

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche
Scientifique

Université A\ MIRA Béjaia



Faculté de Technologie

Département d'Électrotechnique

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Thème

**COMMANDE PAR LA LOGIQUE FLOUE D'UNE
GENERATRICE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE EN
FONCTIONNEMENT AUTONOME**

Réalisé par : YOUSFI Djaouida

Encadreur:

M^r AMIMEUR Hocine

Co-Encadreur

M^r HAMOUDI Yanis

Année Universitaire 2020/2021

REMERCIEMENTS

Remerciements



Au nom d'Allah, le Tout - Miséricordieux, le Très - Miséricordieux

La louange est à Allah l'unique et la paix et le salut sur celui qui n'a point de messager après lui et sur sa famille, ses compagnons et tous ceux qui suivent son chemin jusqu'au jour de la résurrection.

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.

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à monsieur **AMIMEUR Hocine** et **HAMOUDI Yanis** pour leurs conseils ainsi que pour la confiance et l'aide qu'ils m'ont accordé pour mener ce travail à terme.*

Je remercie également tous les membres du jury pour avoir bien voulu évalué et examiner mon 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.

Enfin, une pensée affectueuse est adressée aux membres de ma famille en particulier ma mère, mon père, mes grands-parents, mon frères et mon époux, pour leur soutien sans limite durant toutes mes années d'études.



DEDICACE

Dédicace



*l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste
uil a ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je*



A ma tendre mère: SAMIA.M

*Femme vertueuse, pour moi vous êtes toujours prévenante, attentionnée et vigilante, votre
sens du devoir, votre rigueur et votre souci constant pour ma réussite fait de vous une
mère exemplaire, c'est la raison pour laquelle ce modeste travail vous est entièrement
dédié.*

Puisse Dieu vous accorder longue vie afin de bénéficier du fruit de ce travail.

A mon cher Père: NACER

*Qui a placé mes études au-dessus de tout, Trouvez dans ce travail le témoignage de ma
reconnaissance et de mon indéfectible attachement.*

A mon cher frère: MEHDI

*Pour l'estime et la considération que vous avez pour moi. En témoignage des liens qui
nous unissent trouvez ici le fruit des efforts que vous avez consenti à mon égard tout
au long de ces années d'études universitaires.*

A mes grands-parents : HADJ SADEK & HADJA HANIFA,

A mes oncles, tantes, cousins et cousines

*Pour moi ce travail est le votre, c'est la raison pour laquelle il vous est dédié, soyez donc
honoré, recevez dans ce mémoire mes respects les plus considérables. Les mots me
manquent encore pour vous témoigner ma reconnaissance car un proverbe dit « Quelle
que soit la valeur du présent fait à l'homme ; il n'y a qu'un seul mot pour exprimer la
reconnaissance inspirée par la libéralité, ce mot c'est **Merci** ».*

A mon cher époux: MOURAD.M

*Pour son soutien moral et ses encouragements tout au long de la préparation de ce mode
de travail.*

A toute la famille YOUSFI, MECHERI ET MAKHLOUFI

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste d'abréviations	
Introduction Générale	1

CHAPITRE I

Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile (GASDE) et le redresseur à MLI

I.1 Introduction	3
I.2 Présentation de la machine asynchrone double étoile	3
I.2.1 Constitution de la machine asynchrone double étoile (MASDE)	3
I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile.	4
I.4 Application de la machine asynchrone double étoile.....	5
I.5 Avantages et les inconvénients de la MASDE.....	6
I.6 Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile.....	6
I.6.1 Hypothèses simplificatrices pour l'étude de la GASDE.....	7
I.6.2 Modèle de la GASDE dans le repère naturel (a,b,c)	7
I.6.2.1 Equations électriques dans le repère naturel (a,b,c)	7
I.6.2.2 Equations des flux dans le repère naturel (a,b,c)	8
I.6.3 Modèle de la GASDE dans le repère de Park (d,q).....	9
I.6.3.1 Equations Electriques dans le repère « d,q »	9
I.6.3.2 Equations magnétiques dans le repère« d,q »	10
I.6.3.3 Simulation de la GASDE à vide	11
I.7 Redresseur à MLI.....	13
I.7.1 Généralités sur le redresseur à MLI	13
I.7.1.1 Définition d'un redresseur MLI.....	13
I.7.1.2 Structure général du redresseur MLI	13
I.7.1.3 Principe de fonctionnement du redresseur à MLI.....	14
I.7.1.4 Techniques de commande d'un redresseur à MLI.....	14

Table des matières

I.7.2 Modélisation du redresseur à MLI.....	16
I.7.2.1 Représentation du redresseur MLI dans le référentiel triphasé.....	16
I.8 Conclusion.....	18

CHAPITRE II

Étude du phénomène d'auto-amorçage

II. Introduction.....	19
II.1 Définition d'un système autonome.....	19
II.2 Génératrice asynchrone double étoile (GASDE) auto-amorcée en fonctionnement autonome.....	19
II.3 Phénomène d'auto-amorçage.....	20
II.4 Détermination de la valeur des capacités d'auto-amorçage.....	21
II.5 Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE.....	22
II.6 Modélisation des charges statiques.....	23
II.6.1 Charge purement résistive (R).....	23
II.6.2 Charge inductive (RL).....	24
II.7 Simulation et interprétation des résultats.....	25
II.7.1 Fonctionnement à vide.....	25
II.7.2. Fonctionnement en charges purement résistives.....	32
II.7.3. Fonctionnement en charges résistives-inductives	35
II.8 Conclusion	39

CHAPITRE III

La commande par la logique floue de la génératrice asynchrone double étoile.

Table des matières

III.1 Introduction	40
III.2 Généralités sur La logique floue.....	40
III.2.1 Historique.....	40
III.2.2 Définition	41
III.2.3 Principe de la logique floue	41
III.3 Structure générale d'un système de commande floue	42
III.3.1 Interface de fuzzification	43
III.3.2 Base de connaissance	44
III.3.3 Inférence floue	44
III.3.4 Interface de défuzzification	44
III.3.5 Différentes approches pour la détermination des règles.....	45
III.3.6 Développement pratique du contrôleur flou	46
III.4 Orientation du flux rotorique.....	47
III.5 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue.....	50
III.6 Simulation et interprétation des résultats	50
III.6.1 Essai sans variation de la vitesse ou de la charge	50
III.6.2 Essai avec variation de la vitesse d'entraînement	52
III.6.3 Essai avec variation de la charge	55
III.7 Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59
Bibliographie	

Liste des figures

Figure I.1: Représentation schématique des enroulements de la MASDE. [Ami08]	4
Figure I.2: Modes de fonctionnement de la MASDE suivant la vitesse. [Fer09]	5
Figure I.3: Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases. [Mer08]	6
Figure I.4: Représentation des enroulements de la GASDE selon les axes. [Mer08]	9
Figure I.5 : Schéma de principe du redresseur [Bou09]	13
Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un comparateur à hystérésis. [Seb14]	15
Figure I.8: Structure du redresseur à MLI. [Rah18]	16
Figure I.9 : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.	18
Figure II.1: Schéma de la GASDE auto-amorcée en fonctionnement autonome.	20
Figure II.2: Phénomène de l'auto-amorçage [Poi03]	21
Figure II.3: Connexion de la charge R selon l'axe d (étoile 1)	23
Figure II.4: Connexion de la charge RL selon l'axe d (étoile 1)	24
Figure II.5: Tension et courant statoriques de l'étoile 1.	26
Figure II.6: Variation de l'inductance de magnétisation.	27
Figure II.7: Evolution des caractéristiques de la GASDE (à vide)	28
Figure II.8: Influence de la capacité d'excitation sur la tension statorique de l'étoile 1	29
Figure II.9: Influence de la capacité d'excitation sur le courant statorique de l'étoile 1	30
Figure II.10: Influence de la capacité d'excitation sur le courant de magnétisation.	30
Figure II.11: Influence de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de l'étoile 1.	31
Figure II.12: Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant statorique de l'étoile 1.	31
Figure II.13: Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant de magnétisation.	32
Figure II.14: ZOOM de l'influence de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de l'étoile 1	32
Figure II.15: Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge R.	33
Figure II.16: Influence le charge résistive sur la tension statorique dans l'étoile 1.	34
Figure II .17: Influence de la charge résistive sur le courant statorique dans l'étoile 1	35
Figure II.18: Influence la charge résistive sur le courant de magnétisation.	35

Liste des figures

Figure II.19: Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge RL.	36
Figure II.20: Influence de la charge RL sur la tension statorique de l'étoile 1	37
Figure II.21: Influence de la charge RL sur le courant statorique de l'étoile 1	38
Figure II.22: Influence de la charge RL sur le courant de magnétisation.	38
Figure III.23: a): Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b): Configuration d'un contrôleur flou.....	43
Figure III.24: Schéma bloc d'une boucle régulation à contrôleur flou.....	46
Figure III.25: Fonctions d'appartenance utilisée par le contrôleur.	47
Figure III.26: Tension du bus continu V_{dc}	51
Figure III.27: Flux rotorique φ_{rd}	51
Figure III.28: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence.	52
Figure III.29: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence (ZOOM).....	52
Figure III.30: Variation de la vitesse d'entraînement.	53
Figure III.31: Tension du bus continu V_{dc} en cas de variation de la vitesse d'entraînement.	54
Figure III.32: Flux rotorique φ_{dr} en cas de variation de la vitesse d'entraînement.....	54
Figure III.33: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence en cas de variation de la vitesse d'entraînement.....	55
Figure III.34 : Variation de la charge.	56
Figure III.35: Tension du bus continu V_{dc} en cas de variation de la charge.	56
Figure III.36: Flux rotorique φ_{dr} en cas de variation de la charge	57
Figure III.37: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence en cas de variation de la charge.....	57

Liste des tableaux

Tableau II.1: Influence de la capacité d'excitation sur le courant de magnétisation	30
Tableau II.2: Influence de la vitesse d'entraînement.....	31
Tableau II.3: Influence de la charge résistive	34
Tableau.III.4: Tableau de calcul de la variation de la commande Δu	46

Abréviations & Symboles

Abréviations & Symboles

- Symboles :

s_1, s_2, r	Indices correspondants à l'étoile 1, l'étoile 2 et au rotor	
a_{s1}, b_{s1}, c_{s1}	Indices correspondants aux trois phases du stator 1	
a_{s2}, b_{s2}, c_{s2}	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	(Ω)
$\phi_{s1}, \phi_{s2}, \phi_r$	Flux statoriques et rotorique	(W _b)
L_{s1}, L_{s2}, L_r	Inductance propres des étoiles statoriques et du rotorique.	(H)
θ_m	Position du rotor par rapport à l'étoile 1	(rd)
θ_2	Position du rotor par rapport à l'étoile 2	(rd)
θ_0	Position initiale du rotor par rapport à l'étoile 1	(rd)
α	Angle de décalage entre les deux étoiles	(rd)
Ω	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)
ω_r	Pulsation électrique rotorique	(rd / s)
ω_s	Pulsation électrique statorique	(rd / s)
ω	pulsation électrique de glissement	(rd / s)
d,q	Axe direct et quadratique du repère de Park	(rd)
L_m	Inductance de magnétisation	(H)
I_m	Courant de magnétisation	(A)
C_{a1}, C_{a2}	Condensateurs d'excitation aux bornes de l'étoile 1 et 2	(μ F)
$i_{d,qcex1}, i_{d,qcex2}$	Courants d'excitation selon les axes d et q, étoile 1 et 2	(A)
R_1, R_2	Résistance électrique connectées aux bornes statoriques	(Ω)
L_1, L_2	Inductances des charges connectées aux bornes statoriques	(H)
$i_{d,dL1}, i_{d,qL2}$	Courants de charge (RL) directs et quadratiques	(A)
V_{dc}	Tension du bus continu	(V)
i_{dc}	Courant du bus continu	(A)
$(x)^*$	Grandeur de référence	
$L_{md,q}$	Inductances cycliques de saturation	(H)

- Abréviations

FLC	Régulation par logique floue
GASDE	Génératrice Asynchrone Double Etoile
MASDE	Machine Asynchrone Double Etoile
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsion

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Dés la fin des années 1920, les machines à deux enroulements triphasés au stator avaient été introduites pour des applications de forte puissance, telle que la traction ferroviaire, la propulsion navale, l'automobile, l'aérospatiale, l'industrie pétrochimique et la production de d'énergie électrique d'origine éolienne, etc..... Les machines multiphasées ont par la suite connu un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multiphasées. Le nombre élevé de phase mène à une réduction des ondulations du couple électromagnétique et les pertes rotoriques [Ami08]. La machine polyphasée constitue donc un choix intéressant pour la modération des vibrations et la discrétion des bruits. L'un des exemples les plus courants de la machine asynchrone double étoile, dans la configuration classique deux enroulements triphasés identiques, les deux étoiles se partagent le même stator et sont décalés d'un angle électrique de 30° . Ces enroulements ont le même nombre de pôles et sont alimentés à la même fréquence.

Dans le domaine de la commande des machines électriques, les travaux de recherche s'orientent de plus en plus vers l'application des techniques de commande modernes. Ces techniques évoluent d'une façon vertigineuse avec l'évolution des calculateurs numériques et de l'électronique de puissance. Ceci permet d'aboutir à des processus industriels de hautes performances. On cite à titre d'exemple la commande adaptative, la commande floue,...etc, l'intérêt récent accordé à cette dernière est dû essentiellement à la disponibilité des interrupteurs à fréquence de commutation élevée et des microprocesseurs de plus en plus performants. [Reg16]

Dans le cadre de notre travail nous nous intéresserons à l'étude et l'analyse du 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 par la logique floue pour maintenir la tension du bus continu constante pour des variations de vitesse ou de charge. Notre travail est reparti comme suit :

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) et biphasé (d,q) .

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).

INTRODUCTION GENERALE

Enfin, dans le troisième chapitre, nous présenterons la théorie de la commande par logique floue, et son application sur la GASDE où des résultats de simulations seront présentés.

Nous terminant notre travail par une conclusion générale qui résumera les principales conclusions auxquelles nous allons aboutir.

Chapitre I :

**Modélisation de la génératrice
asynchrone double étoile (GASDE) et
le redresseur à MLI**

I.1 Introduction

La modélisation d'un système quelconque est indispensable lorsque nous voulons lui appliquer une commande particulière, la modélisation c'est une transformation de système à des équations mathématiques.

L'étude de la modélisation des machines électriques présente un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques, conduisent à concevoir et exploiter le matériel au voisinage de leurs limites technologiques.

Ce chapitre permettra d'une part de présenter la description de la machine asynchrone double étoile (MASDE) ainsi que son principe de fonctionnement, ses applications, ses avantages et ses inconvénients et d'autre part 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, la modélisation de la (GASDE) dans le repère réel triphasé en négligeant la saturation du circuit magnétique, enfin nous finirons par présenter des généralités sur le redresseur à MLI puis on va procéder à sa modélisation pour la mise en œuvre de sa commande.

I.2 Présentation de la machine asynchrone double étoile

I.2.1 Constitution de la machine asynchrone double étoile (MASDE)

La machine asynchrone double étoile est composée d'une partie fixe appelée stator portant deux enroulements triphasés identiques et décalés d'un angle électrique (dans cette modélisation on prend $\alpha = 30^\circ$) et d'une partie tournante appelée rotor, contrairement aux machines asynchrones triphasés elle possède plus de 3 phases au stator (2x3 phases), et contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation, les enroulements rotoriques sont raccordés sur eux-mêmes. [Had17]

La figure I.1 représente schématiquement les enroulements de la MASDE. Les angles θ_{ret} et $(\theta_r - \alpha)$ représentent respectivement la position du rotor (phase ar) par rapport à l'étoile 1 (phase as1) et à l'étoile 2 (phase as2). Les grandeurs relatives aux deux étoiles (1 et 2) seront notées respectivement par les indices 1 et 2. [Had01]

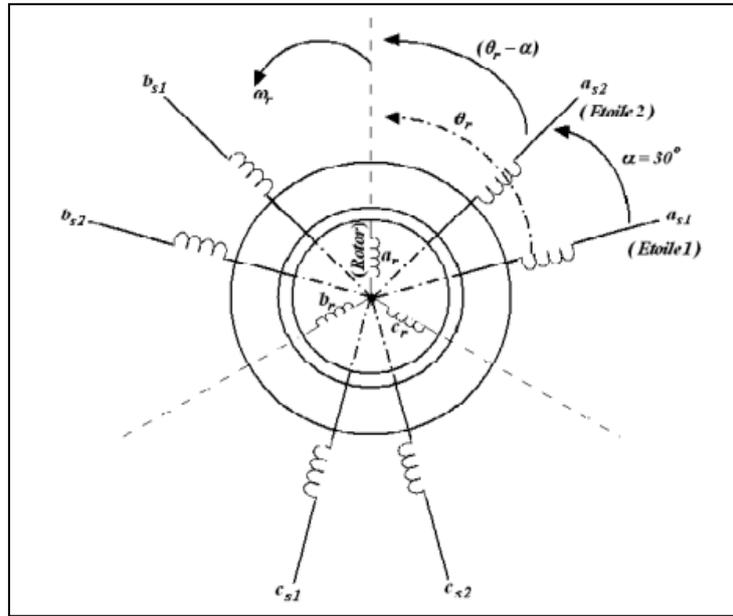


Figure I.1: Représentation schématique des enroulements de la MASDE. [Ami08]

I.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile

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 ω_s (équation I.1); 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.2). [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:

$$\omega_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{I.1})$$

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:

$$\omega = \omega_s - \omega_r \quad (I.2)$$

La figure I.2 montre les modes de fonctionnement de la MASDE suivant la vitesse.

