac{d[\varphi]}{dt} \quad (1.9)$$

Avec :

$$[v] = [[v_{s1}][v_{s2}][v_r]]^{tr} = [v_{as1} \ v_{bs1} \ v_{cs1} \ v_{as2} \ v_{bs2} \ v_{cs2} \ 0 \ 0 \ 0]^{tr}$$

$$[i] = [[i_{s1}][i_{s2}][i_r]]^{tr} = [i_{as1} \ i_{bs1} \ i_{cs1} \ i_{as2} \ i_{bs2} \ i_{cs2} \ i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^{tr}$$

$$[\varphi] = [[\varphi_{s1}][\varphi_{s2}][\varphi_r]]^{tr} = [\varphi_{as1} \ \varphi_{bs1} \ \varphi_{cs1} \ \varphi_{as2} \ \varphi_{bs2} \ \varphi_{cs2} \ \varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^{tr}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{as1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{as2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{bs2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{cs2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix}$$

### 1.3.2.2 Expressions des flux

Le flux total embrassé par une phase de l'étoile 1 est obtenu par la somme vectorielle de l'effet du courant dans la bobine considérée et de l'effet des courants circulant dans les autres bobines. [Mer08]

Cette addition peut être exprimée sous forme matricielle.

**Pour l'étoile 1 :**

$$[\varphi_{s1}] = [L_{s1,s1}][i_{s1}] + [M_{s1,s2}][i_{s2}] + [M_{s1,r}][i_r] \quad (I.10)$$

**Pour l'étoile 2 :**

$$[\varphi_{s2}] = [M_{s2,s1}][i_{s1}] + [L_{s2,s2}][i_{s2}] + [M_{s2,r}][i_r] \quad (I.11)$$

**Pour le rotor :**

$$[\varphi_r] = [M_{r,s1}][i_{s1}] + [M_{r,s2}][i_{s2}] + [L_{r,r}][i_r] \quad (I.12)$$

Les équations des flux statoriques (étoiles 1 et 2) et rotoriques en fonction des courants sous forme matricielle sont données par :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{s1} \\ \varphi_{s2} \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1,s1} & M_{s1,s2} & M_{s1,r} \\ M_{s2,s1} & L_{s2,s2} & M_{s2,r} \\ M_{r,s1} & M_{r,s2} & L_{r,r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_r \end{bmatrix} \quad (I.13)$$

Les sous matrices des inductances dans les équations (I.10), (I.11) et (I.12) sont exprimées comme suit :

$$[L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (I.14)$$

$$[L_{s2,s2}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (I.15)$$

$$[L_{r,r}] = \begin{bmatrix} L_r/L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

$$[M_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (I.17)$$

$$[M_{s1,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_m) & \cos(\theta_m + 2\pi/3) & \cos(\theta_m + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_m + 4\pi/3) & \cos(\theta_m) & \cos(\theta_m + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_m + 2\pi/3) & \cos(\theta_m + 4\pi/3) & \cos(\theta_m) \end{bmatrix} \quad (I.18)$$

$$[M_{s2,r}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos(\theta_2 + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_2 + 4\pi/3) & \cos(\theta_2) & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos(\theta_2 + 4\pi/3) & \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (I.19)$$

$$[M_{s2,s1}] = [M_{s1,s2}]^{tr}; [M_{r,s1}] = [M_{s1,r}]^{tr}; [M_{r,s2}] = [M_{s2,r}]^{tr}$$

$$L_{ms} = L_{mr} = M_{sr} = \frac{2}{3} L_m$$

Avec :

$L_{s1}$ : Inductance propre de la 1<sup>ère</sup> étoile ;

$L_{s2}$ : Inductance propre de la 2<sup>ème</sup> étoile ;

$L_r$  : Inductance propre d'une phase du rotor ;

$L_{ms}$ : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique ;

$L_{mr}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique ;

$M_{sr}$ : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre une étoile et le rotor.

### I.3.2.3 Equation mécanique [Adj12]

L'équation fondamentale de rotation du rotor est décrite par les deux relations suivantes :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = (C_{em} - C_r - F_f \Omega) \quad (I.20)$$

$$\Omega = \frac{\omega_r}{p} \quad (II.21)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie de la machine ;

$C_{em}$  : Couple électromagnétique ;

$C_r$  : Couple résistant (couple de la charge) ;

$F_f$  : Coefficient de frottement ;

$\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation.

#### 1.3.2.4 Expression du couple électromagnétique [Ami08]

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor :

$$C_{em} = \frac{\partial \omega}{\partial \theta_{geo}} = p \frac{\partial \omega}{\partial \theta_{ele}} \quad (I.22)$$

Avec :

$$\omega = \frac{1}{2} \{ [i_{s1}]^{tr} [\varphi_{s1}] + [i_{s2}]^{tr} [\varphi_{s2}] + [i_r]^{tr} [\varphi_r] \} \quad (I.23)$$

D'où :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left\{ [i_{s1}] \frac{d}{d\theta_m} [M_{s1,r}] [i_r]^{tr} + [i_{s2}] \frac{d}{d\theta_m} [M_{s2,r}] [i_r]^{tr} \right\} \quad (I.24)$$

### 1.3.3 Modèle biphasé de la GASDE

#### 1.3.3.1 Transformation de Park

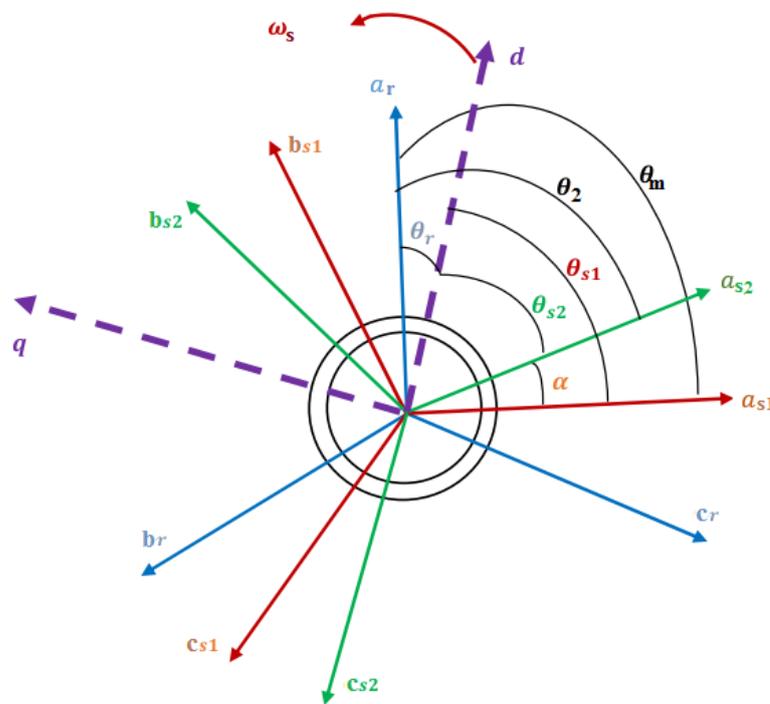
Afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système on utilise des transformations orthogonales. On obtient donc des équations simples par des

changements de variables appropriés. Parmi les transformations les plus utilisées, on a celle de Park.

La transformation de Park consiste à transformer le système d'enroulements triphasés statoriques d'axes a, b, c en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice.

La composante homopolaire ne participe pas à cette création de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d, q). [Ber16]

La figure I.4 représente le modèle généralisé de la GASDE selon le système d'axes (d, q) tournant à la vitesse  $\omega_s$ .



**Figure I.4** : Représentation du modèle de la GASDE selon les axes (d, q). [Ben19]

De la figure I.4 on déduit les relations entre les angles :

$$\theta_{s1} = \theta_m - \theta_r \quad (I.25)$$

$$\theta_{s2} = \theta_{s1} - \alpha = \theta_m - \theta_r - \alpha \quad (1.26)$$

$\theta_{s1}$  : Angle entre l'axe magnétique de la phase  $a_{s1}$  et l'axe d.

$\theta_{s2}$  : Angle entre l'axe magnétique de la phase  $a_{s2}$  et l'axe d.

$\theta_r$  : Angle entre l'axe magnétique de la phase  $a_r$  et l'axe d.

La matrice de Park générale est:

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

La transformation de Park.

$$[G_{dqo}] = [P(\theta)][G_{abc}]$$

La transformation de Park inverse

$$[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[G_{dqo}]$$

Sachant que :  $[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$

Pour l'**étoile 1** la matrice de Park est définie comme suit :

$$[P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1}) & \cos(\theta_{s1} - 2\pi/3) & \cos(\theta_{s1} + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_{s1}) & -\sin(\theta_{s1} - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{s1} + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

Le système de tensions triphasées de l'étoile 1 se transforme comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{qs1} \\ V_{os1} \end{bmatrix} = [P(\theta_{s1})] \begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

La matrice de Park pour l'**étoile 2** est définie comme suit :

$$\begin{aligned}
[P(\theta_{s2})] &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s2}) & \cos(\theta_{s2} - 2\pi/3) & \cos(\theta_{s2} + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_{s2}) & -\sin(\theta_{s2} - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{s2} + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \\
&= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{s1} - \alpha) & \cos(\theta_{s1} - \alpha - 2\pi/3) & \cos(\theta_{s1} - \alpha + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_{s1} - \alpha) & -\sin(\theta_{s1} - \alpha - 2\pi/3) & -\sin(\theta_{s1} - \alpha + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.30)
\end{aligned}$$

Le système de tensions triphasées de l'étoile 2 se transforme comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds2} \\ V_{qs2} \\ V_{os2} \end{bmatrix} = [P(\theta_{s1} - \alpha)] \begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

La matrice de Park pour le rotor est définie comme suit :

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta_r + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

### 1.3.3.2 Choix du référentiel [Ber16]

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone double étoile, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes.

Trois types de référentiels sont intéressants en pratique, le choix du référentiel se fait selon le problème à étudier.

- **Référentiel lié au stator «  $\alpha, \beta$  »**

Dans ce référentiel, les axes ( $\alpha, \beta$ ) sont immobiles par rapport au stator ( $\omega_{coor} = 0$ ). Dans ce cas, la phase  $a_{s1}$  et  $\alpha$  coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage de machine à courant alternatif.

- **Référentiel lié au rotor «  $x, y$  »**

Dans ce référentiel, les axes ( $x, y$ ) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse  $\omega_s$  donc ( $\omega_{coord} = \omega_r$ ).

L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires des machines alternatives synchrone et asynchrone.

- **Référentiel lié au champ tournant «  $d, q$  »**

Dans ce référentiel, les axes ( $d, q$ ) sont immobiles par rapport au champ tournant créé par les deux étoiles du stator ( $\omega_{coord} = \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ ).

Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande. Dans notre travail, nous utilisons ce référentiel.

### **I.3.4 Modélisation de la GASDE dans un repère ( $d, q$ ) lié au champ tournant**

Dans la plupart des cas le modèle linéaire de la machine asynchrone double étoile est suffisant pour obtenir des bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage...). Ce modèle considère que l'inductance magnétisante est constante, ce qui n'est pas tout à fait vrai, car le matériau magnétique utilisé pour la fabrication n'est pas parfaitement linéaire. Cependant dans certaines utilisations de la machine asynchrone (alimentation avec onduleur, génératrice auto-excitée, éoliennes), il est très indispensable de tenir compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique et donc de la variation de l'inductance magnétisante.

L'écriture du modèle de la machine asynchrone double étoile dans un repère biphasé ( $d, q$ ) lié au champ tournant est obtenue en utilisant les transformations normées de Park afin de conserver la puissance. En appliquant ces transformations aux tensions ainsi qu'aux flux statoriques, nous obtenons les modèles électrique (I.37) et magnétique (I.38).

### 1.3.4.1 Equations des tensions [Ben19]

Dans le modèle de Park, nous pouvons écrire également sous forme matricielle une équation de tensions analogue à (I.9) :

$$[V_{dqo}] = -[R][i_{dqo}] - \frac{d[\varphi_{dqo}]}{dt} \quad (I.33)$$

$$\text{Avec : } [V_{dqo}] = [[V_{s1}][V_{s2}][V_r]]^{tr} = [V_{ds1} V_{qs1} V_{os1} V_{ds2} V_{qs2} V_{os2} V_{dr} V_{qr} V_{or}]$$

Comme le circuit rotorique est en court-circuit (cage d'écurueil), on a :

$$[V_r] = [0 \ 0 \ 0]^{tr}$$

Dans le cas d'un système équilibré, la composante homopolaire ne participe pas à la production du couple électromagnétique et l'on obtient donc :

$$[V_{dqo}] = [[V_{s1}][V_{s2}][0]]^{tr} = [V_{ds1} V_{qs1} 0 V_{ds2} V_{qs2} 0 \ 0 \ 0 \ 0]^{tr}$$

Dans le cas d'une alimentation sans fils neutre, la composante homopolaire est nulle :

$$[i_{dqo}] = [[i_{s1}][i_{s2}][i_r]]^{tr} = [i_{ds1} i_{qs1} 0 i_{ds2} i_{qs2} 0 i_{dr} i_{qr} 0]^{tr}$$

$$[\varphi_{dqo}] = [[\varphi_{s1}][\varphi_{s2}][\varphi_r]]^{tr} = [\varphi_{ds1} \varphi_{qs1} \varphi_{os1} \varphi_{ds2} \varphi_{qs2} \varphi_{os2} \varphi_{dr} \varphi_{qr} \varphi_{or}]^{tr}$$

L'équation matricielle (I.33) se décompose comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{qs1} \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s1}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds1} \\ \varphi_{qs1} \\ \varphi_{os1} \end{bmatrix} \quad (I.34)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ds2} \\ V_{qs2} \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{os2} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_{s2}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds2} \\ \varphi_{qs2} \\ \varphi_{os2} \end{bmatrix} \quad (I.35)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{or} \end{bmatrix} \quad (I.36)$$

$\frac{d(\theta_{s1})}{dt}$  : Vitesse de rotation du repère  $(d, q)$  par rapport à l'étoile 1.

$\frac{d(\theta_{s2})}{dt}$  : Vitesse de rotation du repère  $(d, q)$  par rapport à l'étoile 2.

$\frac{d(\theta_r)}{dt} = \omega_r$  : Vitesse de rotation du repère  $(d, q)$  par rapport au rotor.

$$\begin{aligned}
 V_{ds1} &= -R_{s1}i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} - \omega_s\varphi_{qs1} \\
 V_{qs1} &= -R_{s1}i_{qs1} + \frac{d\varphi_{qs1}}{dt} + \omega_s\varphi_{ds1} \\
 V_{ds2} &= -R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} - \omega_s\varphi_{qs2} \\
 V_{qs2} &= -R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} + \omega_s\varphi_{ds2} \\
 V_{dr} &= 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r)\varphi_{qr} \\
 V_{qr} &= 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)\varphi_{dr}
 \end{aligned} \tag{1.37}$$

### 1.3.4.2 Expressions des flux [Chi12]

Les flux de liaison des deux enroulements fictifs statoriques et rotorique dans le repère  $(d, q)$  sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{ds1} &= -L_{l1}i_{ds1} - L_{lm}(i_{ds1} + i_{ds2}) - L_{dq}i_{qs2} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \\
 \varphi_{qs1} &= -L_{l1}i_{qs1} - L_{lm}(i_{qs1} + i_{qs2}) + L_{dq}i_{ds2} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) \\
 \varphi_{ds2} &= -L_{l2}i_{ds2} - L_{lm}(i_{ds1} + i_{ds2}) + L_{dq}i_{qs1} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \\
 \varphi_{qs2} &= -L_{l2}i_{qs2} - L_{lm}(i_{qs1} + i_{qs2}) - L_{dq}i_{ds1} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr})
 \end{aligned} \tag{1.38}$$

$$\varphi_{dr} = L_{lr}i_{dr} + L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr})$$

$$\varphi_{qr} = L_{lr}i_{qr} + L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr})$$

Les inductances cycliques de saturation sont données par : **[Abd12]**

$$L_{md} = L_m + \frac{i_{md}}{i_{mq}} L_{dq} = L \cos^2 \mu + L_m \sin^2 \mu \quad (1.39)$$

$$L_{mq} = L_m + \frac{i_{mq}}{i_{md}} L_{dq} = L \sin^2 \mu + L_m \cos^2 \mu \quad (1.40)$$

$$\cos \mu = \frac{i_{md}}{|\overline{i_m}|} \quad (1.41)$$

$$\sin \mu = \frac{i_{mq}}{|\overline{i_m}|} \quad (1.42)$$

Les inductances cycliques totales statoriques et rotoriques selon les axes d et q sont : **[Ami08]**

$$L_{s1d} = L_{l1} + L_{md}$$

$$L_{s1q} = L_{l1} + L_{mq}$$

$$L_{s2d} = L_{l2} + L_{md} \quad (1.43)$$

$$L_{qs2} = L_{l2} + L_{mq}$$

$$L_{dr} = L_{lr} + L_{md}$$

$$L_{qr} = L_{lr} + L_{mq}$$

L'inductance cyclique d'inter saturation est donnée par : **[Abd12]**

$$L_{dq} = \frac{i_{md}i_{mq}}{|\overline{i_m}|} \frac{dL_m}{d|\overline{i_m}|} = \frac{i_{md}i_{mq}}{|\overline{i_m}|^2} (L - L_m) \quad (1.44)$$

L'expression de l'inductance dynamique est : **[Abd12]**

$$L = \frac{d|\overline{\varphi_m}|}{d|\overline{i_m}|} \quad (1.45)$$

La relation de l'inductance de magnétisation est donnée par : **[Abd12]**

$$L_m = \frac{|\overline{\varphi_m}|}{|\overline{i_m}|} \quad (1.46)$$

L'expression de  $L_m$  est donnée par une expression non linéaire, pour la génératrice asynchrone double étoile, on a l'expression suivante : **[Ami08]**

$$L_m = 0.1406 + 0.0014I_m - 0.0012I_m^2 + 0.00005I_m^3 \quad (1.47)$$

Il en résulte à partir des équations (I.39)–(I.43) que sous les conditions magnétiques linéaires. **[Ami08]**

$$L_{dq} = 0, L_{md} = L_{mq} = L_m, L_{s1d} = L_{s1q}, L_{s2d} = L_{s2q}, L_{dr} = L_{qr} \quad (1.48)$$

Nous obtenons les flux de magnétisation selon les axes d et q en posant : **[Ben19]**

$$\varphi_{md} = L_{md}(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr}) \quad (1.49)$$

$$\varphi_{mq} = L_{mq}(-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr}) \quad (1.50)$$

Le module du flux magnétisant total est donné par :

$$\|\varphi_m\| = \sqrt{\varphi_{md}^2 + \varphi_{mq}^2} \quad (1.51)$$

Le module du courant de magnétisation peut être calculé par :

$$\|i_m\| = \sqrt{(-i_{ds1} - i_{ds2} + i_{dr})^2 + (-i_{qs1} - i_{qs2} + i_{qr})^2} \quad (1.52)$$

### 1.3.4.3 Puissance absorbée et couple électromagnétique **[Ami12]**

En négligeant les composantes homopolaires, la puissance absorbée par la GASDE dans le système d'axes (d, q), est exprimée par :

$$P_s = V_{ds1}i_{ds1} + V_{qs1}i_{qs1} + V_{ds2}i_{ds2} + V_{qs2}i_{qs2} \quad (1.53)$$

En remplaçant les tensions ( $V_{ds1}, V_{qs1}, V_{ds2}, V_{qs2}$ ) par leurs expressions dans l'expression (I.54), on trouve:

$$\begin{aligned}
 P_s = & [R_{s1}i_{ds1}^2 + R_{s1}i_{qs1}^2 - R_{s2}i_{ds2}^2 + R_{s1}i_{qs2}^2] \\
 & + \left( \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{ds1} + \frac{d\varphi_{ds1}}{dt} i_{qs1} + \frac{d\varphi_{ds2}}{dt} i_{ds2} + \frac{d\varphi_{qs2}}{dt} i_{qs2} \right) \\
 & + \omega_s (\varphi_{ds1} i_{ds1} - \varphi_{qs1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{ds2} + \varphi_{qs2} i_{qs2})
 \end{aligned} \tag{I.54}$$

L'expression (I.54) se compose de trois termes :

- Le premier terme correspond aux pertes par effet Joule ;
- Le second représente la variation de l'énergie électromagnétique (réserve d'énergie) ;
- Le dernier terme est la puissance électromagnétique ( $P_{em}$ ).