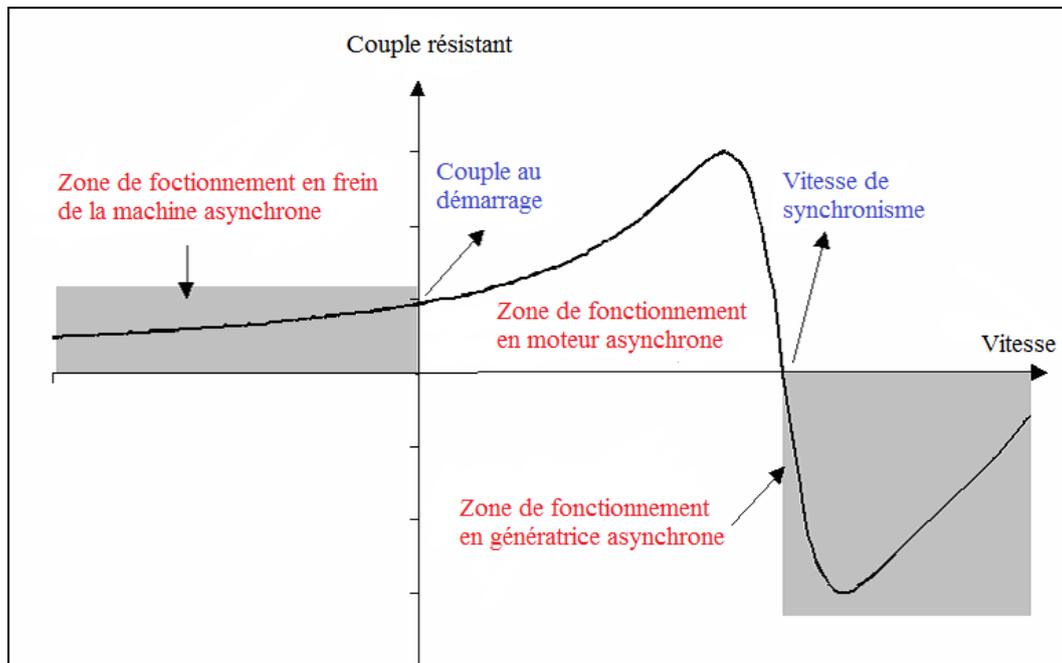


Figure I.2: Modes de fonctionnement de la MASDE suivant la vitesse. [Fer09]

I.4 Application de la machine asynchrone double étoile

La machine asynchrone double étoile (MASDE) est beaucoup plus utilisée dans les applications de puissances élevées ; Parmi ces applications on cite les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les moulins des compresseurs et les moulins du ciment, une autre application concerne l'utilisation de la MASDE dans les systèmes de production de l'énergie éolienne, (voir la figure I.3). [Mer08]

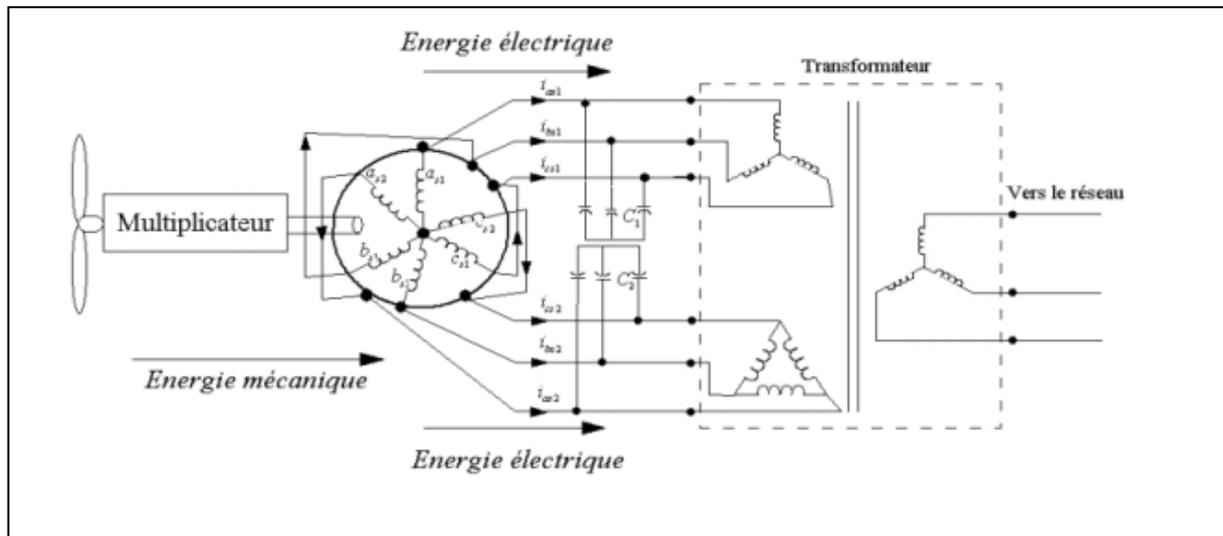


Figure I.3: Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases. [Mer08]

I.5 Avantages et les inconvénients de la MASDE

Les machines multiphasées ont en un intérêt grandissant, et en particulier la machine asynchrone double étoile (MASDE), qui présente en plus des avantages des machines asynchrones à cage, ceux des machines multiphasées. Nous pouvons citer : [Sad17]

- Segmentation de puissance ;
- Amélioration de la fiabilité ;
- Amélioration du facteur de puissance ;
- Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques.

Cependant, la machine asynchrone présente des inconvénients tels que : [Had17]

- Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur- machine ;
- Complication de sa commande à cause de l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux.

I.6 Modélisation de la génératrice asynchrone double étoile

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.

I.6.1 Hypothèses simplificatrices pour l'étude de la GASDE

La machine électrique étant un système très complexe, nous allons simplifier son étude en moyennant les hypothèses simplificatrices suivantes : [Ami08] [Fer09]

- Entrefer constant ;
- Effet des encoches négligé ;
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Pertes ferromagnétiques négligeables ;
- 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.

I.6.2 Modèle de la GASDE dans le repère naturel (a,b,c)

Pris individuellement, les bobines triphasées des deux étoiles et le circuit rotorique (cage d'écuréuil ou bobinage triphasé) peuvent être régis par la loi de Faraday du type (équation I.3) 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.6.2.1 Equations électriques dans le repère naturel (a,b,c)

Les équations électriques de l'étoile 1, de l'étoile 2 et du rotor sont respectivement exprimées par: [Sad10] [Abd97]

$$\begin{aligned} [v_{s1}] &= [r_{s1}][i_{s1}] + \frac{d[\Phi_{s1}]}{dt} \\ [v_{s2}] &= [r_{s2}][i_{s2}] + \frac{d[\Phi_{s2}]}{dt} \\ [v_r] &= [r_r][i_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \end{aligned} \quad (I.3)$$

Avec :

$$\begin{aligned} [v_{s1}] &= [v_{as1} \ v_{bs1} \ v_{cs1}]^t, [v_{s2}] = [v_{as2} \ v_{bs2} \ v_{cs2}]^t, [v_r] = [v_r v_r v_r]^t \\ [i_{s1}] &= [i_{as1} \ i_{bs1} \ i_{cs1}]^t, [i_{s2}] = [i_{as2} \ i_{bs2} \ i_{cs2}]^t, [i_r] = [i_r i_r i_r]^t \\ [\Phi_{s1}] &= [\Phi_{as1} \ \Phi_{bs1} \ \Phi_{cs1}]^t, [\Phi_{s2}] = [\Phi_{as2} \ \Phi_{bs2} \ \Phi_{cs2}]^t, [\Phi_r] = [\Phi_r \Phi_r \Phi_r]^t \\ [r_{s1}] &= \text{diag}[r_{as1} \ r_{bs1} \ r_{cs1}], [r_{s2}] = \text{diag}[r_{as2} \ r_{bs2} \ r_{cs2}], Vr = \text{diag}[rr \ rr \ rr] \end{aligned}$$

Où :

$$(r_{as1} = r_{bs1} = r_{cs1} = r_1), \quad (r_{as2} = r_{bs2} = r_{cs2} = r_2), \quad (r_{ar} = r_{br} = r_{cr} = r_r).$$

r_1 : Résistance d'une phase de l'étoile statorique (1) ;

r_2 : Résistance d'une phase de l'étoile statorique (2) ;

r_r : Résistance d'une phase du rotor.

I.6.2.2 Equations des flux dans le repère naturel (a.b.c)

Les flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes : [Mer08]

$$\begin{aligned} [\Phi_{s1}] &= [L_{s1,s1}] \cdot [I_{s1}] + [M_{s1,s2}] \cdot [I_{s2}] + [M_{s1,r}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_{s2}] &= [M_{s2,s1}] \cdot [I_{s1}] + [L_{s2,s2}] \cdot [I_{s2}] + [M_{s2,r}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] &= [L_{r,s1}] \cdot [I_{s1}] + [M_{r,s2}] \cdot [I_{s2}] + [M_{r,r}] \cdot [I_r] \end{aligned} \quad (I.4)$$

Les sous matrices des inductances dans l'équation (I.4) sont détaillées comme suit :

$$\begin{aligned} [L_{s1,s1}] &= \begin{pmatrix} L_1 + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_1 + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_1 + L_{ms} \end{pmatrix} \\ [L_{s2,s2}] &= \begin{pmatrix} L_2 + L_{ms} & -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & L_2 + L_{ms} & -L_{ms}/2 \\ -L_{ms}/2 & -L_{ms}/2 & L_2 + L_{ms} \end{pmatrix} \\ [L_{r,r}] &= \begin{pmatrix} L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} & -L_{mr}/2 \\ -L_{mr}/2 & -L_{mr}/2 & L_r + L_{mr} \end{pmatrix} \\ [M_{s1,s2}] &= L_{ms} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) \\ \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos \alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha + 4\pi/3) & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ [M_{s1,r}] &= M_{sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta_m) & \cos(\theta_m + 2\pi/3) & \cos(\theta_m + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_m + 4\pi/3) & \cos(\theta_m) & \cos(\theta_m + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_m + 2\pi/3) & \cos(\theta_m + 4\pi/3) & \cos(\theta_m) \end{pmatrix} \\ [M_{s2,r}] &= M_{sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos(\theta_2 + 4\pi/3) \\ \cos(\theta_2 + 4\pi/3) & \cos(\theta_2) & \cos(\theta_2 + 2\pi/3) \\ \cos(\theta_2 + 2\pi/3) & \cos(\theta_2 + 4\pi/3) & \cos(\theta_2) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Avec:

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

L_{s1}, L_{s2} : Les inductances propres des étoiles (1) et (2) ;

L_r : L'inductance propre d'une phase du rotor ;

L_{ms} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique ;

L_{mr} : La valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique ;

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

I.6.3 Modèle de la GASDE dans le repère de Park (d,q)

La représentation des enroulements de la machine dans le repère de Park est donnée par la figure I.4.

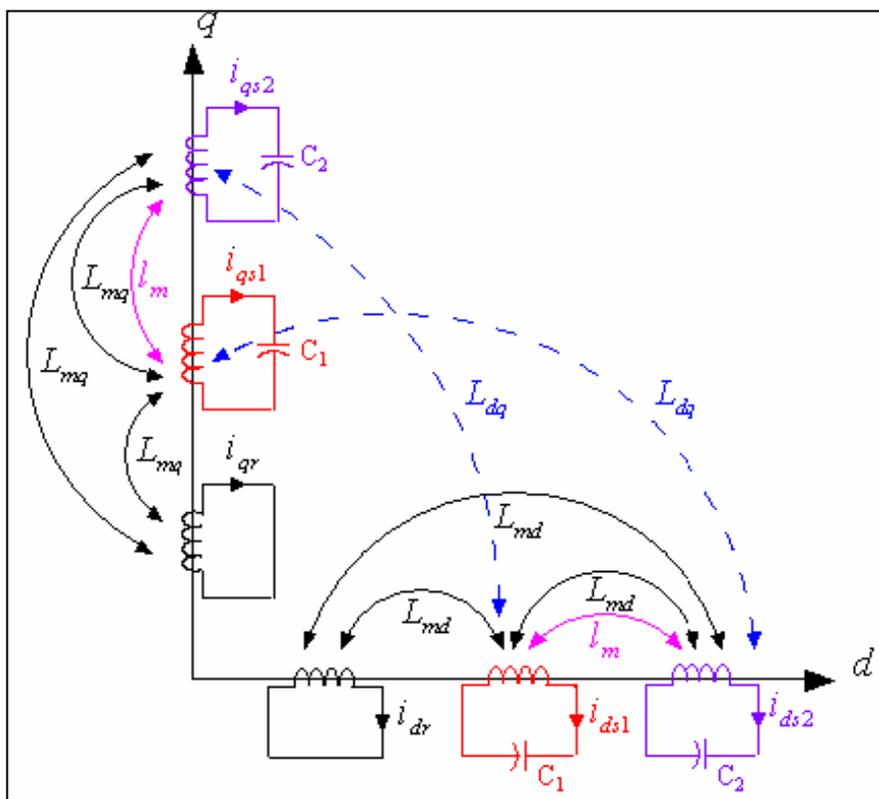


Figure I.4: Représentation des enroulements de la GASDE selon les axes. [Mer08]

I.6.3.1 Equations Electriques dans le repère « d,q »

Les équations électriques de la GASDE dans le repère de Park tournant avec le champ magnétique créé par les enroulements statoriques deviennent : [Abd97]

$$\begin{cases} v_{d1} = -r_1 \cdot i_{d1} + \frac{d}{dt} \Phi_{d1} - \omega_s \Phi_{q1} \\ v_{q1} = -r_1 \cdot i_{q1} + \frac{d}{dt} \Phi_{q1} + \omega_s \Phi_{d1} \\ v_{d2} = -r_2 \cdot i_{d2} + \frac{d}{dt} \Phi_{d2} - \omega_s \Phi_{q2} \\ v_{q2} = -r_2 \cdot i_{q2} + \frac{d}{dt} \Phi_{q2} + \omega_s \Phi_{d2} \end{cases} \quad (I.5)$$

$$\begin{cases} 0 = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (I.6)$$

Avec:

ω_s : La vitesse du champ tournant ;

ω_r : La vitesse de rotation rotorique ;

r_{s1}, r_{s2}, r_r : Sont respectivement les résistances du stator (étoiles 1 et 2) et du rotor.

I.6.3.2 Equations magnétiques dans le repère « d,q »

Cependant, c'est au niveau de l'écriture des flux que ça devient intéressant. Le système matriciel de flux peut également s'écrire sous la forme suivante: [Chi12]

- **Première étoile :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds1} = L_{l1} \cdot I_{d1} - L_{lm}(I_{d1} + I_{d2}) - l_{dq} \cdot I_{q2} + L_{md}(-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qs1} = L_{l1} \cdot I_{q1} - L_{lm}(I_{q1} + I_{q2}) - l_{dq} \cdot I_{d2} + L_{mq}(-I_{d1} - I_{q2} + I_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = L_{l2} \cdot I_{d2} - L_{lm}(I_{d1} + I_{d2}) - l_{dq} \cdot I_{q1} + L_{md}(-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \end{cases} \quad (I.7)$$

- **Deuxième étoile :**

$$\begin{cases} \Phi_{qs2} = L_{l2} \cdot I_{q2} - L_{lm}(I_{q1} + I_{q2}) - l_{dq} \cdot I_{d1} + L_{mq}(-I_{q1} - I_{q2} + I_{qr}) \\ \Phi_{ds2} = L_{l2} \cdot I_{d2} - L_{lm}(I_{d1} + I_{d2}) - l_{dq} \cdot I_{q1} + L_{md}(-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \end{cases} \quad (I.8)$$

- **Au rotor :**

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = l_{lr} \cdot I_{dr} + L_{md}(-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr}) \\ \Phi_{qr} = l_{lr} \cdot I_{qr} + L_{mq}(-I_{q1} - I_{q2} + I_{qr}) \end{cases} \quad (I.9)$$

Où :

$L_{l1}L_{l2}L_{lr}$: Inductances de fuites statoriques (étoile 1 et 2) et rotorique respectivement ;

L_{lm} : Inductance de fuite mutuelle commune aux deux étoiles ;

L_{dq} : Inductance cyclique d'intersaturation donnée par: [Mer07b]

$$L_{dq} = \frac{I_{md} \cdot I_{mq}}{|I_m|} \left(\frac{dL_m}{d|m_m|} \right)$$

Avec :

I_{md}, I_{mq} : Les courants de magnétisation direct et en quadrature.

L_m : Inductance de magnétisation qui est obtenue à partir de la caractéristique de magnétisation de la machine donnée par: [Sin06]

$$L_m = \left[\frac{\Phi_m}{I_m} \right]$$

Φ_m, I_m : Modules du flux et du courant de magnétisation respectivement.

L'expression du courant de magnétisation en fonction des courants statoriques et rotoriques est définie d'après [Ami08] par :

$$I_m = [(-I_{d1} - I_{d2} + I_{dr})^2 + (-I_{q1} - I_{q2} + I_{qr})^2]^{1/2} \quad (I.10)$$

Les inductances cycliques totales statoriques et rotoriques selon les axes d et q sont exprimées par:

$$L_{l(d,q)} = L_{lm} + L_{m(d,q)}$$

I.6.3.2 Simulation de la GASDE à vide

En remplaçant le système d'équations (I.7) et (I.9) dans les équations (I.4) et (I.5), on obtient le système d'équations (I.11) suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} (L_{l1} + L_{l2}) \frac{dI_{d1}}{dt} + L_{ld} \frac{dI_{d2}}{dt} - L_m \frac{dI_{dr}}{dt} = -r_1 I_{d1} + \omega_s (L_{l1} + L_{lq}) I_{q1} + \omega_s L_{lq} I_{q2} - \omega_s L_m I_{qr} - V_{d1} \\ L_{ld} \frac{dI_{d1}}{dt} + (L_{l2} + L_{ld}) \frac{dI_{d2}}{dt} - L_m \frac{dI_{dr}}{dt} = -r_2 I_{d2} + \omega_s L_{lq} I_{q1} + \omega_s (L_{l2} + L_{lq}) I_{q2} - \omega_s L_m I_{qr} - V_{d2} \\ (L_{l1} + L_{lq}) \frac{dI_{q1}}{dt} + L_{lq} \frac{dI_{q2}}{dt} - L_m \frac{dI_{qr}}{dt} = -\omega_s (L_{l1} + L_{ld}) I_{d1} + \omega_s L_{ld} I_{d2} - r_1 I_{q1} + \omega_s L_m I_{dr} - V_{q1} \\ L_{lq} \frac{dI_{q1}}{dt} + (L_{l2} + L_{lq}) \frac{dI_{q2}}{dt} - L_m \frac{dI_{qr}}{dt} = -\omega_s L_{ld} I_{d1} - \omega_s (L_{l2} + L_{ld}) I_{d2} - r_2 I_{q2} + \omega_s L_m I_{dr} - V_{q2} \\ L_m \frac{dI_{d1}}{dt} + L_m \frac{dI_{d2}}{dt} - (L_{lr} + L_m) \frac{dI_{dr}}{dt} = -\omega_g L_m I_{q1} + \omega_g L_m I_{q2} + r_r I_{dr} - \omega_g (L_{lr} + L_m) I_{qr} \\ L_m \frac{dI_{q1}}{dt} + L_m \frac{dI_{q2}}{dt} - (L_{lr} + L_m) \frac{dI_{qr}}{dt} = -\omega_g L_m I_{d1} - \omega_g L_m I_{d2} + \omega_g (L_{lr} + L_m) I_{dr} + r_r I_{qr} \end{array} \right.$$

Les bancs de condensateurs sont connectés en étoile aux bornes des deux étoiles. Sachant que le système d'axe est lié au champ tournant, le système d'équations suivant « d,q » devient:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} v_{d1} = \frac{1}{c_1} I_{d1} + \omega_s V_{q1} \\ \frac{d}{dt} v_{d2} = \frac{1}{c_2} I_{d2} + \omega_s V_{q2} \\ \frac{d}{dt} v_{q1} = \frac{1}{c_1} I_{q1} + \omega_s V_{d1} \\ \frac{d}{dt} v_{q2} = \frac{1}{c_2} I_{q2} + \omega_s V_{d2} \end{cases} \quad (I.12)$$

Du système d'équations (I.11), on exprime ce système sous forme d'état :

$$[\dot{X}] = [A] \cdot [B] \cdot [X]$$

Avec :

$$[\dot{X}] = \frac{d}{dt} [X]$$

$$[A] = [L]^{-1}$$

[L]: représente la matrice d'inductance définie ainsi :

$$[L] = \begin{bmatrix} -(L_{l1} + L_{ld}) & -L_{ld} & 0 & 0 & L_m & 0 \\ -L_{ld} & -(L_{l2} + L_{ld}) & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & -(L_{l1} + L_{lq}) & -L_{lq} & 0 & L_m \\ 0 & 0 & -L_{lq} & -(L_{l2} + L_{lq}) & 0 & L_m \\ -L_m & -L_m & 0 & 0 & (L_{lr} + L_m) & 0 \\ 0 & 0 & -L_m & -L_m & 0 & (L_{lr} + L_m) \end{bmatrix}$$

$$[X] = [I_{d1} I_{d2} I_{q1} I_{q2} I_{dr} I_{qr} V_{d1} V_{d2} V_{q1} V_{q2}]^t$$

$$[B] = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & -w_s(L_{l1} + L_{lq}) & -w_s L_{lq} & 0 & w_s L_m \\ 0 & r_2 & -w_s L_{lq} & -w_s(L_{l2} + L_{lq}) & 0 & w_s L_m \\ w_s(L_{l1} + L_{lq}) & w_s L_{ld} & r_1 & 0 & -w_s L_m & 0 \\ w_s L_{ld} & w_s(L_{l2} + L_{ld}) & 0 & r_2 & -w_s L_m & 0 \\ 0 & 0 & -w_g L_m & w_g L_m & -r_r & w_g(L_m + L_{lr}) \\ w_g L_m & w_g L_m & 0 & 0 & -w_g(L_m + L_{lr}) & -r_r \end{bmatrix}$$

I.7 Redresseur à MLI

I.7.1 Généralités sur le redresseur à MLI

I.7.1.1 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 constitués 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]

I.7.1.2 Structure général du redresseur MLI

La technique employée consiste à modifier la structure interne du redresseur en remplaçant les thyristors par les interrupteurs entièrement commandable à l'ouverture et à la fermeture : transistor MOSFET pour les moyennes et petites puissances, transistors IGBT pour les moyennes et grandes puissances, et les thyristors GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes. [Djeb05]

Pour la commande on utilise la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

La figure (I.5) montre le schéma de principe d'un redresseur MLI.