Sachant que l'expression du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = p \frac{P_{em}}{\omega_s} \tag{I.55}$$

$$C_{em} = p [\varphi_{ds1} i_{ds1} - \varphi_{qs1} i_{qs1} + \varphi_{ds2} i_{ds2} - \varphi_{qs2} i_{qs2}] \tag{I.56}$$

En remplaçant les flux ( $\varphi_{ds1}, \varphi_{qs1}, \varphi_{ds2}, \varphi_{qs2}$ ) donnés par (I.38) dans (I.56) on obtient :

$$C_{em} = p \cdot L_m [(i_{qs1} + i_{qs2}) i_{dr} - (i_{ds1} + i_{ds2}) i_{qr}] \tag{I.57}$$

A partir des équations des flux rotoriques ( $\varphi_{qr}, \varphi_{dr}$ ) exprimées par (I.38), on tire :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{dr} - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})] \tag{I.58}$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_m + L_r} [\varphi_{qr} - L_m (i_{qs1} + i_{qs2})] \tag{I.59}$$

En remplaçant (I.58) et (I.59) dans l'équation (I.57), on aura le couple électromagnétique exprimé en fonction des courants statoriques et des flux rotoriques dans le repère de Park ( $d, q$ ) : [Mer08]

$$C_{em} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{p}{2}\right) \frac{L_m}{L_{dr}} [\varphi_{dr}(i_{qs1} + i_{qs2}) - \varphi_{qr}(i_{ds1} + i_{ds2})] \quad (1.60)$$

### I.3.5 Représentation sous forme d'équation d'état du modèle de la machine [Abd08]

En introduisant le système d'équations (I.38) dans (I.37) et en mettant tout sous forme compacte, on aura :

$$[B][U] = [L][\dot{I}] + \omega[C][I] + [D][I] \quad (1.61)$$

$[U] = [V_{ds1} \ V_{qs1} \ V_{ds2} \ V_{qs2} \ V_{dr} \ V_{qr}]^{tr}$  : Vecteur de commande ;

$[I] = [i_{ds1} \ i_{ds2} \ i_{qs1} \ i_{qs2} \ i_{dr} \ i_{qr}]^{tr}$  : Vecteur d'état et  $[\dot{I}] = \frac{d}{dt} [I]$  ;

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

$[L]$ ,  $[D]$  et  $[C]$  sont respectivement données par les matrices suivantes, ou  $L_{ld} = L_{lm} + L_{md}$  et  $L_{lq} = L_{lm} + L_{mq}$  :

$$[L] = \begin{bmatrix} -(L_{s1} + L_{ld}) & 0 & -L_{ld} & L_{dq} & L_{md} & 0 \\ 0 & -(L_{s1} + L_{lq}) & L_{dq} & -L_{lq} & 0 & L_{mq} \\ -L_{ld} & L_{dq} & -(L_{s2} + L_{ld}) & 0 & L_{md} & 0 \\ -L_{dq} & -L_{lq} & 0 & -(L_{s2} + L_{lq}) & 0 & L_{mq} \\ -L_{md} & 0 & -L_{md} & 0 & (L_r + L_{md}) & 0 \\ 0 & -L_{mq} & 0 & -L_{mq} & 0 & (L_r + L_{mq}) \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} -R_{s1} & \omega_s(L_{s1} + L_{lq}) & -\omega_s L_{dq} & -\omega_s L_{lq} & 0 & -\omega_s L_{mq} \\ \omega_s(L_{s1} + L_{ld}) & -R_{s1} & -\omega_s L_{ld} & -\omega_s L_{dq} & \omega_s L_{md} & 0 \\ \omega_s L_{dq} & \omega_s L_{lq} & -R_{s2} & \omega_s(L_{s2} + L_{ld}) & 0 & -\omega_s L_{mq} \\ \omega_s L_{ld} & \omega_s L_{dq} & \omega_s(L_{s2} + L_{ld}) & R_{s2} & \omega_s L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & L_{mq} & 0 & (L_r + L_{mq}) \\ -L_{md} & 0 & -L_{md} & 0 & (L_r + L_{md}) & 0 \end{bmatrix}$$

En mettant le système (I.61) sous forme d'état, on trouve :

$$[\dot{I}] = [L]^{-1}\{[B][U] - \omega[C][I] - [D][I]\} \quad (I.62)$$

## I.4 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'établissement du modèle mathématique de la GASDE, en utilisant la transformation de Park et en adaptant quelques hypothèses afin de simplifier les démarches de cette modélisation, d'où on distingue la nécessité de la prise en compte de la saturation magnétique de la machine asynchrone double étoile en fonctionnement génératrice auto-excitée.

Cette dernière peut fonctionner soit en la raccordant au réseau d'alimentation soit en fonctionnement autonome auto-excité qui sera l'objet du chapitre suivant.

# **Chapitre II :**

**Auto-amorçage de la génératrice  
asynchrone double étoile (GASDE) en  
fonctionnement autonome**

## II.1 Introduction

La génératrice asynchrone double étoile à cage d'écureuil équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde grâce aux avantages qu'elle présente par rapport aux autres machines. Par ailleurs, son inconvénient principal réside au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elle tire soit du réseau si elle est raccordée à ce dernier, soit elle est compensée par un banc de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnement autonome qui est le cas de notre étude.

L'objectif de ce présent chapitre est l'étude et l'analyse de la GASDE, nous commençons d'abord par la description de la génératrice et du phénomène d'auto-amorçage avant d'entamer la détermination de la valeur de la capacité d'excitation qui est limitée par un minimum et un maximum et la modélisation de l'auto-amorçage, puis nous abordons la modélisation des charges statiques. Enfin, nous simulons la GASDE en trois différents modes de fonctionnement, le bilan de performances de la machine sera présenté en utilisant l'environnement Matlab-Simulink, les résultats de ces simulations seront analysés et discutés.

## II.2 Définition d'un système autonome

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes, on y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des groupes électrogènes. Ces systèmes sont des unités de production d'électricité généralement de petites tailles qui ne sont reliées à aucun réseau de distribution (reliées directement à la charge).

Dans le cas d'utilisations d'un système autonome plusieurs machines électriques peuvent assurer la conversion électromécanique autant que génératrice, tel que la génératrice asynchrone double étoile qui produise de l'énergie électrique à partir d'une énergie mécanique (éolienne), comme le montre la figure II.1.

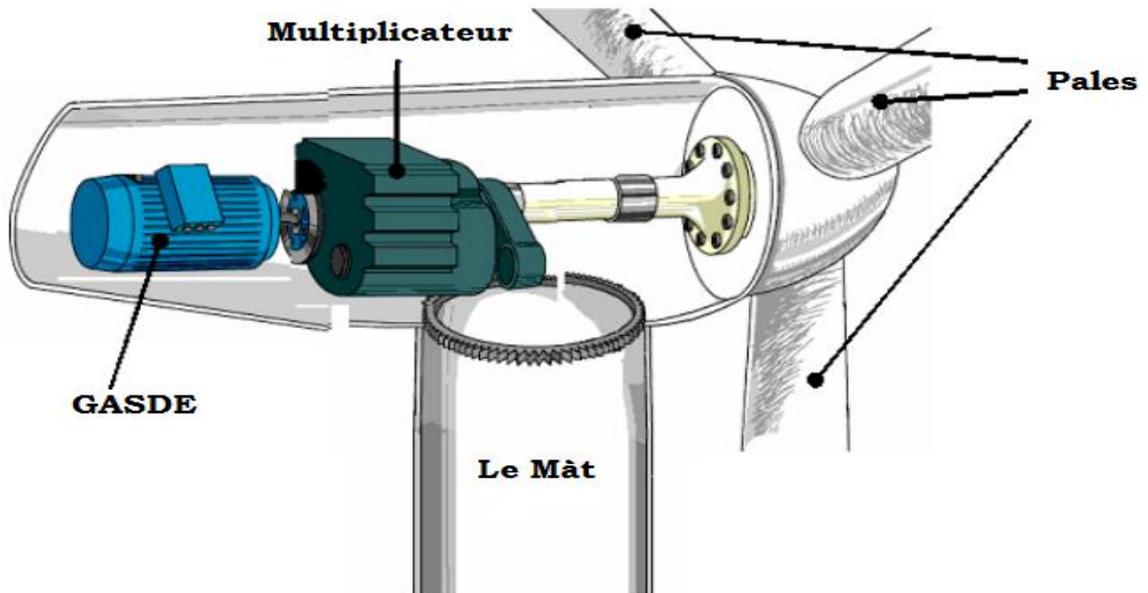


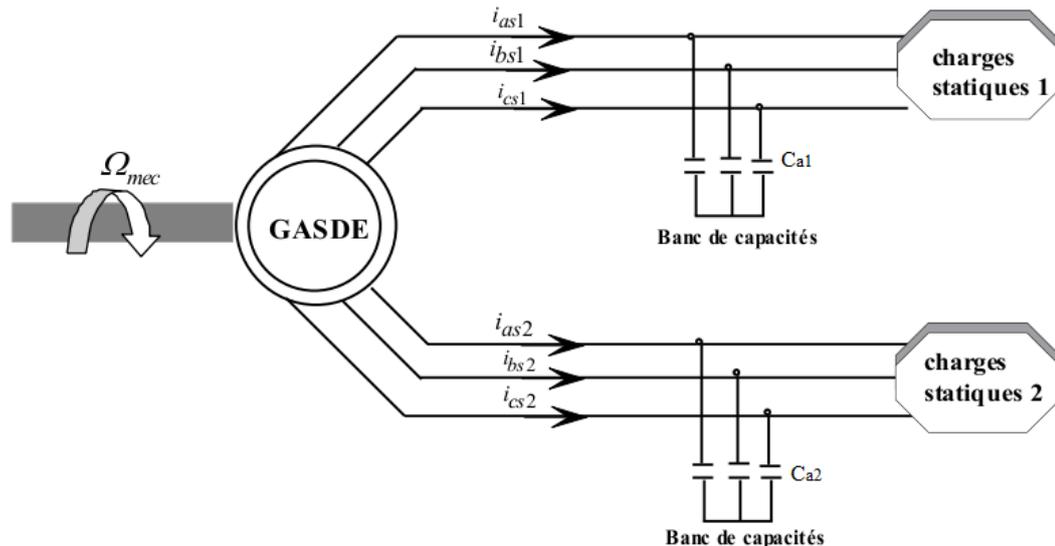
Figure II.1: Système éolien basé sur une GASDE. [Mer08]

### II.3 Génératrice asynchrone double étoile (GASDE) auto-amorcée en fonctionnement autonome

La GASDE dépend de la vitesse de rotation du rotor. Si cette dernière est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, elle se développe alors une force électromagnétique. Par contre la machine n'engendre pas sa propre énergie d'excitation. Pour cela, il faudra lui apporter cette énergie en plaçant une batterie de condensateurs aux bornes statoriques.

L'excitation de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est faite par, en plus de la vitesse d'entraînement du rotor, la connexion des batteries de condensateurs aux bornes statoriques et la présence du flux magnétique rémanent dans le fer rotorique, qui sont les conditions nécessaires pour l'auto-amorçage de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil. [Che15]

Une présentation schématique de la GASDE auto-amorcée en fonctionnement autonome est donnée par la figure II.2.



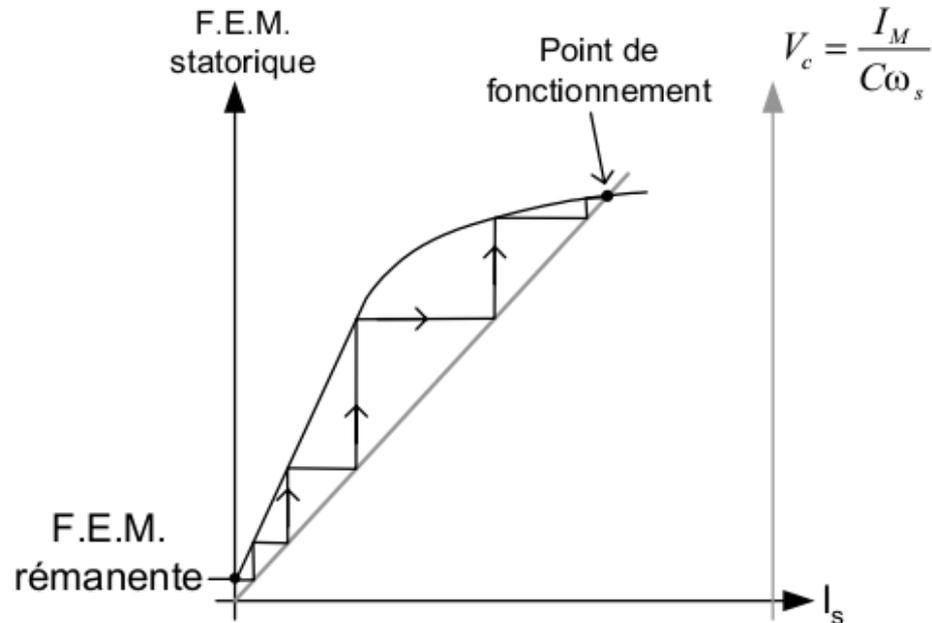
**Figure II.2** : Schéma représentatif de la GASDE auto-amorçée en fonctionnement autonome. [Che15]

## II.4 Phénomène d'auto-amorçage

En fonctionnement autonome, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. Le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice commence par le flux rémanent (la présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour son auto-amorçage) et avec la rotation du rotor, il donne une petite tension/courant aux bornes de la GASDE et à travers le condensateur d'auto-amorçage qui va augmenter la tension/courant par sa nature, puis il renvoi de tension/courant de valeur supérieure par rapport à celle envoyée par la génératrice. Ce processus est répété jusqu'à l'instant où la tension/courant renvoyée par le condensateur soit égale à celle envoyée par la génératrice (point de fonctionnement). [Ker13]

La prise en compte du phénomène de saturation magnétique est très importante, car lors de la simulation du phénomène d'auto-excitation d'une machine c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. [Poi03]

La figure II.3 représente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe du condensateur ( $V_c = \frac{I_M}{C\omega_s}$ ) où  $\omega$  est la pulsation des signaux statoriques en fonction du courant  $I_M$ , pour un fonctionnement à vide de la machine. L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent.



**Figure II.3** : Phénomène d'auto-amorçage. [Poi03]

## II.5 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage

L'auto-amorçage de la GASDE, ne peut avoir lieu que si la puissance nécessaire produite par le banc de capacités correspond à celle absorbée par la machine. Cependant, pour la partie puissance réactive, on doit insérer et déterminer la valeur des capacités d'excitation shunt. Sachant que, les grandeurs des condensateurs sont limitées par un minimum et un maximum  $C_{amin} \leq C_a \leq C_{amax}$ . La condition nécessaire pour l'auto-amorçage est :

$$L_s C_a \omega_s^2 > 1$$

$$\rightarrow C_a > \frac{1}{L_s \omega_s^2} \quad (\text{II. 1})$$

Cette condition montre que la valeur minimale (critique) conduisant à l'auto-amorçage est en fonction de l'inductance cyclique statorique ainsi que de la pulsation rotorique du glissement, car pour  $g = 0$ , on a  $\omega_r = \omega_s$ , d'où :

$$C_a > \frac{1}{L_s \omega_r^2} \quad (\text{II. 2})$$

L'équation (II.2) est établie pour la génératrice asynchrone à cage classique, concernant la GASDE on doit satisfaire la même condition. En pratique, seule la valeur de  $C_{amin}$  est intéressante, car au-delà de  $C_{amax}$  un fonctionnement instable est envisagé. [Poi03], [Che15]

## II.6 Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE

Puisque le fonctionnement en génératrice autonome exige une source d'énergie réactive extérieure (banc de capacités), les équations d'auto excitation sont donc les équations des tensions aux bornes des condensateurs.

Les bancs de condensateurs sont connectés en étoile aux bornes des deux étoiles. Les équations de tensions aux bornes des condensateurs de chaque étoile sont écrites dans le référentiel lié au champ tournant ( $\omega_s = \omega_{coor}$ ) comme suit :

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}V_{ds1} &= \frac{1}{C_{a1}}i_{dca1} + \omega_s V_{qs1} \\ \frac{d}{dt}V_{qs1} &= \frac{1}{C_{a1}}i_{qca1} - \omega_s V_{ds1} \\ \frac{d}{dt}V_{ds2} &= \frac{1}{C_{a2}}i_{dca2} + \omega_s V_{qs2} \\ \frac{d}{dt}V_{qs2} &= \frac{1}{C_{a2}}i_{qca2} - \omega_s V_{ds2}\end{aligned}\tag{II.3}$$

Où  $i_{dca1}, i_{qca1}, i_{dca2}, i_{qca2}$  représentent les courants d'excitation selon les axes  $d$  et  $q$ , étoile 1 et 2.  $C_{a1}, C_{a2}$  sont les condensateurs d'excitation aux bornes de l'étoile 1 et 2 respectivement. [Ben15]

Dans le cas de fonctionnement à vide (pas de charge connectée aux bornes des étoiles), on a:[Mer08]

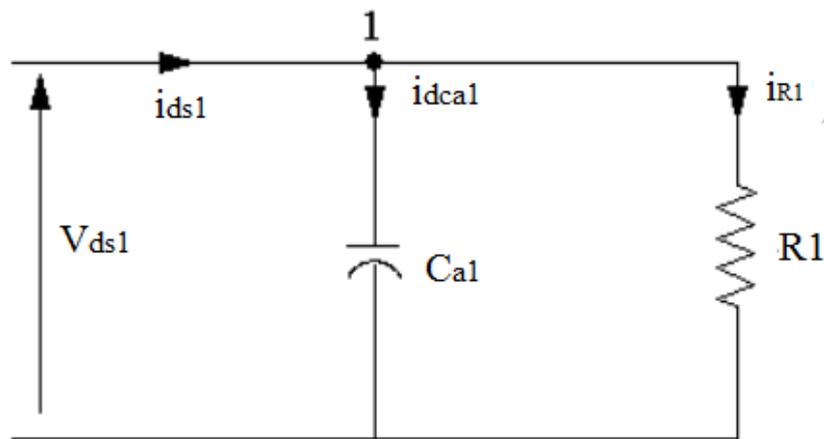
$$\begin{aligned}i_{ds1} &= i_{dca1} \\ i_{qs1} &= i_{qca1} \\ i_{ds2} &= i_{dca2} \\ i_{qs2} &= i_{qca2}\end{aligned}\tag{II.4}$$

## II.7 Modélisation des charges statiques

Dans le cas où la génératrice débite sur une charge équilibrée, on discerne deux types de charges les plus courantes (charge purement résistive, et charge inductive).

### II.7.1 Charge purement résistive (R)

La charge résistive est présentée par trois résistances identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateurs pour chaque étoile de la GASDE. Le schéma réduit de connexion en axe de l'étoile 1 est donnée par la figure II.4 et même chose pour le reste. [Mer08], [Ami08]



**Figure II.4** : Connexion de la charge R selon l'axe d (étoile 1). [Mer08]

Au nœud 1, on écrit l'équation des courants sortant et entrant.

$$i_{dca1} = i_{ds1} - \frac{V_{ds1}}{R_1} \quad (II.5)$$

$$\text{Avec : } i_{R1} = \frac{V_{ds1}}{R_1}$$

Même chose pour les courants  $i_{qca1}$ ,  $i_{dca2}$ ,  $i_{qca2}$ , on écrit :

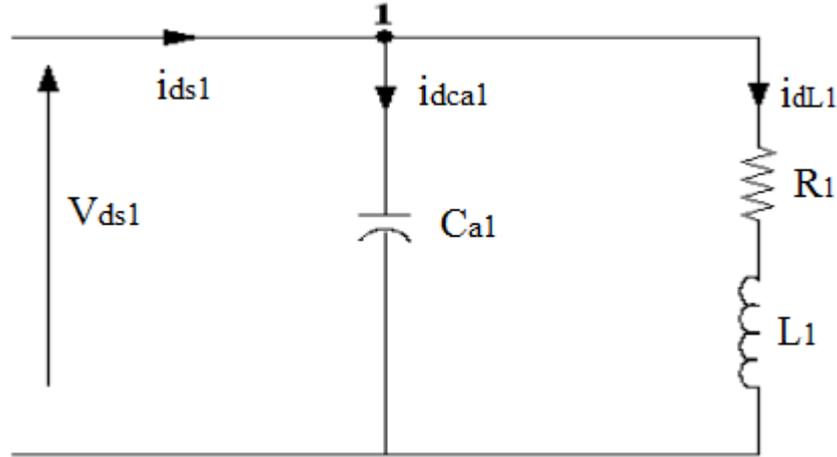
$$\begin{aligned} i_{qca1} &= i_{qs1} - \frac{V_{qs1}}{R_1} \\ i_{dca2} &= i_{ds2} - \frac{V_{ds2}}{R_2} \\ i_{qca2} &= i_{qs2} - \frac{V_{qs2}}{R_2} \end{aligned} \quad (II.6)$$

En substituant (II. 5) et (II. 6) dans le système d'équations (II. 3), on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}V_{ds1} &= \frac{1}{C_{a1}}\left(i_{ds1} - \frac{1}{R_1}V_{ds1}\right) + \omega_s V_{qs1} \\ \frac{d}{dt}V_{qs1} &= \frac{1}{C_{a1}}\left(i_{qs1} - \frac{1}{R_1}V_{qs1}\right) - \omega_s V_{ds1} \\ \frac{d}{dt}V_{ds2} &= \frac{1}{C_{a2}}\left(i_{ds2} - \frac{1}{R_2}V_{ds2}\right) + \omega_s V_{qs2} \\ \frac{d}{dt}V_{qs2} &= \frac{1}{C_{a2}}\left(i_{qs2} - \frac{1}{R_2}V_{qs2}\right) - \omega_s V_{ds2} \end{aligned} \quad (\text{II. 7})$$

### II.7.2 Charge inductive (RL)

La charge inductive est présentée par trois (résistances-inductances) identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateurs pour chaque étoile de la GASDE. Le schéma réduit de connexion en axe d de l'étoile 1 est donnée par la figure II.5 et même chose pour le reste. [Mer08], [Ham16]



**Figure II.5** : Connexion de la charge RL selon l'axe d (étoile 1). [Mer08]

Au nœud 1, on écrit l'équation des courants sortant et entrant.

$$i_{dca1} = i_{ds1} - i_{dL1} \quad (\text{II. 8})$$

Même chose pour les courants  $i_{qca1}$ ,  $i_{dca2}$ ,  $i_{qca2}$ , on écrit :

$$\begin{aligned} i_{qca1} &= i_{qs1} - i_{qL1} \\ i_{dca2} &= i_{ds2} - i_{dL2} \end{aligned} \quad (\text{II. 9})$$

$$i_{qca2} = i_{qs2} - i_{qL2}$$

En substituant (II. 8) et (II. 9) dans le système d'équations (II. 3), on trouve :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_{ds1} &= \frac{1}{C_{a1}} (i_{ds1} - i_{dL1}) + \omega_s V_{qs1} \\ \frac{d}{dt} V_{qs1} &= \frac{1}{C_{a1}} (i_{qs1} - i_{qL1}) - \omega_s V_{ds1} \\ \frac{d}{dt} V_{ds2} &= \frac{1}{C_{a2}} (i_{ds2} - i_{dL2}) + \omega_s V_{qs2} \\ \frac{d}{dt} V_{qs2} &= \frac{1}{C_{a2}} (i_{qs2} - i_{qL2}) - \omega_s V_{ds2} \end{aligned} \quad (\text{II. 10})$$

Les courants de charge directs et quadratiques sont :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_{dL1} &= \frac{1}{L_1} (V_{ds1} - R_1 i_{dL1}) + \omega_s i_{qL1} \\ \frac{d}{dt} i_{qL1} &= \frac{1}{L_1} (V_{qs1} - R_1 i_{qL1}) - \omega_s i_{dL1} \\ \frac{d}{dt} i_{dL2} &= \frac{1}{L_2} (V_{ds2} - R_2 i_{dL2}) + \omega_s i_{qL2} \\ \frac{d}{dt} i_{qL2} &= \frac{1}{L_2} (V_{qs2} - R_2 i_{qL2}) - \omega_s i_{dL2} \end{aligned} \quad (\text{II. 11})$$

## II.8 Simulation et interprétation des résultats

Les résultats de simulation ont été obtenus avec les paramètres de la GASDE données dans l'Annexe. Les performances de la GASDE ont été testées seulement en trois modes de fonctionnement à vide, en charge purement résistive et en charge inductive, la vitesse étant fixée à  $\Omega=157.25$  rd/s.

### II.8.1 Fonctionnement à vide

- **Sans saturation**

On a commencé par la simulation de la GASDE sans saturation où on considère l'inductance de magnétisation constante.

Cet essai est effectué à vide avec ( $C_a = C_{a1} = C_{a2} = 40\mu\text{F}$  et  $L_m = 0.1406\text{H}$ )

La figure II.6 illustre respectivement le développement de la tension et du courant aux bornes de la GASDE en régime non-saturé qui augmentent indéfiniment d'une façon exponentielle en fonction du temps (croissance infinie). Cela montre vraiment l'importance de la saturation magnétique de la machine (en mode génératrice autonome) sur la stabilisation des caractéristiques de la GASDE à vide ou en charge.

En fonctionnement linéaire l'inductance de magnétisation est considérée comme constante et égale à sa valeur en régime non-saturé, alors la caractéristique de magnétisation ne présente pas de coude de saturation et il n'y a pas d'intersection avec la caractéristique externe du condensateur. L'auto-amorçage est alors possible mais la tension statorique augmente jusqu'à atteindre une valeur théoriquement infinie ainsi que le courant atteint rapidement des valeurs inadmissibles. [Lou10]

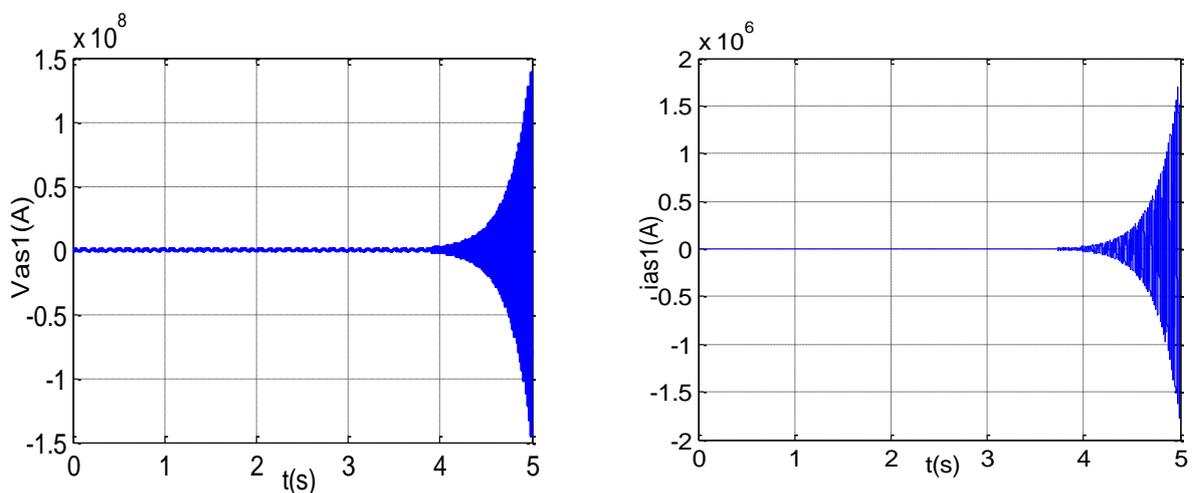


Figure II.6 : Tension et courant statoriques de l'étoile 1.

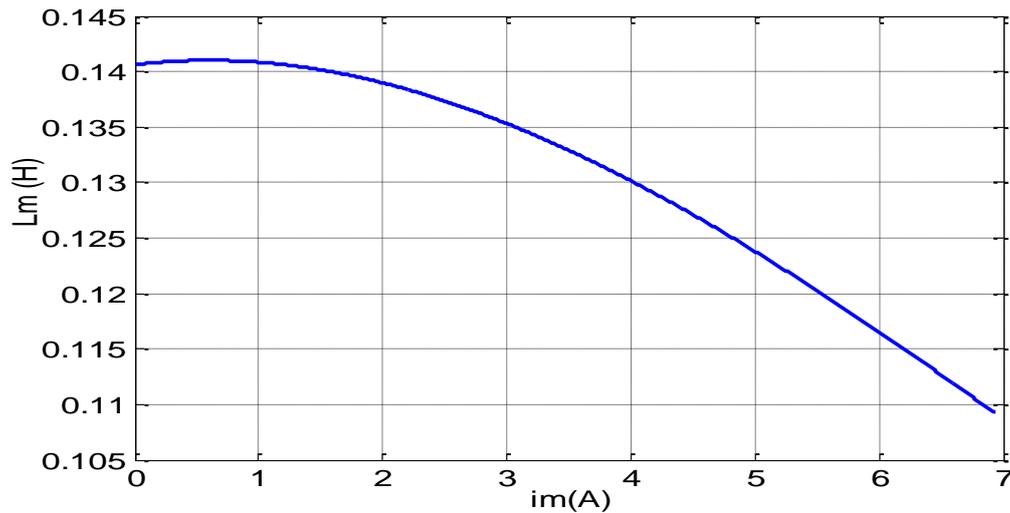
- **Avec saturation**

On considère l'inductance de magnétisation  $L_m$  variable, ce qui veut dire en régime saturé qui est la base du fonctionnement réel de la GASDE.

La courbe de magnétisation est approximée par un polynôme d'interpolation.

$$L_m = 0.1406 + 0.0014i_m - 0.0012i_m^2 + 0.00005i_m^3$$

La figure II.7 représente la variation de l'inductance de magnétisation  $L_m$  en fonction du module du courant de magnétisation  $|I_m|$ .



**Figure II.7 :** Variation de l'inductance de magnétisation.

La simulation de la GASDE dans ce cas est faite à vide, avec  $C_a = C_{a1} = C_{a2} = 40\mu\text{F}$ .

La figure II.8 représente respectivement l'évolution des tensions et des courants statoriques (étoiles 1 et 2), le courant de magnétisation et ainsi que le courant rotorique de la GASDE.

On observe que :

Au démarrage les tensions et les courants statorique efficaces générés par les deux étoiles croient du façon exponentielle (régime transitoire), puis ils se stabilisent et prennent les formes sinusoidales de valeur crête 225.4V pour les tensions statoriques, 2.83A courants statoriques, en régime totalement établi à  $t=2.55\text{s}$ , et à cet instant où le courant de magnétisation se stabilise et atteint son régime saturé à  $I_m= 6.93\text{A}$  après avoir une forme exponentielle, ces derniers sont dus essentiellement au choix des condensateurs d'excitation et de la vitesse.

On constate que l'évolution des tensions et des courants statoriques suivent l'évolution du courant de magnétisation, la forme des courants statoriques est identique à celle des tensions statoriques (même fréquence 50Hz) avec un déphasage de  $90^\circ$  l'un de l'autre, l'allure du courant rotorique montre qu'il est très faible par rapport au courant statorique car l'augmentation du courant rotorique est due essentiellement à l'augmentation de la puissance active fournie par la GASDE.

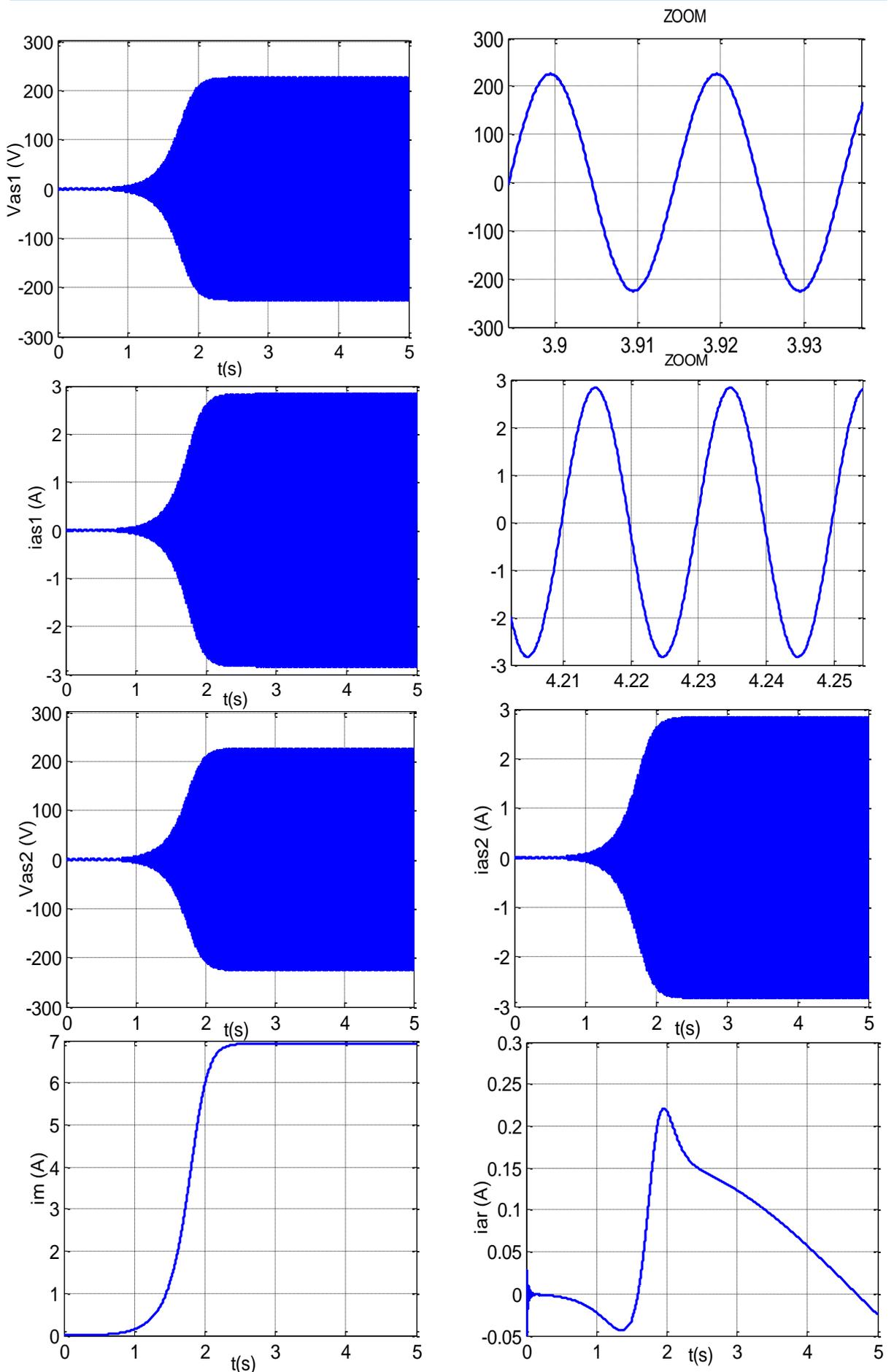


Figure II.8: Evolution des caractéristiques de la GASDE (à vide).

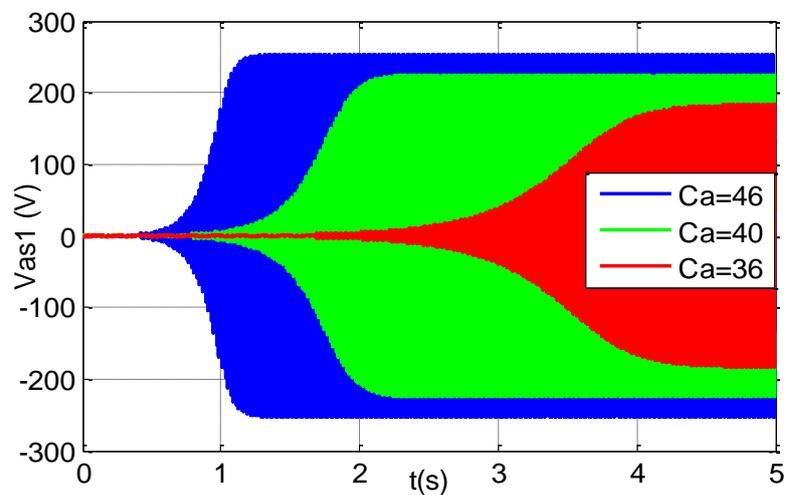
- **Influence de la capacité d'auto-amorçage**

Dans le but de mesurer l'influence (effet) des capacités d'excitation (dont la valeur minimale conduisant à l'amorçage de la génératrice est  $C_a = 33\mu\text{F}$ ) sur les caractéristiques de la GASDE. On a effectué trois essais pour trois différentes valeurs de la capacité d'amorçage ( $46\mu\text{F}$ ,  $40\mu\text{F}$ ,  $36\mu\text{F}$ ), les figures II.9, II.10, II.11 montrent les résultats de simulation et l'influence de la capacité d'amorçage sur les caractéristiques de la génératrice, on a remarqué qu'avec l'augmentation de la capacité d'excitation les caractéristiques de la GASDE augmentent par contre le temps d'amorçage diminue (plus rapide), on distingue que la capacité des condensateurs d'excitation a une forte influence sur les performances de la GASDE.

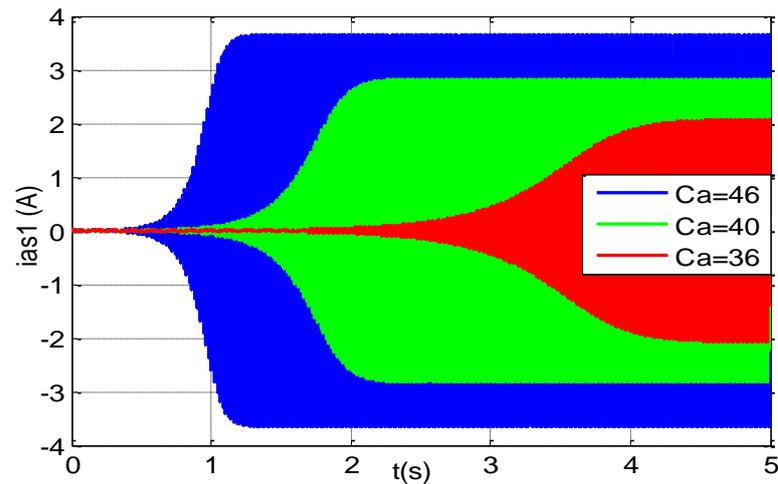
Le tableau II.1 montre les résultats obtenus à l'instant du régime établi (saturé) pour chaque cas.

t(s)	$C_a(\mu\text{F})$	$V_{as1}(\text{V})$	$i_{as1}(\text{A})$	$i_m(\text{A})$
t=4.7	36	183.3	2.07	5.05
t=2.55	40	225.5	2.83	6.93
t=1.55	46	253	3.65	8.93

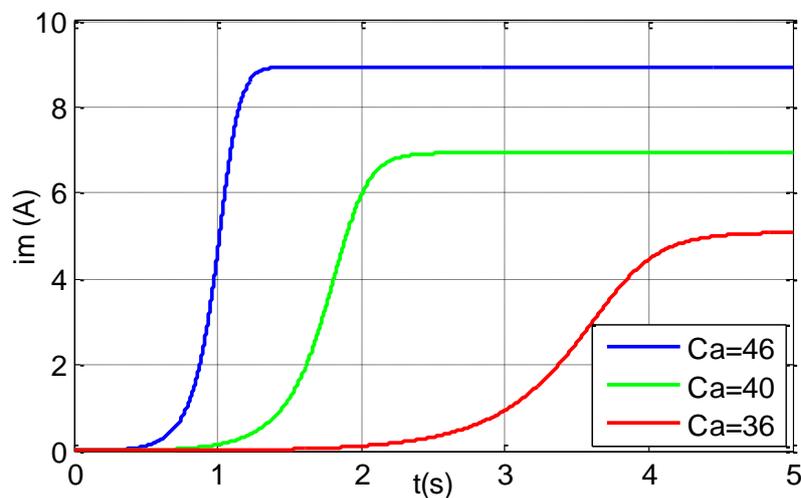
**Tableau II.1** : Influence de la capacité d'excitation.



**Figure II.9** : Influence de la capacité d'excitation sur la tension statorique de l'étoile 1.



**Figure II.10 :** Influence de la capacité d'excitation sur le courant statorique de l'étoile 1.



**Figure II.11 :** Influence de la capacité d'excitation sur le courant de magnétisation.

- **Influence de la vitesse d'entraînement**

Afin de voir l'influence de la vitesse d'entraînement sur les caractéristiques de la GASDE, un test a été réalisé pour trois vitesses (150rd/s, 157.25/s, 165rd/s) avec ( $C_a=40\mu\text{F}$ ).

Les allures II.12, II.13, II.14, II.15 montrent les résultats obtenus après la simulation, on observe que lorsque la vitesse augmente les caractéristiques de la génératrice augmentent, et cette dernière engendre une diminution au niveau du temps d'amorçage (plus rapide), Il existe une vitesse critique où il n'y a pas d'auto-amorçage, et on constate aussi que la fréquence est influencée par la vitesse d'entraînement, elle augmente avec l'augmentation de vitesse.

Le tableau II.2 montre les résultats obtenus à l'instant du régime établi (saturé) pour chaque cas.

$\Omega$ (rd/s)	t(s)	$V_{as1}$ (V)	$i_{as1}$ (A)	$i_m$ (A)	$f$ (Hz)
150	4.61	180.43	2.161	5.293	47.77
157.25	2.55	225.4	2.831	6.931	50
165	1.65	258.91	3.411	8.315	52.54

Tableau II.2 : Influence de la vitesse d'entraînement.

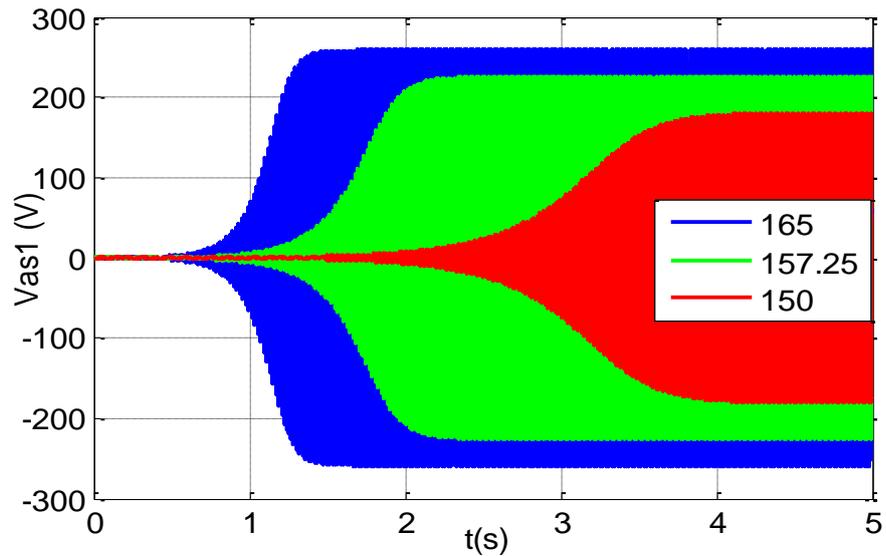


Figure II.12: Influence de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de l'étoile 1.

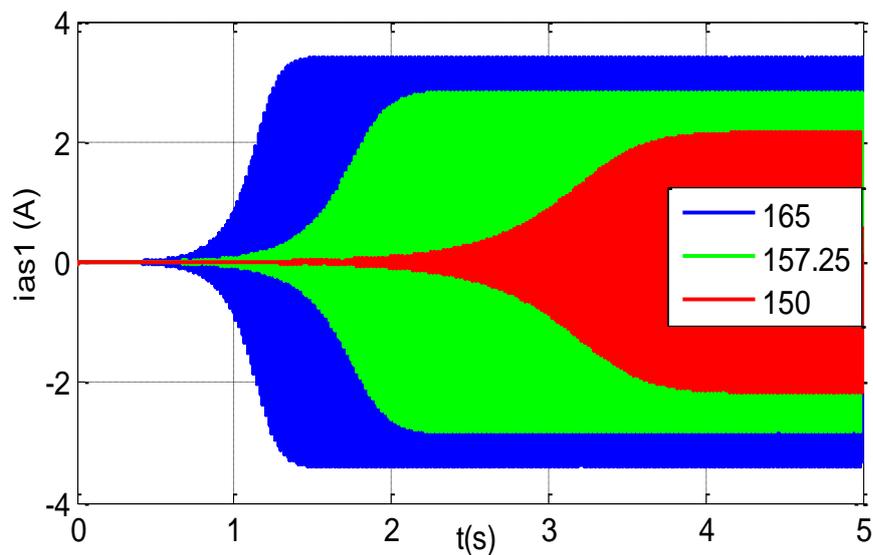
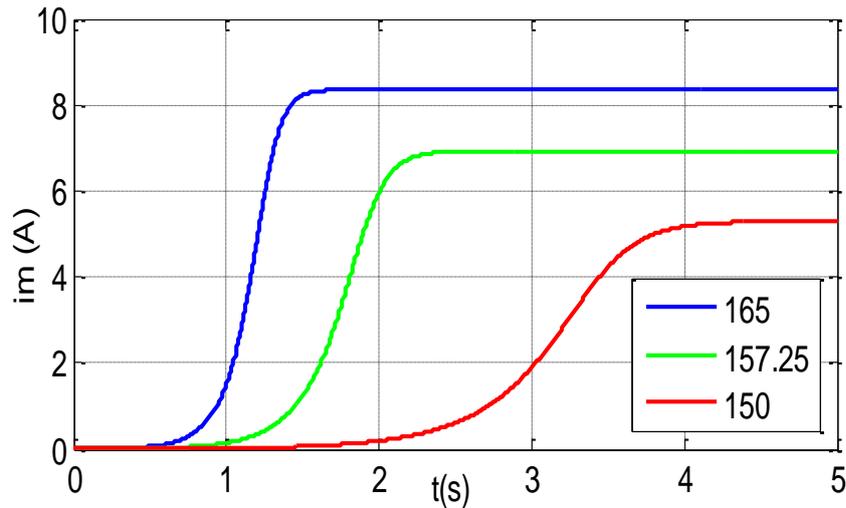
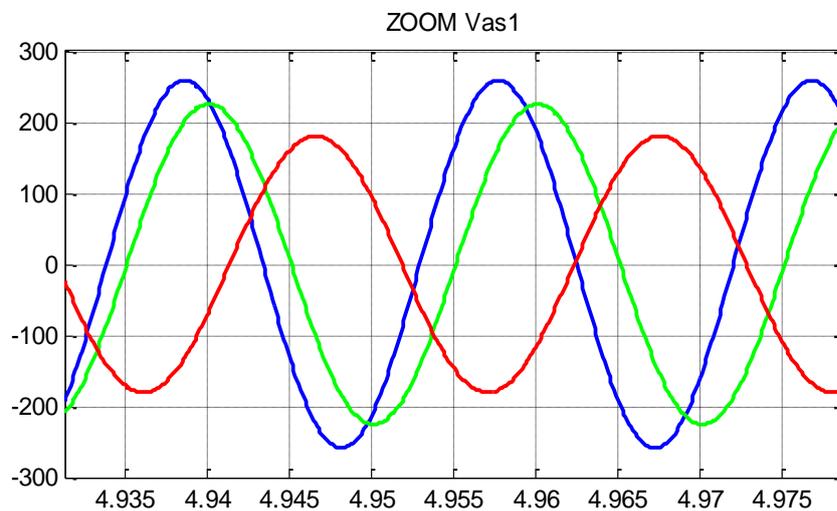


Figure II.13: Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant statorique de l'étoile 1.