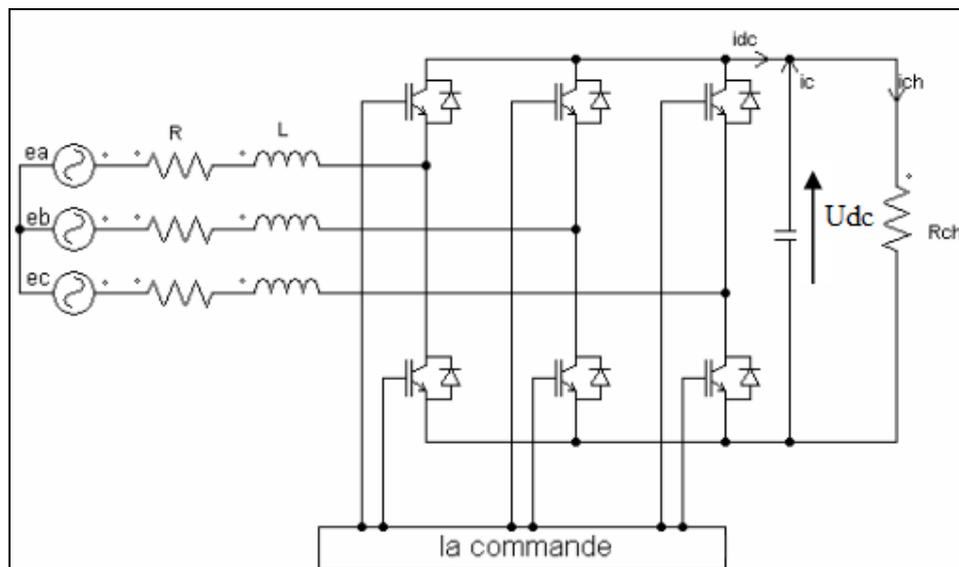


Figure I.5 : Schéma de principe du redresseur [Bou09].

Les redresseurs à MLI sont des onduleurs exploitant leurs réversibilités en courant dans le deuxième mode de fonctionnement. Grâce à la commande MLI, ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux du réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. Nous distinguons deux structures de redresseurs à MLI :

- Redresseur à MLI de courant ;
- Redresseur à MLI de tension.

I.7.1.3 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]

I.7.1.4 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 I.6.

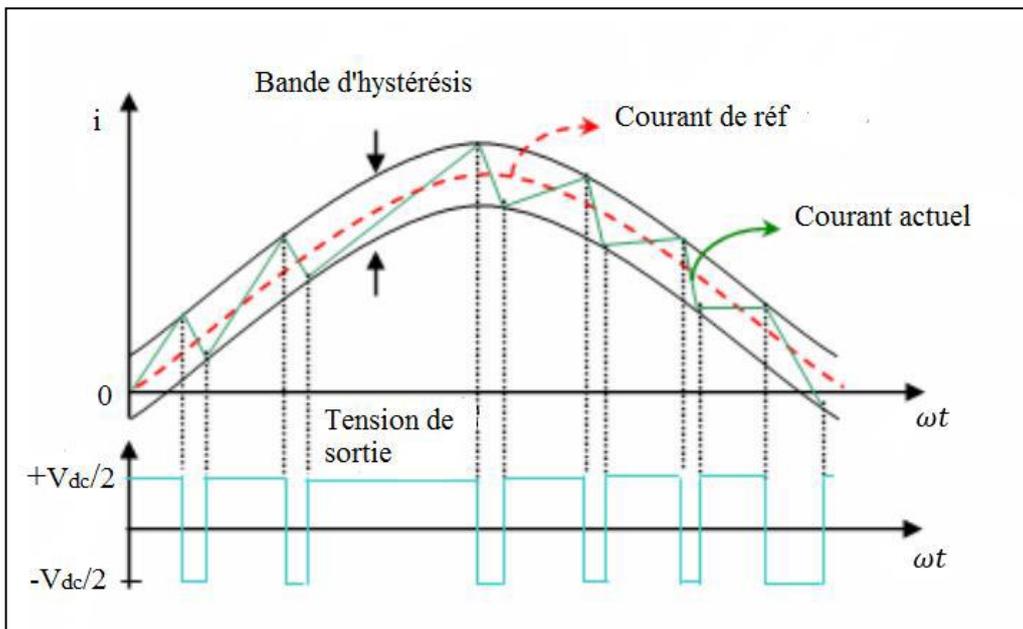


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un comparateur à hystérésis. [Seb14]

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.

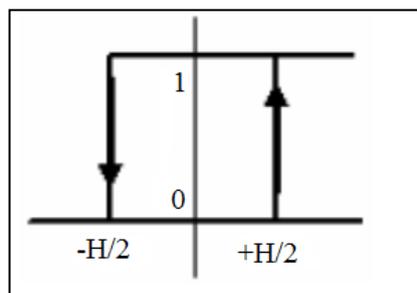


Figure I.7: Principe d'une commande par hystérésis. [Lem18]

I.7.2 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.

La figure I.8 représente le circuit de puissance à modéliser qui se compose d'une source, d'un redresseur MLI et d'une charge continue.

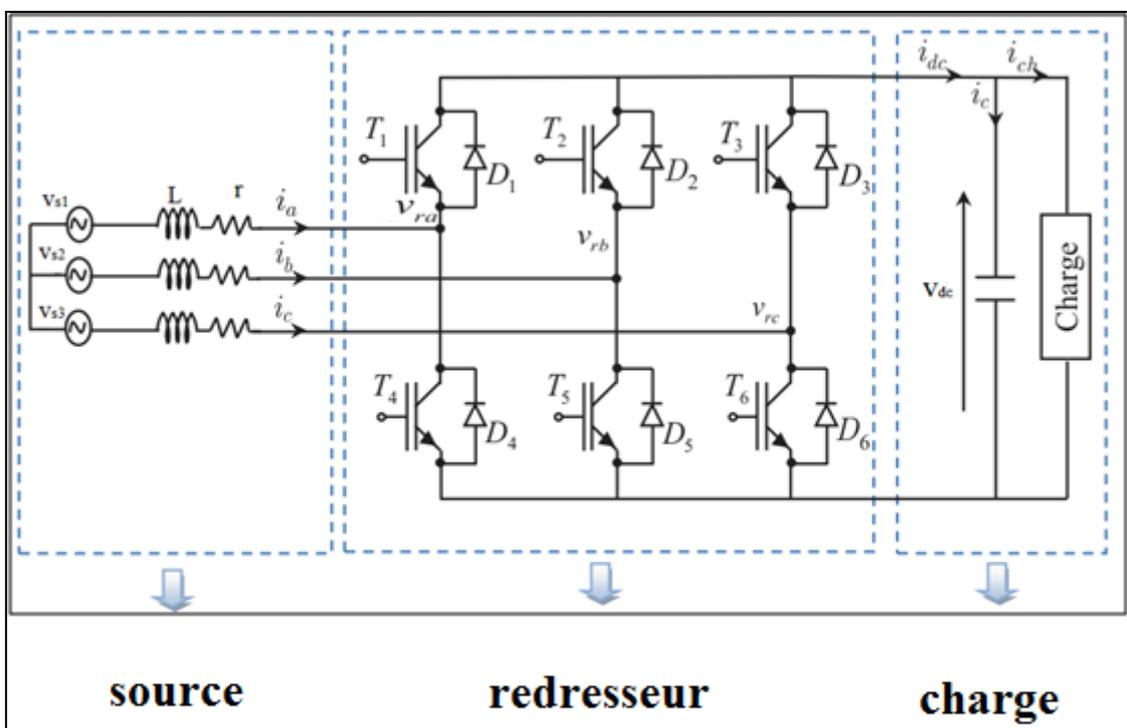


Figure I.8: Structure du redresseur à MLI. [Rah18]

I.7.2.1 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:

$$\begin{aligned} V_{s1} &= R_f i_a + L_f \frac{di_a}{dt} + v_{ra} \\ V_{s2} &= R_f i_b + L_f \frac{di_b}{dt} + v_{rb} \\ V_{s3} &= R_f i_c + L_f \frac{di_c}{dt} + v_{rc} \end{aligned} \quad (\text{I. 13})$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f/L_f & 0 & 0 \\ 0 & -R_f/L_f & 0 \\ 0 & 0 & -R_f/L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{s1} - v_{ra} \\ V_{s2} - v_{rb} \\ V_{s3} - v_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{I. 14})$$

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.

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{I. 15})$$

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

$$i_{dc} = [F_{11} F_{21} F_{31}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{I. 16})$$

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:

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (i_{dc} - i_{ch}) \quad (\text{I. 17})$$

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

A partir des relations (I.13), (I.14), (I.15), (I.16) 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 I.9).

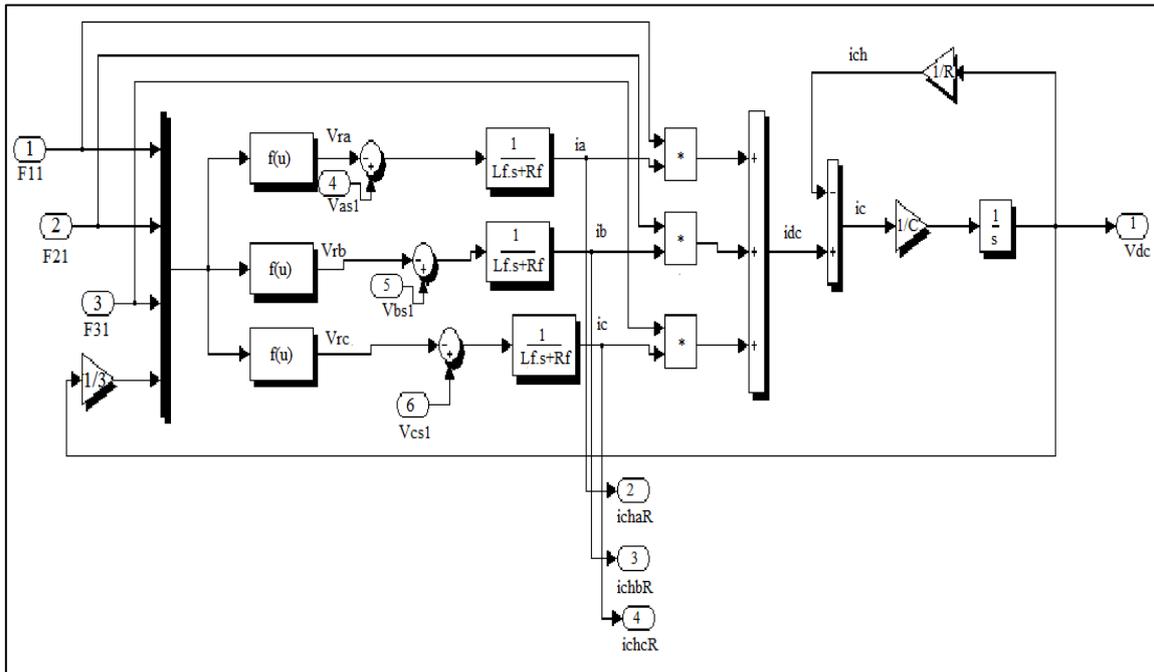


Figure I.9 : Schéma fonctionnel du redresseur MLI dans les coordonnées triphasées normales.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié en premier lieu la modélisation de la machine asynchrone double étoile en mode génératrice. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de cette machine dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, nous avons utilisé la transformation de Park.

Puis la modélisation du redresseur à MLI.

Nous passerons dans le prochain chapitre à l'étude du phénomène d'auto-amorçage d'une GASDE.

Chapitre II :

Étude du phénomène d'auto- amorçage

II.1 Introduction

L'inconvénient principal de la génératrice asynchrone double étoile 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 une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnement autonome qui est le cas de notre étude.

L'étude et l'analyse de la GASDE est l'objectif de ce présent chapitre , 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.1 Définition d'un système autonome

Le système autonome est un système complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité ou une charge sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera un système de stockage ou des batteries assurant une disponibilité en continue d'énergie pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie.

II.2 Génératrice asynchrone double étoile (GASDE) auto-amorcée en fonctionnement autonome

La génératrice asynchrone double étoile 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 connectant une batterie de condensateurs aux bornes statoriques, une vitesse rotorique ainsi qu'une présence du flux magnétique rémanent dans le fer rotorique. [Che15]

L'inductance de magnétisation est le facteur principal de la stabilisation de la tension générée sous les conditions de fonctionnement, à vide ou en charge. Cependant, les performances de la machine sont fortement influencées par la grandeur des condensateurs, ces derniers sont limités par un maximum et un minimum, de même qu'elles sont affectées par les paramètres de la machine, la vitesse de rotation et par la charge.

Une présentation schématique de la GASDE auto-amorçée en fonctionnement autonome est donnée par la figure II.1.

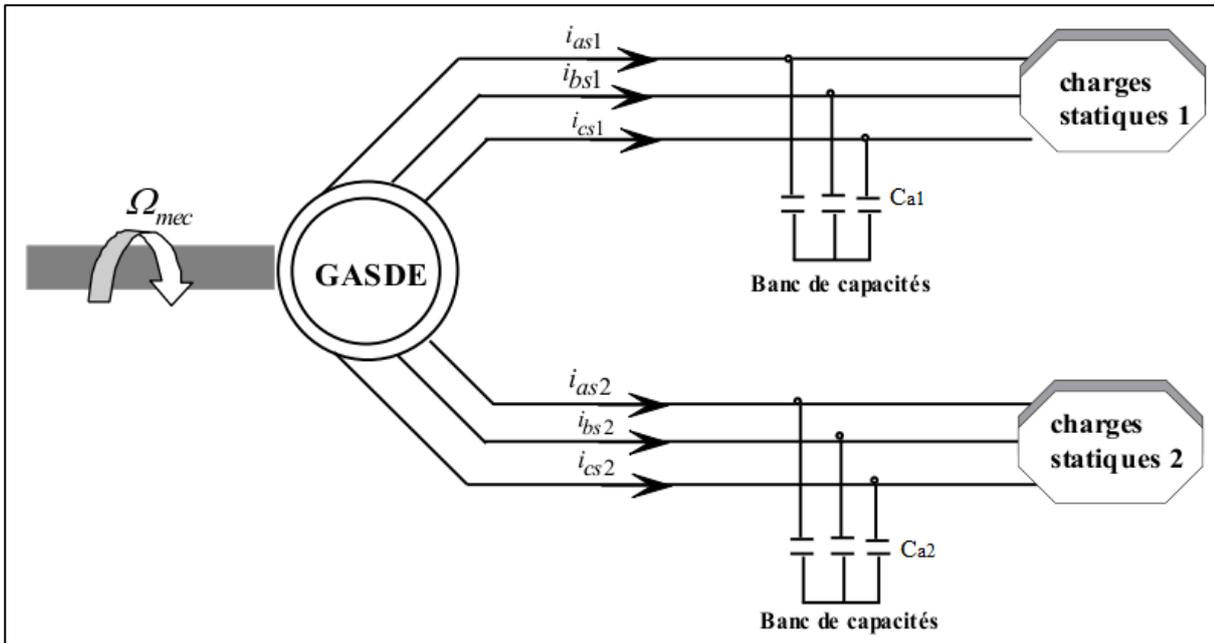


Figure II.1: Schéma représentatif de la GASDE auto-amorçée en fonctionnement autonome.

II.3 Phénomène d'auto-amorçage

Le phénomène d'auto-amorçage de la génératrice est schématisé par la figure II.2. Il commence par le flux rémanent 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, ce dernier va augmenter la tension/courant par sa nature, puis il renvoie de la 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). [Mer08]

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.

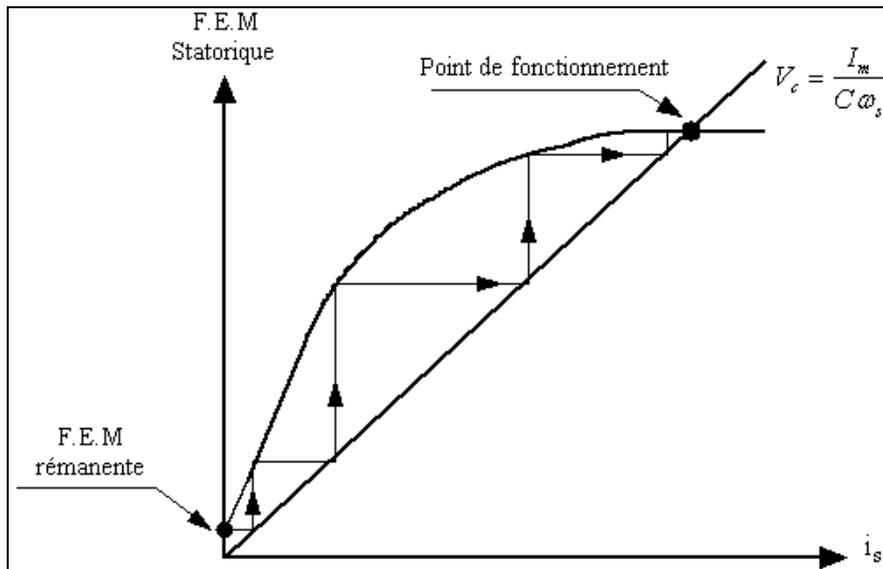


Figure II.2: Phénomène de l’auto-amorçage [Poi03].

II.4 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 absorbé 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 :

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

$$\rightarrow C_a > \frac{1}{L_s \omega_s^2} \tag{II.1}$$

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 :

$$C_a > \frac{1}{L_s \omega_r^2} \tag{II.2}$$

Ce qu’on vient de voir est établi 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} correspond à un fonctionnement instable [Poi03], [Che15].

II.5 Modélisation de l'auto-amorçage de la GASDE

Les équations d'auto-amorçage sont les équations des tensions aux bornes des condensateurs, vu que le fonctionnement en génératrice autonome exige une source d'énergie réactive extérieure (banc des capacités).

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 , étoile1, 2. [Ben15].

C_{a1}, C_{a2} : Sont les condensateurs d'excitation aux bornes de l'étoile 1 et 2 respectivement.

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.6 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.6.1 Charge purement résistive (R)

La charge résistive est présentée par trois résistances identiques connectées en étoile et branchées en parallèle avec le banc de condensateur pour chaque étoile de la GASDE.

Le schéma réduit de connexion en axe de l'étoile 1 est donnée par la figure II.3 et même chose pour le reste. [Mer08] [Ami08]

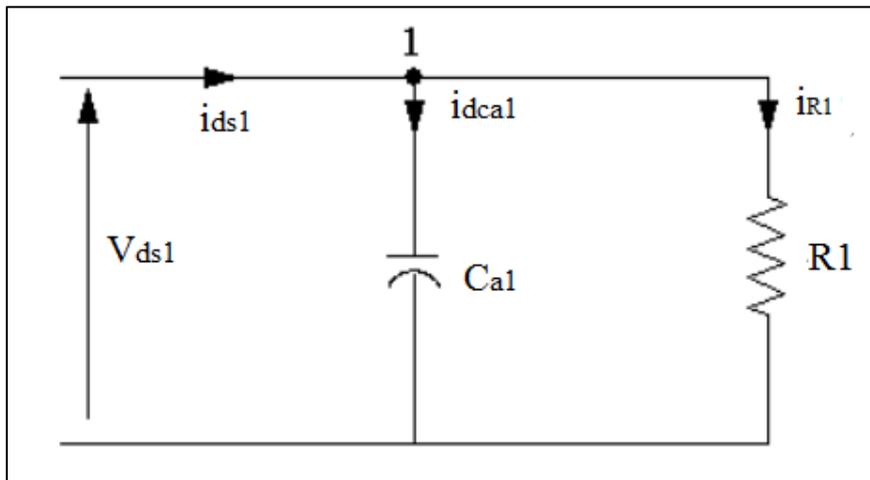


Figure II.3: Connexion de la charge R selon l'axe d (étoile 1).

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

$$i_{dca1} = i_{ds1} - \frac{V_{ds1}}{R_1} \tag{II.5}$$

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

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

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

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

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

II.6.2 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.4. Et même chose pour le reste. [Mer08]

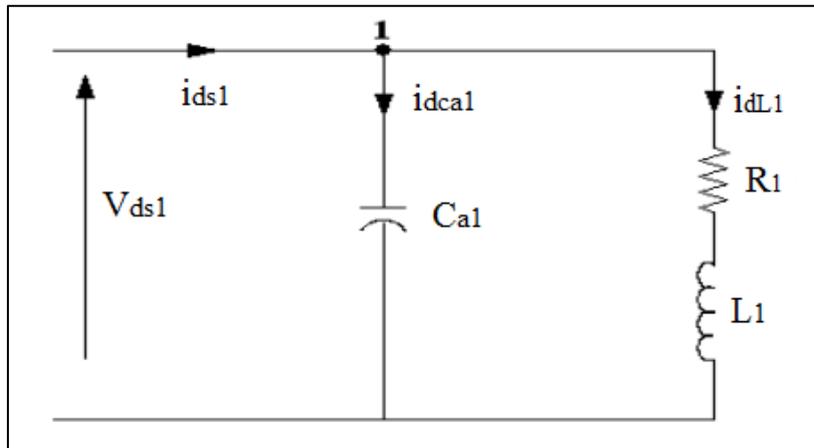


Figure II.4: Connexion de la charge RL selon l'axe d (étoile 1).

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

$$i_{dca1} = i_{ds1} - i_{dL1}
 \tag{II. 8}$$

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

$$\begin{aligned}
 i_{qca1} &= i_{qs1} - i_{qL1} \\
 i_{dca2} &= i_{ds2} - i_{dL2} \\
 i_{qca2} &= i_{qs2} - i_{qL2}
 \end{aligned}
 \tag{II. 9}$$

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

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

Les courants de charge directs et quadratiques sont :

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

II.7 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.7.1 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 ($C_a = C_{a1} = C_{a2} = 45\mu\text{F}$ et $L_m = 0.1406\text{H}$).

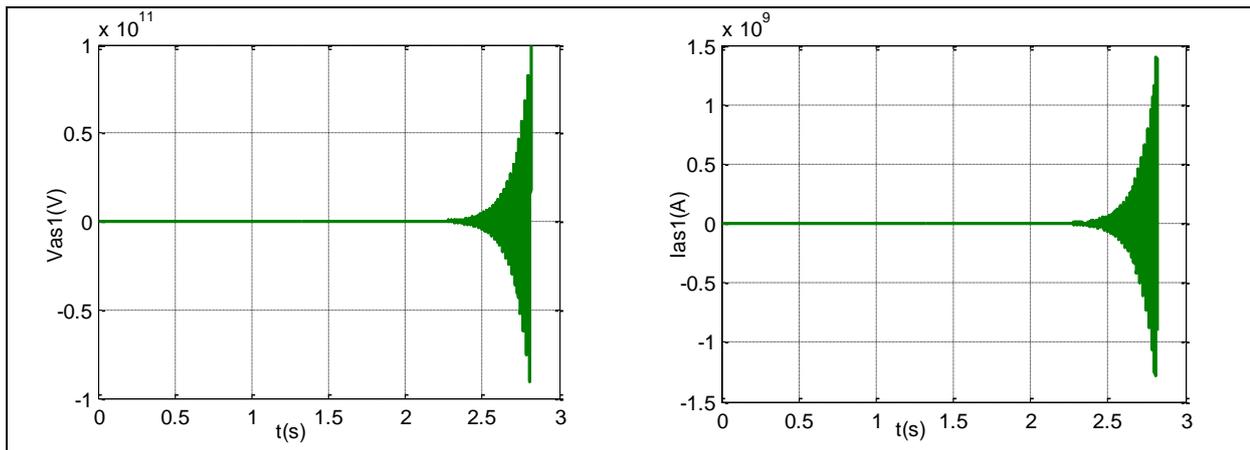


Figure II.5: Tension et courant statoriques de l'étoile 1.

La figure II.5 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.

- **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.6 représente les variations de l'inductance de magnétisation L_m en fonction du module du courant de magnétisation $|I_m|$.

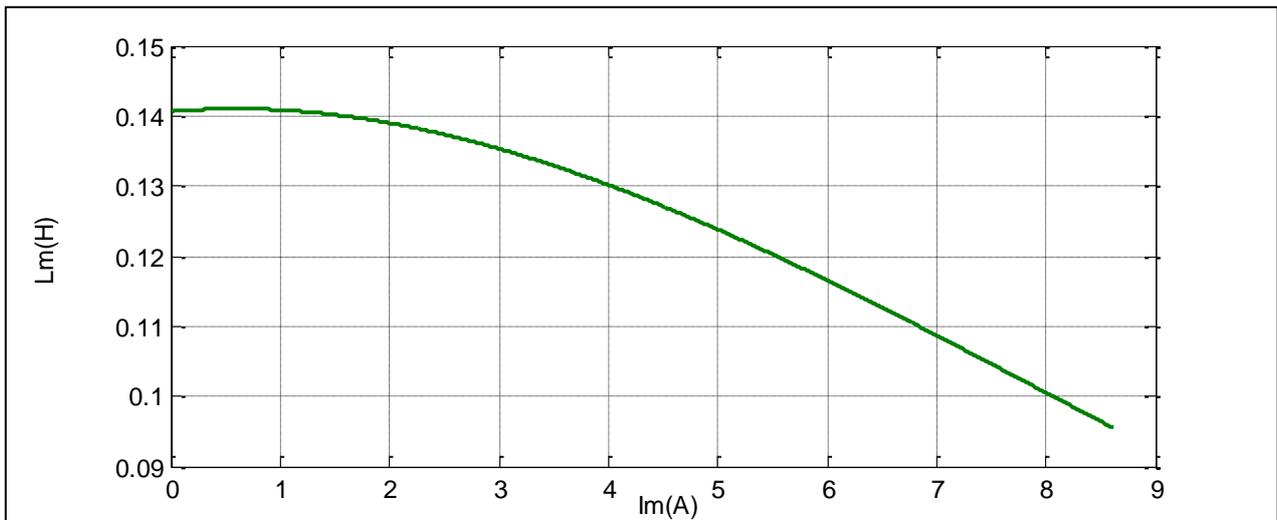


Figure II.6: Variation de l'inductance de magnétisation.

La simulation de la GASDE dans ce cas est faite à vide, avec $C_a = C_{a1} = C_{a2} = 45\mu\text{F}$.

La figure II.7 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 de 249.4V pour les tensions statoriques, 3.51A pour les courants statoriques, en régime totalement établi à $t=2.05\text{s}$, et à cet instant où le courant de magnétisation se stabilise et atteint son régime saturé à $I_m = 8.61\text{A}$ 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 statorique (même fréquence 50Hz) avec un déphasage de 90° 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.

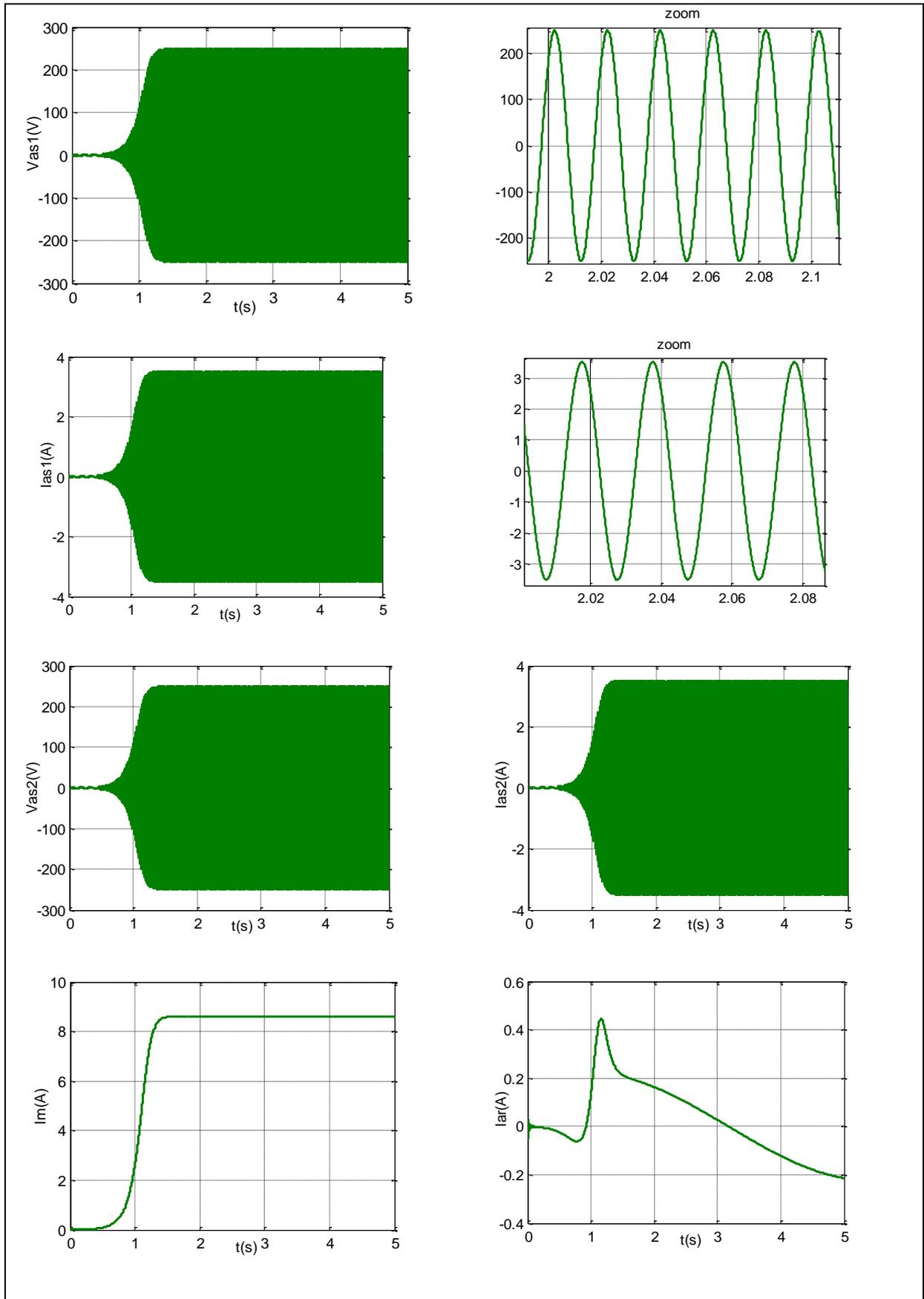


Figure II.7: Evolution des caractéristiques de la GASDE (à vide)

• 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 ($47\mu\text{F}$, $45\mu\text{F}$, $37\mu\text{F}$), les figures II.8, II.9, II.10 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	37	196.05	2.27	5.57
t=1.5	45	249.4	3.52	8.61
t=1.18	47	255.2	3.76	9.2

Tableau II.1: Influence de la capacité d’excitation.

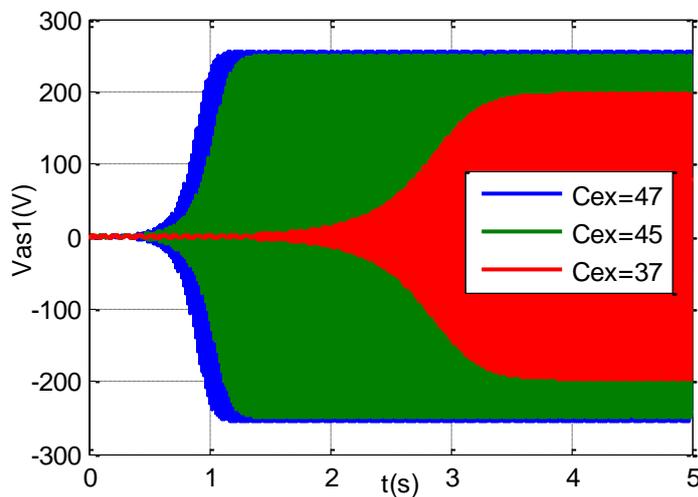


Figure II.8: Influence de la capacité d’excitation sur la tension statorique de l’étoile 1.

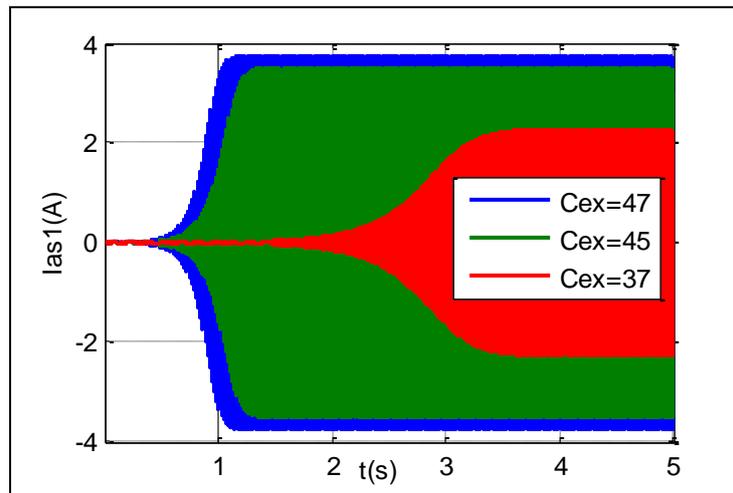


Figure II.9: Influence de la capacité d'excitation sur le courant statorique de l'étoile 1.

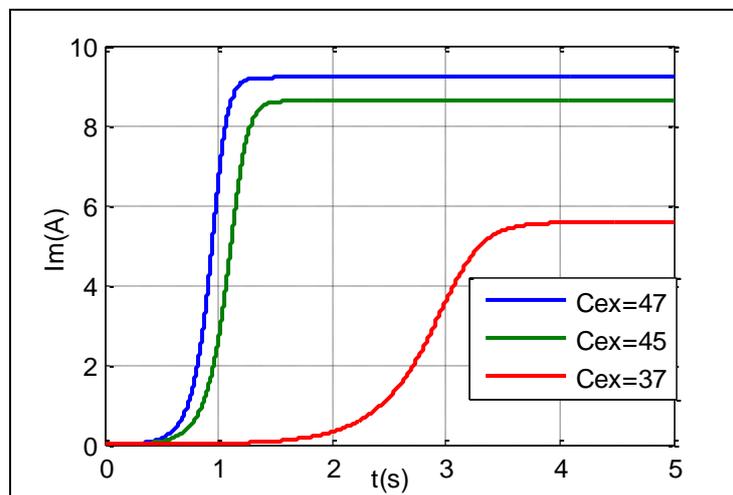


Figure II.10: Influence de la capacité d'excitation sur le courant de magnétisation.

- **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 avec $C_a=45\mu\text{F}$.

Les allures II.11, II.12, II.13, II.14 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 aussi 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.