**Figure II.14** : Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant de magnétisation.



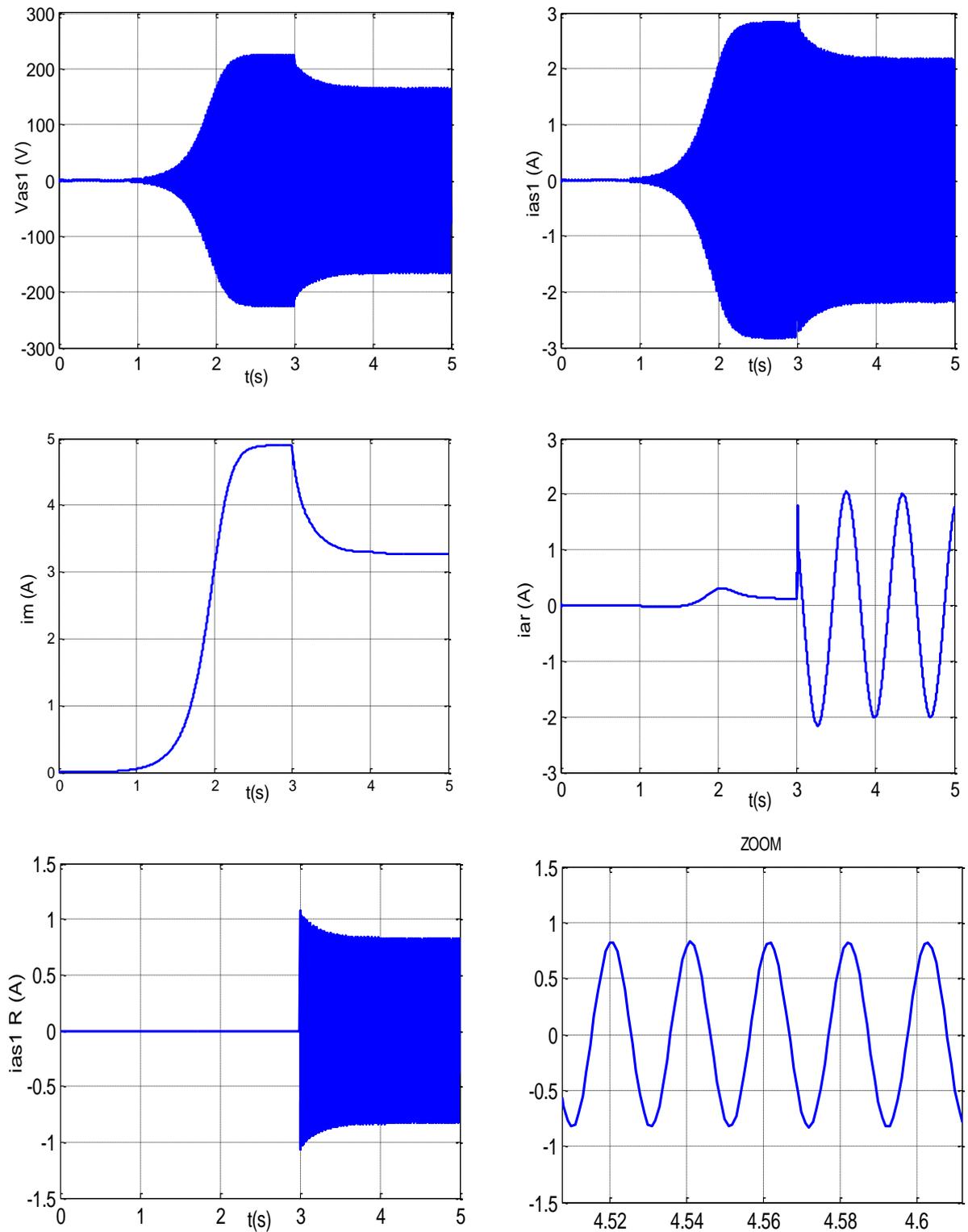
**Figure II.15** : Influence de la vitesse d'entraînement sur les fréquences de la tension statorique de l'étoile 1.

## II.8.2 Fonctionnement en charges purement résistives

La simulation de la GASDE dans ce cas est faite en charges purement résistives ( $R = R_1 = R_2 = 200\Omega$ ) avec ( $C_a = C_{a1} = C_{a2} = 40\mu\text{F}$ ), à l'instant  $t=3\text{s}$  on insère les charges donc pendant l'intervalle de temps de 0 à 3s le fonctionnement est à vide.

La figure II.16 illustre l'évolution des caractéristiques de la GASDE en charge R. On constate à partir des allures obtenues après la simulation que la tension, le courant statorique et le courant de magnétisation chutent après l'insertion de la charge (régime transitoire) puis se convergent vers des valeurs fixes respectivement 165.5V, 2.18A, 4.62A. La chute des courants est proportionnelle à la chute de la charge et à la chute des tensions par la relation ( $i_s = \frac{V_s}{R}$ ). Par contre le courant dans la charge, nul avant l'introduction de cette dernière et

s'instaure d'une manière sinusoïdale à partir de  $t=3s$ , le courant rotorique augmente et atteint 2.04A puis s'évolue d'une façon sinusoïdale, cette augmentation est due à l'augmentation de la puissance active fournie par la GASDE à la charge car le courant rotorique est l'image de la puissance active.



**Figure II.16 :** Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge R.

- **Influence des charges résistives**

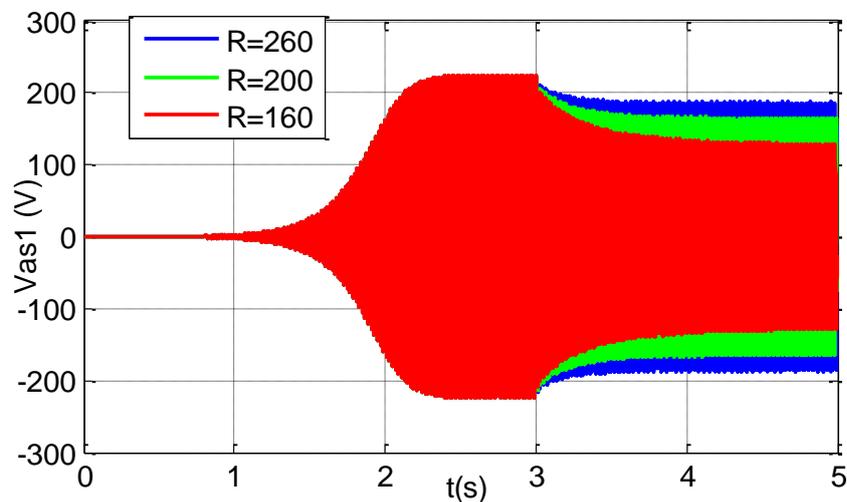
Dans le but de voir l'influence de l'insertion des charges résistives sur les performances de la GASDE, on a simulé pour trois valeurs différentes de la charge ( $160\Omega$ ,  $200\Omega$  et  $260\Omega$ ) et en fixant toujours  $C_a=40\mu\text{F}$ .

Les résultats obtenus après la simulation sont illustrés par les figures II.17, II.18 et II.19, d'après ces dernières on remarque que l'augmentation de la charge provoque une augmentation au niveau des caractéristiques de la génératrice, c'est-à-dire les performances de la GASDE sont vivement influencées par la dimension des charges résistives.

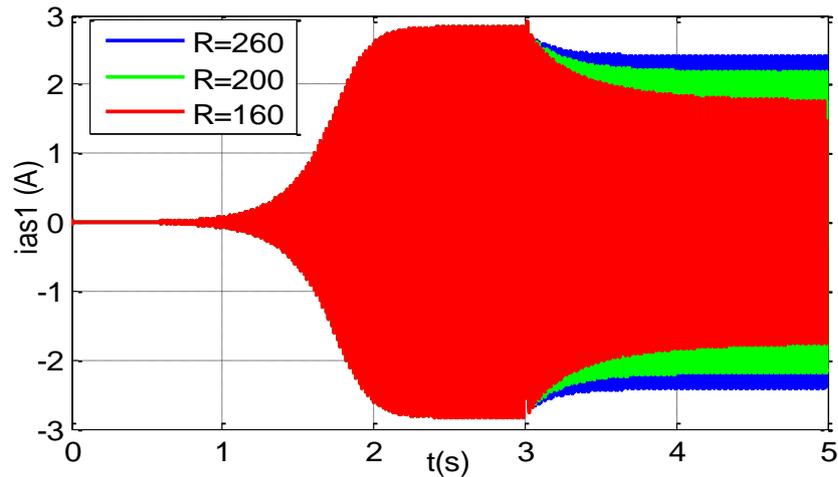
Le tableau II.3 montre les résultats obtenus à partir de l'instant  $t=5\text{s}$  pour chaque cas.

$R(\Omega)$	$V_{as1}(\text{V})$	$i_{as1}(\text{A})$	$i_m(\text{A})$
160	128.9	1.761	3.461
200	165.3	2.184	4.620
260	187.4	2.410	5.393

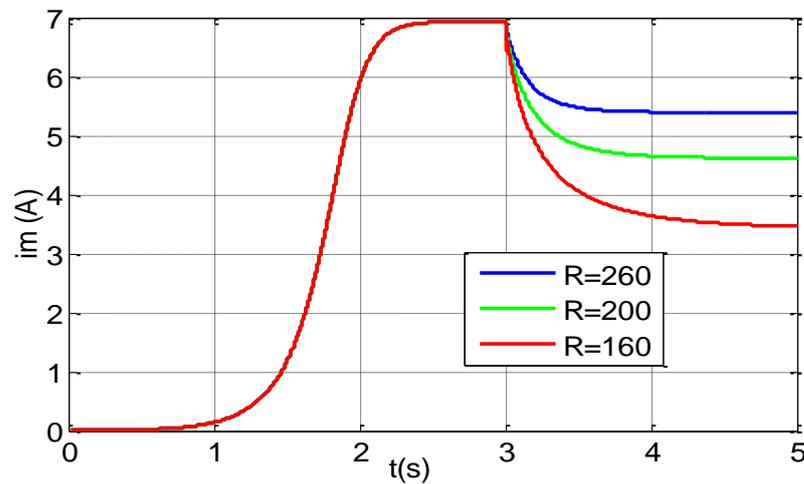
**Tableau II.3** : Influence de la charge résistives.



**Figure II.17**: Influence de la charge résistive sur la tension statorique dans l'étoile 1.



**Figure II.18:** Influence de la charge résistive sur le courant statorique dans l'étoile 1.



**Figure II.19 :** Influence de la charge résistive sur le courant de magnétisation.

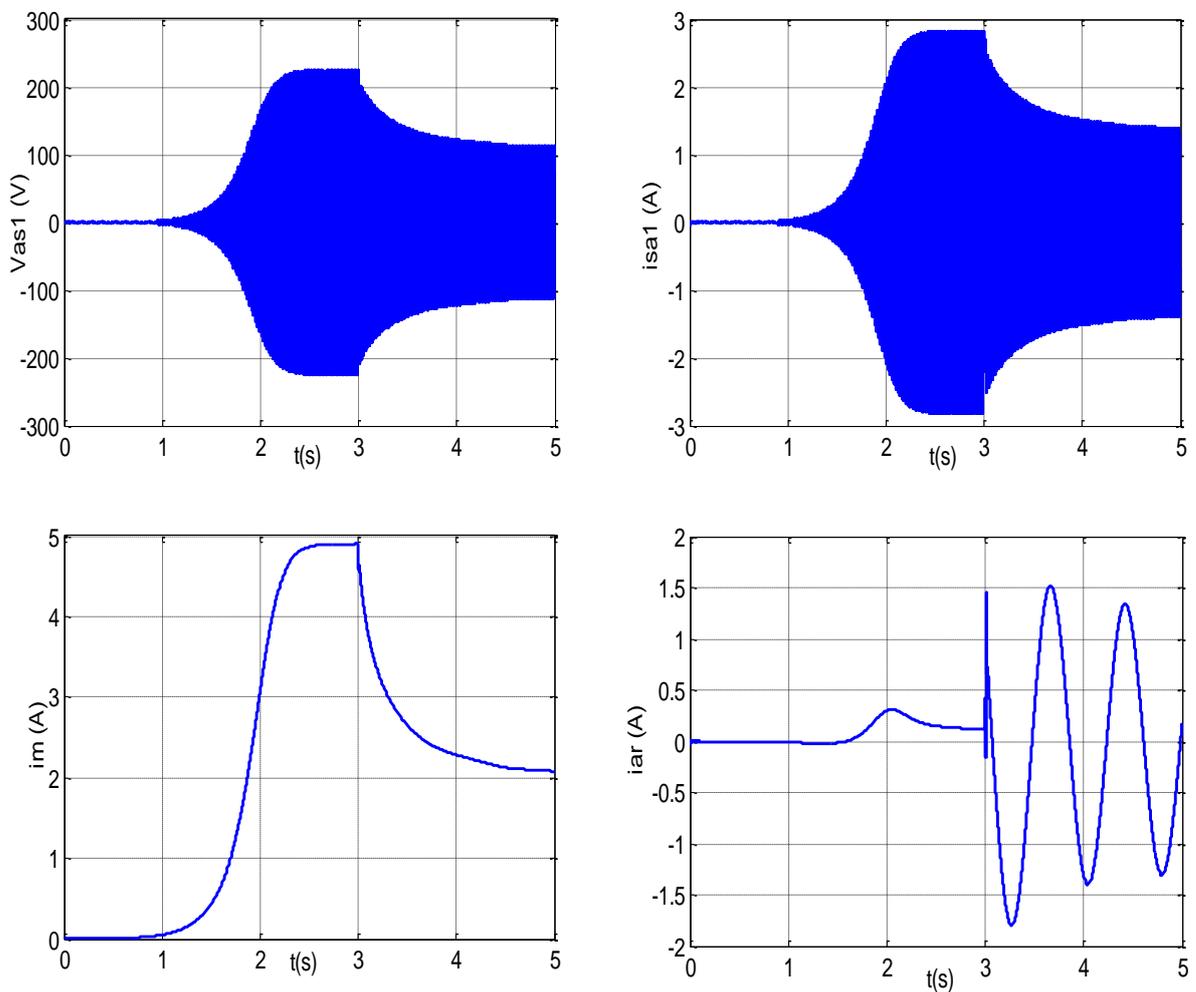
### II.8.3 Fonctionnement en charges résistives-inductives

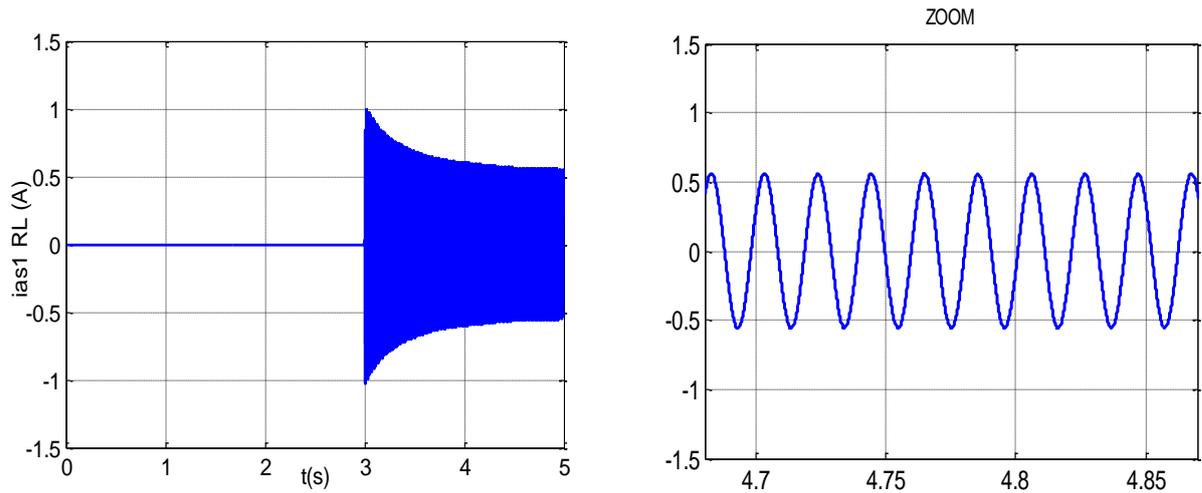
La simulation de la GASDE dans ce cas est faite en charges résistives-inductives ( $R = R_1 = R_2 = 200\Omega$ ), ( $L = L_1 = L_2 = 0.05H$ ) avec ( $C_a = C_{a1} = C_{a2} = 40\mu F$ ), on insère les charges à  $t=3s$ .

La figure II.20 représente l'évolution des caractéristiques de la GASDE en charge RL. On remarque d'après les allures obtenues que la connexion d'une charge inductive consommatrice d'énergie réactive induira une chute supplémentaire au niveau de la tension, courant ainsi le courant de magnétisation, leurs valeurs sont respectivement de 143.56V, 1.84A, 2.75A, qui sont de 21.74V, 0.34A, 1.87A de différence par rapport au cas précédent de la charge purement résistive, cela montre l'effet inductif qui a provoqué la

démagnétisation de la machine en déficit d'énergie réactive pour magnétiser la machine d'une part et alimenter les charges d'une autre part car l'énergie réactive produite par les condensateurs d'excitation est forcément partagée entre la machine et les inductances, et même une diminution au niveau du courant de la charge ainsi que le courant rotorique qui chute de 0.39A par rapport au cas de la charge R.

La diminution du courant de magnétisation signifie moins de flux ce qui est nuisant aux performances de la machine.





**Figure II.20** : Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge RL.

- **Influence des charges résistives-inductives**

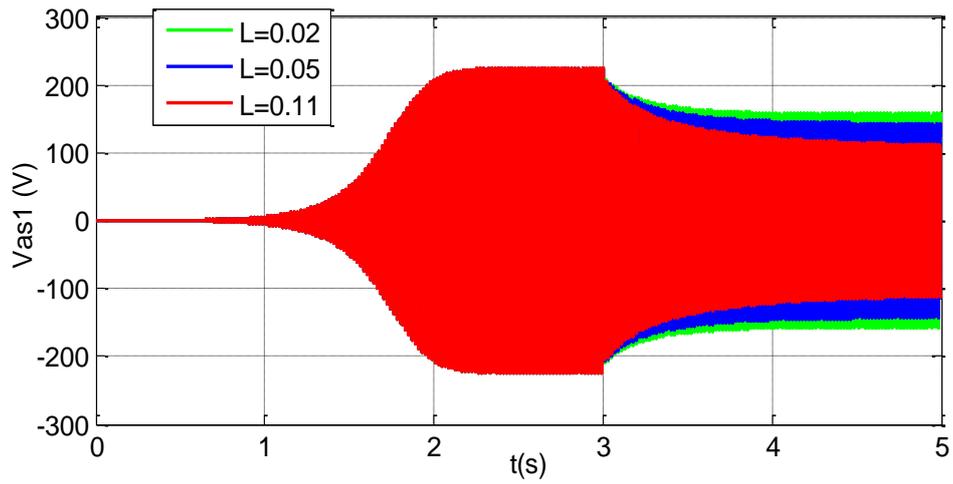
Afin de mieux voir l'influence de la connexion des charges inductives sur les caractéristiques de la GASDE, on a effectué un test pour trois inductances (0.02H, 0.05H et 0.11H) tout en fixant  $R=200\Omega$  et  $C_a=40\mu F$ .

Les résultats obtenus après la simulation sont présentés par les figures II.21, II.22 et II.23, on observe que les caractéristiques de la machine sont inversement proportionnelle à l'inductance, c'est-à-dire à l'augmentation de l'inductance. Les performances de la GASDE diminuent (car l'inductance est consommatrice de l'énergie réactive).

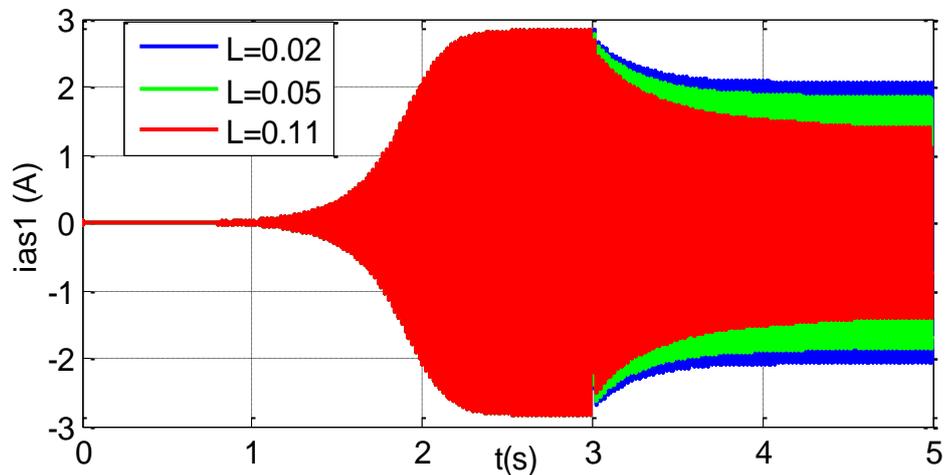
Le tableau II.4 montre les résultats obtenus à partir de l'instant  $t=5s$  pour chaque cas.

$L(H)$	$V_{as1}(V)$	$i_{as1}(A)$	$i_m(A)$
0.02	157.06	2.05	3.06
0.05	143.56	1.84	2.75
0.11	112.2	1.39	2.08

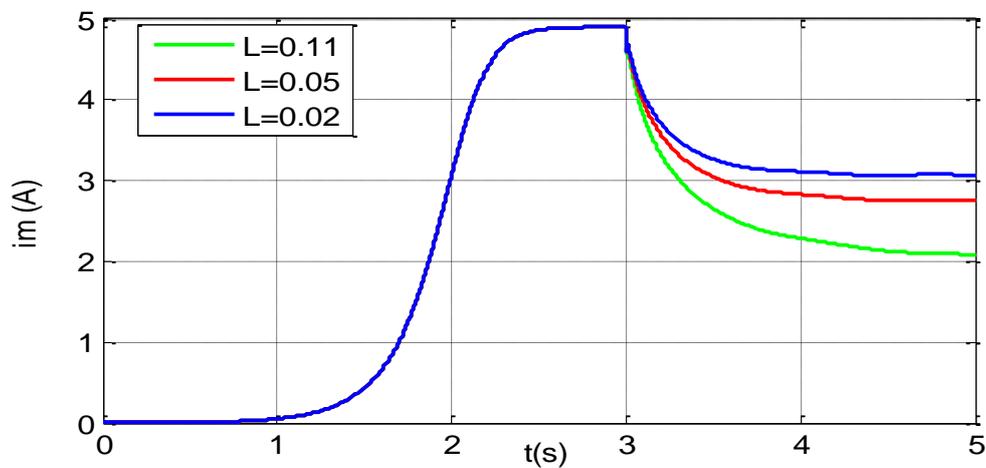
**Tableau II.4** :Influence de la charges résistive-inductive.



**Figure II.21** : Influence de la charge RL sur la tension statorique de l'étoile 1.



**Figure II.22** : Influence de la charge RL sur le courant statorique de l'étoile 1.



**Figure II.23** : Influence de la charge RL sur le courant de magnétisation.

## II.9 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude et l'analyse de la GASDE auto-amorcée en fonctionnement autonome d'où plusieurs tests ont été effectués afin d'analyser les caractéristiques de la machine (régime saturé et non-saturé), (à vide, en charge purement résistive et en charge inductive).

On conclue les points suivants :

- la connexion des batteries de condensateurs aux bornes statorique de la génératrice, la vitesse rotorique et la présence du flux rémanent donnent naissance à l'auto-amorçage,
- l'inductance de magnétisation est le facteur principal de la stabilisation des caractéristiques de la machine (en mode génératrice autonome) à vide ou en charge,
- les caractéristiques de la GASDE sont directement influencées par la vitesse d'entraînement, la dimension des condensateurs d'excitation et par les charges (purement résistives et inductives).

Le fonctionnement de la génératrice en charge ou à vitesse variable nuit à leurs performances. Une commande vectorielle sera proposée dans le chapitre suivant pour pouvoir à la fois contrôler l'amplitude de la tension et sa fréquence à l'aide des convertisseurs statiques placés entre la génératrice et la charge.

# **Chapitre III :**

**Commande vectorielle de la  
génératrice asynchrone double étoile  
(GASDE)**

## III.1 Introduction

Un modèle composé d'une GASDE connectée aux redresseurs à MLI et débitant sur une charge équivalente permet d'effectuer une commande vectorielle par orientation du flux rotorique afin de maintenir la tension du bus continu constante à l'aide d'un système de contrôle.

Nous commençons ce chapitre par présenter des généralités sur le redresseur à MLI puis on va procéder à sa modélisation dans les deux référentiels triphasé et biphasé pour la mise en œuvre de sa commande, puis nous abordons l'étude de la commande vectorielle, enfin nous effectuons trois tests de simulation dans le but d'analyser l'efficacité de la commande vectorielle en trois cas différents (sans variation de la vitesse et de la charge, avec variation de la vitesse, avec variation de la charge), les résultats de simulation obtenus seront analysés et discutés.

## III.2 Généralités sur le redresseur à MLI

### III.2.1 Définition d'un redresseur MLI

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif/continu, est un convertisseur destiné à alimenter une charge par une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative.

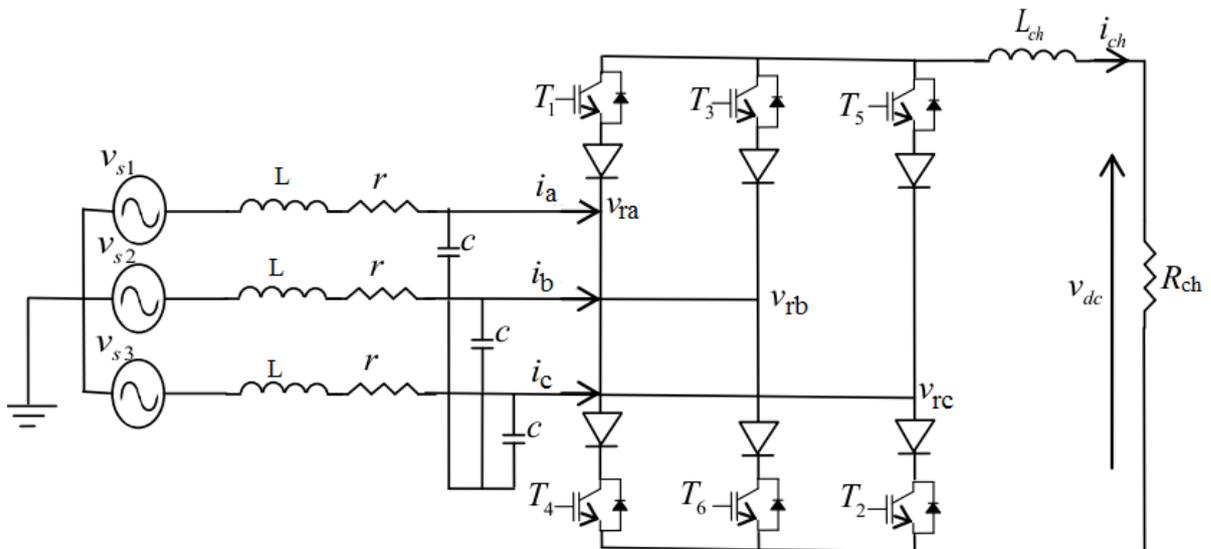
Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI triphasés sont constitué de trois bras, ces derniers sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture grâce à la boucle de contrôle, la possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que, les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. [Ben13]

### III.2.2 Topologies de base d'un redresseur à MLI

Il existe deux façons de mettre en application les redresseurs triphasés à MLI à savoir, redresseurs à source de courant, et redresseurs à source de tension. [Kor09]

### 1. Redresseur à MLI triphasé de tension :

Dans cette structure la source alternative triphasée associée au filtre « $LC$ » se comporte comme un générateur de tension, et la source continue comme un générateur de courant.



**Figure III.1** : Redresseur à MLI structure tension. [Kor09]

### 2. Redresseur à MLI triphasé de courant :

Dans cette structure, la source alternative triphasée associée au filtre « $Lr$ » se comporte comme un générateur de courant, et la source continue comme un générateur de tension.

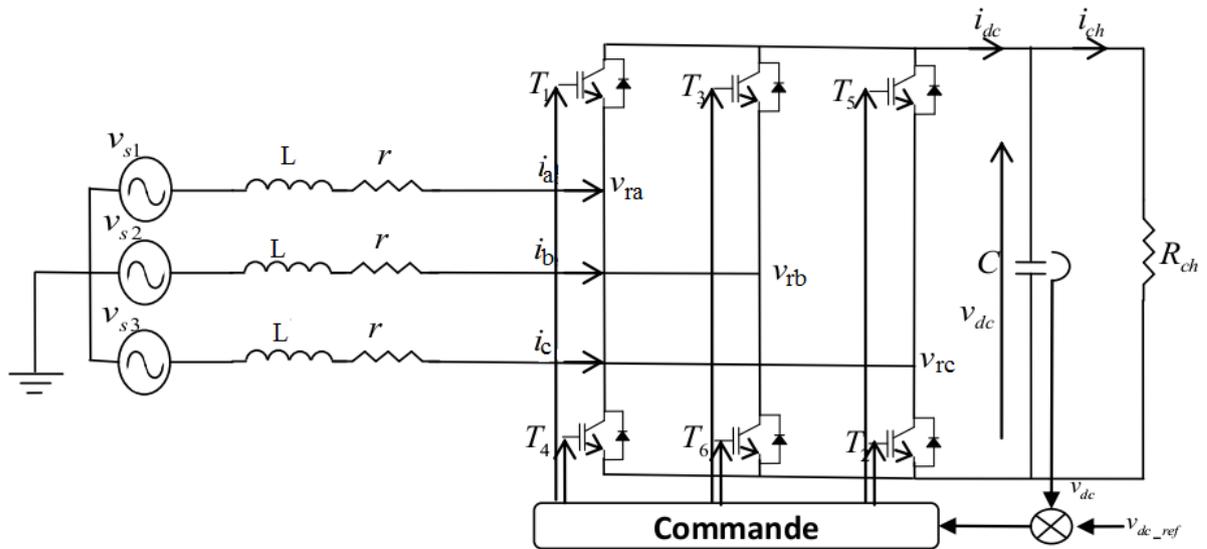


Figure III.2 : Redresseur à MLI structure courant. [Kor09]

### III.2.3 Principe de fonctionnement du redresseur à MLI

Dans la suite de ce travail, nous allons s'intéresser à la structure de courant qui est la plus intensivement employée.

La tension à la sortie du redresseur est toujours supérieure à la tension d'entrée pour cela il faut régler cette tension de sortie, en utilisant une commande en boucle fermée. La tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence  $v_{dc\_ref}$ . Le signal d'erreur obtenu de cette comparaison est multiplié par  $v_{dc\_mes}$  pour déterminer la puissance de référence nécessaire. Quand le courant  $i_{ch}$  est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur  $C$  est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus de puissance à partir du réseau. Le bloc de commande prend la puissance de l'approvisionnement en produisant des signaux appropriés de MLI pour les transistors. De cette façon, on aura des écoulements de courant du côté alternatif vers le côté continu, ainsi la tension du condensateur peut être maintenue à sa valeur de référence. Inversement, quand  $i_{ch}$  devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur  $C$  est surchargé, et le signal d'erreur demande à la commande de décharger le condensateur, et renvoyer ainsi la puissance à la source alternative. [Bou10]

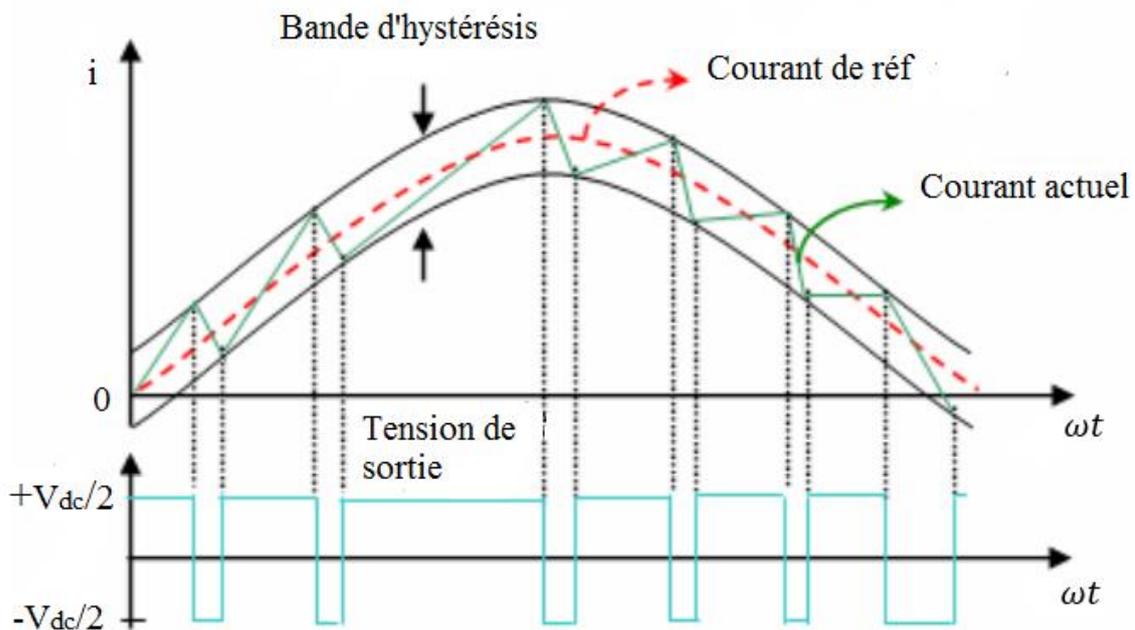
### III.2.4 Techniques de commande d'un redresseur à MLI

Il existe plusieurs techniques de commande MLI, tel que :

- MLI vectorielle ;
- MLI à porteuse triangulaire ;
- MLI à échantillonnage périodique ;
- MLI à bande d'hystérésis à laquelle nous nous intéressons dans notre travail.

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. [Lem18]

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la figure III.3,



**Figure III.3** : Principe de fonctionnement d'un comparateur à hystérésis. [Seb14]

l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ , où  $H$  représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c à d, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas.

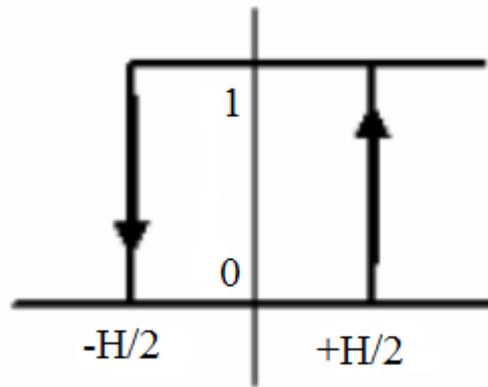


Figure III.4 : Principe d'une commande par hystérésis. [Lem18]

### III.3 Modélisation du redresseur à MLI

Construire le modèle mathématique du redresseur à MLI est la première étape vers la conception et la mise en œuvre de sa commande. Ce modèle sera converti du repère triphasé au repère tournant  $(d, q)$ . [Rah18]

La figure III.5 représente le circuit de puissance à modéliser qui se compose d'une source, d'un redresseur MLI et d'une charge continue.

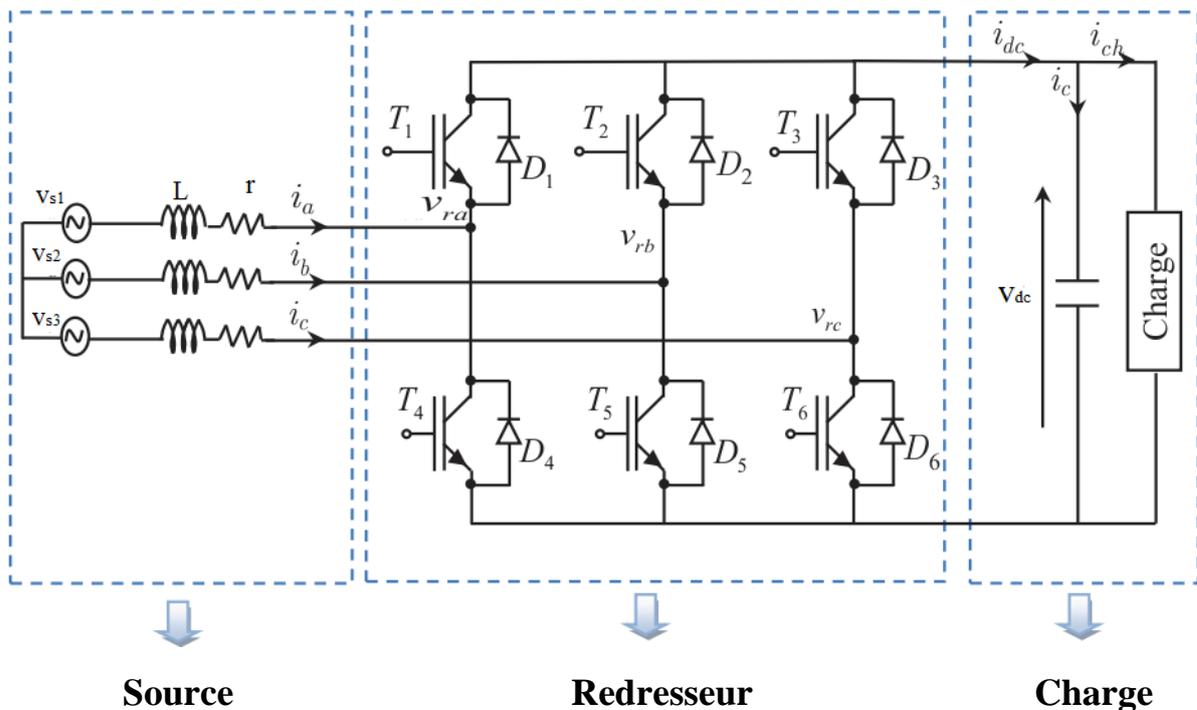


Figure III.5: Structure du redresseur à MLI. [Rah18]

### III.3.1 Représentation du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

La source triphasée alternative qui est sensé d'alimenter le redresseur dans notre travail est la génératrice en série avec un filtre «  $R_f L_f$  ».

On suppose que le système d'alimentation équilibré avec les mêmes impédances dans les trois phases. [Bel07], [Rio93]

Les tensions aux bornes de la génératrice sont exprimées comme suit :

$$\begin{aligned} V_{s1} &= R_f i_a + L_f \frac{di_a}{dt} + v_{ra} \\ V_{s2} &= R_f i_b + L_f \frac{di_b}{dt} + v_{rb} \\ V_{s3} &= R_f i_c + L_f \frac{di_c}{dt} + v_{rc} \end{aligned} \quad (III. 1)$$

Et les courants de chaque phase sont alors donnés par le système d'équation d'état suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f/L_f & 0 & 0 \\ 0 & -R_f/L_f & 0 \\ 0 & 0 & -R_f/L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{s1} - v_{ra} \\ V_{s2} - v_{rb} \\ V_{s3} - v_{rc} \end{bmatrix} \quad (III. 2)$$

À l'entrée du redresseur, les tensions de phase sont données en fonction des ordres de commande (fonctions de connexions)  $[F_{11}, F_{21}, F_{31}]$  et la tension du bus continu  $v_{dc}$ .

Sachant que les deux interrupteurs de chaque bras sont à commande complémentaire.

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (III. 3)$$

Le courant continu  $i_{dc}$  est donné en fonction des ordres de commande et les courants d'entré,

$$i_{dc} = [F_{11} F_{21} F_{31}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (III. 4)$$

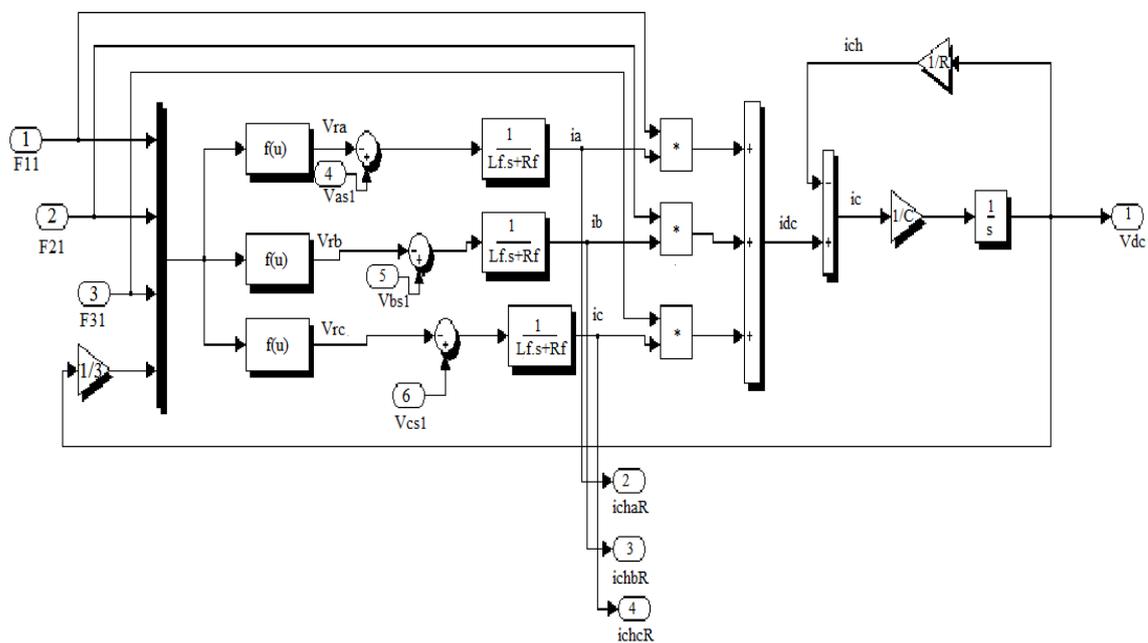
La capacité insérée à la sortie du bus continu a pour rôle de diminuer les ondulations de la tension redressée (capacité de filtrage, elle doit être suffisante afin d'avoir une tension stable et fixe quel que soit le fonctionnement de la GASDE, cette dernière est placée en parallèle avec une résistance  $R$ , modélisant la charge continue.