Wr (rad /S)	t(s)	V_{as1} (V)	i_{as1} (A)	i_m (A)	f(Hz)
315	1.64	250	3.5	8.686	50.16
320	1.36	259	3.7	9.11	50,95
350	0.75	300	4.5	11.54	55,73

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

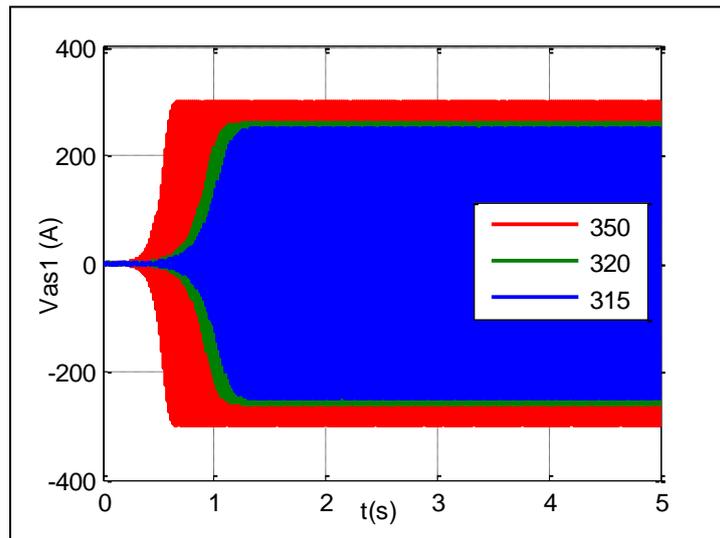


Figure II.11: Influence de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de l'étoile 1.

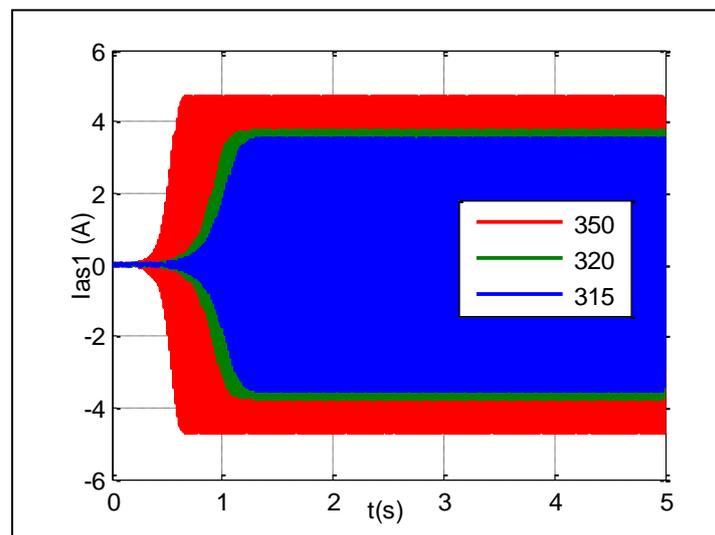


Figure II.12: Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant statorique de l'étoile 1.

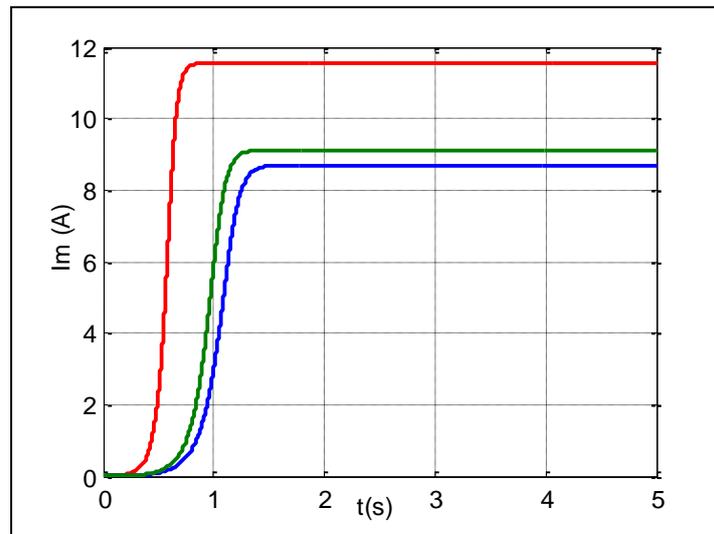


Figure II.13: Influence de la vitesse d'entraînement sur le courant de magnétisation.

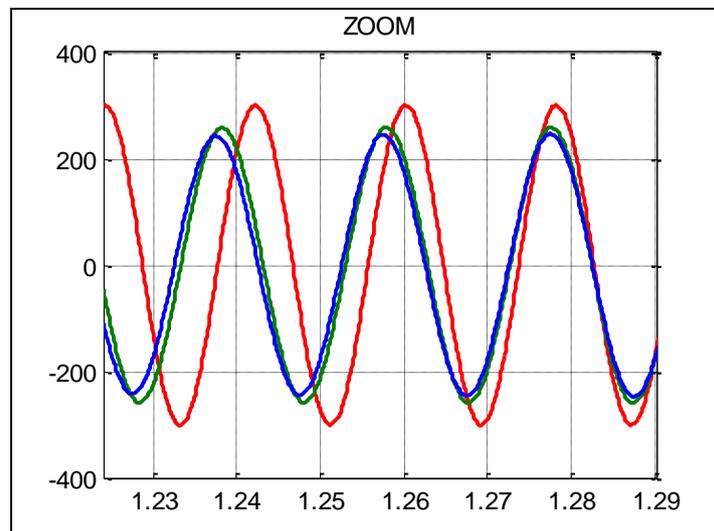


Figure II.14: ZOOM de l'influence de la vitesse d'entraînement sur la tension statorique de l'étoile 1.

II.7.2 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 ($C_a = C_{a1} = C_{a2} = 45\mu\text{F}$), à l'instant $t = 2\text{s}$, on insère les charges donc pendant l'intervalle du temps de 0 à 2s le fonctionnement est à vide.

La figure II.15 illustre l'évolution des caractéristiques de la GASDE en charge R.

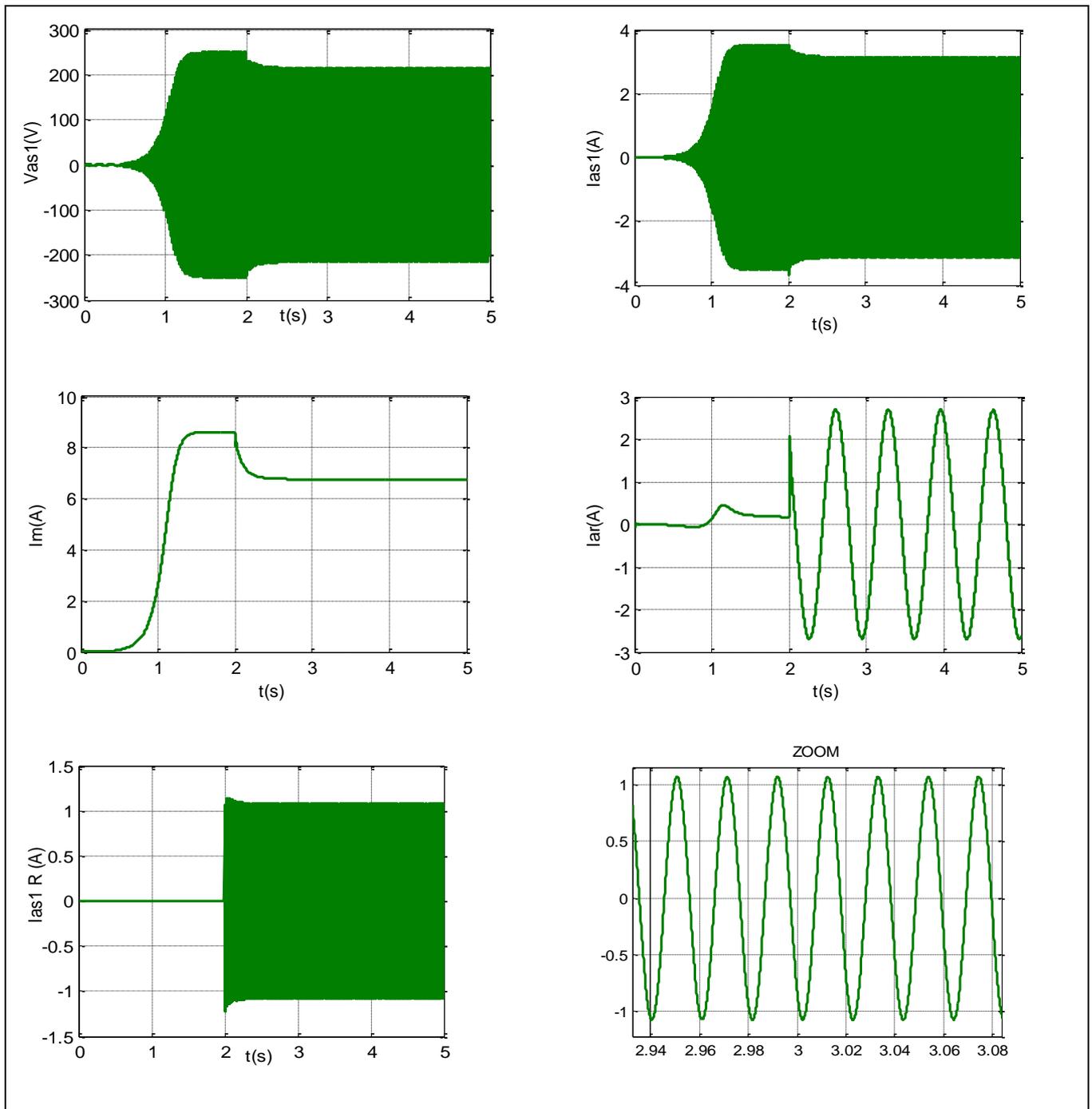


Figure II.15: Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge R.

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 215.2V, 3.14A, 6.77A.

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=2s, le courant rotorique augmente.

• **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 (170Ω, 200Ω, 270Ω) et en fixant toujours $C_a=45\mu F$.

Les résultats obtenus après la simulation sont illustrés par les figures II.16, II.17, II.18, d'après ces dernières on remarque que l'augmentations de la charge provoque une augmentation au niveau des caractéristiques de la génératrice, c'est-à-dire les performanes de la GASDE sont vivement influencées par dimension des charges résistives.

Le tableau II.3 montre les résultats obtenus à l'instant t=5s pour chaque cas.

R(Ω)	V _{as1} (V)	i _{as1} (A)	i _m (A)
170	204.3	2.934	6.255
200	215.21	3.143	6.77
270	227.46	3.253	7.4

Tableau II.3: Influence de la charge résistive

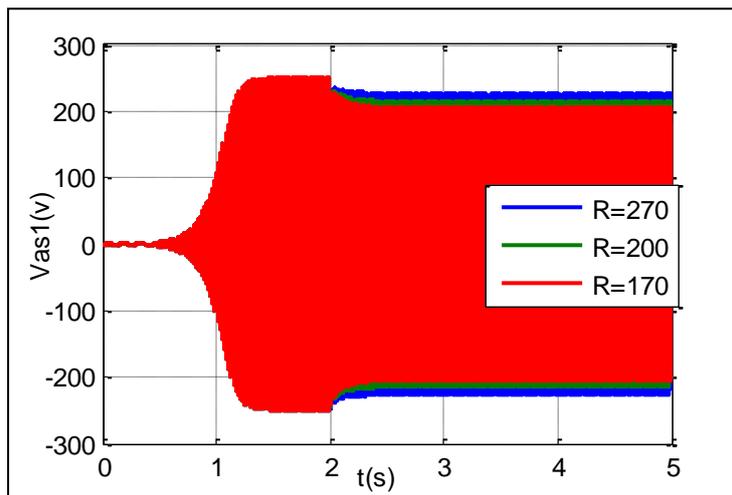


Figure II.16: Influence le charge résistive sur la tension statorique dans l'étoile 1.

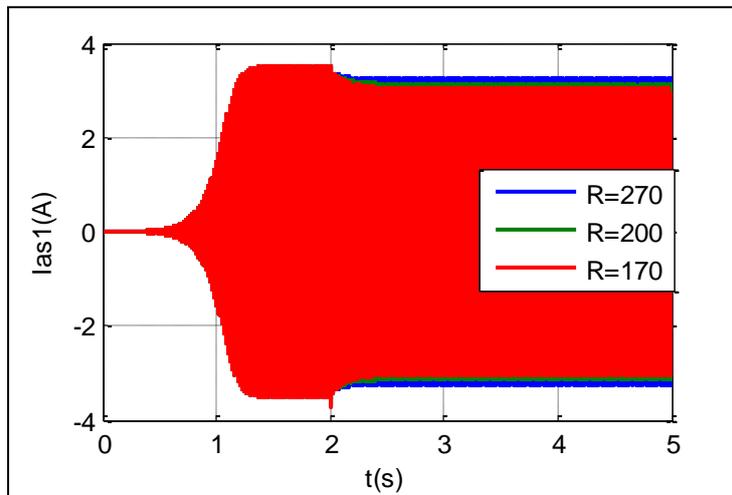


Figure II .17: Influence de la charge résistive sur le courant statorique dans l'étoile 1.

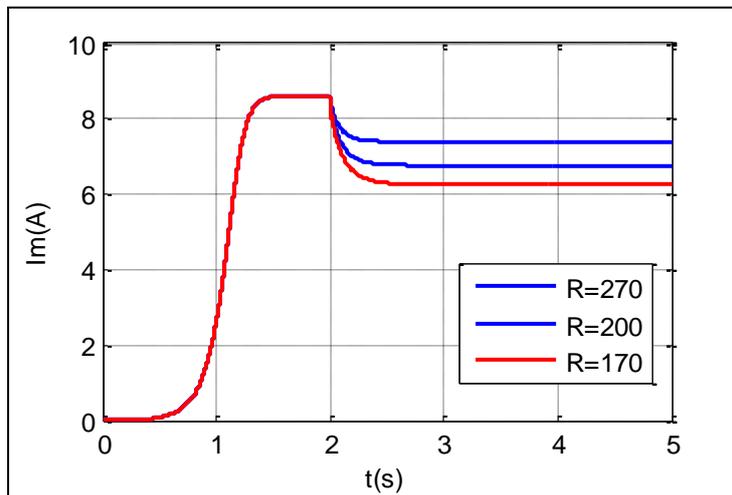


Figure II.18: Influence la charge résistive sur le courant de magnétisation.

II.7.3 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 ($C_a = C_{a1} = C_{a2} = 45\mu F$), on insère les charges à $t=2s$. 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 249.4V, 3.5182A, 8.62A , qui sont de 42.4V,0.573A,2.297A de différence par rapport au cas précédent de la charge purement résistive, cela montre l'effet inductif qui a provoquer 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 partager entre la machine et les inductances, et même une diminution au niveau du courant de la charge ainsi 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.

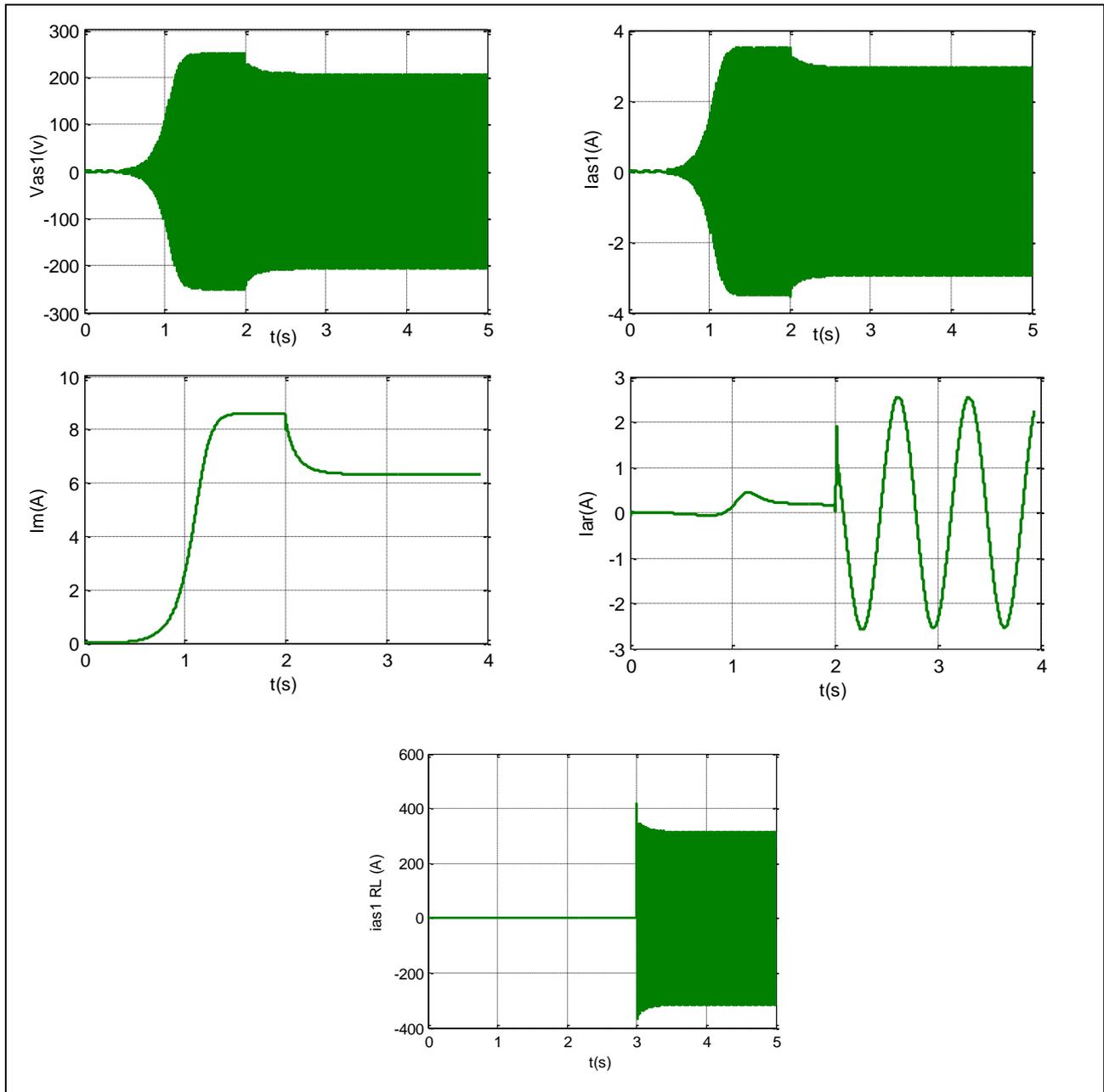


Figure II.19: Evolution des caractéristiques de la GASDE en charge RL.

- 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 (0.03H, 0.05H, 0.10H) tout en fixant $R = 200\Omega$ et $C_a = 45\mu F$.

Les résultats obtenus après la simulation sont présentés par les figures II.20, II.21, II.22, 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 l'instant $t = 5s$ pour chaque cas.