La tension  $v_{dc}$  aux bornes de la charge est donnée par l'équation suivante:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{dc} - i_{ch}) \quad (III.5)$$

$$v_{dc} = R_{ch} \cdot i_{ch}$$

A partir des relations (III,1), (III,2), (III,3), (III,4) on peut établir le schéma fonctionnel global du redresseur à MLI ayant comme entrée la commande des gâchettes des interrupteurs du haut ( $F_{11}, F_{21}, F_{31}$ ) et comme sortie la tension redressée  $v_{dc}$ .(figure III.6)



**Figure III.6 :** Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.

### III.3.2 Représentation du redresseur MLI dans le référentiel tournant ( $d, q$ )

Les équations dans le repère tournant ( $d, q$ ) sont obtenues par l'application de la transformation de Park. [Ben13]

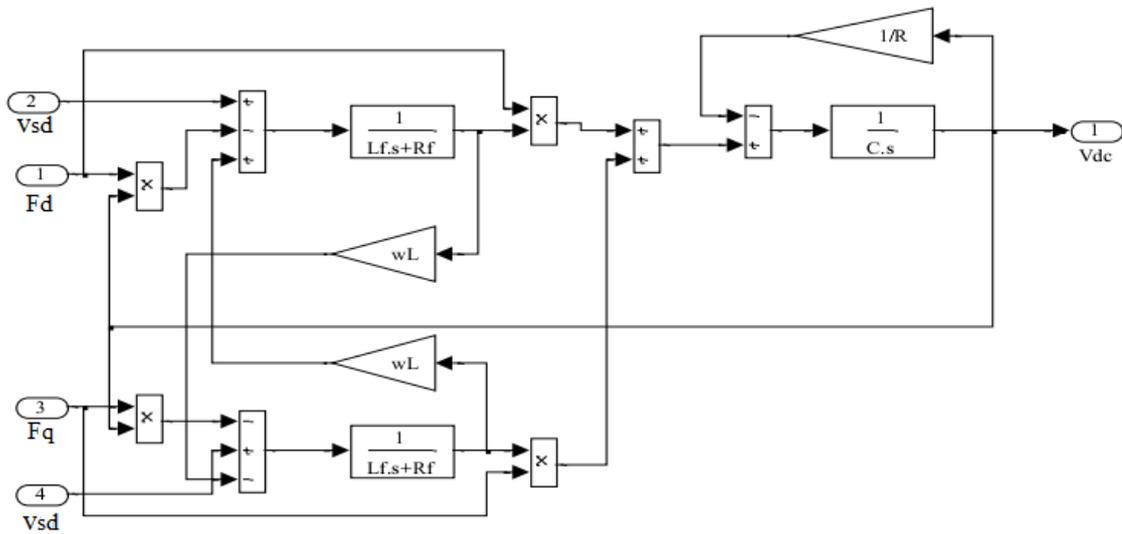
$$v_{sd} = r i_{sd} - L \frac{di_{sd}}{dt} + L \omega i_{sq} + v_{rd}$$

$$v_{sq} = r i_{sq} - L \frac{di_{sq}}{dt} - L \omega i_{sd} + v_{rq} \quad (III.6)$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_{ch}$$

$$\text{Avec : } i_{dc} = [F_d \quad F_q] \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$

La figure III.7 représente le Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le référentiel  $(d, q)$ .



**Figure III.7** : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans le référentiel  $(d, q)$ . [Ben13]

### III.4 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

La commande par orientation du flux (FOC), proposée par Blaschke en 1972, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux.

Par conséquent, ceci permet de contrôler le flux de la machine avec la composante  $i_{ds}$  du courant statorique qui est l'équivalent du courant inducteur de la machine à courant continu. Tandis que, la composante  $i_{qs}$  permet de contrôler le couple électromagnétique (la tension du bus continu) correspondant au courant induit de la machine à courant continu. [Lou10]

Le principe de la commande vectorielle ou la commande par flux est appliqué au cas de la machine asynchrone fonctionnant en génératrice consiste à réaliser un découplage entre les

deux variables principales qui sont la tension du bus continu (ou le couple) et le flux, indépendamment l'un de l'autre. [Che15]

### III.4.1 Application d'orientation du flux rotorique

L'application d'orientation du flux rotorique sur le modèle de la GASDE étudié dans le chapitre I permet d'écrire : [Ami12a]

$$\begin{aligned}\varphi_{dr} &= \varphi_r^* \\ \varphi_{qr} &= 0 \\ \frac{d\varphi_r^*}{dt} &= 0\end{aligned}\quad (III.7)$$

On obtient :

$$R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_r^*}{dt} = 0 \rightarrow i_{dr} = 0 \quad (III.8)$$

$$R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_r^* = 0 \rightarrow i_{qr} = -\frac{(\omega_s - \omega_r)}{R_r} \varphi_r^* \quad (III.9)$$

Les courants rotoriques en fonction des courants statoriques se présentent comme suit: [Ami12a]

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} (\varphi_r^* - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})) \quad (III.10)$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \quad (III.11)$$

En substituant (III.9) dans (III.11) on aura :

$$\omega^* = \frac{R_r L_m}{(L_m + L_r) \varphi_r^*} i_{qs}^* \quad (III.12)$$

D'où :

$$i_{qs1}^* + i_{qs2}^* = i_{qs}^*$$

L'expression finale du couple électromagnétique est : [Ami12a]

$$C_{em}^* = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \varphi_r^* \quad (III.13)$$

Les tensions statoriques sur l'axe (d, q) deviennent comme suit : [Ben13]

$$\begin{aligned}V_{ds1} &= R_{s1} i_{ds1} + L_{s1} \frac{di_{ds1}}{dt} - \omega_s (L_{s1} i_{qs1} + T_r \varphi_r^* (\omega_s - \omega_r)) \\ V_{qs1} &= R_{s1} i_{qs1} + L_{s1} \frac{di_{qs1}}{dt} + \omega_s (L_{s1} i_{ds1} + \varphi_r^*)\end{aligned}\quad (III.14)$$

$$V_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + L_{s2} \frac{di_{ds2}}{dt} - \omega_s(L_{s2}i_{qs2} + T_r\varphi_r^*(\omega_s - \omega_r))$$

$$V_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + L_{s2} \frac{di_{qs2}}{dt} + \omega_s(L_{s2}i_{ds2} + \varphi_r^*)$$

Où :  $T_r = R_r/L_r$

Après transformations et simplifications, on aura le système d'équations (III.15) qui décrit le modèle de la GASDE. **[Ben13]**

$$\begin{aligned} \frac{di_{ds1}}{dt} &= \frac{1}{L_{s1}} \left[ V_{ds1} - R_{s1}i_{ds1} + \omega_s \left( L_{s1}i_{qs1} + T_r\varphi_r^*(\omega_s - \omega_r) \right) \right] \\ \frac{di_{qs1}}{dt} &= \frac{1}{L_{s1}} \left( V_{qs1} - R_{s1}i_{qs1} - \omega_s(L_{s1}i_{ds1} + \varphi_r^*) \right) \\ \frac{di_{ds2}}{dt} &= \frac{1}{L_{s2}} \left[ V_{ds2} - R_{s2}i_{ds2} + \omega_s \left( L_{s2}i_{qs2} + T_r\varphi_r^*(\omega_s - \omega_r) \right) \right] \quad (III.15) \\ \frac{di_{qs2}}{dt} &= \frac{1}{L_{s2}} \left( V_{qs2} - R_{s2}i_{qs2} - \omega_s(L_{s2}i_{ds2} + \varphi_r^*) \right) \\ \frac{d\varphi_r}{dt} &= -\frac{R_r\varphi_r}{L_r + L_m} + \frac{R_rL_m}{L_r + L_m} (i_{ds1} + i_{ds2}) \end{aligned}$$

La commande vectorielle a pour objectif de maintenir et de contrôler la tension à la sortie des deux redresseurs constante quelque soient la vitesse d'entraînement et la charge dans une plage de faisabilité.

La mise en œuvre de la commande nécessite l'estimation du flux rotorique, la mesure du couple électromagnétique et le calcul de la pulsation statorique.

A partir de la valeur désirée de la tension continue, il est possible d'exprimer celle de la puissance de référence par : **[Ben18]**

$$V_{dc} \cdot i_{dc}^* = P^* = P_{ele} = C_{em} \cdot \Omega \quad (III.16)$$

En négligeant les pertes, l'équation du couple électromagnétique peut être exprimée comme suit :

$$C_{em} = \frac{P^*}{\Omega} \quad (III.17)$$

D'après l'équation (III.18), le couple est contrôlé par la quadrature du courant  $i_{qs1}$  et  $i_{qs2}$  des deux étoiles.

$$i_{qs1} + i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r)C_{em}^*}{pL_m\varphi_r^*} \quad (III.18)$$

Le flux  $\varphi_r$  est estimé à partir des courants  $i_{ds1}$  et  $i_{ds2}$  des deux étoiles. Une fois celui-ci maintenu à sa référence, le couple est alors directement proportionnel aux  $i_{qs1}$  et  $i_{qs2}$

$$\varphi_r^* = \frac{R_r L_m}{(L_r + L_m)S + R_r} (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (III.19)$$

D'où :  $i_{ds} = i_{ds1} + i_{ds2}$

La pulsation statorique est calculée comme suit :

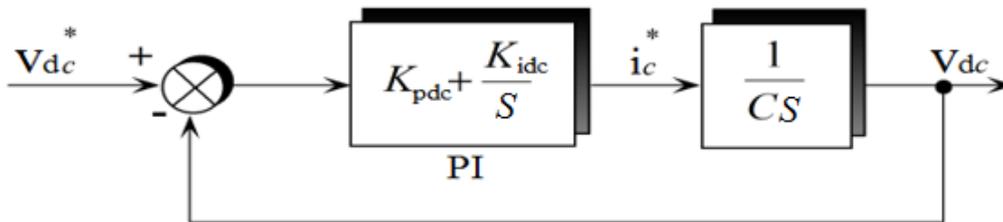
$$\begin{aligned} \omega_s &= \omega^* + \omega_r \\ \omega_r &= p\Omega \end{aligned} \quad (III.20)$$

### III.4.2 Calcul des régulateurs

- *Régulateur de la tension continue* :

On utilise le régulateur PI pour corriger l'erreur entre la tension continue mesurée et sa référence. La sortie de régulateur PI donne le courant référence  $i_c^*$ . [Ami12]

La structure de la boucle de régulation de la tension du bus continu est donnée par la figure III.8.



**Figure III.8** : Représentation schématique de la boucle de régulation de la tension du bus continu. [Ami12]

La FTBO s'écrit :

$$T(s) = \left( K_{pdc} + \frac{K_{idc}}{S} \right) \left( \frac{1}{C \cdot S} \right) = \frac{K_{pdc}S + K_{idc}}{C \cdot S^2} \quad (III.21)$$

FTBF est :

$$F(s) = \frac{K_{pdc}S + K_{idc}}{C \cdot S^2 + K_{pdc}S + K_{idc}} = \frac{\tau S + 1}{\frac{\tau C}{K_{pdc}} S^2 + \tau S + 1} \quad (III.22)$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{K_{pdc}}{K_{idc}}$$

Par identification avec la forme canonique :

$$\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\varepsilon}{\omega_n} S + 1 = 0 \quad (\text{III.23})$$

On obtient :

$$K_{pdc} = 2\varepsilon C \omega_n = \frac{6\varepsilon C}{t_r} \quad (\text{III.24})$$

Et

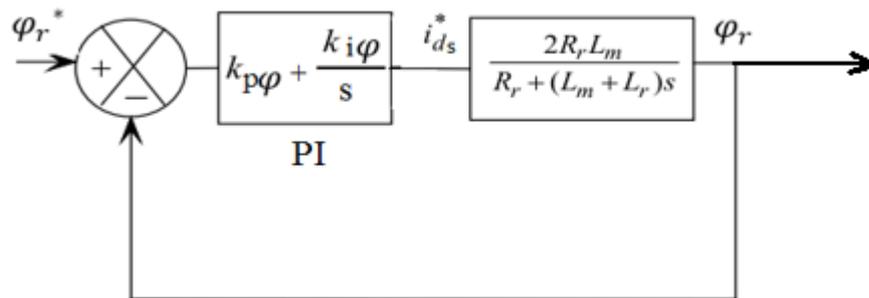
$$K_{idc} = \frac{3K_p}{2\varepsilon t_r} = \frac{9C}{t_r^2} \quad (\text{III.25})$$

En imposant :  $\varepsilon = 0.7$  ,  $\omega_n = \frac{3}{t_r}$  et on prend le temps de réponse en boucle fermée égal à  $10^{-1}s$ .

- **Régulateur du flux**

On utilise le régulateur PI pour corriger l'erreur entre le flux estimé et sa référence. La sortie du régulateur PI donne le courant référence  $i_{ds}^*$ . **[Ben18]**

La structure de la boucle de régulation du flux est donnée par la figure III.9.



**Figure III.9** : Représentation schématique de la boucle de régulation du flux. **[Ben18]**

La FTBO s'écrit :

$$T(s) = \left( K_{p\varphi} + \frac{K_{i\varphi}}{S} \right) \left( \frac{2R_r L_m}{R_r + (L_m + L_r)S} \right) = \frac{(K_{p\varphi}S + K_{i\varphi})(2R_r L_m)}{R_r S + (L_m + L_r)S^2} \quad (III.26)$$

La FTBF est :

$$F(s) = \frac{2R_r L_m (K_{i\varphi} + K_{p\varphi}S)}{(L_m + L_r)S^2 + (R_r + 2K_{p\varphi}R_r L_m)S + 2K_{i\varphi}R_r L_m} \quad (III.27)$$

Par identification avec l'équation (III.24) :

On aura :

$$K_{p\varphi} = \frac{2\varepsilon w_n (L_m + L_r) - R_r}{R_r L_m} \quad (III.28)$$

Et

$$K_{i\varphi} = w_n^2 \frac{L_m + L_r}{2R_r L_m} \quad (III.29)$$

En imposant :  $\varepsilon = 0.7$ ,  $w_n = \frac{t_r}{3}$  et on prend le temps de réponse en boucle fermée égal à  $(5)10^{-2}$ .

### III.5 Simulation et interprétation des résultats

Le système composé de la génératrice asynchrone double étoile connectée à deux redresseurs à MLI et commandés suivant la stratégie de commande introduite ci-dessus a été simulé. Le modèle de la machine est celui présenté dans le chapitre I. Il tient compte de la saturation. Dans ce qui suit, trois tests de simulation sont effectués afin de quantifier les performances de la commande.

Le premier test permettra de vérifier le comportement de la commande vectorielle. Le second permettra de tester l'influence de variations de la vitesse. Le troisième quantifiera l'impact de variations de la charge sur l'évolution de la tension du bus continu.

La commande de la GASDE est faite avec un seul bus continu à la sortie des deux redresseurs.

La figure III.10 illustre l'algorithme de commande avec un seul bus continu.

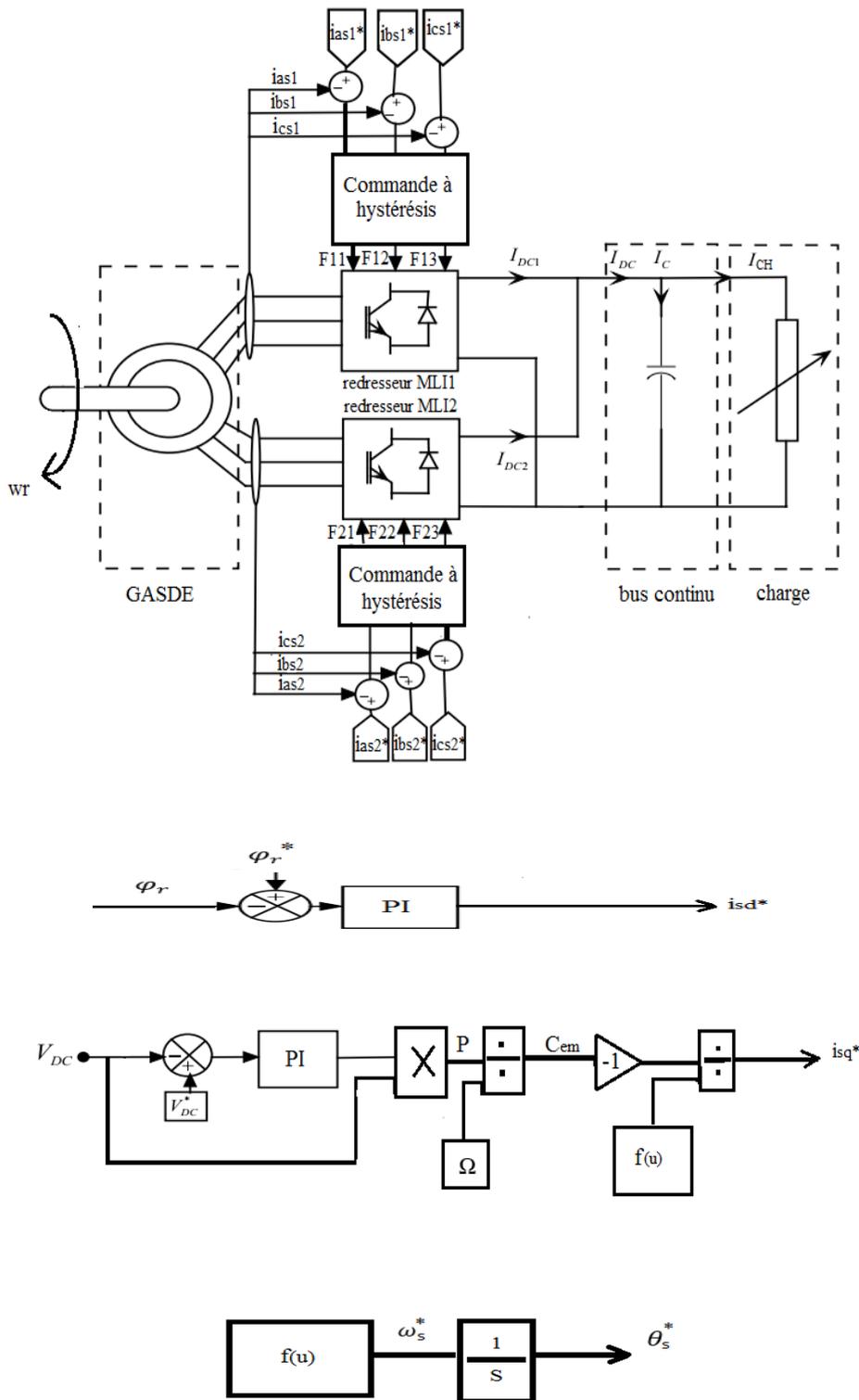


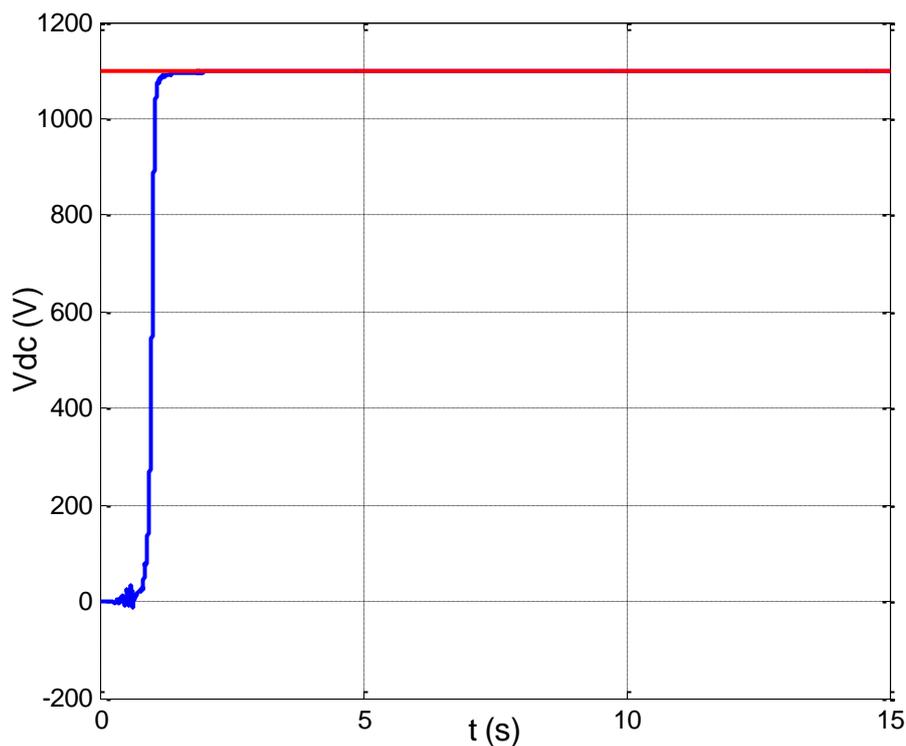
Figure III.10 : Algorithme de commande avec un seul bus continu.

### III.5.1 Essai sans variation de la vitesse ou de la charge

La valeur de référence de la tension du bus continu à la sortie des deux redresseurs est fixée 1100 V et nous avons simulé un fonctionnement à vide suivi de l'application brusque d'une charge  $R=200\ \Omega$  à  $t=1s$ , la GASDE est entraînée à sa vitesse de synchronisme.

Dans cet essai nous allons vérifier l'efficacité de la commande vectorielle par la technique d'orientation du flux rotorique, ainsi que la tension du bus continu, pour maintenir le flux et la tension à leurs valeurs de référence on a utilisé des régulateurs PI classiques.

D'après les figures III.11, III.12 la tension  $V_{dc}$  suit parfaitement sa référence et le flux rotorique est bien orienté, la figure III.13 montre que le courant statorique de l'étoile 1 suit le courant de référence, la tension aux bornes de la GASDE croit d'une façon exponentielle (régime transitoire), puis elle se stabilise et prend la forme sinusoïdale (figure III.14).



**Figure III.11** : Tension du bus continu  $V_{dc}$ .

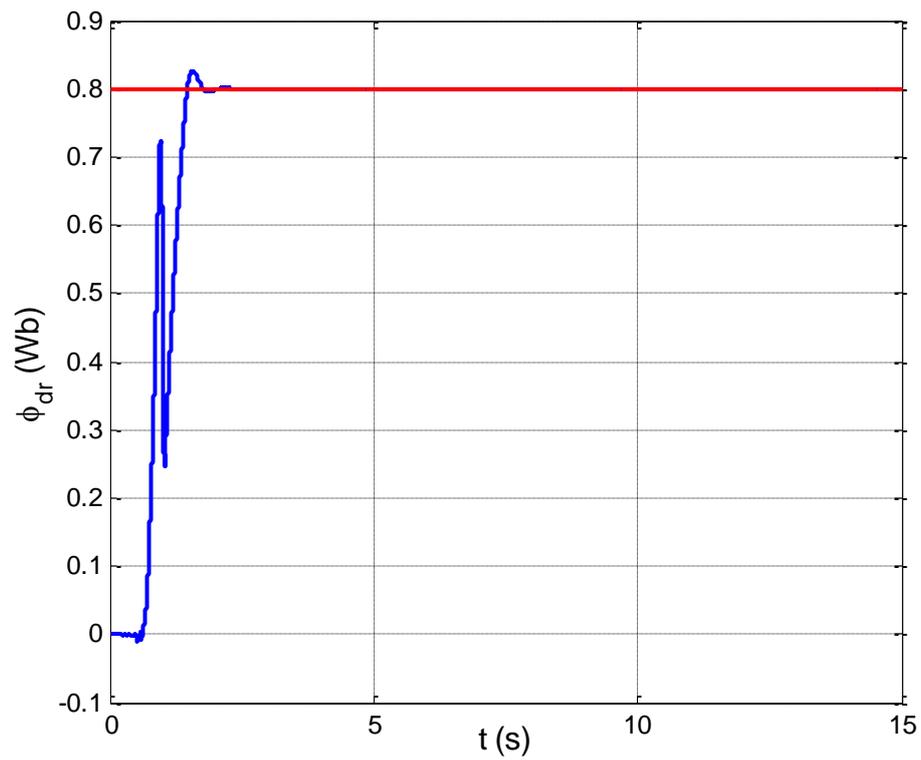


Figure III.12 : Flux rotorique  $\varphi_{rd}$ .

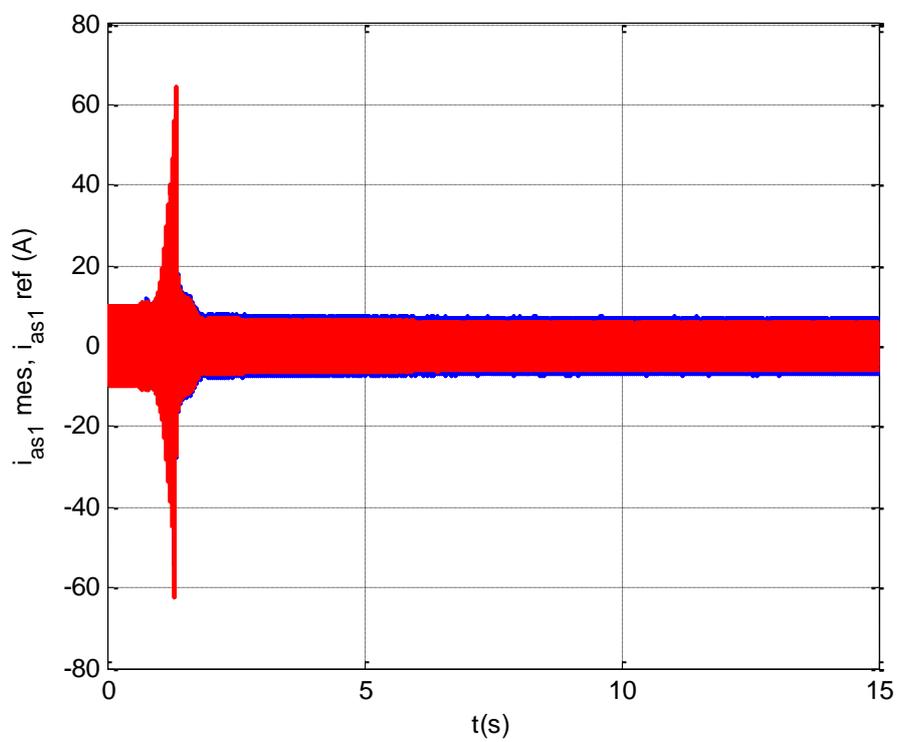
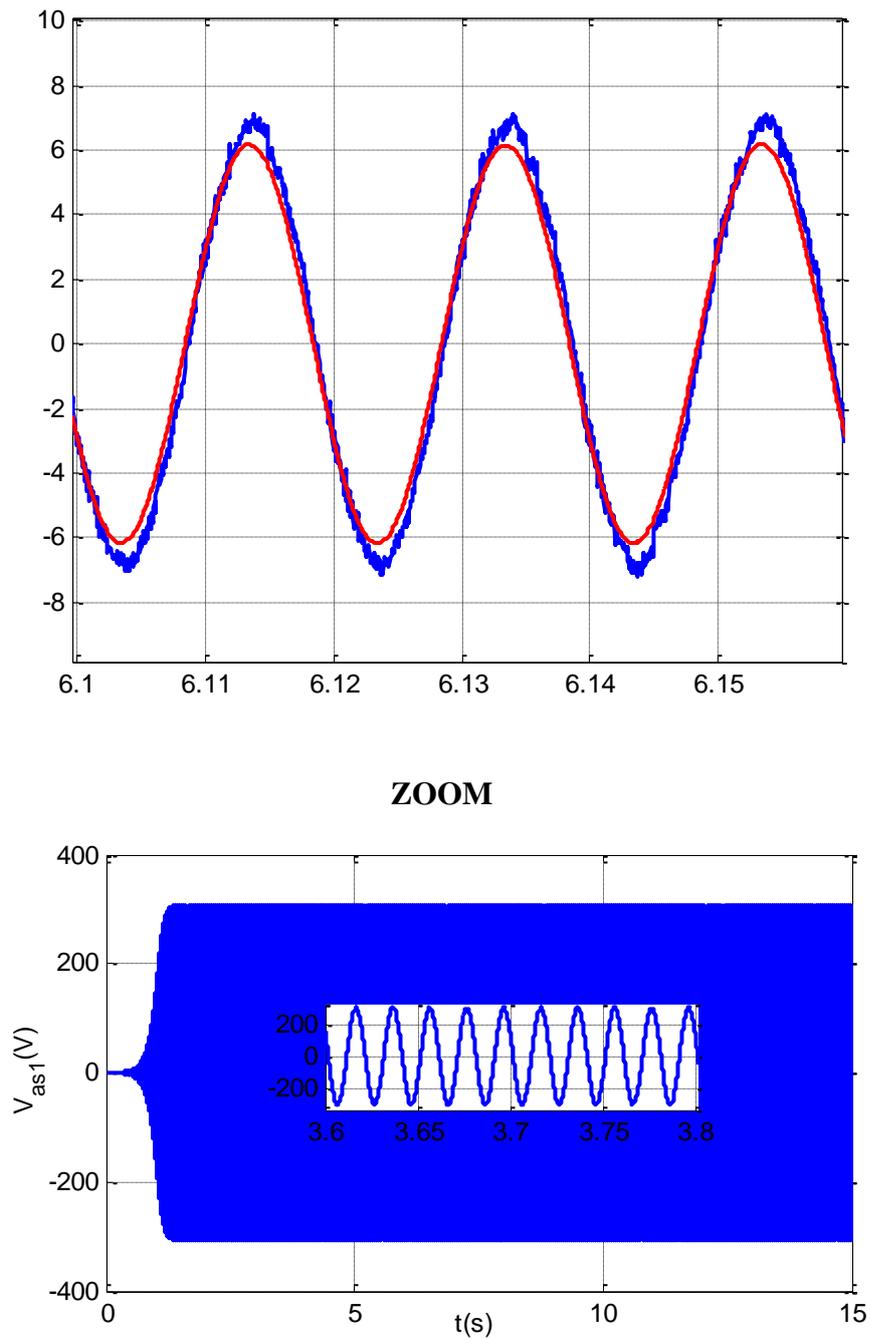


Figure III.13 : Courant statorique de l'étoile 1et sa référence.

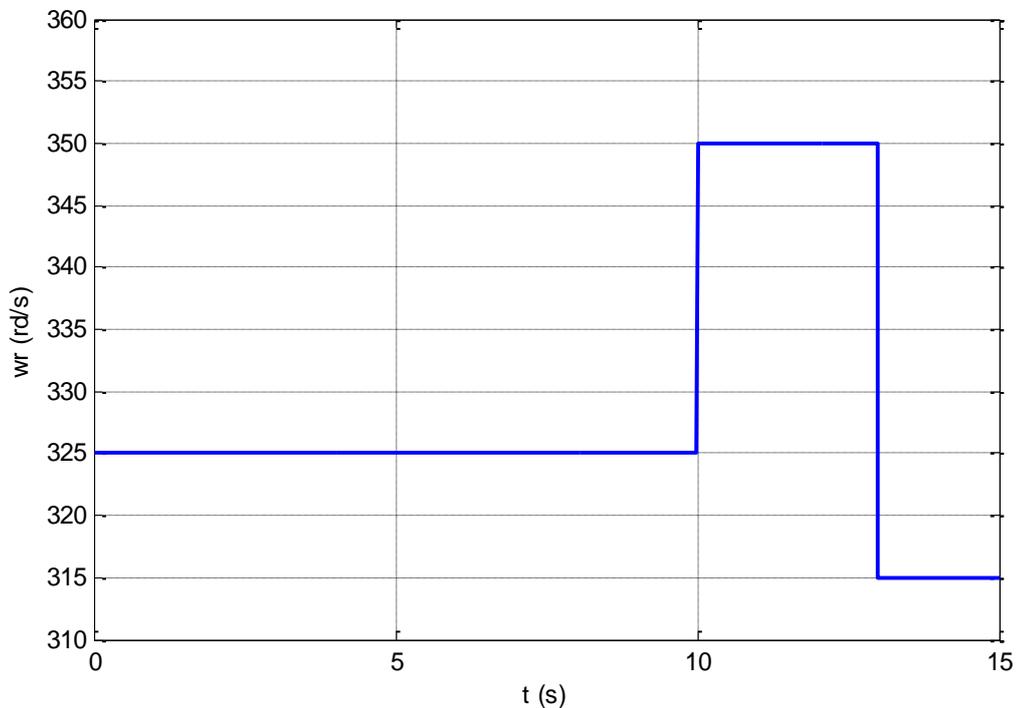


**Figure III.14** : Tension statorique de l'étoile 1.

### III.5.2 Essai avec variation de la vitesse d'entraînement

Dans cet essai nous allons tester l'influence de la variation de la vitesse, la valeur de la tension  $V_{dc} = 1100$  V, nous avons simulé un fonctionnement à vide suivi de l'application brusque d'une charge  $R = 200 \Omega$  à  $t = 1$ s, la variation de vitesse d'entraînement est montrée dans la figure III.15.

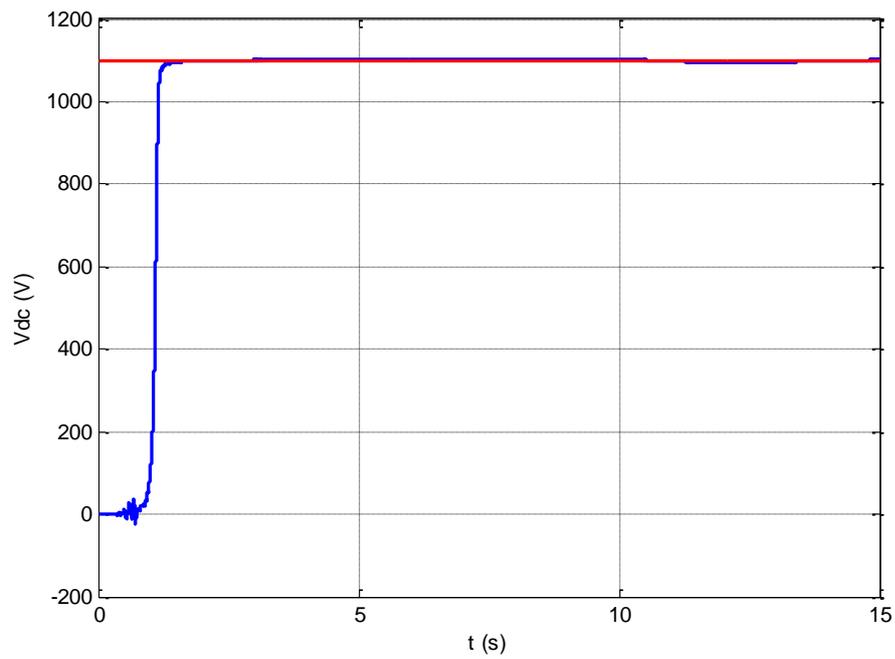
Dans un premier temps, la GASDE est entraînée à une vitesse de 325 rd/s, à l'instant  $t = 10$ s la vitesse est augmentée jusqu'à 350 rd/s puis à l'instant  $t = 13$ s la vitesse est diminuée à 315 rd/s.



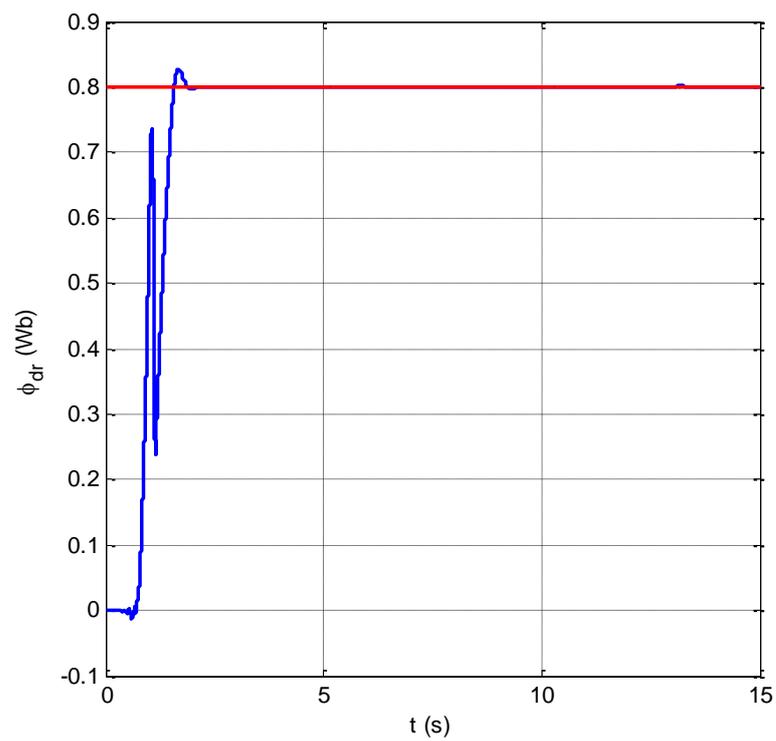
**Figure III.15** : Variation de la vitesse d'entraînement.

D'après la figure III.16 la tension du bus continu présente un léger changement aux variations de vitesse, l'augmentation de la vitesse engendre une augmentation de la puissance mécanique donc une augmentation au niveau de la tension aux bornes des deux étoiles, le régulateur de tension intervient et agit tout en diminuant le courant  $i_{sq}$ , puis la tension  $V_{dc}$  reprend sa valeur de référence après une surtension, dans le cas de la diminution de la vitesse le régulateur agit tout en augmentant le courant  $i_{sq}$ , la tension  $V_{dc}$  reprend sa valeur de référence après une chute de tension. On remarque d'après la figure III.17 que le flux rotorique suit sa référence et il est insensible aux variations de la vitesse contrairement à la tension qui est sensible.

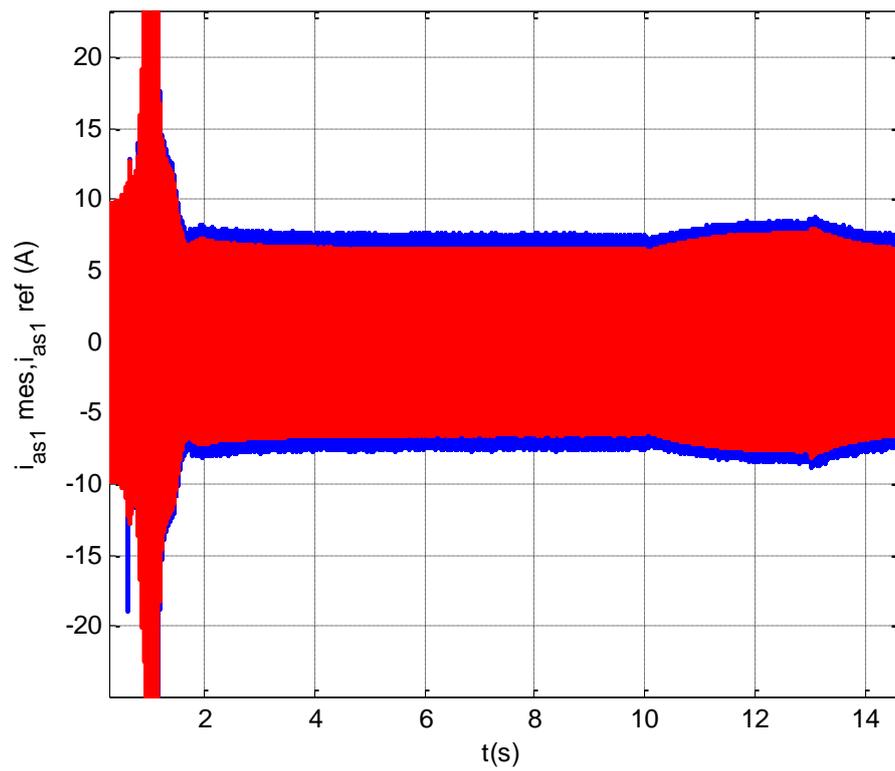
La figure III.18 montre que le courant statorique de l'étoile 1 suit le courant de référence et lors de l'augmentation de la vitesse à  $t=10$ s le courant augmente et lors de la diminution de la vitesse à  $t=13$ s le courant diminue, et de la figure III.19 on constate que la tension aux bornes de la GASDE évolue d'une manière sinusoïdale et elle est influencé par la variation de la vitesse (la tension statorique est proportionnelle à la vitesse d'entraînement).



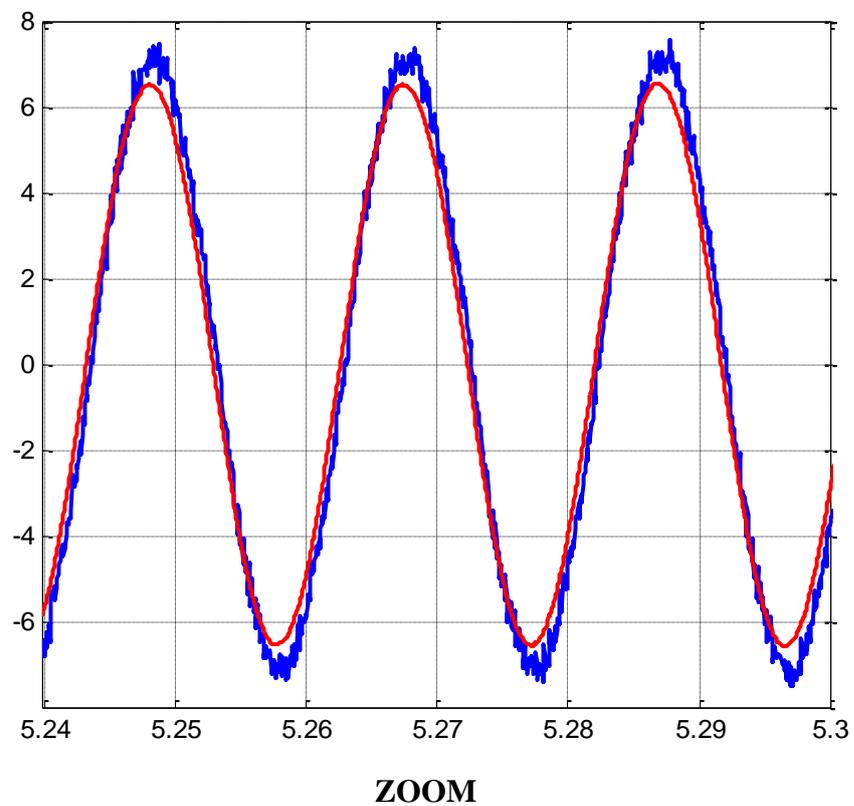
**Figure III.16** : Tension du bus continu  $V_{dc}$  en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

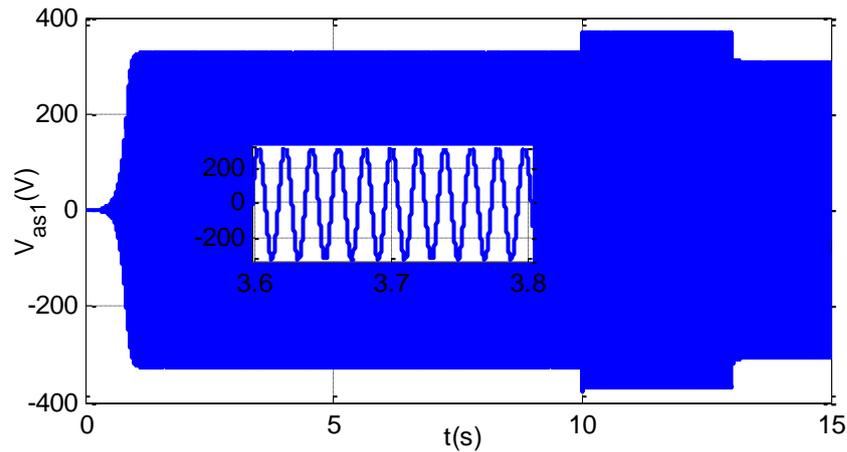


**Figure III.17** : Flux rotorique  $\phi_{dr}$  en cas de variation de la vitesse d'entraînement.



**Figure III.18** : Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence en cas de variation de la vitesse d'entraînement.





**Figure III.19** : Tension statorique de l'étoile 1.

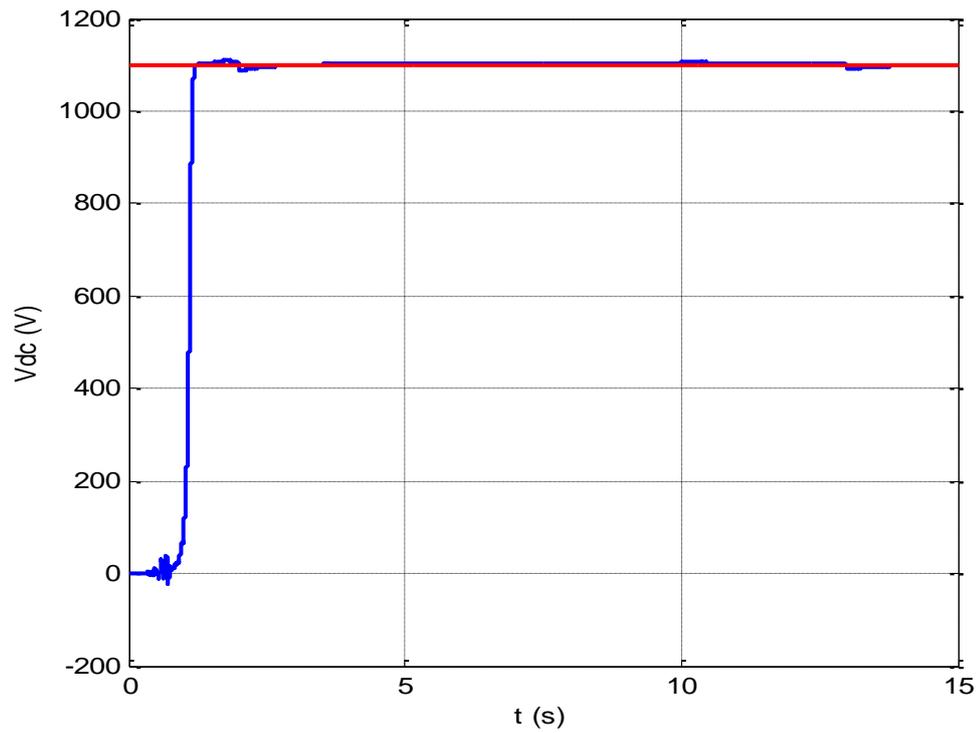
### III.5.3 Essai avec variation de la charge

Dans ce dernier essai, on s'intéresse aux performances de la commande vectorielle en cas de variations de charge. La GASDE est entraînée à la vitesse de synchronisme, la tension  $V_{dc}=1100$  V.