$L(H)$	$V_{as1}(V)$	$i_{as1}(A)$	$i_m(A)$
0.03	210.169	3.02	6.5
0.05	206.634	2.95	6.327
0.10	197.4	2.75	5.88

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

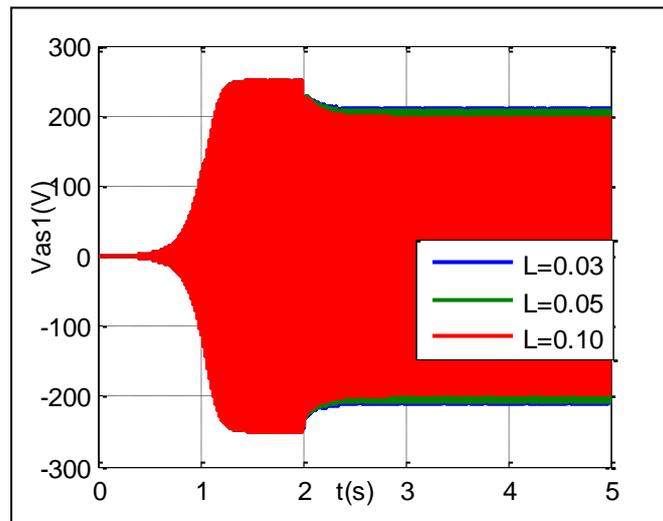


Figure II.20: Influence de la charge RL sur la tension statorique de l'étoile 1.

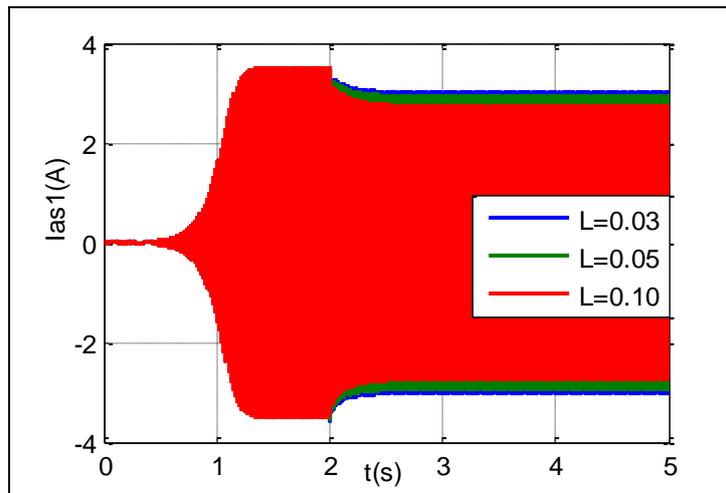


Figure II.21: Influence de la charge RL sur le courant statorique de l'étoile 1.

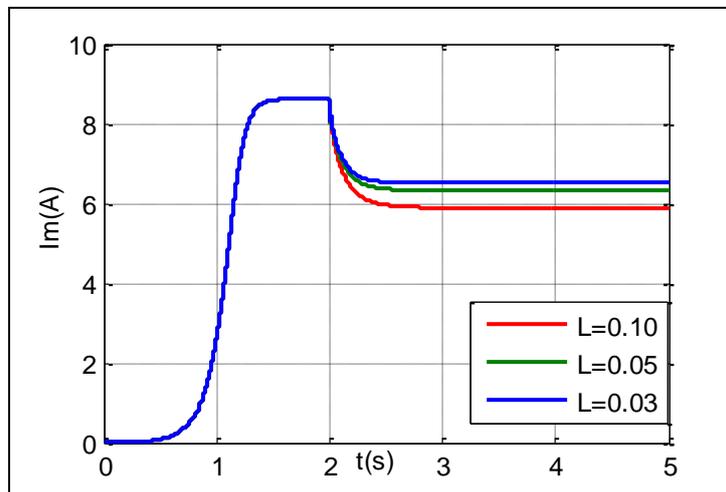


Figure II.22: Influence de la charge RL sur le courant de magnétisation.

II.8 Conclusion

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

Nous arrivons aux conclusions suivantes :

- 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).

Nous passerons dans le prochain chapitre à la commande par la logique floue de la génératrice asynchrone double étoile.

CHAPITRE III :

La commande par la logique floue de la génératrice asynchrone double étoile.

III.1 Introduction

La logique floue suscite actuellement un intérêt général de la part des chercheurs, des ingénieurs et des industriels, et plus généralement de la part de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturel, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine et de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par les humains.

Dans le domaine du génie électrique, la commande à logique floue a fait l'objet de plusieurs travaux : dans la commande des convertisseurs statiques et dans la commande des machines électriques [Bou10] Toutes ces applications ont démontré qu'un régulateur à logique floue est plus robuste qu'un régulateur conventionnel [kou11].

Les performances que la commande floue peut apporter par comparaison avec les commandes classiques, sont essentiellement dues à la méthode de conception de ces régulateurs. En effet, ces derniers ne nécessitent pas la connaissance des modèles mathématiques du système. Par contre ils ont besoin d'un ensemble de règles basées essentiellement sur les connaissances d'un opérateur qualifié manipulant le système.

Afin de pouvoir appliquer la technique de la logique floue à la commande d'une GASDE, dans ce chapitre nous allons nous intéresser de plus près à la commande vectorielle en remplaçant le régulateur PI par un régulateur floue, en exposant en premier lieu les principes et fondements de la logique floue, et introduire les bases et les constituants ainsi que l'architecture algorithmique et structurelle d'une commande floue, ou nous mettons le point sur [Zou07]:

- La fuzzification;
- Les inférences floues;
- La défuzzification.

En deuxième lieu, on va appliquer cette commande à la régulation de tension de la GASDE.

III.2 Généralités sur La logique floue

III.2.1 Historique

Voici un bref historique de la logique floue :

- En 1965, le concept flou apparut grâce au professeur Loft Zadeh (Université de Berkley en Californie). Il déclara qu'un contrôleur électromécanique doté d'un raisonnement humain serait plus performant qu'un contrôleur classique», et il introduit la théorie des «sous-ensembles flous».

- En 1973, le professeur Zadeh publie un article, il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques (dont la valeur est un mot et non un nombre).
- En 1974, Mamdani (Université de Londres) réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur.
- En 1980, Smidth et Co. A/S (au Danemark), mettent en application la théorie de la logique floue dans le contrôle de fours à ciment. C'est la première mise œuvre en pratique de cette nouvelle théorie.
- Dans les années 80, plusieurs applications commencent à immerger notamment au Japon.
- En 1987, 'explosion du flou' au Japon (avec le contrôle du métro de Sendai ' et qui atteint son apogée en 1990.
- Aujourd'hui, une vaste gamme de nouveaux produits ont une étiquette «produit flou» (Fuzzy).

III.2.2 Définition

La logique floue est une logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs «vrai» ou «faux», les valeurs intermédiaires «vrai» ou «faux» avec un certain degré, ce qui caractérise le raisonnement humain qui est basé sur des données imprécises ou incomplète . Venant à l'origine du mot «duvet» (en anglais «fuzzy», c'est-à-dire le duvet qui couvre le corps des poussins), le terme «fuzzy» signifie (indistinct, brouillé, mal défini ou mal focalisé), qui se traduit par «flou» en français. Dans le monde universitaire et technologique, le mot «flou» est un terme technique représentant l'ambiguïté ou le caractère vague des intuitions humaines plutôt que la probabilité. [Bir03]

III.2.3 Principe de la logique floue

Dans la perspective des sciences de l'ingénieur nous pouvons, admettre que dans les situations où les méthodes traditionnelles de modélisation à partir d'observation physique s'avèrent non satisfaisante. Les sciences subjectives, particulièrement la logique floue, peuvent rendre beaucoup de services, lorsque les connaissances sur la façon de résoudre un problème, de piloter un grand système, d'effectuer un réglage, etc. sont disponibles. Cela suppose que l'on sache définir des méthodes rigoureuses de représentations des connaissances. En pratique la résolution d'un problème concret peut avoir recours à l'utilisation conjointe des méthodes objectives traditionnelles et celles subjectives. [Bou09]

III.3 Structure générale d'un système de commande floue

La commande ou la régulation des systèmes est le domaine industriel de la logique floue le plus exploité. On distingue trois structures majeures de régulateurs à logique floue (RLF):

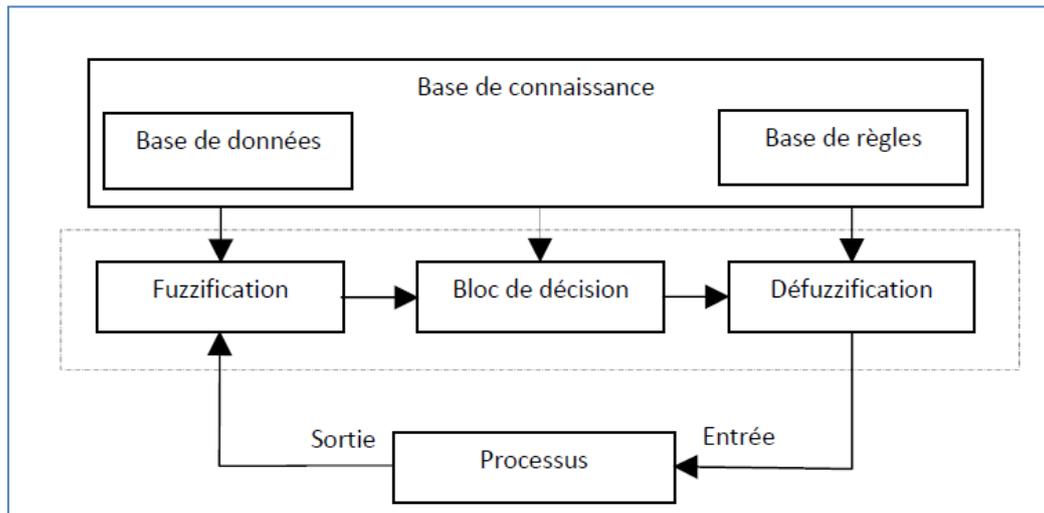
- La structure pure ;
- La structure de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) ;
- La structure de Mamdani ou le modèle « fuzzification - defuzzification ».

Dans la structure pure les variables d'entrée et de sortie du RLF sont des variables floues ou linguistiques. Ceci constitue un handicap étant donné que les entrées et les sorties des régulateurs des systèmes réels sont des variables réelles ou numériques.

La structure TSK résout ce problème par une simple transformation des variables linguistiques en variables réelles. L'inconvénient de cette structure est que le conséquent de chaque règle soit une formule mathématique.

La structure de Mamdani s'est proposé une interface de défuzzification (défuzzificateur) à la sortie de la structure pure. Le fuzzificateur transforme les variables réelles d'entrée en variables linguistiques floues, tandis que le défuzzificateur effectue l'opération inverse. La structure de Mamdani est devenue le modèle standard du RLF le plus utilisé dans la régulation des systèmes. Le schéma synoptique général d'un contrôleur flou est représenté dans la figure III.23 [bag99].

(a)



(b)

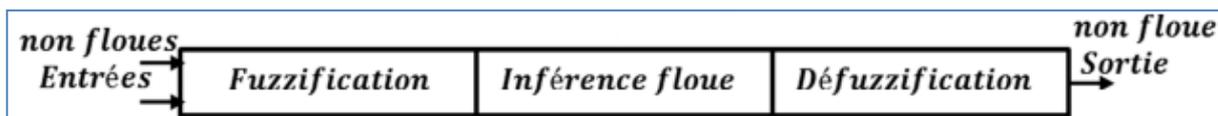


Figure III.23: a): Schéma synoptique d'un contrôleur flou, b): Configuration d'un contrôleur flou.

Comme le système à commander ne reçoit que des valeurs déterministes (non floues), un RLF devrait convertir les valeurs déterministes à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et reconvertir le signal de commande de valeurs floues en valeurs déterministes pour appliquer au procédé. Les rôles de chaque bloc peuvent être résumés comme suit: [tou10]

III.3.1 Interface de fuzzification

Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes :

- Etablit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées ;
- Effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1, 1]$ afin de faciliter le calcul.

III.3.2 Base de connaissance

Le bloc base de connaissance comporte une connaissance dans le domaine d'application et le résultat de commande prévu. Il consiste en « base de données » et en « base de règles linguistiques (floues) de commande » :

- La base de données effectue des définitions qui sont nécessaires pour établir les règles de commande et manipuler les données floues dans un RLF ;
- La base de règles représente la stratégie de commande et le but désiré par le biais des règles de commande linguistiques.

III.3.3 Inférence floue

Le bloc inférence est le cœur d'un RLF, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles d'inférence dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement:

- La méthode d'inférence max-min ;
- La méthode d'inférence max-produit ;
- La méthode d'inférence somme-produit.

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs flous.

III.3.4 Interface de défuzzification

La défuzzification consiste à prendre une décision, c'est-à-dire, obtenir une commande réelle à partir de la commande obtenue sous forme d'ensemble flou. Dans le cas d'un raisonnement basé sur l'inférence de règles floues, plusieurs méthodes existent, les plus couramment utilisées sont: [Ham13]

- Méthode du centre de gravité ;
- Méthode de moyenne de maximum ;
- Méthode de moyenne pondérée.

III.3.5 Différentes approches pour la détermination des règles

Il existe deux approches principales pour la détermination des règles d'un contrôleur flou la première est une méthode purement heuristique; les règles sont déterminées de telle sorte que l'écart entre la consigne et la sortie puisse être corrigé. Cette détermination repose sur la connaissance qualitative du comportement du processus. La seconde approche est une méthode pouvant déterminer d'une manière systématique la structure linguistique et/ou les paramètres satisfaisants les objectifs et les contraintes de contrôle. [kou11]

Une autre méthode a été introduite pour la détermination des règles et cela en se référant à la trajectoire du système en boucle fermée. La recherche intuitive du comportement du système en boucle fermée, pour la détermination des règles dans le domaine temporel, utilise fréquemment l'erreur e (observation) et la variation de l'erreur Δ_e . (Dynamique du processus) ainsi que la variation de la commande Δ_u (entrée du processus à réguler).

La procédure à suivre, pour la détermination des règles du contrôleur flou est expliquée en considérant les points indiqués sur la figure (III.25). Pour chacun de ces points, on explicite l'expertise sous la forme suivante :

Règle 1: Si $e = PG$ et $\Delta_e = EZ$ alors $\Delta_u = PP$. Départ.

Règle 2: Si $e = PG$ et $\Delta_e = NP$ alors $\Delta_u = PP$.

Augmentation de la commande pour garder l'équilibre.

Règle 3: Si $e = PP$ et $\Delta_e = NP$ alors $\Delta_u = EZ$. Convergence vers l'équilibre.

Règle 4: Si $e = EZ$ et $\Delta_e = NP$ alors $\Delta_u = NP$. Freinage du processus.

Règle 5: Si $e = NP$ et $\Delta_e = EZ$ alors $\Delta_u = NP$. Freinage et inversion de la variation de la commande.

Règle 6: Si $e = NP$ et $\Delta_e = PP$ alors $\Delta_u = EZ$. Convergence vers l'équilibre.

Règle 7: Si $e = EZ$ et $\Delta_e = EZ$ alors $\Delta_u = EZ$. Equilibre.

En considérant point par point le comportement du processus et l'action de variation de commande à appliquer, on en déduit la table du contrôle flou suivante :

e Δ _e	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	EZ
NP	NG	NP	NP	EZ	PP
EZ	NP	NP	EZ	PP	PP
PP	NP	EZ	PP	PP	PG
PG	EZ	PP	PG	PG	PG

Tableau.III.4: Tableau de calcul de la variation de la commande Δu

III.3.6 Développement pratique du contrôleur flou

La majorité des contrôleurs flous (fuzzy logic controller, FLC) utilisent des algorithmes se basant sur le schéma simple de Mamdani pour un système mono-variable, figure (III.24).

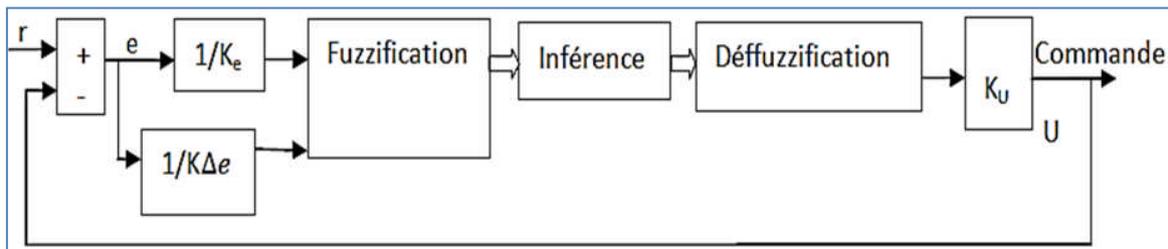


Figure III.24: Schéma bloc d'une boucle de régulation à contrôleur flou.

D'après le schéma ci-dessus, le système de régulation floue se compose essentiellement du contrôleur flou et du processus à contrôler.

Le contrôleur flou comprend :

- Un bloc de calcul de la variation de l'erreur au cours du temps (Δ_e) ;
- Les facteurs d'échelle associés à l'erreur, à sa variation et à celle de la commande ;
- Un bloc de fuzzification de l'erreur et de sa variation ;
- Les règles de contrôle flou ;
- Un bloc de défuzzification de la variation de la commande ;
- Un bloc intégrateur.

La figure (III.25) représente les fonctions d'appartenance utilisées par le contrôleur.

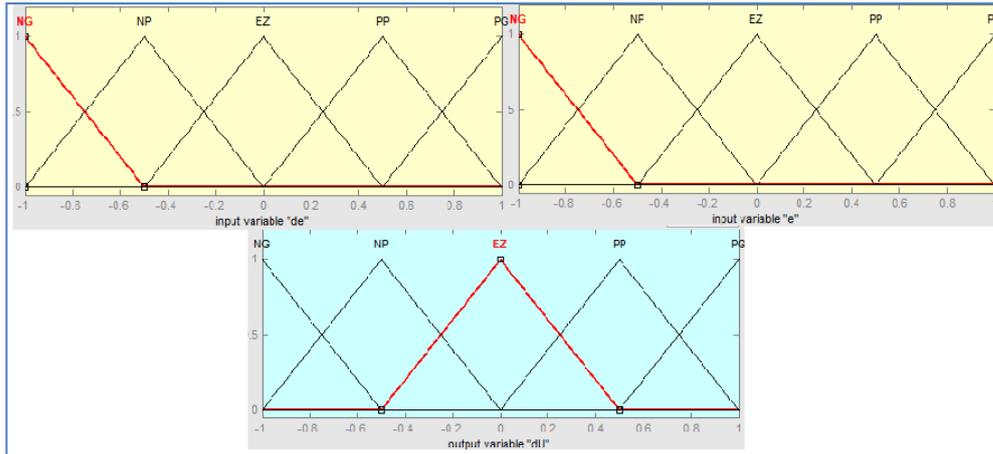


Figure III.25: Fonctions d'appartenance utilisée par le contrôleur.

III.4 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]

$$\varphi_{dr} = \varphi_r^*$$

$$\varphi_{qr} = 0$$

$$\dot{\varphi}_r^* = 0$$

On obtient :

$$R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_r^*}{dt} = 0 \rightarrow i_{dr} = 0 \tag{III.1}$$

$$R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_r^* = 0 \rightarrow i_{qr} = -\frac{(\omega_s - \omega_r)}{R_r} \varphi_r^* \tag{III.2}$$

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

$$i_{dr} = \frac{1}{L_m + L_r} (\varphi_r^* - L_m (i_{ds1} + i_{ds2})) \tag{III.3}$$

$$i_{qr} = -\frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \tag{III.4}$$

En substituant (III.2) dans (III.4) on aura :

$$\omega^* = \frac{R_r L_m}{(L_m + L_r) \varphi_r^*} i_{qs}^* \quad (\text{III. 5})$$

D'où :

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

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

$$C_{em}^* = p \frac{L_m}{L_m + L_r} (i_{qs1} + i_{qs2}) \varphi_r^* \quad (\text{III. 6})$$

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

$$\begin{aligned} V_{ds1} &= R_{s1} i_{ds1} + L_{s1} \frac{di_{ds1}}{dt} - \omega_s (L_{s1} i_{qs1} + T_r \varphi_r^* (\omega_s - \omega_r)) \\ V_{qs1} &= R_{s1} i_{qs1} + L_{s1} \frac{di_{qs1}}{dt} + \omega_s (L_{s1} i_{ds1} + \varphi_r^*) \\ V_{ds2} &= R_{s2} i_{ds2} + L_{s2} \frac{di_{ds2}}{dt} - \omega_s (L_{s2} i_{qs2} + T_r \varphi_r^* (\omega_s - \omega_r)) \\ V_{qs2} &= R_{s2} i_{qs2} + L_{s2} \frac{di_{qs2}}{dt} + \omega_s (L_{s2} i_{ds2} + \varphi_r^*) \end{aligned} \quad (\text{III. 7})$$

Où : $T_r = R_r / L_r$

Après transformations et simplifications, on aura le système d'équations (III.8) qui décrit le modèle de la GASDE. [Ben13]

$$\begin{aligned} \frac{di_{ds1}}{dt} &= \frac{1}{L_{s1}} \left[V_{ds1} - R_{s1} i_{ds1} + \omega_s (L_{s1} i_{qs1} + T_r \varphi_r^* (\omega_s - \omega_r)) \right] \\ \frac{di_{qs1}}{dt} &= \frac{1}{L_{s1}} \left(V_{qs1} - R_{s1} i_{qs1} - \omega_s (L_{s1} i_{ds1} + \varphi_r^*) \right) \end{aligned}$$

$$\frac{di_{ds2}}{dt} = \frac{1}{L_{s2}} \left[V_{ds2} - R_{s2}i_{ds2} + \omega_s (L_{s2}i_{qs2} + T_r\varphi_r^*(\omega_s - \omega_r)) \right] \quad (\text{III. 8})$$

$$\frac{di_{qs2}}{dt} = \frac{1}{L_{s2}} (V_{qs2} - R_{s2}i_{qs2} - \omega_s(L_{s2}i_{ds2} + \varphi_r^*))$$

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -\frac{R_r\varphi_r}{L_r + L_m} + \frac{R_rL_m}{L_r + L_m} (i_{ds1} + i_{ds2})$$

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

$$V_{dc} \cdot i_{dc}^* = P^* = P_{ele} = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{III. 9})$$

D'où :

$$C_{em} = \frac{P^*}{\Omega} \quad (\text{III. 10})$$

D'après l'équation (III.16), le couple est contrôlé par la quadrature du courant i_{qs1} et i_{qs2} des deux étoiles.

$$i_{qs1} + i_{qs2} = \frac{(L_m + L_r)C_{em}^*}{pL_m\varphi_r^*} \quad (\text{III. 11})$$

Le flux φ_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}

$$\varphi_r^* = \frac{R_rL_m}{(L_r + L_m)S + R_r} (i_{ds1} + i_{ds2}) \quad (\text{III. 12})$$

La pulsation statorique est calculée comme suit :

$$\omega_s = \omega^* + \omega_r \quad (\text{III. 13})$$

$$\omega_r = p\Omega$$

III.5 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue

➤ Avantages

- La théorie est simple s'applique à des systèmes complexes ;
- Pas de modèles mathématique du procédé à asservir ;
- Robustesse de la commande floue vis-à-vis des incertitudes ;
- Possibilités de commande auto adaptative aux variations du procédé.

➤ Inconvénients :

- Technique de réglage essentiellement empirique ;
- Performances dépendant de l'expertise ;
- Il n'existe pas de théorie générale qui caractérise rigoureusement la stabilité, la robustesse, etc.[Khe11]

III.6 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 par la logique floue. 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.

III.6.1 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 $t=2s$, la GASDE est entraînée à sa vitesse de synchronisme ($\omega_r=315\text{rd/s}$).

Dans cet essai nous allons vérifier l'efficacité de la commande floue 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 flous.

D'après les figures III.26, III.27 la tension V_{dc} suit parfaitement sa référence et le flux rotorique est bien orienté, la figure III.28 montre que le courant statorique de l'étoile 1 suit le courant de référence.

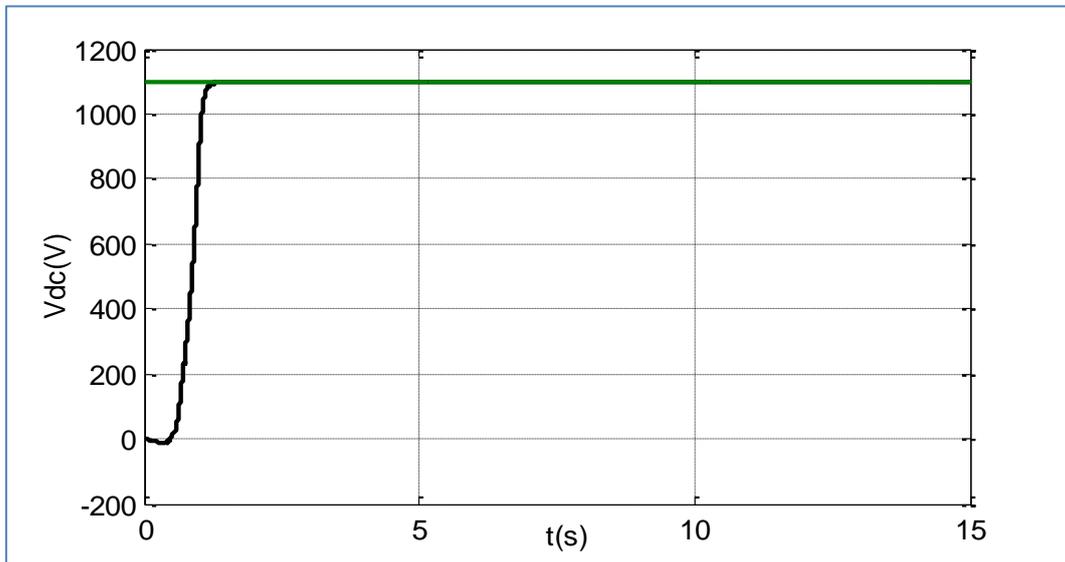


Figure III.26: Tension du bus continu V_{dc} .

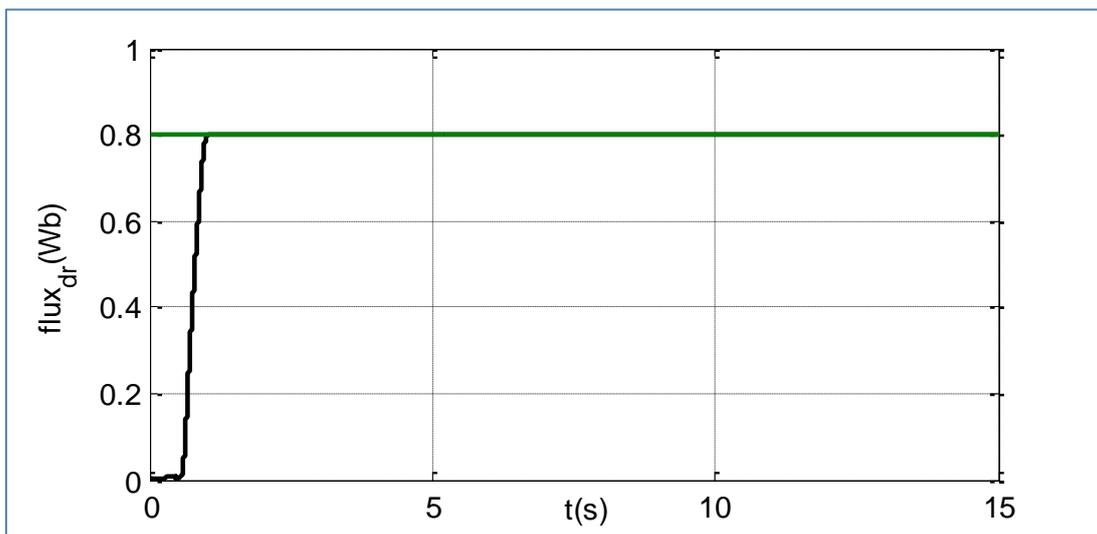


Figure III.27: Flux rotorique φ_{rd} .

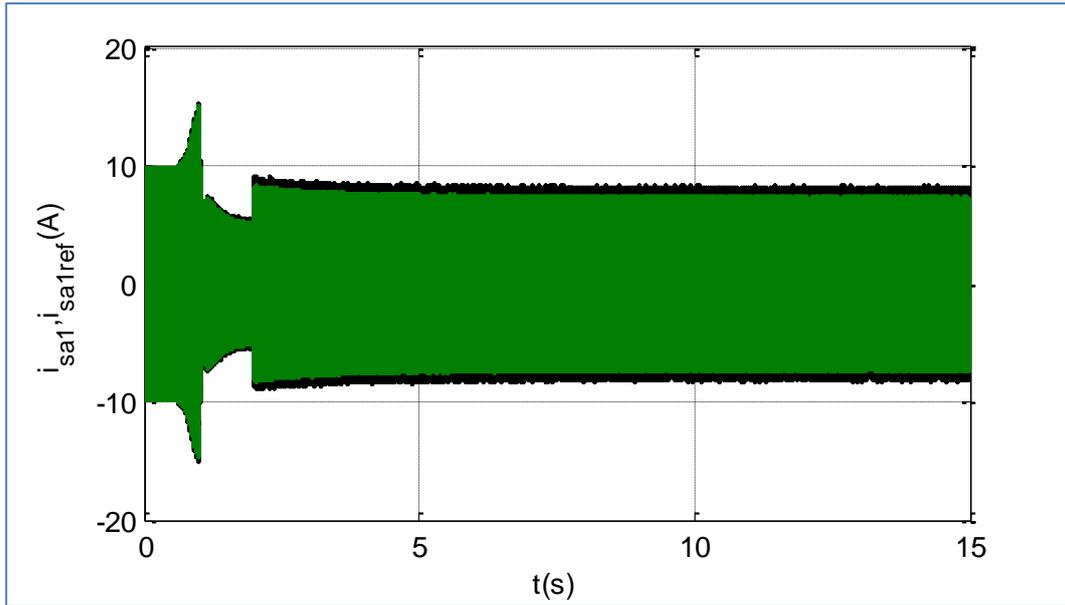


Figure III.28: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence.

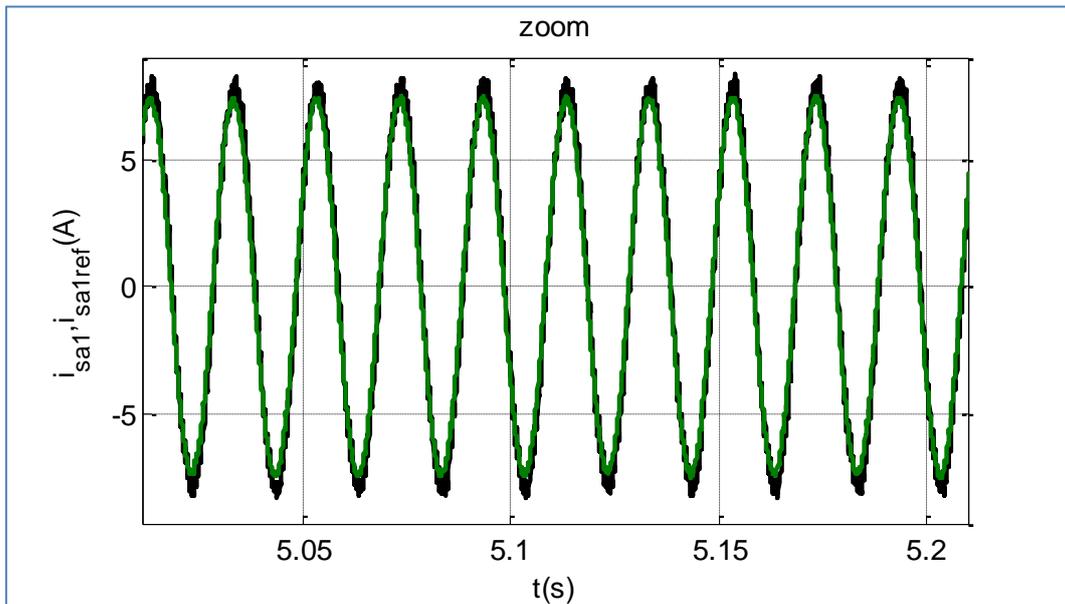


Figure III.29: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence (ZOOM).

III.6.2 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 $t = 2s$, la variation de vitesse d'entraînement est montrée dans la figure III.30.

Dans un premier temps, la GASDE est entraînée à une vitesse de 315 rd/s, à l'instant $t = 8s$ la vitesse est augmentée jusqu'à 330 rd/s puis à l'instant $t = 12s$ la vitesse est diminuée à 315 rd/s.

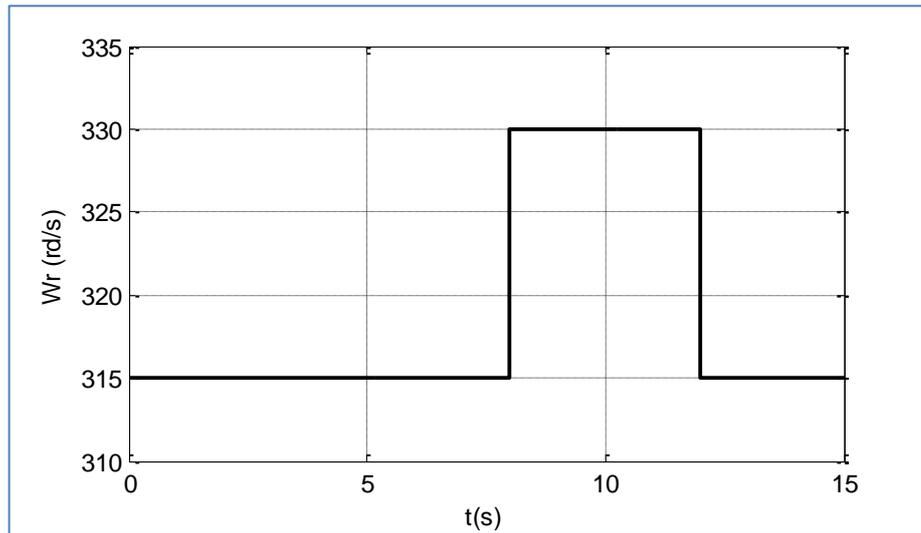


Figure III.30: Variation de la vitesse d'entraînement.

D'après les figures (III.31, III.32) la tension du bus continu ainsi que le flux rotorique suivent leur référence et ils sont insensibles aux variations de la vitesse.

La figure III.33 montre que le courant statorique de l'étoile 1 suit le courant de référence et lors de l'augmentation de la vitesse à $t=8s$ le courant augmente et lors de la diminution de la vitesse à $t=12s$ le courant diminue.

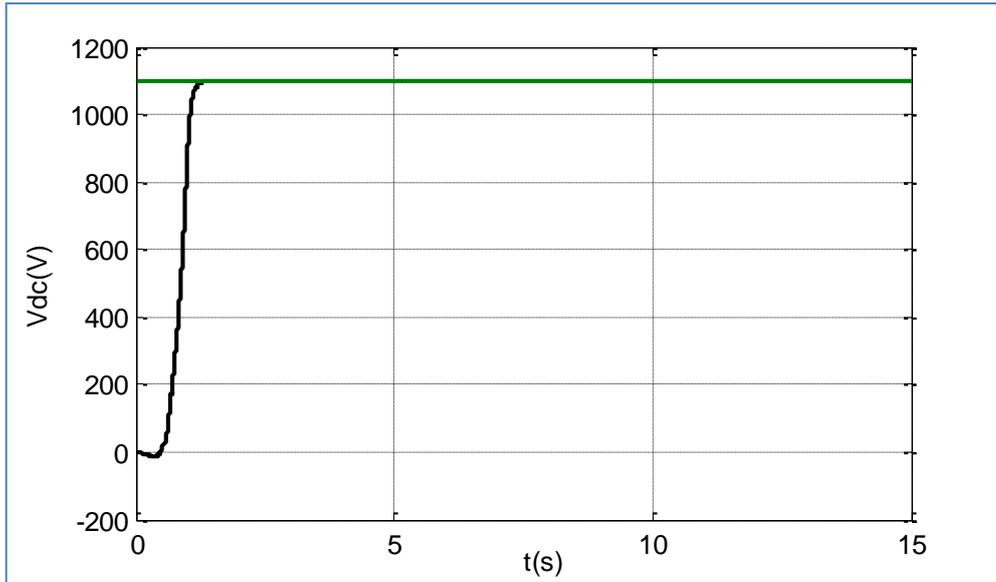


Figure III.31: Tension du bus continu V_{dc} en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

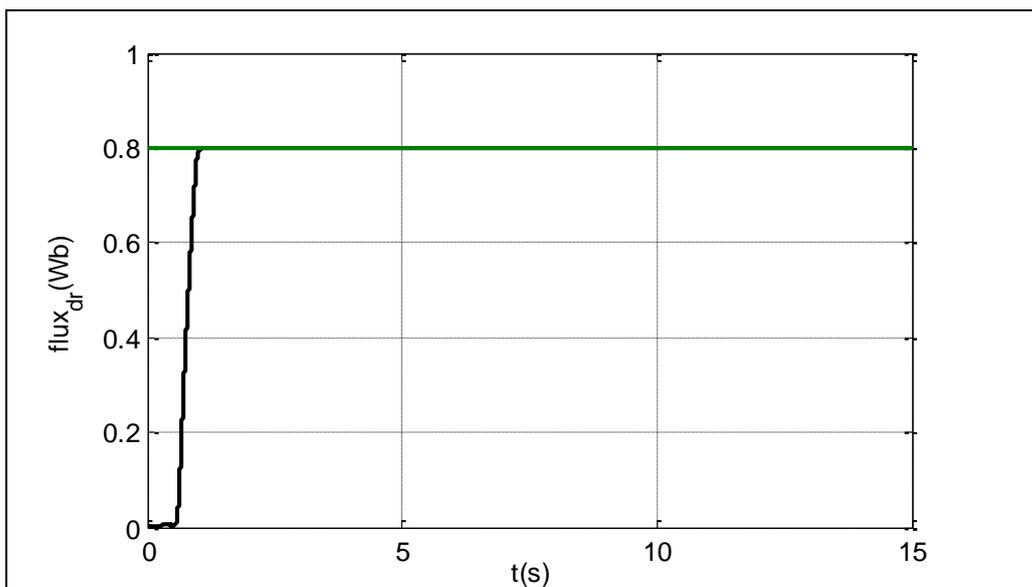


Figure III.32: Flux rotorique φ_{dr} en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

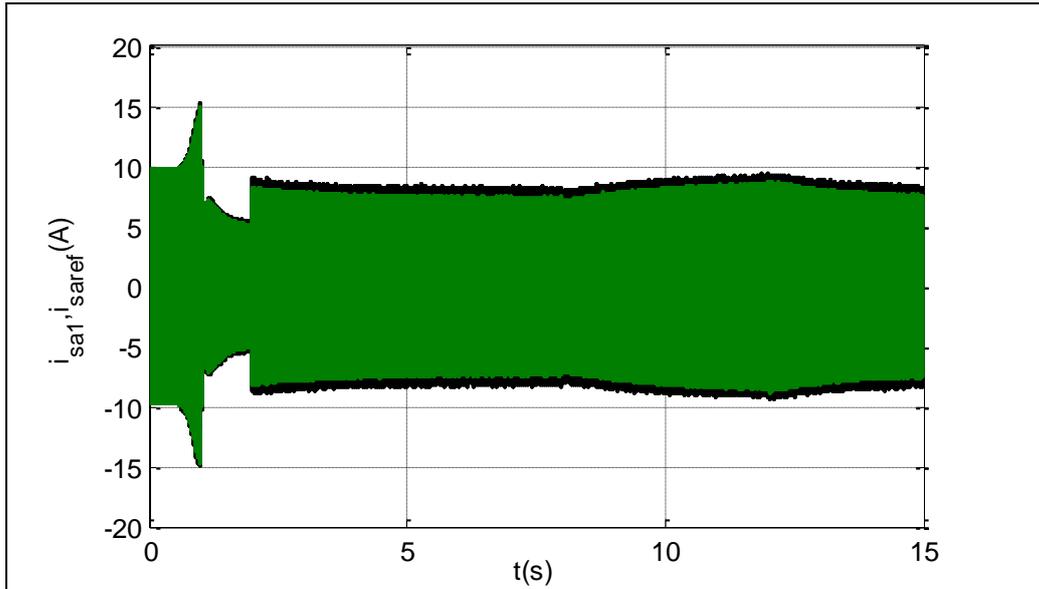


Figure III.33: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence en cas de variation de la vitesse d'entraînement.