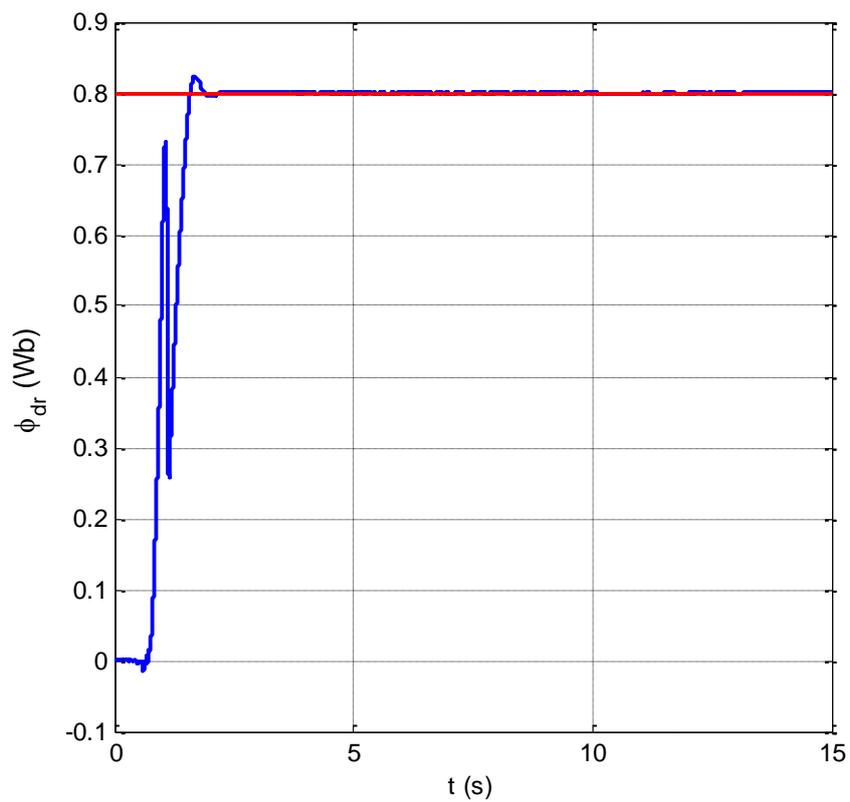
Initialement le fonctionnement la GASDE est à vide jusqu'à  $t=1$ s on applique brusquement une charge  $R=200 \Omega$ , puis à l'instant  $t=10$ s la résistance est augmentée à  $R=400 \Omega$  et à l'instant  $t=13$ s la résistance est diminuée de nouveau à  $R=200\Omega$ .

Le flux rotorique est totalement insensible aux variations de la charge. (figure III.21)

La tension redressée est influencée par la variation de la charge d'après la figure III.20, cette variation affecte sur la valeur de la puissance demandée qui est liée à la tension  $V_{dc}$  et le courant statorique  $i_{sq}$ , on constate des dépassements (chute de tension à la diminution de la résistance et surtension à l'augmentation de la résistance) puis la tension reprend sa valeur de référence après l'intervention du régulateur de puissance. La figure III.22 montre que le courant statorique de l'étoile 1 suit le courant de référence, initialement le courant atteint une certaine valeur puis à l'instant où on augmente la résistance il diminue, et au moment où on diminue la résistance il augmente de nouveau, d'après la figure III.23 la tension statorique évolue d'une façon sinusoïdale, on remarque qu'elle n'est pas influencée par la variation de la charge.



**Figure III.20** : Tension du bus continu  $V_{dc}$  en cas de variation de la charge.



**Figure III.21** : Flux rotorique  $\phi_{dr}$  en cas de variation de la charge

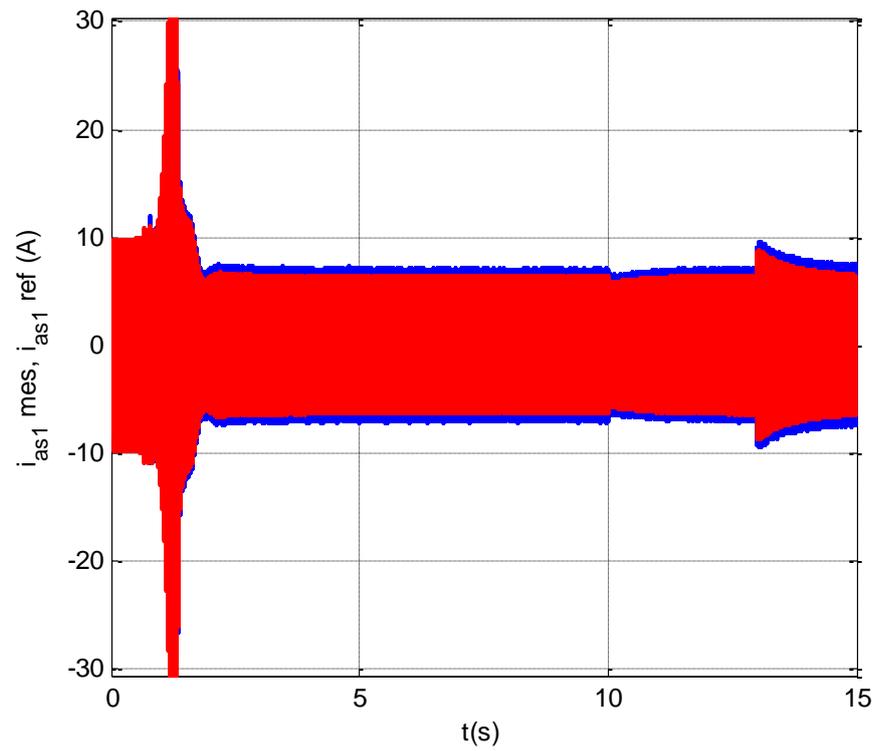
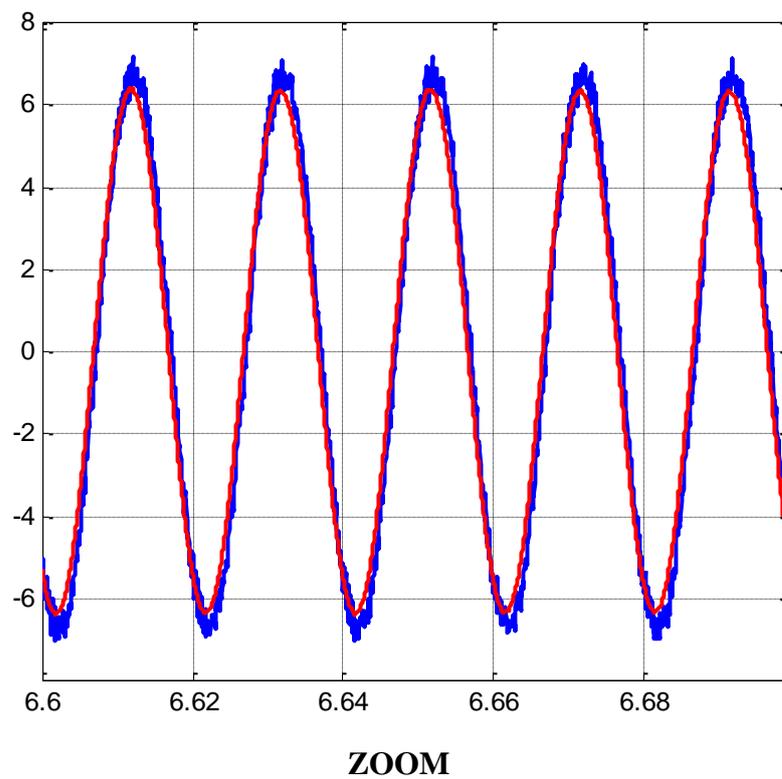
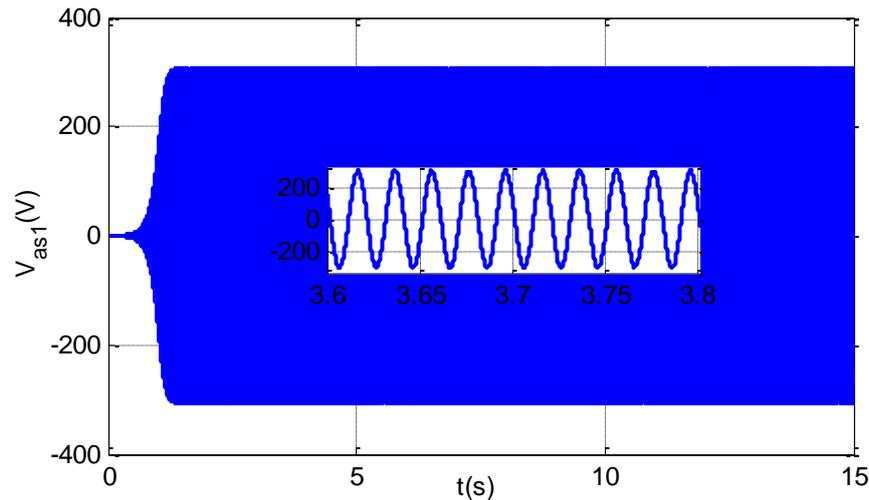


Figure III.22 : Courant statorique de l'étoile 1et sa référence en cas de variation de la charge.





**Figure III.23** : Tension statorique de l'étoile 1.

### III.6 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer la commande vectorielle par orientation du flux rotorique sur la génératrice asynchrone double étoile débitant sur deux redresseurs commandés afin de maintenir la tension du bus continu constante pour des variations de vitesse ou de charge.

La mise en œuvre de cette commande nécessite d'estimer le flux rotorique, le calcul du couple électromagnétique et le calcul de la pulsation statorique, le courant  $i_{sq}$  est calculé à partir du couple électromagnétique de référence qui est à son tour obtenu à partir de la valeur de la puissance active de référence, cette dernière est fourni par le régulateur de tension du bus continu  $V_{dc}$ , le flux est contrôlé par le courant statorique  $i_{sd}$ , donc cette commande consiste à réaliser un découplage entre le flux et la tension du bus continu.

D'après les simulations nous avons remarqué que cette commande présente une solution viable face aux différentes variations (vitesse, charge), elle possède des performances acceptables. A l'apparition des perturbations lors de la variation de la vitesse ou la charge, le système de régulation intervient afin de stabiliser la tension du bus continu de sa valeur de référence, le flux reste totalement insensible aux variations, donc seul la tension qui est influencée par ces dernières.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire a permis d'étudier et d'analyser les performances de la génératrice asynchrone double étoile auto-amorcée en fonctionnement autonome, de la modéliser dans les deux repères : triphasé et biphasé ainsi que l'application de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique.

Le premier chapitre donne un aperçu sur la MASDE (description, avantages, inconvénients et domaines d'applications), suivi de la modélisation de la GASDE dans le repère réel triphasé en négligeant la saturation du circuit magnétique, nous avons effectué un changement de repère par l'application de la transformée de Park pour simplifier les systèmes d'équations et les rapporter à des axes perpendiculaires électriquement (direct et en quadrature) en tenant compte de la saturation du circuit magnétique.

Afin de mieux maîtriser le comportement de la génératrice auto-excitée le second chapitre a été dédié à l'analyse de ses caractéristiques en effectuant des essais à vide et en charge sous l'environnement MATLAB/Simulink d'où on a remarqué que les performances de la GASDE sont directement influencées par la vitesse d'entraînement, la dimension des condensateurs d'excitation et par les charges et en particulier les charges inductives qui sont consommatrices de l'énergie réactive.

Le troisième chapitre a été consacré à l'application de la commande vectorielle à orientation du flux rotorique à la génératrice asynchrone double étoile connectée aux redresseurs à MLI et débitant sur des charges. Ce contrôle permis de maintenir la tension du bus continu constante, différents essais sont effectués (sans variations de la vitesse, de la charge, variations de la vitesse et de la charge). La commande présente de bons résultats, la tension est bien contrôlée, et le flux rotorique bien orienté grâce aux régulateurs PI.

D'après les résultats obtenus on peut conclure les points suivants :

- La transformation de Park permis de simplifier les systèmes d'équations et d'avoir des valeurs constantes,
- La connexion des batteries de condensateurs aux bornes statorique de la génératrice, la vitesse rotorique et la présence du flux rémanent donnent naissance à l'auto-amorçage,
- La nécessité de la prise en compte de la saturation magnétique de la MASDE en mode génératrice en fonctionnement autonome,

- Les caractéristiques de la GASDE sont directement influencées par la vitesse d'entraînement, la dimension des condensateurs d'excitation et par les charges (purement résistives et inductives), elles varient avec la variation de ces grandeurs,
- La possibilité de maintenir la tension du bus continu constante quelques soient les variations de la vitesse ou de la charge, en appliquant le contrôle vectoriel à flux rotorique orienté.

Perspectives :

- Insertion des condensateurs de compensation en série/parallèle avec les charges, pour maintenir les tensions aux bornes de la GASDE, lors du fonctionnement en charge, cela permet de renforcer le rôle des condensateurs de l'auto-amorçage.
- L'application d'autres technique de commandes telle que la logique floue, la commande adaptative,ect...

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [Abd08] L. Abdelhamid, R. Abdessemed, H. Amimeur, « Etude et simulation des différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens, 5<sup>th</sup> International conference on electrical engineering, Université de Batna, 2008.
- [Abd12] L. Abdelhamid, « Contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens 'Evaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement' Thèse de doctorat, Université de Batna, 2012.
- [Adj12] A. Adjati, « Etude des machines asynchrones à double étoile en pompage », Mémoire de magister, Université de Béjaia, 2012.
- [Ami08] H. Amimeur, « Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement », Mémoire de magister, Université de Batna, 2008.
- [Ami12] H. Amimeur, « Contribution au contrôle de la machine asynchrone double étoile » Thèse de doctorat, Université de Batna, 2012.
- [Ami12a] H. Amimeur, D. Aouzellag, R. Abdessemed, K. Ghedamsi, «Sliding mode control of a dual-stator induction generator for wind energy conversion systems», *Electrical Power and Energy Systems*, vol.42, 2012, pp.60-70.
- [Bel07] L. Belhadji, « Commande directe de puissance basée sur le flux virtuel d'un convertisseur AC/DC triphasé sans capteur de tension», Mémoire de magister, Ecole militaire polytechnique d'Alger, 2007.
- [Ben13] Y. Bendjeddou, « Contribution à l'étude des performances d'un générateur asynchrone », Mémoire de magister, Université de Batna, 2013.
- [Ben15] M. Ben Slimane, M. Arbkhelifi, M. Ben Fredj, H. Rehaoulia, «Analysis of saturated self-excited dual stator induction generator for wind energy generation », *Journal of circuit, systems, and computers*, vol. 24, 2015, pp.1-24.
- [Ben18] Y. Bendjeddou, R. Abdessemed, E. Merabet, «Improved field oriented control for stand alone dual star induction generator used in wind energy conversion», *Engineering Review* vol. 40, 2020, pp.34-46.

- [Ben19] M. Benakcha, « Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une génératrice asynchrone double étoile 'GASDE' », Thèse de doctorat, Université de M'sila, 2019.
- [Ber16] F. Berrabah, « Commande sans capteur de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2016.
- [Bes18] T. Bessaad, « Commande par logique floue d'un système multi-machines connectées en série », Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2018.
- [Bou10] A. Bouafia, F. Krim, J. Gaubert, « Predictive direct power control of three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier using space-vector modulation (SVM) », IEEE Trans. Power Electron, vol. 25, 2010, pp. 1945–1955.
- [Che15] S. Chekkal, « Intégration des génératrices asynchrones à double étoiles dans un système éolien », Thèse de doctorat, Université de Béjaia, 2015.
- [Chi12] K.A. Chinmaya, G.K. Singh, « Modeling and experimental analysis of grid-connected six-phase induction generator for variable speed wind energy conversion system », Electric power systems research, vol.166, 2019, pp. 151-162.
- [Fer09] K. Ferkous, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magister, Ecole Doctorale « Energie renouvelables » de Constantine, 2009.
- [Had17] Y. Hadjouti, A. Hambli, « Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques », Mémoire de master, Université de Bouira, 2017.
- [Ham16] F. Hamoud, M.L. Doumbia, A. Cheriti, « Performance study of a self-excitation dual stator winding induction generator for renewable distributed generation systems, smart grid and renewable energy », vol.7, 2016, pp 197-215.
- [Ker13] S. Kercha, W. Goubi, « Etude et modélisation des machines électriques double étoile », Mémoire de master, Université de Ouargla, 2013.
- [Kor09] B. Korich, « Commande d'un convertisseur AC/DC triphasé à quatre bras en régime déséquilibré », Mémoire de magister, Ecole militaire polytechnique d'Alger, 2009.
- [Lak14] M. Lakhdari, « Simulation et commande de la machine asynchrone double étoile pour aérogénération », Mémoire de magister, Université de Sétif, 2014.

- [**Lem18**] M. Lemaini «Contrôle de puissance d'un redresseur MLI », Mémoire de master, Université de Biskra, 2018.
- [**Lou10**] L. Louze, « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [**Mer08**] E. Merabet, « Commande floue adaptative d'une machine asynchrone double étoile », Mémoire de magister, Université de Batna, 2008.
- [**Mou07**] A. Moussa Siddo, I. Soumana Nouhou « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale polytechnique d'Alger, 2007.
- [**Poi03**] F. Poitiers, « Etude et commande des génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, Ecole de polytechnique de l'université de Nantes, 2003.
- [**Rah17**] A. Rahoui, « Techniques avancées pour la commande et l'observation d'un redresseur MLI », Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2017.
- [**Rio93**] P. Rioual, H. Pouliquen, J-P. Louis, « Control of a PWM rectifier in the unbalanced state by robust voltage regulation », The European power electronics association, , N°13-169,1993.
- [**Sad17**] R. Sadouni, « Commande directe du couple (DTC-SVM) d'une MASDE associée à deux onduleurs multiniveaux en cascade avec un redresseur à MLI piloté par DPC », Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel-Abbes, 2017.
- [**Seb14**] I. Sebihi, K. Hafsi, « Etude du générateur asynchrone auto-excitée pour l'utilisation dans le système éolienne », Mémoire de master, Université de Ouargla, 2014.

## Paramètres de la GASDE :

Les paramètres de la GASDE sont donnés par le tableau suivant :

Vitesse nominale (synchronisme)	$v_n=1500\text{tr/mn}$
Fréquence nominale	$f=50\text{Hz}$
Résistance d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)	$R_{s1}=R_{s2}=1.9\Omega$
Résistance d'une phase rotorique	$R_r=2.1\Omega$
Inductance propre de fuite d'une phase statorique (étoiles 1 et 2)	$L_{l1}=L_{l2}=0.0132\text{H}$
Inductance propre de fuite d'une phase rotorique	$L_{lr}=0.0132\text{H}$
Inductance mutuelle de fuite stators-rotor	$L_{lm}=0.011\text{H}$
Moment d'inertie	$J=0.038\text{kg.m}^2$
Coefficient de frottement	$F_f=0\text{ N.m.s/rd}$
Nombre de paires de pôles	$p=2$

**Résumé :** Le travail présenté dans ce mémoire est la commande vectorielle par flux rotorique orienté de la machine asynchrone double étoile (MASDE) en mode génératrice auto-excitée en fonctionnement autonome. Dans la première partie nous avons donné un aperçu sur l'état de l'art de la MASDE, puis nous nous sommes intéressés à son modèle type génératrice autonome d'où on a procédé à sa modélisation dans le référentiel triphasé (a, b, c) sans prise en compte de la saturation, et dans le référentiel biphasé (d, q) en tenant compte de la saturation. En deuxième partie, une étude analytique a été présentée tout en décrivant le phénomène de l'auto-amorçage, afin de mieux maîtriser le comportement de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE) auto-amorcée nous avons effectué trois tests (à vide, en charge R et en charge RL), la modélisation de ces charges statique a été abordé aussi. Finalement, nous avons étudié la commande vectorielle par orientation du flux de la GASDE débitant sur des redresseurs à MLI commandés par la technique à bande d'hystérésis, le flux et la tension redressée sont régulées par des régulateurs classiques PI et cela pour bien orienter le flux et maintenir la tension du bus continu constante à sa valeur de référence quelque soient la variation de la vitesse ou de la charge, des tests de simulation ont été fait afin de tester les performances de cette commande.

**Mots-clés:** Machine asynchrone double étoile, génératrice asynchrone double étoile convertisseurs AC/DC, commande vectorielle, régulateur PI, auto-amorçage.

**Abstract:** The work presented in this thesis is the vector control by oriented rotor flux of the dual stator induction machine (DSIM) in self-excited generator mode in autonomous operation. In the first part we gave an overview on the state of the art of DSIM, then we were interested in its autonomous generator type model from which we proceeded to its modeling in the three-phase frame of reference (a, b, c) without taking saturation into account, and in the two-phase frame of reference (d, q) in taking into account saturation. In the second part, an analytical study was presented while describing the phenomenon of self-excited, in order to better understand the behavior of the self-excited dual stator induction generator (SDSIG) we carried out three tests (empty, under load R and under load RL), the modeling of these static loads was also approached. Finally, we studied the vector control by oriented rotor flux of the SDSIG debiting on PWM rectifiers controlled by the hysteresis band technic, flux and rectified voltage are regulated by conventional PI regulators, and this to well orient the flux and keep the voltage DC bus constant at its reference value whatever the variation in speed or load, simulation tests were carried out in order to test the performance of this command.

**Keywords:** dual stator induction machine, dual stator induction generator, vector control, PI regulator, self-excited.