III.6.3 Essai avec variation de la charge

Dans ce dernier essai, on s'intéresse aux performances de la commande floue en cas de variations de charge. La GASDE est entraînée à la vitesse de synchronisme, la tension $V_{dc}=1100$ V. Initialement on applique brusquement une charge $R=200 \Omega$, puis à l'instant $t=8$ s la résistance est augmentée à $R=450 \Omega$ et à l'instant $t=12$ s la résistance est diminuée de nouveau à $R=200\Omega$.

Le flux rotorique est totalement insensible aux variations de la charge. (figure III.34)

La tension redressée est influencée par la variation de la charge d'après la figure III.35, 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. La figure III.36 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.

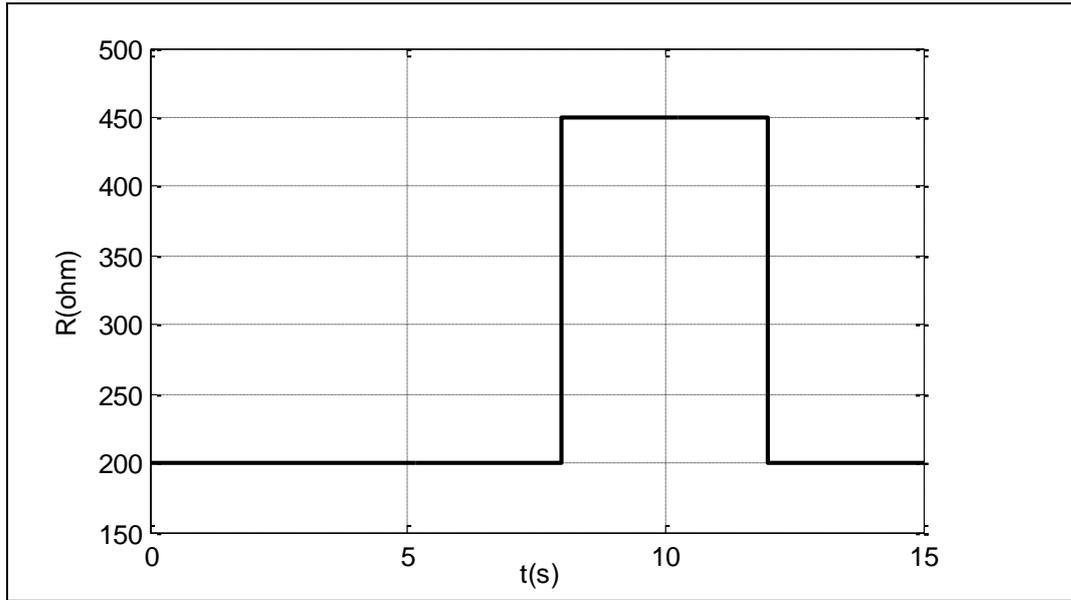


Figure III.34 : Variation de la charge.

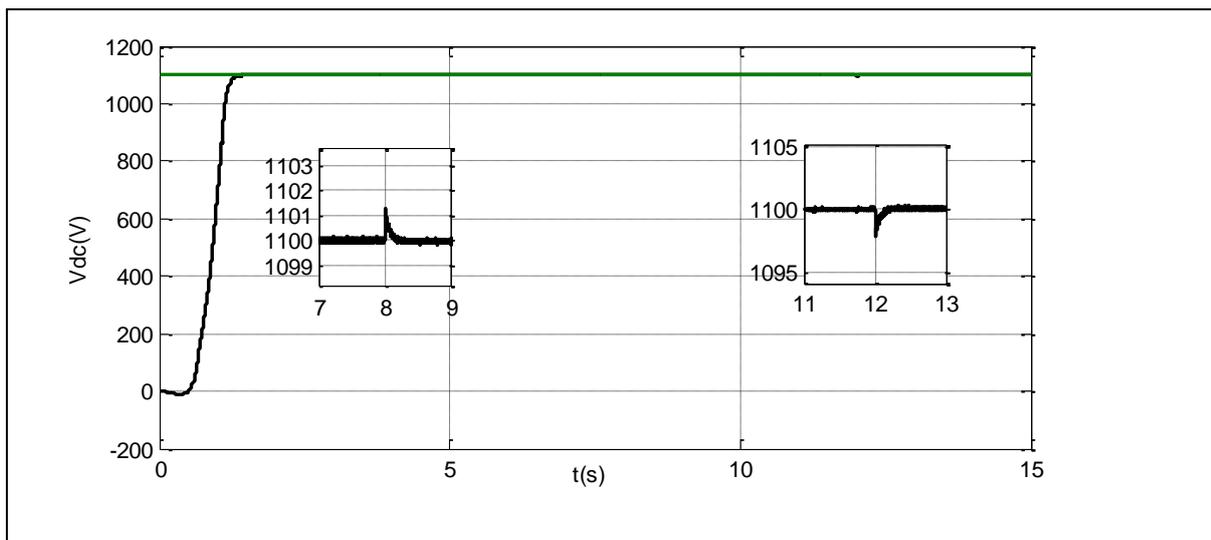


Figure III.35: Tension du bus continu V_{dc} en cas de variation de la charge.

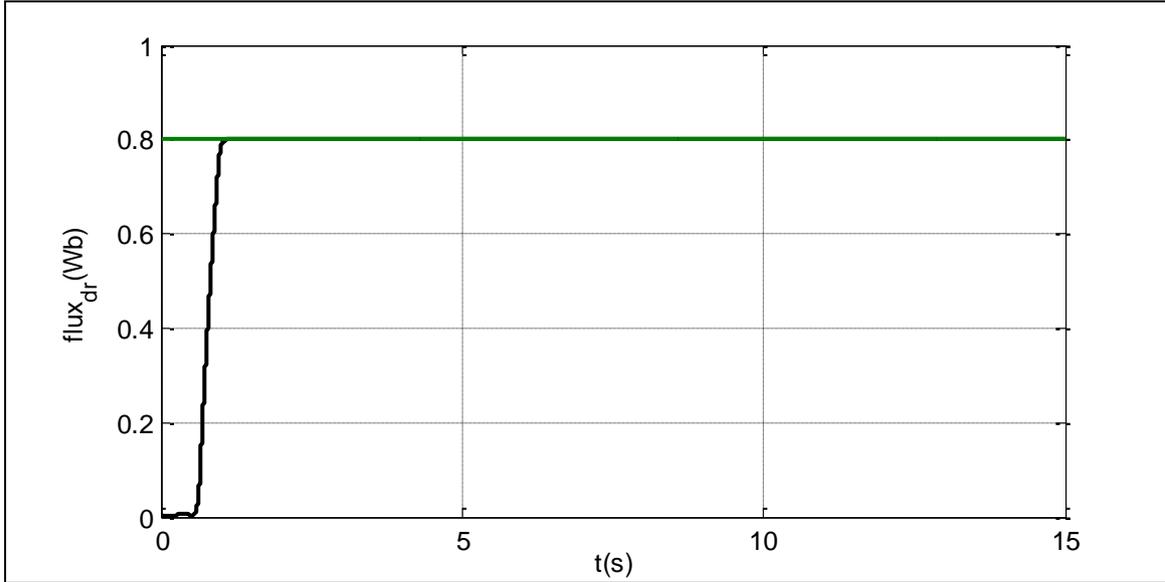


Figure III.36: Flux rotorique ϕ_{dr} en cas de variation de la charge

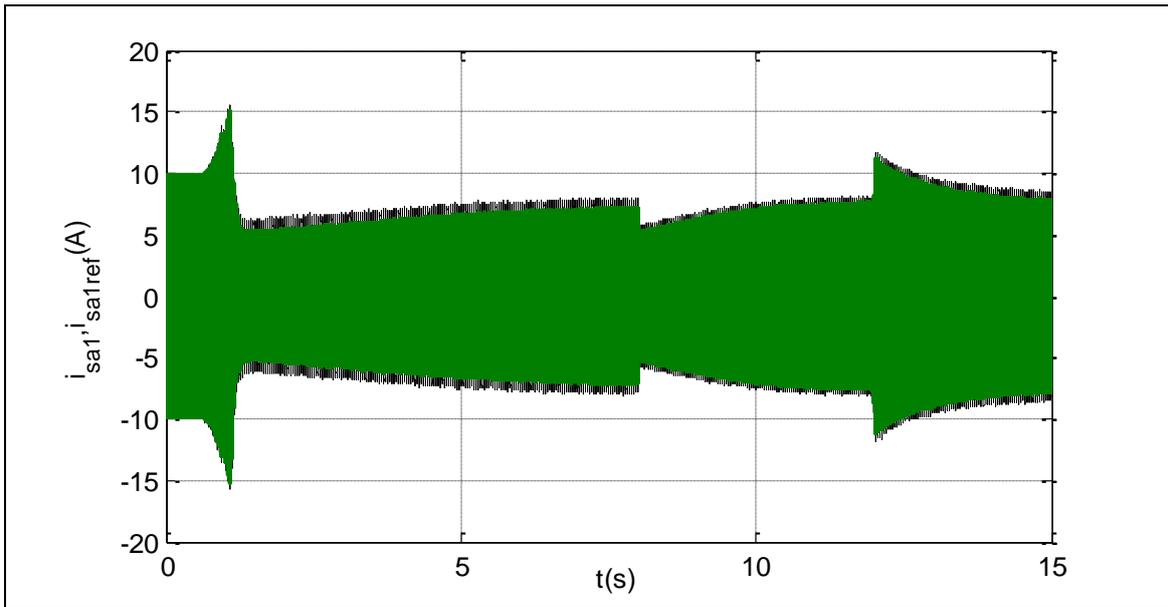


Figure III.37: Courant statorique de l'étoile 1 et sa référence en cas de variation de la charge.

III.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'appliquer la commande par la logique floue sur la génératrice asynchrone double étoile.

Les notions de base de la logique floue ont été présentées au début de ce chapitre. Les aspects de la commande par logique floue, ainsi que la conception d'un contrôleur flou ont été introduits tout en justifiant notre choix de ce type de commande qui réside dans sa capacité de traiter l'imprécis, l'incertain et le vague et sa simplicité de conception. Une simulation à base d'un contrôleur flou a été effectuée pour faire le réglage afin de maintenir la tension du bus continu constante pour des variations de vitesse ou de charge.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

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 par la logique floue.

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 par la logique floue à la génératrice asynchrone double étoile connectée aux redresseurs à MLI et débitant sur des charges, ce chapitre nous a permis d'avoir une vue générale sur les systèmes flous, Nous avons montré comment appliquer cette théorie en vue de la conception d'un régulateur flou. Une simulation à base d'un contrôleur flou a été effectuée afin 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). Les résultats obtenus montrent que le régulateur flou présente des performances de poursuite très satisfaisantes

D'après les résultats obtenus on peut conclure 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 ;
- La nécessité de la prise en compte de la saturation magnétique de la MASDE en mode génératrice en fonctionnement autonome dans le modèle mathématique ;
- Les caractéristiques de la GASDE sont directement influencées par la vitesse d'entraînement, la dimension des condensateurs d'excitation et par les charges (purements résistives et inductives), elles varient avec la variation de ces grandeurs ;

CONCLUSION GENERALE

- 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 flou.

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 techniques de commandes telle que la commande vectorielle, la commande adaptative, etc....

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [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.
- [ABD97] K. Abdelmalek, « Filtrage Actif du Couple de Machines Electriques de Forte Puissance », Thèse de Doctorat, à l'Institut National Polytechnique de Lorraine de France, 1997.
- [Ami08] H. Amimeur, « Contribution à la commande d'une machine asynchrone double étoile par mode de glissement », Mémoire de magister, Université de Batna, 2008.
- [bag99] L. Baghli « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 1999.
- [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.
- [Ben15] M. Ben Slimane, M. Arbkhlifi, 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.
- [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.
- [BER04] D. Beriber, « Machine asynchrone à double stator alimentée par onduleurs à trois niveaux à structure NPC », Thèse de magister, ENP., Alger, 2004.
- [Ber16] F. Berrabah, « Commande sans capteur de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2016.
- [Bir03] M. Birame « Commande floue d'un convertisseur AC-DC à UPF en cascade avec un convertisseur DC-DC double étage alimentant un système de biberonnage par super capacités d'un véhicule électrique », Magister en électrotechnique Batna, 2003.
- [Bou09] A. Boulahia, « Etude des convertisseurs statique destinés à la qualité d'énergie électrique » thèse de Magistère en Electrotechnique, Université de Constantine, Avril 2009.
- [Bou09] F. Boumaraf « Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation », mémoire d'Ingénieur d'État en électrotechnique de l'Université de Batna, 2009.
- [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.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [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.
- [Che15] S. Chekkal, « Intégration des génératrices asynchrones à double étoiles dans un système éolien », Thèse de doctorat, Université de Béjaia, 2015.
- [Djeb05] M.S.Djebbar, « Etude comparative des redresseur cascade et multi niveaux à commande MLI » Thèse de Magistère en Electrotechnique, Université Mentouri Constantine, 2005.
- [Fer09] K. Ferkous, « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de magister, Ecole Doctorale « Energie renouvelables » de Constantine, 2009.
- [Had01] D. Hadiouche, Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile modélisation, alimentation et structure, Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré de Nancy I, France, Décembre 2001.
- [Ham13] T. Hamadou « Commande pat logique floue d'un moteur asynchrone double étoile », Mémoire d'ingénieur, Université A. Mira de Bejaia, 2013.
- [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.
- [Khe] N .kherbouche D.tamendjari, «Controle d'une generatrice asynchrone par la logique floue»
- [kou11]L .Kouhail, et El .Djjar «Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «gada» pour l'utilisation de l'énergie éolienne», mémoire de d'ingénieur, université m'sila, 2011.
- [Lem18] M. Lemaini «Contrôle de puissance d'un redresseur MLI », Mémoire de master, Université de Biskra, 2018.
- [Mer07] E. Merabet, R. Abdessemed, H. Amimeur, F. Hamoudi, L. Abdelhamid, "Influencede la charge sur une g'en'eratrice asynchrone double 'etoile (GASDE)," International Conference on Renewable Energy ICRE'07, University of Bejaia, pp. 63–68 (CDROM), 25–27 November 2007.
- [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.
-

BIBLIOGRAPHIE

[Rah17] A. Rahoui, « Techniques avancées pour la commande et l'observation d'un redresseur MLI », Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2017.

[Reg16] B. Reguig, « Modélisation et commande floue d'une génératrice asynchrone à double alimentation Application à l'énergie éolienne », Mémoire de master, Université de M'sila, 2016.

[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.

[SAD10] R. Sadouni, « Commande par mode glissant flou d'une machine synchrone à double étoile », mémoire de magister, Univ Djilali liabes de sidi bel Abbes, 2010.

[Sad17] R. Sadouni, « Commande directe du couple (DTC-SVM) d'une MASDE associée à deux onduleurs multi niveaux 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.

[Sin06b] G. K. Singh, K. B. Yadav, R. P. Saini, « Analysis of a saturated multi-phase (six phase) self-excited induction generator », International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 7, Iss. 2, Art. 5, pp. 1–21, 2006.

[tou10] B. Toual, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable », mémoire de magister Université de Batna, 2010.

[Zou07] Z. Zouaoui « Commande des convertisseurs statiques DC/DC Par la logique floue », Magister en Electrotechnique Batna, 2007.

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 par la logique floue 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) et dans le référentiel biphasé (d, q). En deuxième partie, une étude analytique a été présentée tout en décrivant le phénomène de l'autoamorçage, 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 par la logique floue 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 flous et cela pour bien orienté 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 par la logique floue, régulateur flou, auto-amorçage.

Abstract

The work presented in this thesis is the fuzzy logic control of the double star asynchronous machine (MASDE) in self-excited generator mode in autonomous operation. In the first part we gave an overview on the state of the art of the 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) and in the two-phase frame of reference (d, q). In the second part, an analytical study was presented while describing the phenomenon of self-priming, in order to better control the behavior of the self-primed asynchronous double star generator (SDSIG) we carried out three tests (empty, under load R and in RL load), the modeling of these static loads was also approached. Finally, we studied the control by the fuzzy logic of the SDSIG outputting to PWM rectifiers controlled by the hysteresis band technique, the flux and the rectified voltage are regulated by fuzzy regulators and this to properly orient the flux and keep the DC bus voltage constant at its reference value regardless of the variation in speed or load, simulation tests were carried out in order to test the performance of this control.

Words key: dual stator induction machine, dual stator induction generator, fuzzy logic controller, fuzzy regulator, self-excited.